

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

TEMPÊTES PRINTANIÈRES ET PRÉCIPITATIONS PRÉCÉDANT LA DÉBÂCLE DANS LE HAUT DU
FLEUVE SAINT-JEAN EN MARS ET AVRIL 2021

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

DOMINIQUE BOISVERT

JANVIER 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.»

*Le gris, l'agacé, le brun, le farouche
tu craques dans la beauté fantôme du froid
dans les marées de bouleaux, les confréries
d'épinettes, de sapins et autres compères
parmi les rocs occultes et parmi l'hostilité*

GASTON MIRON

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier ma directrice de recherche Julie Thériault pour sa patience et son aide précieuse tout au long de la rédaction de ce mémoire. Sa passion pour la recherche a été une inspiration tant pendant la campagne de terrain que pendant l'analyse des données qui a suivi en particulier considérant la difficulté de trouver de la motivation en pleine pandémie mondiale.

Je voudrais également remercier Nicolas Leroux qui a su être une personne ressource à plusieurs moments de ma maîtrise et qui a toujours été généreux de son temps. Sincères remerciements à Hadleigh Thompson pour son appui et ses conseils alors que j'étais un peu dépassé par l'ampleur de la tâche à accomplir sur le terrain.

La campagne de SAJESS à Edmundston n'aurait pas pu se réaliser sans la participation des bénévoles ayant offert leur temps et leurs efforts, je souhaite donc les remercier chaleureusement.

Merci aussi à mes collègues qui malgré la distance forcée par les mesures sanitaires ont été présents autant que possible pour offrir du soutien moral et des conseils. Merci Émile Cardinal, Mathieu Lachapelle, Catherine Aubry, Karel Veilleux et Margaux Girouard.

Je voudrais enfin remercier mes parents et mes frères pour leur écoute, leur amour et pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté au cours des années.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xvii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xviii
RÉSUMÉ.....	xix
ABSTRACT	xx
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	11
2.1 Projet SAJESS et collecte de données	11
2.1.1 Station fixe SAJESS et station ECCC.....	11
2.1.2 Station MUST	13
2.1.3 Radiosondages.....	15
2.1.4 Observations manuelles et macrophotographies.....	15
2.1.5 Observateurs bénévoles CoCoRaHS.....	16
2.2 Choix d'une série d'événements.....	16
2.3 Méthodes d'analyse.....	17
2.3.1 Diagnostic des précipitations.....	17
2.3.2 Description des conditions à l'échelle synoptique.....	18
2.3.3 Description des conditions à l'échelle régionale.....	19
2.3.4 Description des conditions en surface	20
2.3.5 Description de la structure verticale de l'atmosphère	20
CHAPITRE 3 SÉRIE D'ÉVÉNEMENTS DE PRÉCIPITATIONS AVANT ET APRÈS LA DÉBÂCLE	28
3.1 Conditions météorologiques à l'échelle synoptique	28
3.1.1 Description des événements	28
3.1.1.1 Événement 1 – 25 mars 2021	29
3.1.1.2 Événement 2 – 26-27 mars 2021	29
3.1.1.3 Événement 3 – 28-29 mars 2021	30
3.1.1.4 Événement 4 – 1-2 avril 2021	31
3.1.1.5 Événement 5 – 4-5 avril 2021	31

3.1.2	Advection d'air chaud et flux d'humidité.....	32
3.2	Conditions météorologiques à l'échelle régionale.....	32
3.2.1	Température et humidité relative à partir des thermomètres HOBO	32
3.2.2	Distribution de précipitations dans la région à partir de données CoCoRaHS.....	33
3.3	Conditions météorologiques en altitude	34
CHAPITRE 4 TYPES DE PRÉCIPITATION ET CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES À LA SURFACE		59
4.1	Conditions précédant et après la série d'événements et neige au sol	59
4.2	Types de précipitation.....	59
4.3	Conditions en surface pendant les événements	60
4.4	Macrophotographie et observations manuelles.....	61
4.5	Diagnostic des transitions de phase à la station fixe et observations manuelles	62
4.5.1	Événement 1	62
4.5.2	Événement 2	62
4.5.3	Événement 3	63
4.5.4	Événement 4.....	63
4.5.5	Événement 5	63
CHAPITRE 5 TYPES DE PRÉCIPITATION ET CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EN ALTITUDE.....		82
5.1	Radiosondages	82
5.2	Micro-radar météorologique (MRR-pro)	84
CHAPITRE 6 DISCUSSION		101
6.1	Sources d'erreurs	106
6.1.1	Observations et disdromètre	106
6.1.2	Observations et radiosondages	108
CHAPITRE 7 CONCLUSION		109
ANNEXE A Intervalles de vitesse et dimension du disdromètre laser		112
ANNEXE B Niveaux de pression ERA5.....		113
ANNEXE C Comparaison de la moyenne des particules du CFM.....		114
RÉFÉRENCES		125

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Position du haut de la vallée du fleuve Saint-Jean dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick. .8	.8
Figure 1.2 Normales climatiques d’Environnement et Changement climatique Canada à la station d’Edmundston pour la période 1981-2010. Les barres orange indiquent la quantité mensuelle de précipitations solides (mm); les barres bleues indiquent la quantité mensuelle de précipitations liquides (mm). La ligne noire indique la température moyenne; la zone grise indique l’écart-type....9	.9
Figure 1.3 Carte topographique des environs d’Edmundston. Le point orange montre la position de la station MUST. Le point rouge montre la position de la station fixe. Données topographiques TessaDEM. Carte réalisée avec OpenStreetMap.10	.10
Figure 2.1 Région du haut du fleuve Saint-Jean. Position de la station ECCC et de la station fixe; position de la ville d’Edmundston et de la station MUST; position de la ville de Caribou, Maine. En jaune le fleuve Saint-Jean. En violet la rivière Madawaska. Fond de carte obtenu via Google Earth.....21	.21
Figure 2.2 Position de la station fixe et de la station ECCC. Fond de carte obtenu via Google Earth.22	.22
Figure 2.3 Carte de la région d’étude et positions des stations. En gris les stations CoCoRaHS. En bleu les stations CoCoRaHS avec thermomètres. En orange la station MUST. En rouge la station fixe et la station ECCC.23	.23
Figure 2.4 Relations dimension-vitesse pour quatre types de précipitation (Ishizaka et al., 2013). En magenta la pluie $vi = 3.78d0.67$; en vert la neige roulée $vi = 1.3d0.66$; en orange les agrégats densément givrés $vi = 1.1d0.15$; en bleu les dendrites $vi = 0.3$24	.24
Figure 3.1 Cartes synoptiques des cœurs de courant-jet à 250 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 250 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 250 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs identifient les cœurs de courant-jet et la vitesse du vent en nd.35	.35
Figure 3.2 Cartes synoptiques en surface au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la pression atmosphérique à la surface en hPa. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 10 m en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs indiquent l’épaisseur de la couche 1000-500 hPa en da (rouges > 540 da ; bleus ≤ 540 da).36	.36
Figure 3.3 Cartes synoptiques de la température à 2 m au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars	

2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la pression atmosphérique à la surface en hPa. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 10 m en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs donnent la température à 2 m en °C.37

Figure 3.4 Cartes synoptiques du tourbillon absolu à 500 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 500 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 500 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs donnent la valeur du tourbillon absolu ($10^{-5}/s$).....38

Figure 3.5 Cartes synoptiques de l’advection de température à 850 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 850 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 850 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs identifient les zones d’advection de température positive (rouge) et négative (bleu).39

Figure 3.6 Cartes synoptiques du flux d’humidité intégré verticalement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les flèches noires indiquent la grandeur et la direction du flux d’humidité en $kg/m \cdot s$. Les contours de couleurs indiquent l’eau précipitable totale en kg/m^240

Figure 3.7 Précipitations horaires et advection de température à 850 hPa durant la série d’événements choisie. La couleur des barres identifie le type de précipitation observé manuellement dominant durant chaque heure. La quantité de précipitation est obtenue à partir du pluviomètre GEONOR de la station ECCC. La courbe indique l’advection de température à 850 hPa selon les réanalyses ERA5. Les zones de couleur à l’arrière-plan identifient les périodes d’advection d’air chaud (rouge) et d’advection d’air froid (bleu).41

Figure 3.8 a) Distribution des températures mesurées à chaque minute par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées pendant l’Événement 1. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. b) Distribution des températures à 2 m mesurées à chaque minute par la sonde de température HMP155 à la station MUST durant l’Événement 1. c) Distribution des températures à 2 m mesurées à chaque minute par la sonde de température HMP155 à la station fixe durant l’Événement 1. La ligne rouge indique la température moyenne de l’ensemble des stations. La zone gris pâle indique l’écart type.....42

Figure 3.9 Variabilité régionale de la température de l’air près de la surface (~2 m). La température affichée est la moyenne sur chaque événement des températures enregistrées par chaque thermomètre aux stations CoCoRaHS identifiées.....43

Figure 3.10 Anomalies normalisées de la température de l’air mesurée près de la surface par les thermomètres. L’anomalie d’une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de la température de l’air mesurée durant l’événement par l’ensemble des thermomètres.44

Figure 3.11 a) Distribution de l'humidité relative mesurée à chaque minute par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées pendant l'Événement 1. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. b) Distribution de l'humidité relative à 2 m mesurée à chaque minute par la sonde HMP155 à la station MUST durant l'Événement 1. c) Distribution de l'humidité relative à 2 m mesurée à chaque minute par la sonde HMP155 à la station fixe durant l'Événement 1. La ligne rouge indique la température moyenne de l'ensemble des stations. La zone gris pâle indique l'écart type.....	45
Figure 3.12 Variabilité régionale de l'humidité relative près de la surface (~2 m). L'humidité relative affichée est la moyenne sur chaque événement des valeurs d'humidité relative par chaque thermomètre aux stations CoCoRaHS identifiées.	46
Figure 3.13 Anomalies normalisées de l'humidité relative mesurée près de la surface par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de l'humidité relative mesurée durant l'événement par l'ensemble des capteurs de données.	47
Figure 3.14 Répartition régionale des précipitations totales (en mm) récoltées par les bénévoles CoCoRaHS. Le numéro de la station CoCoRaHS est indiqué à côté de chaque point. Les stations en gris n'avaient pas récolté de données valables pour l'événement.	48
Figure 3.15 Anomalies normalisées des précipitations totales mesurées entre les différentes stations CoCoRaHS. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de la quantité précipitations (en mm) mesurée durant l'événement par l'ensemble des stations.	49
Figure 3.16 Répartition régionale du contenu liquide des précipitations (en mm/cm). Le rapport entre le contenu liquide (en mm) et la hauteur de neige au sol (en cm) est obtenu à partir des données des bénévoles CoCoRaHS. Le numéro de la station CoCoRaHS est indiqué à côté de chaque point. Les stations en gris n'avaient pas récolté de données valables pour l'événement ou n'avaient récolté que des précipitations liquides.....	50
Figure 3.17 Anomalies normalisées du contenu en eau liquide des précipitations mesurées entre les différentes stations CoCoRaHS. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne du contenu en eau liquide mesurée durant l'événement par l'ensemble des stations.	51
Figure 3.18 Précipitations totales mesurées à chaque station CoCoRaHS pour chaque événement. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. La ligne rouge indique la valeur moyenne de la quantité de précipitations pour l'événement. La ligne bleue indique la quantité totale de précipitations mesurées par le pluviomètre GEONOR.	52
Figure 3.19 Skew-T de radiosondages au début de chaque événement documenté. Vitesse des vents en nd (1.852 km/h). a) Événement 1 – radiosondage de Caribou (Maine), valide le 25 mars 2021 à 0000 UTC. b) Événement 2 – radiosondage SAJESS, valide le 26 mars 2021 à 1800 UTC. c) Événement 3 – radiosondage SAJESS, valide le 28 mars 2021 à 1800 UTC. d) Événement 4 – radiosondage SAJESS, valide le 1 avril 2021 à 0900 UTC. e) Événement 5 – radiosondage SAJESS, valide le 5 avril 2021 à 0000 UTC.	53
Figure 4.1 Épaisseur de neige au sol (cm) mesurée par le capteur de distance SR50A à la station fixe.	64

Figure 4.2 Résumé des conditions atmosphériques en surface pendant la série d'événements. Les chiffres identifient les cinq événements. Le taux de précipitation horaire mesuré par le Geonor et le type principal de précipitation observé à la station MUST sont indiqués par les rectangles de couleur. Les courbes rouge et bleue donnent la température et la température du point de rosée mesurées à la station MUST. La zone grise identifie la zone près de 0 °C (entre -2 et 2 °C).	65
Figure 4.3 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 1. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.	66
Figure 4.4 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 2. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.	67
Figure 4.5 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 3. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.	68
Figure 4.6 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 4. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.	69
Figure 4.7 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 5. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.	70
Figure 4.8 Distribution a) des températures et b) des températures du point de rosée au sol enregistrées à la station MUST lorsque de la neige était observée. Le type principal de précipitation observé est indiqué en abscisse. RA : pluie. SN : neige. PL : Grésil.	71
Figure 4.9 Distribution a) des températures et b) des températures du point de rosée (à droite) au sol enregistrées à la station MUST lorsque de la pluie était observée. Le type principal de précipitation observé est indiqué en abscisse. RA : pluie. SN : neige.	72
Figure 4.10 Nombre de particules détectées par le disdromètre laser optique pendant l'observation manuelle de différents types de précipitations entre le 25 mars et le 6 avril 2021. Chaque colonne correspond au principal type observé pendant une période de 10 minutes. FZDZ : Bruine verglaçante. PL : Grésil. RA : Pluie. SN : Neige.....	73

- Figure 4.11 Nombre d'occurrences d'un type de cristal sur une macrophotographie. Une photo prise entre le 25 mars et le 6 avril 2021 qui contient au moins un cristal d'un certain type compte comme une occurrence de ce type de cristal.....74
- Figure 4.12 Macrophotographie prise durant l'Événement 2 à 0423 UTC le 27 mars 2021. La photo contient des cristaux irréguliers et du grésil. Aucune période de grésil n'avait été observée manuellement au moment de la prise de cette photo.75
- Figure 4.13 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 1. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 0300 UTC à 1310 UTC le 25 mars 2021.76
- Figure 4.14 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 2. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 1710 UTC le 26 mars 2021 à 0920 UTC le 27 mars 2021. b) Transition pluie-neige de 0200 UTC à 0300 UTC le 27 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0200 UTC le 27 mars 2021; « 6 » correspond à 0300 UTC le 27 mars 2021).....77
- Figure 4.15 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 3. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 1210 UTC le 28 mars 2021 à 1930 UTC le 29 mars 2021. b) Transition neige-grésil de 2330 UTC le 28 mars 2021 à 0050 UTC le 29 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 2330 UTC le 28 mars 2021; « 8 » correspond à 0050 UTC le 29 mars 2021). c) Transition neige-grésil de 0500 UTC à 0650 UTC le 29 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0500 UTC le 29 mars 2021; « 11 » correspond à 0650 UTC le 29 mars 2021). Un point manquant indique une absence de données pour la période.78
- Figure 4.16 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 4. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 0730 UTC le 1 avril 2021 à 0050 UTC le 2 avril 2021. b) Transition pluie-neige de 1030 UTC à 1130 UTC le 1 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1030 UTC le 1 avril 2021; « 6 » correspond à 1130 UTC le 1 avril 2021). c) Transition neige-grésil de 1630 UTC à 1740 UTC le 1 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1630 UTC le 1 avril 2021 ; « 7 » correspond à 1740 UTC le 1 avril 2021).79
- Figure 4.17 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 5. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 2020 UTC le 4 avril 2021 à 1350 UTC le 5 avril 2021. b) Transition neige-grésil-pluie de 0400 UTC à 0530 UTC le 5 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Pour clarifier la présentation un point sur deux est affiché. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0400 UTC le 5 avril 2021; « 8 » correspond à 0530 UTC le 5 avril 2021).80
- Figure 5.1 a) Profil de radiosondage moyen pour l'ensemble des événements de précipitations du 25 mars au 6 avril 2021 b) Profil de radiosondage moyen correspondant à une observation de neige au sol

pour la même période c) Profil de radiosondage moyen correspondant à une observation de pluie au sol pour la même période. La ligne bleue est obtenue à partir de la moyenne des données à cette altitude. La zone grise identifie l'écart type pour cette altitude.86

Figure 5.2 a) Température moyenne entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la pluie était observée au sol. b) Point de rosée moyen entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la pluie était observée au sol.87

Figure 5.3 a) Température moyenne entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la neige était observée au sol. b) Température moyenne du point de rosée entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la neige était observée au sol.88

Figure 5.4 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station de Caribou durant l'Événement 1. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.89

Figure 5.5 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 2. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.90

Figure 5.6 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 3. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.91

Figure 5.7 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 4. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.92

Figure 5.8 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 5. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.93

Figure 5.9 Séries temporelles des données mesurées par le MRRpro à la station MUST pour la série d'événements. Le principal type de précipitation observé à la station MUST est indiqué par les zones colorées entre les graphiques. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse de Doppler (m/s) c) Largeur spectrale (m/s).....94

Figure 5.10 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de pluie. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de pluie. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s).95

Figure 5.11 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de neige. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de neige. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s)	96
Figure 5.12 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de grésil. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de grésil. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s)	97
Figure 5.13 Distribution des valeurs de réflectivité équivalente mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil	98
Figure 5.14 Distribution des valeurs de vitesse de Doppler verticale (m/s) mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil	99
Figure 5.15 Distribution des valeurs de largeur spectrale (m/s) mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil	100
Figure C.1 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 1. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.....	114
Figure C.2 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 2. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.....	115
Figure C.3 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition pluie-neige pendant l'Événement 2 entre 0200 UTC et 0300 UTC le 27 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0200 UTC le 27 mars 2021; « 6 » correspond à 0300 UTC le 27 mars 2021)	116
Figure C.4 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 3. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.....	117

Figure C.5 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 3 entre 2330 UTC le 28 mars 2021 et 0050 UTC le 29 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 2330 UTC le 28 mars 2021 ; « 8 » correspond à 0050 UTC le 29 mars 2021).....118

Figure C.6 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 3 entre 0500 UTC et 0650 UTC le 29 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0500 UTC le 29 mars 2021; « 11 » correspond à 0650 UTC le 29 mars 2021). Un point manquant indique une absence de données pour la période.119

Figure C.7 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 4. a) Distribution de nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.....120

Figure C.8 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition pluie-neige pendant l'Événement 4 entre 1030 UTC et 1130 UTC le 1 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1030 UTC le 1 avril 2021 ; « 6 » correspond à 1130 UTC le 1 avril 2021)121

Figure C.9 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 4 entre 1630 UTC et 1740 UTC le 1 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1630 UTC le 1 avril 2021; « 7 » correspond à 1740 UTC le 1 avril 2021)122

Figure C.10 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 5. a) Distribution de nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.....123

Figure C.11 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil-pluie pendant l'Événement 5 entre 0400 UTC et 0530 UTC le 5 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Pour clarifier la présentation un point sur deux est

affiché. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0400 UTC le 5 avril 2021; « 8 » correspond à 0530 UTC le 5 avril 2021).124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Liste détaillée des instruments utilisés et de leurs incertitudes. Les instruments étaient déployés à la station MUST et à la station fixe à moins de spécification contraire entre parenthèses dans la première colonne. Les incertitudes indiquées sont les incertitudes maximums, pour plus de détails se référer à la documentation technique des différents instruments.	25
Tableau 2.2 Coordonnées et élévation (m) de la station MUST, de la station fixe et de la station ECCC ...	26
Tableau 2.3 Coordonnées et élévation (m) des stations CoCoRaHS	27
Tableau 3.1 Liste des événements météorologiques observés durant la campagne de terrain SAJESS 2021 dans la région du Madawaska au Nouveau-Brunswick. Les événements colorés en gris n'ont pas été analysés dans cette étude. Une trajectoire « Continentale » décrit une tempête qui se dirige vers le nord-est en survolant le continent nord-américain à partir du Colorado ou du Golfe du Mexique. Une trajectoire « Nor'Easter » décrit une tempête qui se déplace vers le nord en suivant la côte est américaine et qui s'est formée dans l'Atlantique à l'est des États-Unis.	54
Tableau 3.2 Données disponibles pour les 5 événements de la série analysée. Un « O » indique que l'appareil a fonctionné en continu pendant l'événement. Un « X » indique que ces données ne sont pas disponibles. Le nombre de photos et de radiosondages disponibles pour chaque événement est indiqué. En plus des radiosondages indiqués, les données des radiosondages de Caribou, MA sont disponibles chaque jour pour les temps synoptiques 00Z et 12Z. Les colonnes « Trépied météo » désignent l'ensemble des appareils fixés au trépied de chaque station.	55
Tableau 3.3 Température (°C) et Humidité relative (%) moyennes à environ 2 m pour chaque événement. Vitesse (m/s) et direction (°) moyennes du vent à environ 6 m pour chaque événement. Une direction de 0° indique un vent du nord.	56
Tableau 3.4 Température moyenne à environ 2 m aux stations CoCoRaHS pendant les événements analysés. L'écart type est calculé à partir de la température moyenne à chaque station.	57
Tableau 3.5 Humidité relative moyenne à environ 2 m aux stations CoCoRaHS pendant les événements analysés. L'écart type est calculé à partir de l'humidité relative moyenne à chaque station.	58
Tableau 4.1 Nombre d'heures de chaque type de précipitations observées entre le 25 mars et le 6 avril 2021. La colonne « Près de 0 °C » indique les précipitations observées alors que la température au sol était entre -2 et 2 °C. La colonne « Total » inclut toutes les températures au sol.	81
Tableau A.1 Liste des intervalles de diamètres des hydrométéores (mm) utilisés par le disdromètre laser OTT Parsivel ²	112

Tableau A.2 Liste des intervalles de vitesses de chute des hydrométéores (m/s) utilisés par le disdromètre laser OTT Parsivel²112

Tableau B.1 Liste des niveaux de pression (en hPa) pour les données ERA5.113

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CFM	Centre du Flux de Masse
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	ECMWF Reanalysis v5
MRR	Micro Rain Radar
MUST	Mobile Urban Station
PARSIVEL	Particle Size Velocity
SAJESS	Saint John River Experiment on cold Season Storms
SWE	Snow Water Equivalent
UQAM	Université du Québec à Montréal
UTC	Temps Universel Coordonné

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

da	Décamètre
nd	Noëud
f	Tourbillon planétaire ou paramètre de Coriolis
f_c	Centre du flux de masse
f_i	Flux de masse d'une particule
F	Flux d'humidité
g	Accélération gravitationnelle moyenne de la Terre
T	Température de l'air
T_d	Température du point de rosée
T_w	Température du thermomètre mouillé
u	Composante est-ouest du vent
v	Composante nord-sud du vent
v_i	Vitesse de chute d'une particule
W	Eau précipitable totale

RÉSUMÉ

L'accumulation de neige sur le bassin supérieur du fleuve Saint-Jean pendant l'hiver peut souvent entraîner de graves inondations lors de la fonte printanière. Depuis 2008, trois inondations se sont produites dans le bassin du fleuve Saint-Jean près de Fredericton, au Nouveau-Brunswick. L'objectif de cette étude est de caractériser les événements à forte incidence qui ont entraîné la fermeture d'écoles ou qui ont contribué à la fonte des neiges et à la débâcle dans le haut de la vallée du fleuve Saint-Jean. Pour ce faire, nous avons utilisé les données recueillies lors de l'expérience de la rivière Saint-Jean sur les tempêtes de saison froide (SAJESS) entre le 4 mars 2020 et le 30 avril 2020. Au cours de cette période, une série de cinq événements de précipitation coïncidant avec la crue printanière de 2020 ont été documentés, dont quatre étaient associés à une transition de type de précipitation de la neige à la pluie ou de la pluie à la neige. Pour étudier les conditions atmosphériques à grande échelle et les types de précipitations de ces tempêtes, les mesures d'un micro-radar météorologique, d'un disdromètre laser optique, de radiosondages météorologiques et de microphotographies des particules de précipitations ont été analysées. Les données de réanalyse ERA5 ont également été utilisées pour explorer les conditions synoptiques. Ces données sont combinées aux conditions météorologiques au sol, telles que la température de l'air, l'humidité relative et la quantité de précipitations. Durant cette période de temps, plusieurs types de précipitation ont été observés tels que de la pluie, de la neige et du grésil. Aucun épisode de pluie verglaçante n'a été rapporté à la surface. Bien que les transitions de phase observées se produisent simultanément avec l'advection d'air chaud, liée à une augmentation de la température de l'air en altitude, le refroidissement par chaleur latente de la neige fondante peut forcer une transition pluie-neige pour des taux de précipitations élevés. Pour conclure ce mémoire démontre la complexité des conditions atmosphériques pouvant mener à des précipitations mixtes à la surface.

Mots clés : fleuve Saint-Jean, SAJESS, tempêtes hivernales, précipitations hivernales, transition pluie-neige, disdromètre optique, micro-radar météorologique, radiosondages

ABSTRACT

Snowpack accumulating over the Upper Saint John River basin during the winter can often lead to severe flooding during spring melt. Since 2008, three flooding events occurred in the Saint John River Basin near Fredericton, New Brunswick. The goal of the study is to characterize high-impact events that led to school closure or that contributed to snow melt and ice break up on the upper saint John River valley. To do so, we used the data collected during the Saint John River Experiment on Cold Season Storms (SAJESS) experiment between 4 March 2020 and 30 April 2020. During this period, a series of five precipitation events coinciding with the 2020 spring freshet were documented, four of which were associated with a precipitation-type transition from snow to rain or rain to snow. To investigate the large-scale atmospheric conditions and precipitation types of these storms, measurements from a vertical pointing micro rain radar, an optical laser disdrometer, weather soundings, and microphotography of precipitation particles were analysed. ERA5 reanalysis data were also used to explore the synoptic conditions. These data are combined with meteorological conditions on the ground, such as air temperature, relative humidity, and precipitation amount. During this time period, several types of precipitation were observed such as rain, snow and sleet. No freezing rain events were reported at the surface. Although the observed phase transitions occur simultaneously with the advection of warm air, related to an increase in air temperature aloft, the latent heat cooling of melting snow can force a rain-snow transition for high precipitation rates. In conclusion, this paper demonstrates the complexity of atmospheric conditions that can lead to mixed precipitation at the surface.

Keywords : Saint John river, SAJESS, winter storms, winter precipitation, rain-snow transition, optical disdrometer, micro rain radar, radiosonde

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La vallée du fleuve Saint-Jean au Nouveau-Brunswick connaît régulièrement des inondations hivernales et printanières liées à des tempêtes à forte incidence (Environnement et Changement climatique Canada, 2021). Lorsque ces tempêtes coïncident avec un redoux printanier ou des embâcles de glace, les inondations résultantes peuvent causer des dommages importants aux infrastructures et poser de sérieux risques pour la sécurité de la population. Par exemple, les grandes quantités de pluie en avril-mai 2008 sur l'ensemble du bassin du fleuve Saint-Jean ont accéléré la fonte de la neige et ont causé la plus importante inondation en 35 ans au Nouveau-Brunswick. Les dommages causés par celle-ci se sont élevés à plus de 23 millions de dollars et ont touché environ 1600 propriétés (Newton et Burrell, 2016). D'importantes inondations ont à nouveau eu lieu en 2018 et en 2019 au moment de la crue du fleuve Saint-Jean (Environnement et Changement climatique Canada, 2021). Ces risques d'inondation s'ajoutent à un nombre important de perturbations causées par les tempêtes à forte incidence des saisons froides : fermetures d'écoles et de routes, risques d'endommagement des infrastructures et du réseau électrique. Compte tenu des risques d'inondation associés aux précipitations pendant la période de dégel, il est important de bien comprendre les facteurs pouvant mener à un mélange de précipitations, en particulier lorsque les températures sont proches de 0 °C.

Le Nouveau-Brunswick se trouve dans la trajectoire de nombreuses tempêtes frontales et subit l'influence d'ouragans ou de tempêtes extratropicales originaires des Caraïbes (Environnement Canada, 1974; Conrad, 2009, p.46; Mahdi et al. 2019). Les risques d'inondation liés aux tempêtes sont particulièrement importants lorsque la température au sol est près de 0 °C en raison de la difficulté de prévoir la phase des précipitations de même que l'effet que celles-ci auront sur la fonte de la neige (Jeong et Sushama, 2018; Jennings et Molotch, 2019; Hale et al., 2022). La prévision de la phase des précipitations peut s'avérer encore plus difficile pour des événements de précipitations mixtes durant lesquels de très petits changements des conditions atmosphériques peuvent entraîner une transition de phase (Ralph et al., 2005; Thériault et al., 2015). Or, le Nouveau-Brunswick comprend plus de 120 jours de conditions près de 0 °C annuellement et environ 25% de ces conditions sont associés à des événements de précipitation (Mekis et

al., 2020). Le Nouveau-Brunswick a un des taux de précipitations mixtes les plus élevés au monde (Stuart et Isaac, 1999; Cortinas et al., 2004). On y compte entre autres annuellement près de 30 heures de pluie verglaçante surtout en mars (Mekis et al., 2020; Stuart et Isaac, 1999). La vallée du fleuve Saint-Jean reçoit annuellement approximativement 1100 mm de précipitation dont environ 340 mm sous forme de neige (Beltaos et al., 2003). Les précipitations hivernales représentent environ 32% des précipitations annuelles (Beltaos et Burrell, 2015). L'embouchure du fleuve au sud de la province reçoit davantage de précipitations (~1400 mm) que la source au nord-ouest (~900 mm) et la variabilité inter mensuelle est relativement faible (Cunjak et Newbury, 2005). Même s'il reçoit annuellement une plus faible quantité totale de précipitations que le sud du Nouveau-Brunswick, le haut du fleuve Saint-Jean (station d'Environnement et Changement climatique Canada à Edmundston : « station ECCC ») est caractérisé par de plus importantes accumulations de neige (~250-350 cm) que l'embouchure du fleuve près de la Baie de Fundy (~180-230 cm) (Environnement Canada, 1974; Baronetti et al., 2019). La quantité de neige accumulée est directement liée à l'ampleur de la crue printanière (Chouaib et Caissie, 2021). Une importante crue près de la source du fleuve Saint-Jean (Figure 1.1) peut entraîner des répercussions sur l'ensemble du fleuve en aval et demande entre autres une surveillance accrue du débit permis par les onze barrages qui harnachent le fleuve. Beltaos et Burrell (2015) notent d'ailleurs que le nombre et l'intensité des inondations dans le haut du bassin du fleuve Saint-Jean ont augmenté depuis les années 1950 en raison des changements au niveau des infrastructures et du climat. Bien qu'on ne note pas de tendance à la hausse des précipitations au Nouveau-Brunswick ni du débit du fleuve Saint-Jean, on observe un régime plus variable depuis les années 1950 associé entre autres aux changements climatiques. La variabilité interannuelle des précipitations et du débit, combinée avec une haute équivalence en eau du manteau neigeux (Snow Water Equivalent, SWE) est responsable de fontes hâtives et de plusieurs inondations majeures (Hare et al., 1997; Newton et Burrell, 2016).

Considérant que le nord-ouest du Nouveau-Brunswick est également la région où l'accumulation de neige est la plus importante sur l'ensemble du bassin du fleuve, le suivi de la phase des précipitations lors d'importantes tempêtes y est capital pour prévoir des événements de pluie sur neige, la formation d'embâcles ou une débâcle hâtive. La climatologie détaillée de l'est canadien comprend peu de suivi dans cette région. Des études recensant les précipitations mixtes ou verglaçantes sur le Canada atlantique omettent la ville d'Edmundston dans leur couverture du Nouveau-Brunswick et se contentent de la ville de Fredericton (Cortinas et al., 2004; Stuart et Isaac, 1999). La ville de Fredericton se situe à environ 200 km au sud-est d'Edmundston et à environ 90 km au nord de Saint-Jean à l'embouchure du fleuve. Elle se

trouve à une altitude moyenne d'environ 20 m à la frontière entre les Plaines maritimes à l'est et les Hautes terres de Sainte-Croix à l'ouest. Edmundston se situe à une altitude moyenne d'environ 175 m au cœur des Hautes terres d'Edmundston (O'Sullivan et al., 2019). En raison du relief isolant partiellement Edmundston de l'influence maritime (tant au nord qu'au sud et à l'est), elle se trouve dans un climat régional différant manifestement de celui de Fredericton malgré la distance relativement courte entre les deux villes à l'échelle synoptique (Fortin et Dubreuil, 2020). Cette différence climatique se manifeste entre autres par le nombre annuel d'heures de précipitations verglaçantes pour les deux villes (Stuart et Isaac, 1999).

Même des études consacrées spécifiquement aux inondations dans le haut du fleuve Saint-Jean utilisent les normales climatiques recensées par Environnement Canada (Figure 1.2) en l'absence d'une climatologie régionale exhaustive (Beltaos et Burrell, 2015). Des études se sont intéressées aux tendances générales sur l'ensemble du bassin du fleuve Saint-Jean (Hare et al., 1997a, 1997b), mais même ces études ne détaillent pas les particularités climatiques de la région étudiée dans le cadre de ce mémoire notamment en ce qui a trait aux mécanismes déterminant la phase lors d'événements près de 0 °C.

Une méthode simple pour essayer de prévoir la phase des précipitations est de fixer un seuil de température au sol. Cependant, la dynamique atmosphérique déterminant la phase des précipitations n'est pas simple et celle-ci dépend d'un ensemble de facteurs (Thériault et Stewart, 2010). Selon Jennings et al. (2018), un seuil de température seul ne constitue pas un bon outil de séparation entre les précipitations solides et liquides. Peu importe le seuil choisi, on aura tendance à sous-estimer ou surestimer l'occurrence de précipitations liquides. Une humidité relative faible favorise l'évaporation à la surface des gouttelettes d'eau, ce qui tend à les refroidir par absorption de chaleur latente et à augmenter la température de transition solide-liquide (Jennings et al., 2018). À l'inverse une humidité tendant vers la saturation engendre moins d'évaporation et diminue la température de transition de la phase. La température du point de rosée (T_d) ou la température du thermomètre mouillé (T_w) constituent donc des meilleurs critères de séparation de phase (Jennings et al., 2018). Le thermomètre mouillé est un critère qui s'approche davantage des pertes de chaleur latente par évaporation des hydrométéores (Feiccabrino et al., 2015; Harder et Pomeroy, 2013). Le critère $T_w = 0,5$ °C est le meilleur critère de séparation simple sans avoir besoin de recourir à une méthode statistique (Jennings et al., 2018). L'avantage principal de cette méthode est de fournir un critère facile d'accès sur le terrain ou à court préavis. Il est aussi possible de calculer le bilan d'énergie psychrométrique des hydrométéores pour déterminer leur température

réelle qui est généralement plus élevée que T_w (Harder et Pomeroy, 2013). Si on connaît bien le site où ont lieu les précipitations, on peut également avoir recours à des courbes paramétriques sigmoïdes (Kienzle, 2008). Ces courbes recensent la distribution de phase des précipitations en fonction de la température. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut produire une courbe pour la région où l'on effectue les prévisions (Harpold et al., 2017). Le changement de phase est généralement un processus continu et le seuil de transition représente une présence en proportion égale de précipitations liquides et solides. Il peut convenir de fixer des seuils multiples pour identifier une zone de précipitations mixtes.

Le relief peut aussi influencer la phase des précipitations arrivant au sol. Comme la température diminue généralement avec l'altitude, les transitions pluie-neige peuvent se former sur le flanc de la montagne, avec de la pluie proche de la surface et de la neige en altitude (Thériault et al., 2018). Le relief dans le haut de la vallée du fleuve Saint-Jean comprend des élévations qui varient entre 100 et 500 m (Figure 1.3). On peut s'attendre à observer différentes phases de précipitations à quelques kilomètres de distance. La présence de vallées et de barrières orographiques favorise la formation d'inversions de température lors de tempêtes hivernales (Henson et al., 2011; Chartrand et al., 2022). Les inversions de température durent plus longtemps au creux d'une vallée qu'en terrain plat (Leukauf et al., 2015). Le blocage d'air froid (*cold air damming*) et la canalisation des vents, qui favorisent les inversions de températures dans les vallées, sont plus fréquents sur la côte est nord-américaine en décembre et en mars (Bell et Bosart, 1988).

Ces inversions de température sont nécessaires à la formation d'une couche de fonte au-dessus d'une couche de regel caractéristiques de l'occurrence de précipitations mixtes ou verglaçantes (Henson et al., 2011; Stewart, 1992; Stewart et al., 2015; Sankaré et Thériault, 2016). La transition pluie-neige sans inversion de température comprend aussi une zone de précipitations mixtes. On y caractérise la phase par la quantité relative d'eau liquide (liquid fraction) contenue dans les hydrométéores. On aura dans l'ordre : pluie, neige presque fondue, neige mouillée et neige. Il est aussi possible d'observer une transition de neige à pluie. En revanche, la transition de phase pour un profil vertical comprenant une inversion de température est plus complexe en raison de la présence de la couche de regel proche de la surface. La détermination de la phase dépend des épaisseurs de la couche de fonte et de la couche de regel ainsi que de leurs températures. Le taux de fonte des hydrométéores avant leur entrée dans la couche de regel est également déterminant pour la phase de la précipitation au sol. Ainsi plusieurs types de précipitation entre la pluie et la neige peuvent être formés; on aura : pluie, pluie verglaçante, grésil et neige. On peut aussi observer l'inverse lors d'une transition de neige à pluie. La pluie verglaçante se produit lorsque les

particules fondent complètement dans la couche de fonte et que des gouttelettes surfondues gèlent au contact de la surface. Si les particules sont partiellement fondues en entrant dans la couche de regel, elles vont geler en partie ou en totalité avant d'atteindre le sol et former du grésil. Il est possible que des gouttelettes surfondues gèlent avant d'atteindre le sol en entrant en collision avec des cristaux de glace ou des noyaux glaçogènes et forment aussi du grésil. La phase pour ce type de transition est plus difficile à déterminer puisque des conditions atmosphériques presque identiques peuvent mener à de la pluie verglaçante ou du grésil (Sankaré et Thériault, 2016; Thériault et Stewart 2010). L'effet sur la fonte de la neige au sol de même que sur le potentiel d'inondation est drastiquement plus important en cas de verglas qu'en cas de grésil (Jeong et Sushama, 2017; Li et al., 2019) et par conséquent ce type d'événements mérite une attention particulière.

Dans le cas d'une transition avec inversion de température, le type de précipitation solide entrant dans la couche de fonte a une influence sur le taux de fonte des particules. Tel que mentionné précédemment, le taux de fonte détermine partiellement la phase de la précipitation au sol. Par exemple, pour des profils de températures du thermomètre mouillé identiques, les dendrites fondent complètement sur une distance plus courte que les flocons de type colonne. Par conséquent, la pluie verglaçante est favorisée lors d'une transition si la neige observée est surtout composée de dendrites tandis qu'on peut s'attendre à davantage de grésil si la neige se compose de colonnes (Sankaré et Thériault, 2016).

Le changement de phase des hydrométéores en altitude a un effet sur l'évolution de la couche de fonte. Ainsi, comme le montrent Thériault et Stewart (2007), un vent ascendant favorise l'uniformisation des différentes couches et accélère la disparition de la couche de fonte. Le refroidissement adiabatique de l'air, de même que le mélange entre les couches d'air s'ajoutent à la chaleur latente absorbée par la fusion de flocons de neige pour favoriser la transition de la couche de fonte vers une couche uniforme à 0 °C. L'accélération de la transition signifie en général davantage de neige et moins de grésil. À l'inverse, en début d'événement un vent ascendant accélère la fonte de la neige et favorise la formation de verglas. Comme l'orographie dans la région du haut du fleuve Saint-Jean peut forcer des mouvements verticaux de l'air, la direction du vent (amont ou aval) peut être un facteur influençant le type et la quantité de précipitation.

La trajectoire des particules doit aussi être considérée pour déterminer la phase (Donaldson et Stewart, 1993). Même si une inversion de température n'est pas observée dans le profil vertical de température,

des vents horizontaux peuvent par exemple pousser des hydrométéores à l'avant d'un front chaud. Les particules peuvent alors subir l'équivalent du passage d'une couche de fonte à une couche de regel malgré l'absence d'une véritable inversion de température. Le transport horizontal des particules modifie aussi l'épaisseur effective des différentes couches, un transport plus important correspondant à des couches effectives plus épaisses. La taille et la masse des particules solides ont une influence sur l'effet du vent et on s'attend à un transport horizontal plus important pour les particules de faible densité. Cela s'ajoute à l'effet de la densité elle-même sur le taux de fonte des particules. Les particules plus denses vont donc avoir tendance à favoriser une fonte partielle avant d'entrer dans la couche de regel et être associées à davantage de grésil. Tandis que les particules moins denses vont tendre à fondre complètement et à favoriser la formation de gouttelettes surfondues donnant le verglas. Comme les trajectoires des particules dépendent de leur masse la distribution de masse des particules en altitude se traduit par une répartition horizontale et une augmentation du mélange de différents types de précipitation à la surface.

Les conditions météorologiques dans le haut du fleuve Saint-Jean entre décembre 2007 et avril 2008 ont été déterminantes pour l'intensité des inondations le long du bassin versant en avril-mai 2008 (Newton et Burrell, 2016). L'équivalent en eau de la neige au sol en amont de Mactaquac était environ 1,5 fois plus élevé que la normale en février et mars et 1,8 fois plus élevé à la mi-avril. Des températures au-dessus des normales (température quotidienne moyenne de 3,8 °C en avril 2008, normales de 3 °C pour la période 1981-2010 tel qu'illustré à la Figure 1.2) et des quantités importantes de pluie (90 mm à la station d'Edmundston soit 30 mm de plus que les normales) à la fin du mois d'avril ont rapidement fait fondre la neige et causé les inondations (Newton et Burrell, 2016; Environnement et Changement climatique Canada, 2013).

Considérant le rôle prépondérant qu'ont joué les événements de pluie-sur-neige sur les inondations majeures au Nouveau-Brunswick (Beltaos et Burrell, 2015 ; Newton et Burrell, 2016), il y a un manque de connaissances sur les événements météorologiques dans le haut du fleuve Saint-Jean. L'objectif de ce mémoire est de caractériser une série d'événements de précipitation précédant la débâcle sur le fleuve Saint-Jean en mars et avril 2021. Pour ce faire, les données recueillies durant la *Saint John Experiment on Cold Season Storms* (SAJESS) au cours de l'hiver 2020-2021, dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick sont utilisées.

Le mémoire est organisé comme suit. Le chapitre 2 décrit la méthodologie dont la campagne de mesure SAJESS qui vise à mieux comprendre les conditions météorologiques menant à l'accumulation et la fonte de la couverture neigeuse, souvent responsable d'inondations le long du fleuve Saint-Jean. Ce chapitre explique la méthodologie utilisée pour faire l'analyse des données. Le chapitre 3 décrit la série d'événements choisie pour l'étude. Les types de précipitation et les conditions météorologiques à la surface et en altitude sont présentés dans les chapitres 4 et 5, respectivement. Une discussion est présentée au chapitre 6 et la conclusion au chapitre 7.

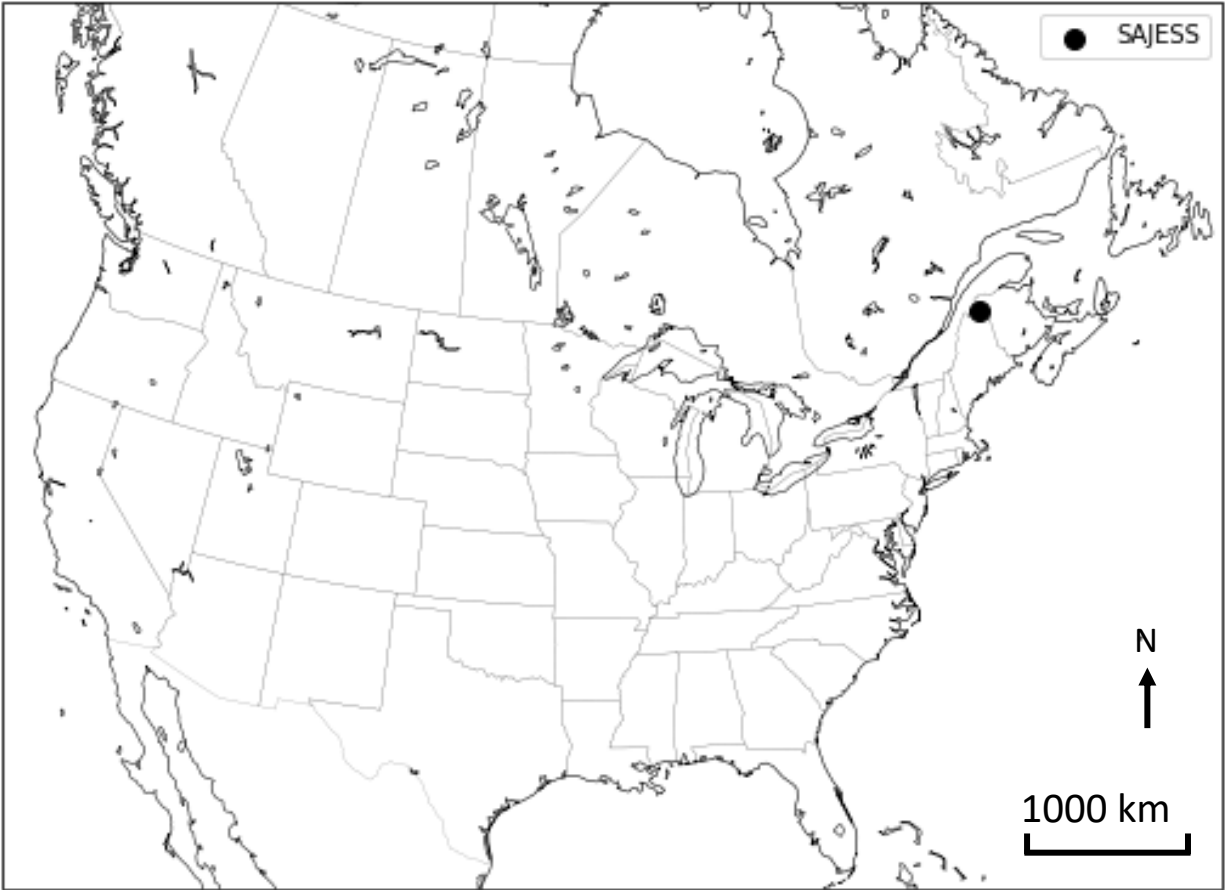


Figure 1.1 Position du haut de la vallée du fleuve Saint-Jean dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick.

Edmundston, NB - Normales climatiques 1981-2010

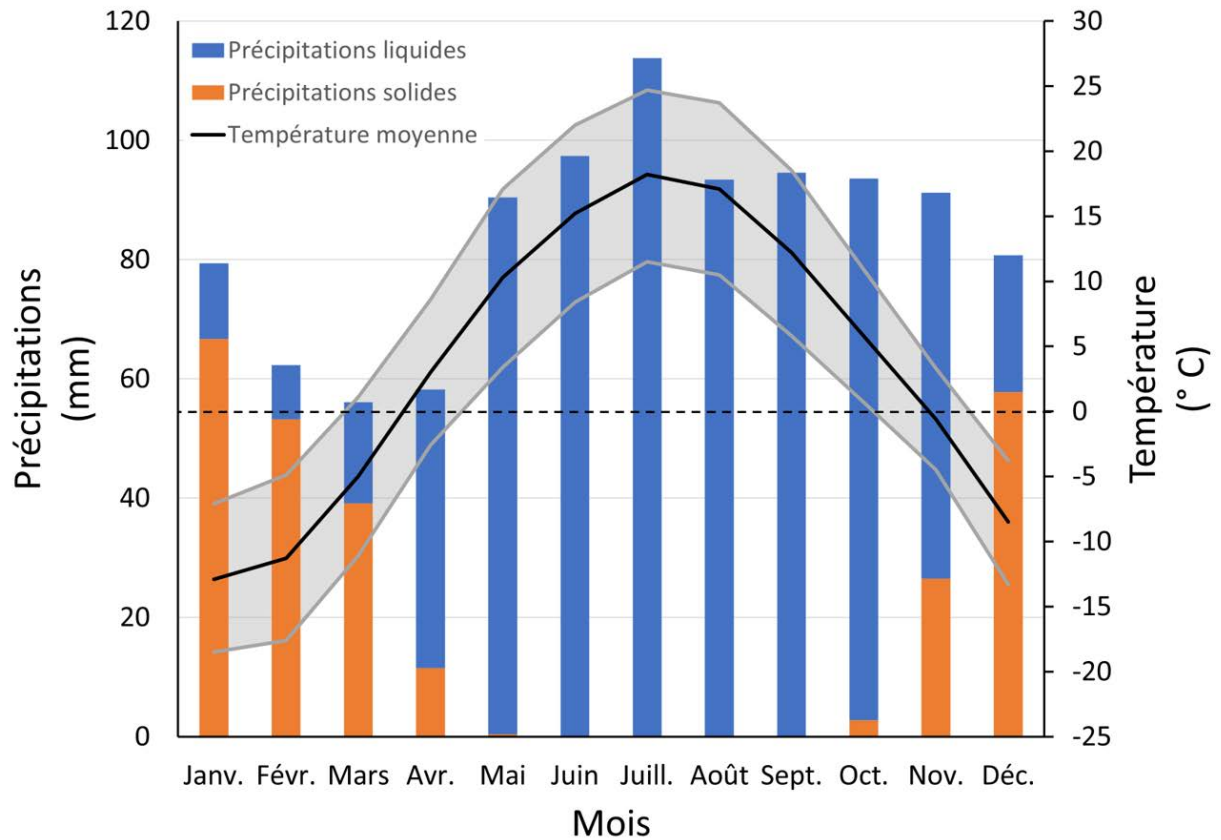


Figure 1.2 Normales climatiques d'Environnement et Changement climatique Canada à la station d'Edmundston pour la période 1981-2010. Les barres orange indiquent la quantité mensuelle de précipitations solides (mm); les barres bleues indiquent la quantité mensuelle de précipitations liquides (mm). La ligne noire indique la température moyenne; la zone grise indique l'écart-type.

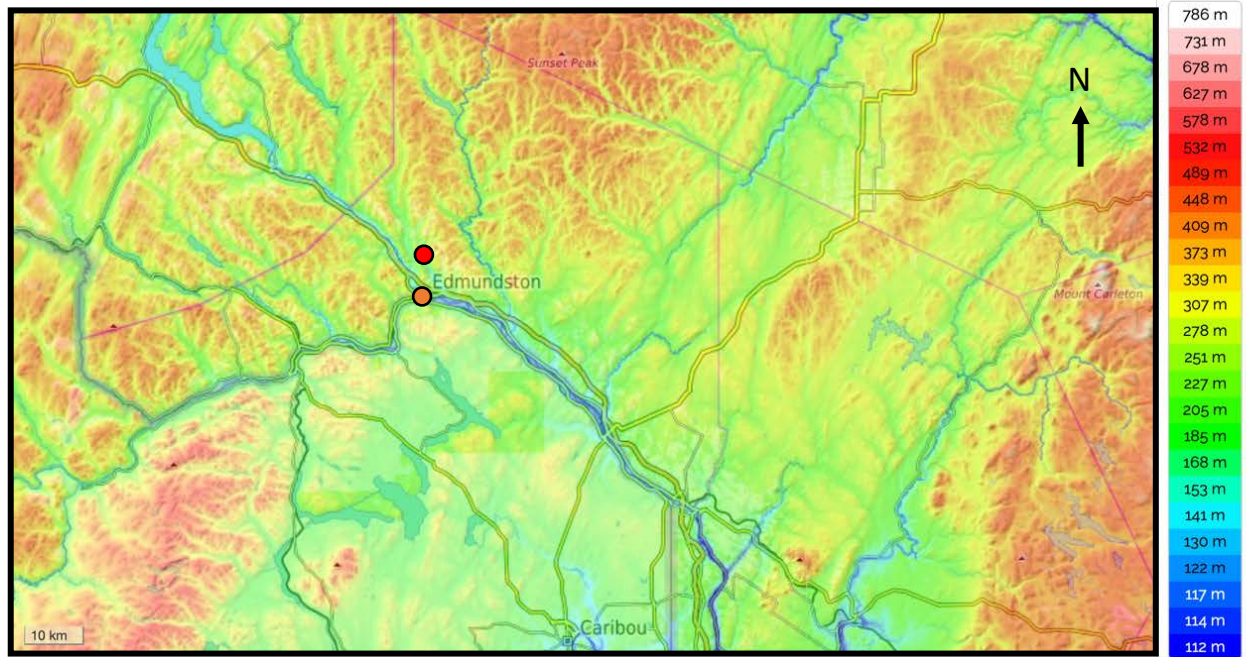


Figure 1.3 Carte topographique des environs d’Edmundston. Le point orange montre la position de la station MUST. Le point rouge montre la position de la station fixe. Données topographiques TessaDEM. Carte réalisée avec OpenStreetMap.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit la collecte et le traitement des données de la campagne de terrain SAJESS menée dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick. Nous y détaillerons également l'identification d'événements de précipitation et de séries d'événements en combinant les observations manuelles avec les conditions synoptiques.

2.1 Projet SAJESS et collecte de données

SAJESS est un projet de recherche mené par l'Université du Québec à Montréal (UQAM) en collaboration avec plusieurs universités au Canada et en Europe ainsi que plusieurs partenaires et collaborateurs au Nouveau-Brunswick, en particulier dans la région d'Edmundston (Figure 1.1). La campagne de terrain 2020-2021 visait à caractériser les tempêtes hivernales dans le nord du Nouveau-Brunswick en mettant l'accent sur les semaines précédant et suivant la débâcle du fleuve Saint-Jean.

Des instruments ont été déployés de décembre 2020 à mai 2021 dans une station (qu'on nommera simplement « station fixe ») près de la station météorologique d'Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC). Les données des instruments de la station ECCC étaient aussi disponibles pour cette période. D'autres instruments ont été déployés avec la *Mobile Urban Station* (MUST), la roulotte scientifique de l'UQAM, du début mars à la fin avril 2021 près du centre-ville d'Edmundston (Figure 2.1). On nommera ce site « station MUST ». L'équipe du projet SAJESS a également conduit des observations manuelles à la station MUST pendant qu'elle était déployée. En complément des données et des observations de SAJESS, des observateurs bénévoles *Community Collaborative Rain, Hail & Snow Network* (CoCoRaHS) ont contribué à fournir des mesures des précipitations dans la région. Le Tableau 2.1 présente une liste détaillée des instruments qui sont utilisés dans ce mémoire parmi l'ensemble des instruments déployés par l'équipe du projet SAJESS (Thompson et al., 2022).

2.1.1 Station fixe SAJESS et station ECCC

La station fixe de SAJESS était déployée à environ 200 m de la station d'ECCC d'Edmundston (Figure 2.2 et

Instrument	Modèle	Variable	Unité	Incertitude
Sonde de température et humidité relative de l'air	HMP155	Température Humidité relative	°C %	±0,5 °C ±2 %
Capteur d'épaisseur de neige	SR50A	Épaisseur de neige	cm	±1 cm
Micro radar météorologique (station fixe)	MRR-2	Réflexivité Vitesse de Doppler Largeur spectrale	dBZ m/s m/s	1
Micro radar météorologique (station MUST)	MRRpro	Réflexivité Vitesse de Doppler Largeur spectrale	dBZ m/s m/s	1
Disdromètre laser (station fixe)	OTT Parsivel ²	Vitesse de chute Taille des particules	m/s mm	2
Radiosonde	iMet-4	Température Humidité relative Pression	°C % hPa	±0,2 °C ±5 % ±2.0 hPa
Sonde de température (stations HOBO)	HOBO MX2301A	Température Humidité relative	°C %	±0,25 °C ±2,5 %

1 : L'incertitude des mesures provenant du MRR-2 ou du MRRpro est estimée à 10% par le fabricant (Metek, 2017).

2 : L'incertitude des mesures du OTT Parsivel² est de plus ou moins une catégorie de vitesse ou de taille (voir Tableau A.1 et Tableau A.2)

Tableau 2.2) à une altitude de 152 m. Les instruments déployés ont enregistré des mesures en continu entre le 1^{er} décembre 2020 et le 1^{er} mai 2021. La station comprenait un trépied météorologique disposant d'une sonde de température et d'humidité relative HMP155; de 2 sondes infrarouge SI-411 pour mesurer la température du sol ; d'un capteur SR50A mesurant l'épaisseur de neige au sol; d'un radiomètre CNR4 (visible et infrarouge). Une sonde de température et d'humidité du sol CS655 était insérée directement sous le trépied. Un disdromètre laser OTT Parsivel² a mesuré la vitesse de chute et la taille des hydrométéores. Les intervalles de taille et de vitesse utilisés par le disdromètre laser pour classer les particules sont énumérées à l'Annexe A (Tableau A.1 et Tableau A.2). Un micro-radar météorologique de type Micro Rain Radar (MRR-2) a mesuré des données de réflectivité et de vitesse de Doppler au-dessus du site avec une résolution de 200 m jusqu'à une altitude de 6200 m. Les données utilisées dans le cadre de ce mémoire sont toutes des moyennes sur une minute. Un anémomètre sonique et un analyseur de flux étaient également déployés, mais ne sont pas utilisés dans le cadre de ce mémoire.

La station ECCC disposait de plusieurs instruments, mais dans le cadre de ce mémoire nous avons seulement utilisé les données du capteur de précipitation Geonor T-200B placé dans un Alter-simple. Les données du Geonor utilisées dans le cadre de ce mémoire sont des moyennes horaires.

2.1.2 Station MUST

La station MUST était située près du centre-ville d'Edmundston (

Instrument	Modèle	Variable	Unité	Incertitude
Sonde de température et humidité relative de l'air	HMP155	Température Humidité relative	°C %	±0,5 °C ±2 %
Capteur d'épaisseur de neige	SR50A	Épaisseur de neige	cm	±1 cm
Micro radar météorologique (station fixe)	MRR-2	Réflectivité Vitesse de Doppler Largeur spectrale	dBZ m/s m/s	1
Micro radar météorologique (station MUST)	MRRpro	Réflectivité Vitesse de Doppler Largeur spectrale	dBZ m/s m/s	1
Disdromètre laser (station fixe)	OTT Parsivel ²	Vitesse de chute Taille des particules	m/s mm	2
Radiosonde	iMet-4	Température Humidité relative Pression	°C % hPa	±0,2 °C ±5 % ±2.0 hPa
Sonde de température (stations HOBO)	HOBO MX2301A	Température Humidité relative	°C %	±0,25 °C ±2,5 %

1 : L'incertitude des mesures provenant du MRR-2 ou du MRRpro est estimée à 10% par le fabricant (Metek, 2017).

2 : L'incertitude des mesures du OTT Parsivel² est de plus ou moins une catégorie de vitesse ou de taille (voir Tableau A.1 et Tableau A.2)

Tableau 2.2), à la confluence du fleuve Saint-Jean et de la rivière Madawaska à une altitude de 143 m. La station comprenait un trépied météorologique disposant d'une sonde de température et d'humidité relative HMP155 ; d'un radiomètre CNR4 ; d'un capteur SR50A mesurant l'épaisseur de neige au sol. Un micro-radar météorologique Micro Rain Radar Pro (MRRpro) a mesuré des données de réflectivité et de vitesse de Doppler au-dessus du site avec une résolution de 50 m jusqu'à une altitude de 6400 m. Une caméra multiangle à flocons de neige (Multi Angle Snowflake Camera, MASC) a pris des photos en 3D des hydrométéores. La roulotte MUST chauffée abritait des ordinateurs et des outils permettant à l'équipe SAJESS de mener des observations manuelles et de déployer des radiosondes à proximité des instruments. Un anémomètre 05103AP monté sur le mât de la roulotte a enregistré la vitesse et la direction du vent à environ 6 m au-dessus du sol. Les instruments de la station MUST ont enregistré des données entre le 4 mars et le 1^{er} mai 2021 et les données utilisées dans ce mémoire sont des moyennes sur 1 minute.

2.1.3 Radiosondages

Le déploiement de radiosondes météorologiques iMet-4 aux 3 heures à la station MUST avant et pendant les événements précipitation a permis d'obtenir des profils troposphériques de température et d'humidité relative de même que la direction et la vitesse des vents. Les données enregistrées pendant un radiosondage sont aux secondes. Au total, 52 radiosondes ont été déployées pendant la campagne SAJESS dont 18 pendant la série d'événements analysée dans ce mémoire.

2.1.4 Observations manuelles et macrophotographies

Lors d'événements de précipitations, des observations manuelles par l'équipe SAJESS étaient effectuées à toutes les 10 minutes à la station MUST. Ces observations visaient surtout à confirmer la présence et le ou les types de précipitations au sol de même que la présence éventuelle de poudrerie. Lorsque la visibilité le permettait, la couverture du ciel en octas, le ou les types de nuages visibles étaient également observés.

Des macrophotographies des précipitations solides étaient également prises à chaque 10 minutes. Les précipitations étaient récoltées sur un tapis de collecte de façon à pouvoir observer les particules individuellement. Ainsi le temps de collecte pouvait varier en fonction de l'intensité des précipitations. Lorsque le tapis commençait à être couvert de précipitations, il était placé dans une tente afin de limiter l'accumulation additionnelle de particules. Pour chaque période, le tapis de collecte était photographié systématiquement neuf fois ; chaque photographie couvrant un secteur différent du tapis de collecte. Un

support amovible permettait de contrôler la position du tapis de collecte par rapport à la lentille macro de l'appareil photo et d'uniformiser les prises de photos.

L'équipe SAJESS surveillait les radars météorologiques en temps réel et faisait le suivi des prévisions de différents modèles météorologiques. Au moins une heure avant le début prévu des précipitations, un membre de l'équipe se rendait à la station MUST pour débiter les observations manuelles. Quelques événements brefs qui n'apparaissaient pas sur les radars et n'étaient pas prévus par les modèles n'ont pas pu être observés manuellement, mais ont tout de même été enregistrés par les instruments.

2.1.5 Observateurs bénévoles CoCoRaHS

Des citoyens et des écoles de la région ont adhéré au réseau CoCoRaHS dans le cadre de la campagne SAJESS. La couverture régionale de la prise de données lors de la campagne SAJESS était assurée par des bénévoles participant au réseau CoCoRaHS.

Jusqu'à 22 stations réparties dans la région SAJESS ont récolté des données de mars à mai 2021 (Figure 2.3). Chaque jour, les bénévoles mesuraient la quantité liquide totale de nouvelle précipitation (en mm) à l'aide d'une jauge graduée et la nouvelle accumulation au sol de précipitation solide (en cm) à l'aide d'un tapis de collecte et d'une règle. Le contenu en eau (en mm) de la nouvelle accumulation solide était également mesuré en faisant fondre une carotte récoltée sur le tapis de collecte. À chaque semaine, l'épaisseur de neige au sol (en cm) et le contenu en eau de la neige au sol (en mm) étaient mesurés. En plus des mesures de précipitations, des thermomètres HOBO MX2301A mesurant la température (en °C) et l'humidité relative à ~2 m du sol ont été installés à 13 stations réparties dans la région SAJESS (Figure 2.3). La position et l'altitude des stations sont présentées au Tableau 2.3.

2.2 Choix d'une série d'événements

Au cours de la campagne SAJESS 2021, 15 événements météorologiques ont été documentés et observés. Ces événements ont été définis en fonction d'un seuil minimal d'une heure de précipitations continues arrivant au sol. Ces événements sont regroupés en quatre séries (A-B-C-D) durant lesquelles aucune période consécutive de plus de 72 heures sans précipitation n'a été observée. Ce mémoire analyse en particulier la troisième série d'événements (série C) qui correspond à la période durant laquelle a eu lieu la débâcle printanière du fleuve Saint-Jean. Cette série est composée de six événements ayant eu lieu du 25 mars au 5 avril 2021, parmi lesquels cinq seront analysés en détails. Pour chacun de ces cinq

événements, des précipitations ont été observées au sol de façon intermittente pendant au moins 6 heures et ont été enregistrées simultanément à la station MUST en bordure du fleuve Saint-Jean et à la station fixe (située à environ 6.2 km plus au nord). L'événement qui n'a pas été analysé dans ce mémoire a été écarté puisqu'aucune précipitation n'a été mesurée à la station fixe.

Chacun de ces cinq événements analysés est associé à un système météorologique identifié sur des cartes de réanalyses d'ERA5 (Hersbach et al., 2020). L'analyse de ces cartes permet de séparer les tempêtes en deux catégories en fonction de la situation synoptique : les trois premiers événements étaient associés à des systèmes provenant du sud-ouest et ayant suivi un trajet dans l'axe de la vallée du fleuve Saint-Laurent (tempêtes continentales); les deux derniers événements étaient associés à des systèmes provenant du sud-est et ayant longé la côte est américaine (Nor'easters). Chaque événement et le système auquel il est associé sera identifié par un numéro séquentiel unique (1 à 5).

2.3 Méthodes d'analyse

La section suivante détaille les méthodes utilisées pour analyser les données collectées au long de la campagne SAJESS.

2.3.1 Diagnostic des précipitations

Afin de diagnostiquer le type de précipitation au sol et déterminer à quel moment ont eu lieu les transitions de phase, il est possible d'utiliser les données recueillies par le disdromètre laser. La distribution de tailles et de vitesses de chute des particules peut être utilisée pour déterminer le centre de flux de masse (CFM) des précipitations en utilisant la méthode d'Ishizaka et al. (2013). Le flux de masse quantifie l'efficacité du transport d'eau par les hydrométéores : une grosse particule avec une grande vitesse de chute aura un plus grand flux de masse qu'une petite particule avec une petite vitesse de chute. Le CFM est la moyenne du flux de masse de l'ensemble des particules défini ainsi :

$$f_c = \frac{\sum_i f_i r_i}{\sum_i f_i} \quad (1)$$

Où r_i est le vecteur position des particules dans l'espace dimension-vitesse et f_i est le flux de masse de la particule défini ainsi :

$$f_i = m_i v_i \quad (2)$$

Où m_i est la masse de la particule, calculée à partir de la taille de la particule mesurée par le disdromètre et v_i est la vitesse de chute de la particule, mesurée par le disdromètre.

La position du CFM peut être comparée aux relations théoriques dimension-vitesse de différents types de précipitations (Figure 2.4). En calculant le CFM par période de 10 minutes il est possible de déterminer le type principal de précipitation à la station fixe pendant cette période et de le comparer avec le type de précipitation observé à la station MUST pendant la même période. Le trajet décrit par les positions des CFM dans l'espace dimension-vitesse permet aussi de visualiser la transition entre différents types de précipitation.

2.3.2 Description des conditions à l'échelle synoptique

Les données de réanalyse ERA5 présentées sur une carte de l'Amérique du Nord permettent de décrire les conditions météorologiques précédant les événements de précipitations (Hersbach, 2020). Les données ont une résolution spatiale de 31 km et une résolution temporelle de 1 heure. Pour générer les cartes, les données ont été placées sur une grille avec des mailles de dimension $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Les niveaux de pression utilisés sont énumérés en annexe (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**)

Les cartes en surface présentent la pression atmosphérique en surface, l'épaisseur de la couche 1000-500 hPa, la direction et la vitesse des vents à 10 m.

Les cartes à 250 hPa, 500 hPa et 850 hPa présentent les hauteurs géopotentielle, la direction et la vitesse des vents en nœuds (nd). Les cartes à 250 hPa présentent aussi les cœurs de courant-jet (nd). Les cartes à 500 hPa présentent le tourbillon absolu (1/s) calculé à partir des composantes des vents :

$$\zeta + f = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + f \quad (3)$$

Où ζ est le tourbillon relatif, f est le tourbillon planétaire, u est la composante zonale du vent et v est la composante méridienne du vent.

La somme est le tourbillon absolu. Les cartes à 850 hPa présentent l'advection de température ($^\circ\text{C}/\text{h}$) calculé à partir de la température de l'air et de la vitesse des vents :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{adv} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

Où T est la température (°C), u et v sont les composantes du vent (m/s) et $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{adv}$ est la contribution de l'advection à la variation de température (°C/s). En multipliant par 3600 s/h on obtient l'advection de température en °C/h.

Des cartes présentant l'eau précipitable totale (kg/m²) et le flux d'humidité (kg/m·s) intégrés sur l'ensemble de la colonne atmosphérique (entre 1000 et 1 hPa) ont également été réalisées. L'eau précipitable totale a été calculée ainsi à partir des données d'humidité spécifique d'ERA5 :

$$W = -\frac{1}{g} \int q_v dp \quad (5)$$

Où g est l'accélération gravitationnelle moyenne de la Terre (m/s²), q_v est l'humidité spécifique (kg/kg) et dp est la différence de pression entre deux niveaux (hPa).

Le flux d'humidité s'obtient à partir de l'humidité spécifique et de la vitesse des vents :

$$\vec{F} = -\frac{1}{g} \int \vec{v} \cdot q_v dp \quad (6)$$

Les dérivées partielles des équations (3) et (4) ont été approximées de façon discrète entre les mailles utilisées pour réaliser les cartes. Les intégrales des équations (5) et (6) ont été approximées par des sommes discrètes entre les niveaux de pression utilisés.

2.3.3 Description des conditions à l'échelle régionale

Les données recueillies quotidiennement par les bénévoles CoCoRaHS et aux 5 minutes par les thermomètres déployés dans la région ont été comparées avec les données de la station MUST pour chaque événement de précipitation. Ceci permet d'établir si les conditions étaient uniformes ou non à l'échelle temporelle de la durée d'un événement et à l'échelle de la région.

Le diagnostic des précipitations à la station fixe, décrit à la section 2.3.1, est également comparé aux types de précipitation déterminés par les observations manuelles à la station MUST.

2.3.4 Description des conditions en surface

En combinant les observations manuelles (aux 10 minutes) avec les données de température et d'humidité relative recueillies à la station MUST (moyennes aux 10 minutes à partir des données des instruments), nous avons déterminé la distribution de température et de température du point de rosée associée à la neige et à la pluie.

2.3.5 Description de la structure verticale de l'atmosphère

Les données des radiosondages et les données du MRRpro donnent un portrait des conditions atmosphériques typiques en altitude lors de l'observations de différents types de précipitations au sol. Grâce aux radiosondages, nous décrivons l'évolution du profil de température au cours des événements de même que les conditions typiques (profil moyen) associées à la pluie et à la neige. De même, le MRRpro a permis de suivre l'évolution de la réflectivité (dBZ), de la vitesse de Doppler (m/s) et de la largeur spectrale (m/s) au cours de la série d'événements. Les profils typiques de ces trois variables pour la pluie, la neige et le grésil ont également été réalisés. Les résultats sont également présentés sous forme de Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) : une fréquence normalisée par altitude des valeurs mesurées par l'instrument.



Figure 2.1 Région du haut du fleuve Saint-Jean. Position de la station ECCC et de la station fixe; position de la ville d'Edmundston et de la station MUST; position de la ville de Caribou, Maine. En jaune le fleuve Saint-Jean. En violet la rivière Madawaska. Fond de carte obtenu via Google Earth.



Figure 2.2 Position de la station fixe et de la station ECCC. Fond de carte obtenu via Google Earth.

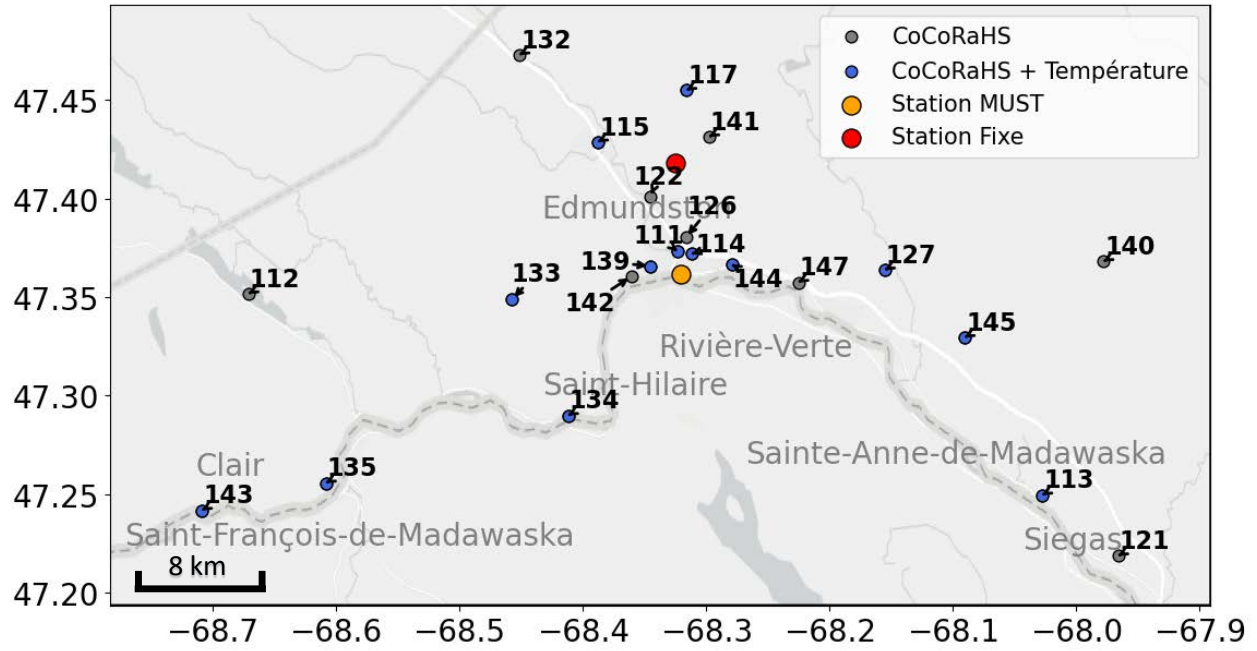


Figure 2.3 Carte de la région d'étude et positions des stations. En gris les stations CoCoRaHS. En bleu les stations CoCoRaHS avec thermomètres. En orange la station MUST. En rouge la station fixe et la station ECCC.

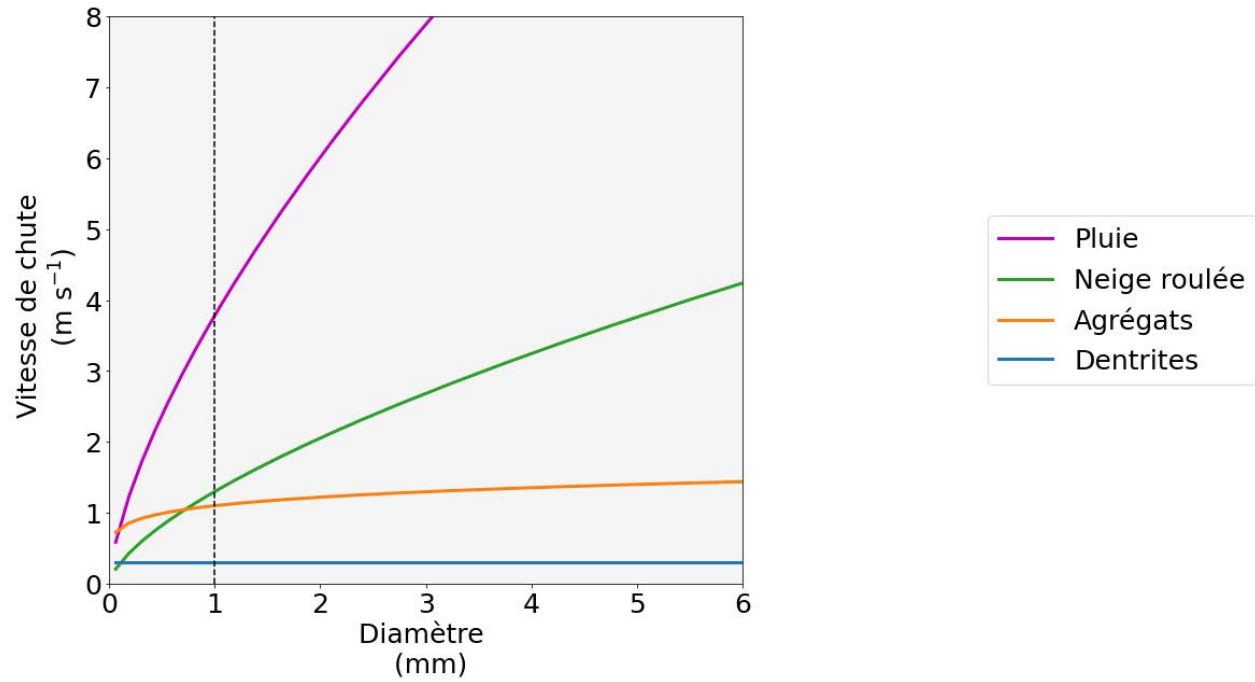


Figure 2.4 Relations dimension-vitesse pour quatre types de précipitation (Ishizaka et al., 2013). En magenta la pluie $v_i = 3.78d^{0.67}$; en vert la neige roulée $v_i = 1.3d^{0.66}$; en orange les agrégats densément givrés $v_i = 1.1d^{0.15}$; en bleu les dendrites $v_i = 0.3$

Tableau 2.1 Liste détaillée des instruments utilisés et de leurs incertitudes. Les instruments étaient déployés à la station MUST et à la station fixe à moins de spécification contraire entre parenthèses dans la première colonne. Les incertitudes indiquées sont les incertitudes maximums, pour plus de détails se référer à la documentation technique des différents instruments.

Instrument	Modèle	Variable	Unité	Incertitude
Sonde de température et humidité relative de l'air	HMP155	Température	°C	±0,5 °C
		Humidité relative	%	±2 %
Capteur d'épaisseur de neige	SR50A	Épaisseur de neige	cm	±1 cm
Micro radar météorologique (station fixe)	MRR-2	Réflectivité	dBZ	1
		Vitesse de Doppler	m/s	
		Largeur spectrale	m/s	
Micro radar météorologique (station MUST)	MRRpro	Réflectivité	dBZ	1
		Vitesse de Doppler	m/s	
		Largeur spectrale	m/s	
Disdromètre laser (station fixe)	OTT Parsivel ²	Vitesse de chute	m/s	2
		Taille des particules	mm	
Radiosonde	iMet-4	Température	°C	±0,2 °C
		Humidité relative	%	±5 %
		Pression	hPa	±2.0 hPa
Sonde de température (stations HOBO)	HOBO MX2301A	Température	°C	±0,25 °C
		Humidité relative	%	±2,5 %

1 : L'incertitude des mesures provenant du MRR-2 ou du MRRpro est estimée à 10% par le fabricant (Metek, 2017).

2 : L'incertitude des mesures du OTT Parsivel² est de plus ou moins une catégorie de vitesse ou de taille (voir Tableau A.1 et Tableau A.2)

Tableau 2.2 Coordonnées et élévation (m) de la station MUST, de la station fixe et de la station ECCC

Station	Latitude nord	Longitude ouest	Élévation (m)
MUST	47,361556	68,320490	143
Fixe	47,417850	68,324753	152
ECCC	47,415453	68,328953	151

Tableau 2.3 Coordonnées et élévation (m) des stations CoCoRaHS

Station	Latitude nord	Longitude ouest	Élévation (m)
111	47,3731246	68,3231116	162
112	47,3516282	68,6710081	198
113	47,2496041	68,0275739	161
114	47,371929	68,311702	198
115	47,4286082	68,3876877	143
117	47,454822	68,315935	330
121	47,2188049	67,9659761	154
122	47,4007059	68,3454802	144
126	47,3802684	68,3163835	192
127	47,363704	68,155189	175
132	47,4727907	68,451395	192
133	47,3488224	68,4573196	192
134	47,289956	68,411945	155
135	47,25568256	68,60821419	192
139	47,36577	68,345151	241
140	47,368011	67,977975	295
141	47,43127	68,297538	348
142	47,36047	68,360432	189
143	47,241904	68,708709	163
144	47,366564	68,279181	141
145	47,329485	68,090444	231
147	47,3574595	68,2252446	164

CHAPITRE 3

SÉRIE D'ÉVÉNEMENTS DE PRÉCIPITATIONS AVANT ET APRÈS LA DÉBÂCLE

Ce chapitre décrit les conditions atmosphériques aux échelles synoptiques et régionales avant et pendant les cinq événements de précipitation. Pour chaque événement, nous décrivons l'évolution de ces conditions en combinant l'analyse des cartes de réanalyses d'ERA5 (Hersbach et al., 2020), des observations CoCoRaHS, des données des thermomètres HOBO et des radiosondages. En particulier, il transparaît que le type et la phase des précipitations observées en surface ne sont pas déterminés par les trajectoires synoptiques des tempêtes. Pour des conditions synoptiques similaires en début d'événement pour les 3 premiers événements (tempêtes continentales) et pour les 2 derniers événements (*Nor'easters*), 4 types de transition de phase différents ont été observés (liquide, liquide-mixte-solide, solide, solide-mixte-liquide).

La durée des événements analysés varie entre 10 heures (le 25 mars 2021) et 29 heures (le 1-2 avril 2021). À l'exception de l'Événement 1 (25 mars 2021) durant lequel seule de la pluie a été observée, tous les événements étaient accompagnés de plusieurs types de précipitations.

3.1 Conditions météorologiques à l'échelle synoptique

3.1.1 Description des événements

Le Tableau 3.1 énumère les événements observés pendant la campagne de terrain SAJESS et identifie la série d'événements analysés dans ce mémoire avec leur identifiant numérique. Il détaille également pour les 5 événements analysés, la trajectoire synoptique du système météorologique associé à l'événement, les types de précipitations observées au sol, le type de transition de phase et la durée de l'événement. Le Tableau 3.2 présente les données disponibles pour chaque événement analysé. Celles-ci comprennent les observations manuelles menées au site, les microphotographies de précipitations solides, les données des observateurs bénévoles CoCoRaHS, les données instrumentales de la station MUST (instruments fixés au trépied météorologique, MRRpro, radiosondages) et de la station fixe (instruments fixés au trépied météorologique, pluviomètre Geonor, MRR-2, disdromètre laser OTT Parsivel²), ainsi que les données issues de réanalyses ERA5. Le Tableau 3.3 contient la température moyenne et l'humidité relative

moyenne à environ 2 m de même que la vitesse moyenne et la direction moyenne du vent à environ 6 m mesurées lors de chaque événement à la station MUST.

3.1.1.1 Événement 1 – 25 mars 2021

Le 25 mars 2021, un système dépressionnaire a touché le Québec et le nord du Nouveau-Brunswick. Le système, auquel nous ferons référence sous le nom d'Événement 1, a apporté de petites quantités de précipitations au-dessus d'Edmundston. Bien qu'Environnement Canada ait mis en vigueur un risque de pluie verglaçante, seule de la pluie a été observée. À 0000 UTC le 25 mars 2021, la circulation à 250 hPa était caractérisée par un creux au-dessus des Grandes Plaines des États-Unis, un creux relativement plus petit au-dessus des Grands Lacs et une grande crête au-dessus de l'océan Atlantique (Figure 3.1a). Une région de cœur de courant jet était présente sur le nord du Québec et le Labrador. Un autre cœur de courant jet circulait sur le sud des États-Unis. Le plus petit creux s'est déplacé vers le nord-est pendant la journée après la séquence de jets du nord. En surface, un système dépressionnaire se déplaçait vers le nord-est depuis les Grands Lacs et sur le Québec (Figure 3.2a) et la température à 2 m était légèrement au-dessus de 0 °C (Figure 3.3a). Sur la côte est des États-Unis, un creux associé au système dépressionnaire se déplaçait vers le nord. Une série de facteurs a contribué à maintenir le système : il y avait une divergence au sommet de la troposphère dans la région entre l'entrée droite du cœur de courant jet le plus au nord et la sortie gauche du cœur de courant jet situé au sud ; il y avait aussi une advection positive de tourbillon absolu cyclonique à 500 hPa (Figure 3.4a). À 850 hPa, il y avait une advection d'air chaud à l'avant et au sud-est du système dépressionnaire et une advection d'air froid derrière celui-ci (Figure 3.5a). De plus, l'intégration verticale du flux d'humidité montrait un transport net vers le nord sur la côte est associé au creux de surface (Figure 3.6a). La température moyenne de l'air à 2 m était de 4,1 °C, l'humidité relative moyenne était de 94%. Les vents à 6 m étaient du sud-sud-est (147.5°) et soufflaient en moyenne à 0,8 m/s.

3.1.1.2 Événement 2 – 26-27 mars 2021

Les 26 et 27 mars 2021, un système dépressionnaire touche les Maritimes et le sud du Québec. Le système, que nous appellerons l'Événement 2, a apporté de la pluie et de la neige à Edmundston comme prévu par les modèles. À 0000 UTC le 26 mars 2021, la circulation à 250 hPa était encore caractérisée par un creux à grande échelle sur les plaines centrales des États-Unis et la crête sur l'océan Atlantique (Figure 3.1b). Un deuxième creux s'est formé derrière le système du 25 mars et s'est déplacé vers le nord-est avec une trajectoire légèrement plus vers l'est que le système précédent. Un cœur de courant jet était présent au-dessus du Golfe du Saint-Laurent et un deuxième cœur de courant jet circulait du Texas vers New York. En

surface, un système dépressionnaire s'est formé au sud des Grands Lacs et a progressé vers l'est-nord-est en se creusant tout au long de la journée (Figure 3.2b) et la température à 2 m était légèrement au-dessus de 0 °C (Figure 3.3b). Tout comme le système précédent, la divergence dans le niveau supérieur entre les deux cœurs de courant jet a contribué au développement du système. Une advection positive de tourbillon absolu à 500 hPa était également présente (Figure 3.4b). À 850 hPa, l'advection d'air chaud précédait le système et l'advection d'air froid le suivait (Figure 3.5b). Le flux d'humidité intégré montre que le système transportait l'humidité vers le nord depuis le golfe du Mexique (Figure 3.6b). La température moyenne de l'air à 2 m était de 3 °C, l'humidité relative moyenne était de 91%. Les vents à 6 m étaient de l'est-sud-est (115,9°) et soufflaient en moyenne à 1 m/s.

3.1.1.3 Événement 3 – 28-29 mars 2021

Les 28 et 29 mars 2021, une troisième dépression touche les Maritimes et le Québec. Ce système, appelé Événement 3, a apporté de la neige et du grésil sur Edmundston. Bien que de la pluie verglaçante ait été prévue par ECCC, aucune précipitation verglaçante n'a été observée pendant la tempête. De la bruine verglaçante s'est probablement produite avant le plus fort de la tempête, mais aucune observation visuelle n'a pu le confirmer, comme nous en discuterons au chapitre suivant. À 0000 UTC le 28 mars 2021, la circulation à 250 hPa comprenait toujours un large creux au-dessus du centre des États-Unis et une crête au-dessus de la côte atlantique s'était déplacée un peu plus à l'est (Figure 3.1c). Contrairement aux événements précédents durant lesquels des creux plus petits se sont formés en aval du creux principal, l'Événement 3 se caractérise par le déplacement de ce creux vers l'est. De forts cœurs de courant jet (~280 km/h) étaient présents en aval et en amont du creux. En surface, un système dépressionnaire s'est formé sur les Grands Lacs et s'est creusé pendant deux jours tout en se déplaçant lentement vers le nord-est (Figure 3.2c) et la température à 2 m était légèrement au-dessous de 0 °C (Figure 3.3c). La région en aval du creux est associée à de la divergence au sommet de la troposphère et a contribué au développement du système. Une forte advection positive de tourbillon absolu était également associée au système à 500 hPa (Figure 3.4c). De même, les cartes à 850 hPa ont affiché le même patron d'advection de température que les deux tempêtes précédentes (Figure 3.5c) et un fort transport d'humidité du golfe du Mexique était présent (Figure 3.6c). La température moyenne de l'air à 2 m était de -1,2 °C, l'humidité relative moyenne était de 87%. Les vents à 6 m étaient du sud-sud-est (163,7°) et soufflaient en moyenne à 2,7 m/s.

3.1.1.4 Événement 4 – 1-2 avril 2021

Le 1er avril 2021, deux dépressions affectent les Maritimes et le sud-est du Québec. Le premier système passe relativement loin au nord-ouest de la région du haut du fleuve Saint-Jean et est associé à moins d'une heure continue de précipitation liquide à Edmundston. Des précipitations ininterrompues pendant plus de 16 heures sont associées au second système que nous désignerons Événement 4. Bien que certaines prévisions d'ECCC comprenaient des avertissements de pluie verglaçante, seuls de la neige, de la pluie et du grésil ont été observés à Edmundston. À 0000 UTC le 1 avril 2021, la circulation à 250 hPa était caractérisée par un creux à grande échelle sur l'Ontario et les Grands Lacs et une crête sur la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve (Figure 3.1d). Un fort cœur de courant jet (~260 km/h) soufflant du sud-sud-ouest circulait sur le Québec. En surface, un système dépressionnaire qui s'est formé le 28 mars sur les Rocheuses canadiennes se déplaçait maintenant lentement vers le nord au-dessus du Labrador (Figure 3.2d) et la température à 2 m était légèrement au-dessus de 0 °C (Figure 3.3d). Le système était allongé dans une direction méridionale, s'étendant du nord du Québec jusqu'à l'État de Géorgie. Au cours de la journée, la partie la plus australe du système s'est fermée et a formé un système séparé (Événement 4). Ce deuxième système s'est déplacé vers le nord le long de la côte atlantique. Ces deux systèmes ont été maintenus grâce à la divergence au sommet de la troposphère dans le cœur de courant jet en aval du creux situé au-dessus de l'Ontario. On observe de l'advection positive de tourbillon absolu à 500 hPa dans la région à l'intérieur du creux (Figure 3.4d). Le creux était associé à une advection d'air froid à 850 hPa (Figure 3.5d). Un transport d'humidité vers le nord était présent le long de la côte atlantique (Figure 3.6d). La température moyenne de l'air à 2 m était de -0,2 °C, l'humidité relative moyenne était de 90%. Les vents à 6 m étaient du sud-ouest (229,4°) et soufflaient en moyenne à 1,4 m/s.

3.1.1.5 Événement 5 – 4-5 avril 2021

Les 4 et 5 avril 2021, un système dépressionnaire a touché les Maritimes. Le système, que nous appellerons l'Événement 5, a apporté de la neige, du grésil et de la pluie sur Edmundston. De la pluie verglaçante était prévue dans certains modèles de prévisions d'ECCC, mais aucune n'a été observée. À 0000 UTC le 4 avril 2021, la circulation à 250 hPa était caractérisée par un creux incliné négativement (Figure 3.1e). En deux jours, la partie la plus méridionale du creux s'est complètement fermée. Un cœur de courant jet soufflant du sud au-dessus du nord-est du Canada s'est dissipé au cours de la journée. À la surface au-dessus de l'océan Atlantique, un système dépressionnaire se creusant de plus en plus s'est déplacé lentement vers le nord-ouest (Figure 3.2e) et la température à 2 m était légèrement au-dessus de 0 °C (Figure 3.3e). Sur les cartes à 500 hPa, on observe une advection cyclonique de tourbillon absolu au sud de la Nouvelle-

Écosse (Figure 3.4e). À 850 hPa, il y avait une advection de température positive à l'avant du système et une advection négative de température derrière le système (Figure 3.5e). Un flux d'humidité du sud-est se dirigeait vers Terre-Neuve depuis l'Atlantique (Figure 3.6e). La température moyenne de l'air à 2 m était de $-0,3$ °C, l'humidité relative moyenne était de 90%. Les vents à 6 m étaient du sud-sud-ouest ($195,3^\circ$) et soufflaient en moyenne à $1,1$ m/s.

3.1.2 Advection d'air chaud et flux d'humidité

Les cartes de réanalyses à 850 hPa (Figure 3.5) montrent que chacun des événements est associé avec de l'advection de température positive au-dessus de la région d'étude pendant la plupart des périodes de précipitation. Pour l'ensemble des événements on dénombre plus de 60 heures de précipitation lors d'advection de température positive contre moins de 20 heures de précipitation lors d'advection de température négative (Figure 3.7).

L'analyse des cartes de flux d'humidité (Figure 3.6) montre également que les précipitations sur la région sont associées à un transport d'humidité vers le nord sur la partie est du continent ou au-dessus de l'Atlantique à partir du Golfe du Mexique. La position du maximum de transport vers le nord d'humidité n'est pas déterminée directement par la trajectoire des tempêtes. Pour les quatre premiers événements, le flux d'humidité est près de la côte est américaine. L'Événement 5 (4-5 avril 2021) est un cas particulier étant donné que le patron d'advection est tel que l'advection d'air chaud est associée à des vents du nord et que le flux d'humidité le long de la côte est américaine est nul.

3.2 Conditions météorologiques à l'échelle régionale

3.2.1 Température et humidité relative à partir des thermomètres HOBO

La température de l'air à environ 2 m démontrait une relativement faible variabilité régionale pour l'ensemble des événements (écart type entre les stations $\leq 0,7$ °C pour l'ensemble des événements alors que l'erreur instrumentale est de $\pm 0,25$ °C) (Tableau 3.4). La température moyenne mesurée à la station MUST est à moins d'un écart type de la moyenne des autres stations. L'altitude des stations ne semble pas avoir d'effets sur la température mesurée à chaque station (Figure 3.8). La Figure 3.9 montre la température moyenne enregistrée à chaque station pendant les cinq événements. La Figure 3.10 montre l'anomalie de température normalisée à chaque événement pour chaque capteur de données. On voit qu'aucune station n'a de biais constant qui pourrait être attribuable à une particularité locale. La variabilité entre les événements semble plus importante que la variabilité sur l'échelle régionale.

L'humidité relative mesurée aux mêmes stations démontre une faible variabilité régionale (écart type entre les stations $\leq 2,5\%$ pour l'ensemble des événements ce qui correspond à l'erreur instrumentale) (Tableau 3.5). L'humidité relative moyenne mesurée à la station MUST ne semble pas bien correspondre avec la moyenne des stations (plus de 3 écarts types d'écart pour les Événements 2, 3 et 4). L'altitude des stations ne semble pas avoir d'effet sur l'humidité relative (Figure 3.11). La carte de la

Figure 3.12 montre l'humidité relative moyenne enregistrée à chaque station pendant les cinq événements. La carte des anomalies normalisées à la Figure 3.13 montre que tout comme pour la température de l'air, aucune station ne semble avoir de biais particulier. La position des stations ne contribue pas significativement à la variabilité de l'humidité relative de l'air à l'échelle de la région et la variabilité temporelle semble plus importante.

Ainsi les données de température et d'humidité relative de la région SAJESS sont déterminées davantage par les conditions météorologiques que par la topographie de la région. Les données recueillies par les instruments ou les observations de l'équipe SAJESS à la station fixe ou à la station MUST sont ainsi représentatives des conditions régionales qui prévalaient au moment des mesures ou des observations.

3.2.2 Distribution de précipitations dans la région à partir de données CoCoRaHS

Considérant la faible variabilité régionale au niveau de la température et de l'humidité relative, une partie de la variabilité observée entre les stations CoCoRaHS peut être attribuée à la technique de mesure. En mesurant l'épaisseur de neige au sol avec une règle, il est possible d'obtenir plusieurs mesures différentes pour le même site. Les écarts observés entre les stations tant au niveau de la quantité totale de précipitation (Figure 3.14 et Figure 3.15) qu'au niveau de l'équivalent en eau de la neige (Figure 3.16 et Figure 3.17) ne sont pas forcément le reflet d'écarts réels entre les stations. En effet, aucune station ne démontre un biais constant d'un événement à l'autre et il ne semble pas y avoir un effet observable de l'altitude ou de la latitude des stations. Cependant, la moyenne des mesures des différentes stations pendant un événement permet de comparer les événements entre eux. La faible variabilité régionale suggère que les données récoltées par les instruments et manuellement à la station fixe et à la station MUST sont représentatives de l'ensemble de la région pour des phénomènes à l'échelle spatiale régionale ou à l'échelle temporelle de la durée d'un événement.

Finalement, nous avons comparé les mesures CoCoRaHS au pluviomètre GEONOR situé à la stations ECCC (Figure 3.18). La valeur moyenne des données recueillies à chaque station pendant un événement est du même ordre que l'accumulation mesurée par le pluviomètre. Les mesures des observateurs CoCoRaHS semblent plus précises pour les événements comportant des précipitations liquides (Événements 1 et 5)

que pour les événements comportant surtout des précipitations solides (Événements 2 à 4). Ceci peut s'expliquer entre autres par la sous captation des précipitations solides due au vent (Rasmussen et al. 2012)

3.3 Conditions météorologiques en altitude

Les conditions météorologiques en altitude au-dessus de la région d'étude ont été mesurées au début de chaque événement par radiosondage (Figure 3.19). Tous les événements analysés sont caractérisés par la saturation de l'air dans les niveaux verticaux sous 700 hPa avant le début des précipitations sauf pour l'Événement 1. Durant l'Événement 1, la basse troposphère avant chaque événement était caractérisée par la présence de deux couches d'air distinctes : une couche d'air proche de la surface (entre 1000 et 900 hPa) et une couche d'air chaud intermédiaire (entre 900 et 850 hPa). Le profil vertical de température dans la couche de surface suit approximativement le gradient atmosphérique adiabatique (~ 10 °C/km) tandis que la couche intermédiaire est plus stable en raison de l'inversion de température. Dans le cas des Événements 3 et 5, la couche intermédiaire montre une augmentation de la température relativement importante entre sa base et le niveau où la température est maximale (respectivement 7,9 °C et 5,3 °C), tandis que pour les Événements 2 et 4, cette augmentation de température est plus légère (respectivement 1 °C et 2,5 °C).

Avec l'altitude, les vents en début d'événement tendaient vers un vent géostrophique d'ouest à l'exception de l'Événement 5. Le vent à 250 hPa était du nord-ouest à ~ 100 km/h avant l'Événement 1 ; du sud-ouest à ~ 75 km/h avant l'Événement 2 ; de l'ouest à ~ 270 km/h avant l'Événement 3 et ; du sud-ouest à environ 240 km/h avant l'Événement 4. Les vents au début de l'Événement 5 étaient généralement d'est (sud-est à ~ 90 km/h à 250 hPa) à l'exception du sommet de la troposphère (du sud-sud-ouest à ~ 10 km/h à 150 hPa et de l'ouest à ~ 20 km/h à 100 hPa). Ces vents d'est sont typiques des grosses tempêtes de type *Nor'easter* (American Meteorological Society, 2012). Par contre, l'Événement 4 ne montre pas les vents d'est typiques d'un *Nor'easter* en altitude malgré une trajectoire synoptique similaire à celle de l'Événement 5. Le patron de vents à l'échelle synoptique au moment de l'Événement 4 était encore structuré par le passage successif de 3 tempêtes continentales. Cette transition entre deux régimes synoptiques différents est caractéristique de l'Événement 4. Finalement, pour tous les événements, la direction du vent change dans le sens horaire (vents dextrogyres) en montant en l'altitude. Ce cisaillement du vent vertical correspond à de l'advection de température positive. On remarque que les vents proches de la surface au début de l'Événement 4 tournent dans le sens anti-horaire (vents lévogyres). Ce cisaillement du vent vertical correspond à de l'advection de température négative.

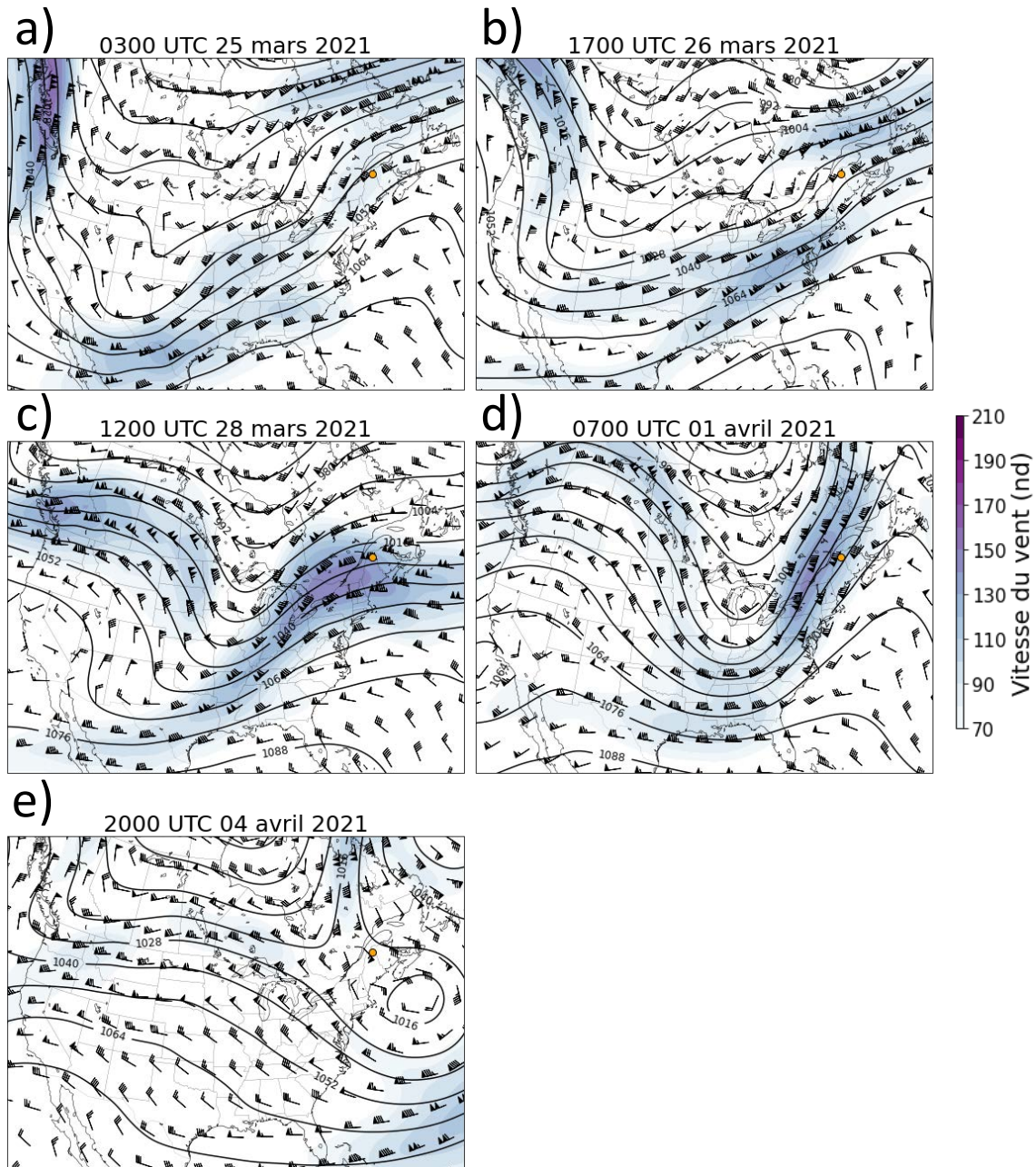


Figure 3.1 Cartes synoptiques des cœurs de courant-jet à 250 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 250 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 250 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs identifient les cœurs de courant-jet et la vitesse du vent en nd.

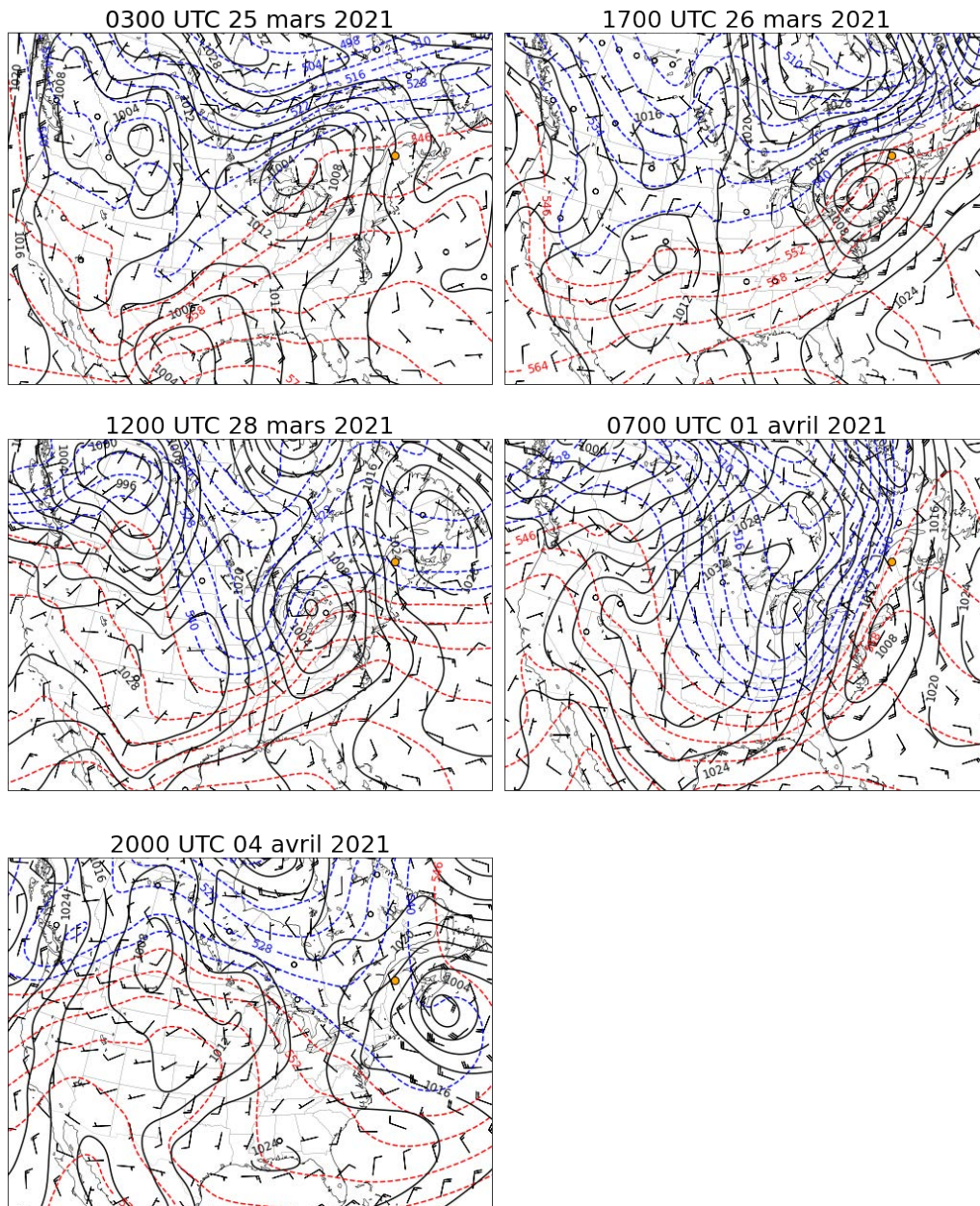


Figure 3.2 Cartes synoptiques en surface au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la pression atmosphérique à la surface en hPa. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 10 m en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs indiquent l'épaisseur de la couche 1000-500 hPa en da (rouges > 540 da ; bleus ≤ 540 da).

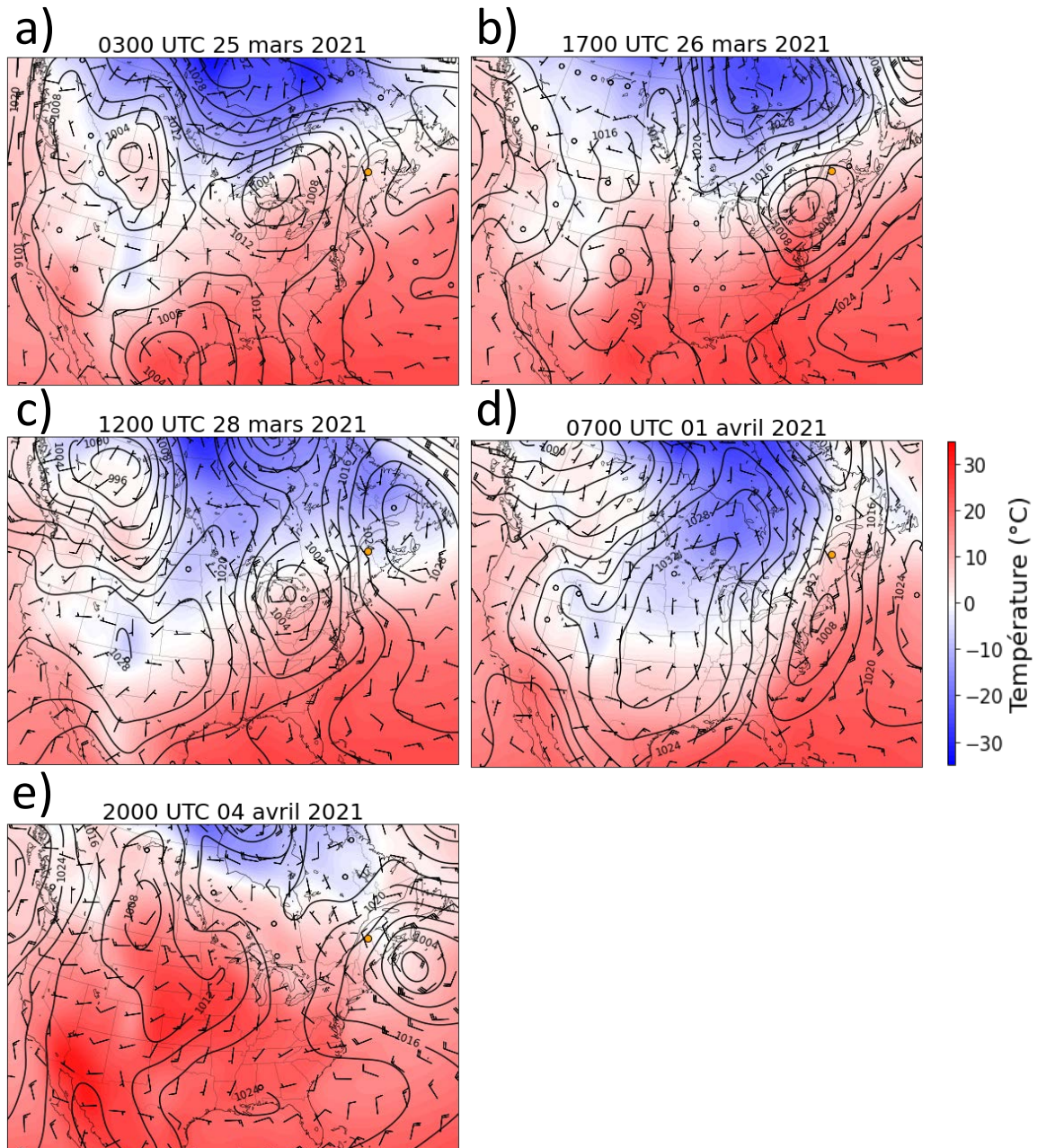


Figure 3.3 Cartes synoptiques de la température à 2 m au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la pression atmosphérique à la surface en hPa. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 10 m en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs donnent la température à 2 m en °C.

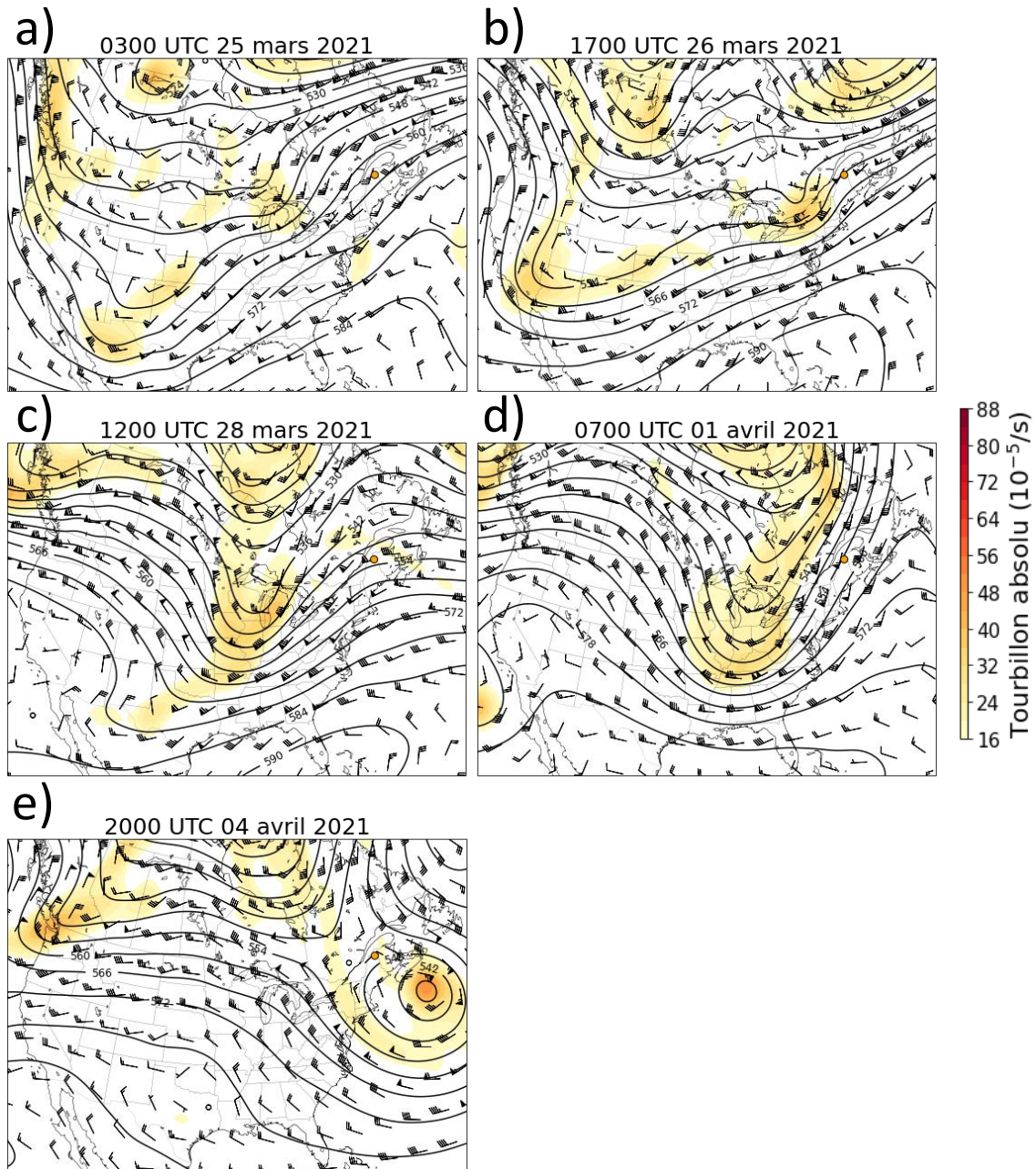


Figure 3.4 Cartes synoptiques du tourbillon absolu à 500 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 500 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 500 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs donnent la valeur du tourbillon absolu ($10^{-5}/s$).

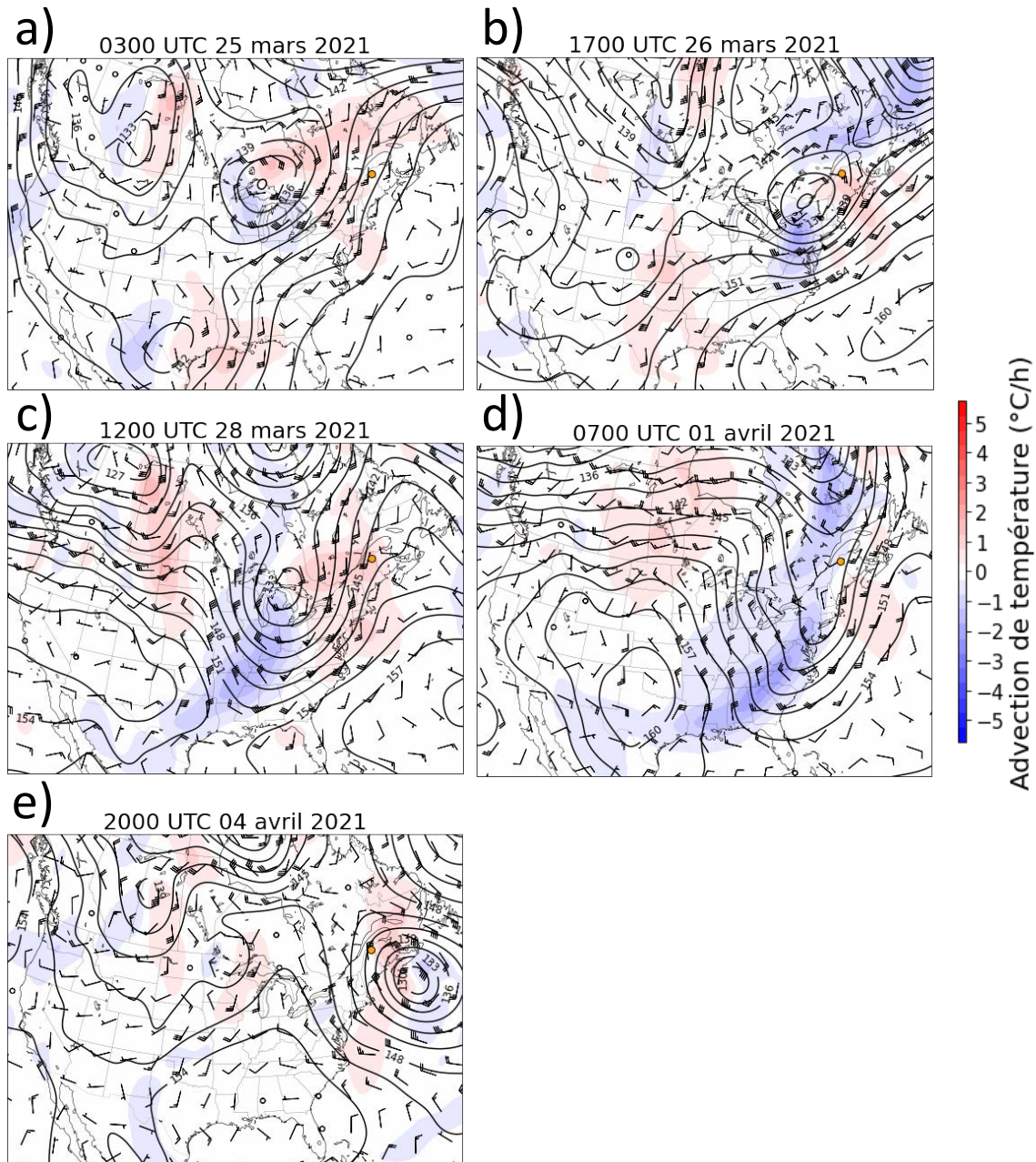


Figure 3.5 Cartes synoptiques de l'advection de température à 850 hPa au début de chaque événement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les contours noirs indiquent la hauteur géopotentielle à 850 hPa en da. Les barbules de vent indiquent la vitesse et la direction du vent à 850 hPa en nd (1.852 km/h). Les contours de couleurs identifient les zones d'advection de température positive (rouge) et négative (bleu).

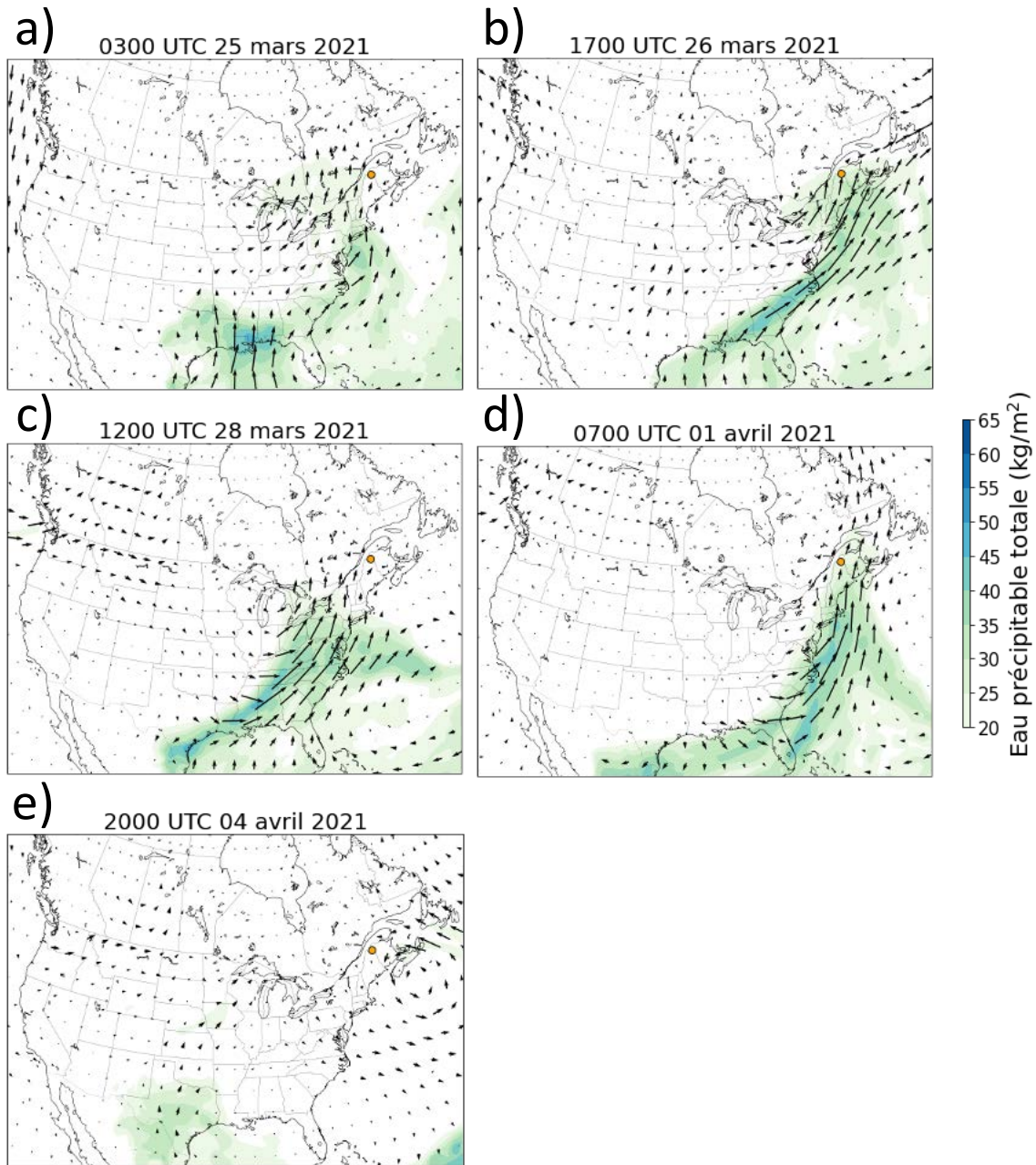


Figure 3.6 Cartes synoptiques du flux d'humidité intégré verticalement. a) Événement 1, 0300 UTC 25 mars 2021 b) Événement 2, 1700 UTC 26 mars 2021 c) Événement 3, 1200 UTC 28 mars 2021 d) Événement 4, 0700 UTC 1 avril 2021 e) Événement 5, 2000 UTC 4 avril 2021. Les flèches noires indiquent la grandeur et la direction du flux d'humidité en kg/m·s. Les contours de couleurs indiquent l'eau précipitable totale en kg/m².

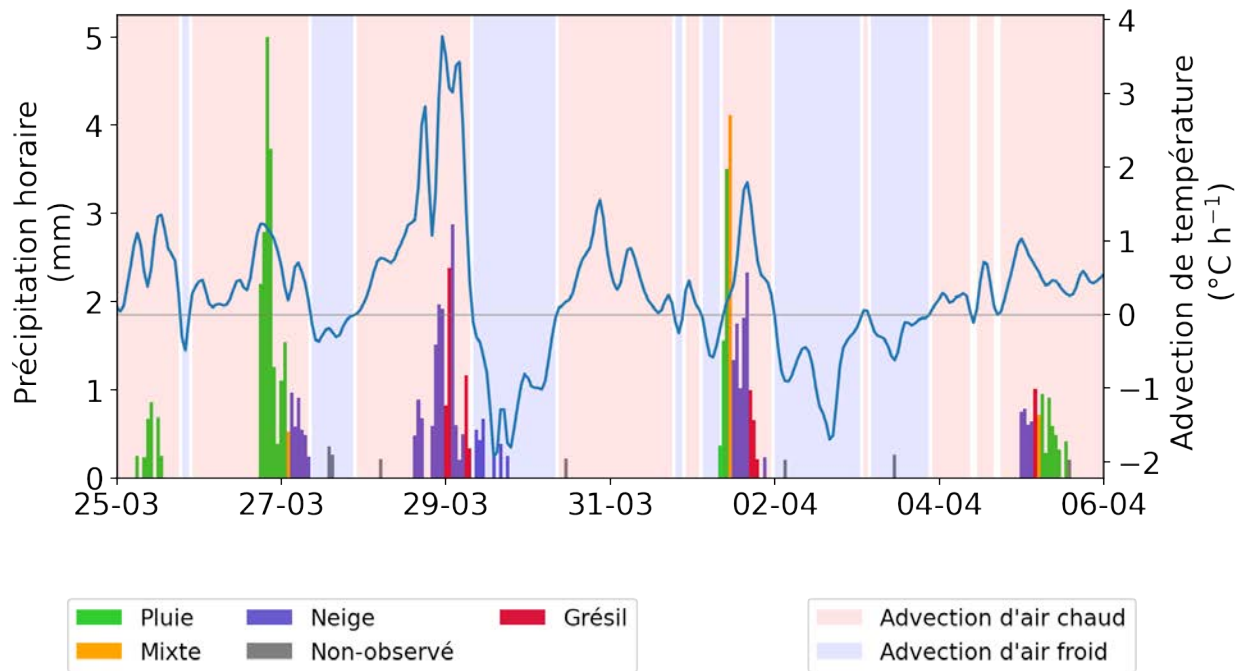


Figure 3.7 Précipitations horaires et advection de température à 850 hPa durant la série d'événements choisie. La couleur des barres identifie le type de précipitation observé manuellement dominant durant chaque heure. La quantité de précipitation est obtenue à partir du pluviomètre GEONOR de la station ECC. La courbe indique l'advection de température à 850 hPa selon les réanalyses ERA5. Les zones de couleur à l'arrière-plan identifient les périodes d'advection d'air chaud (rouge) et d'advection d'air froid (bleu).

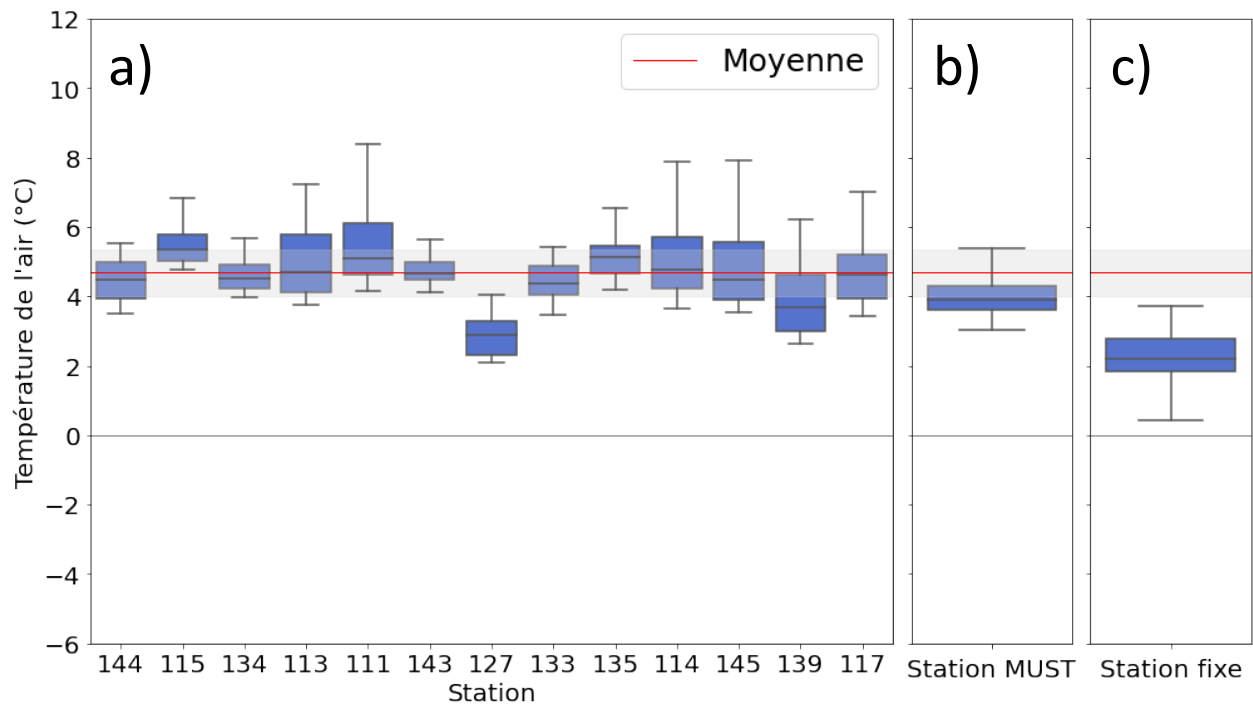


Figure 3.8 a) Distribution des températures mesurées à chaque minute par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées pendant l'Événement 1. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. b) Distribution des températures à 2 m mesurées à chaque minute par la sonde de température HMP155 à la station MUST durant l'Événement 1. c) Distribution des températures à 2 m mesurées à chaque minute par la sonde de température HMP155 à la station fixe durant l'Événement 1. La ligne rouge indique la température moyenne de l'ensemble des stations. La zone gris pâle indique l'écart type.

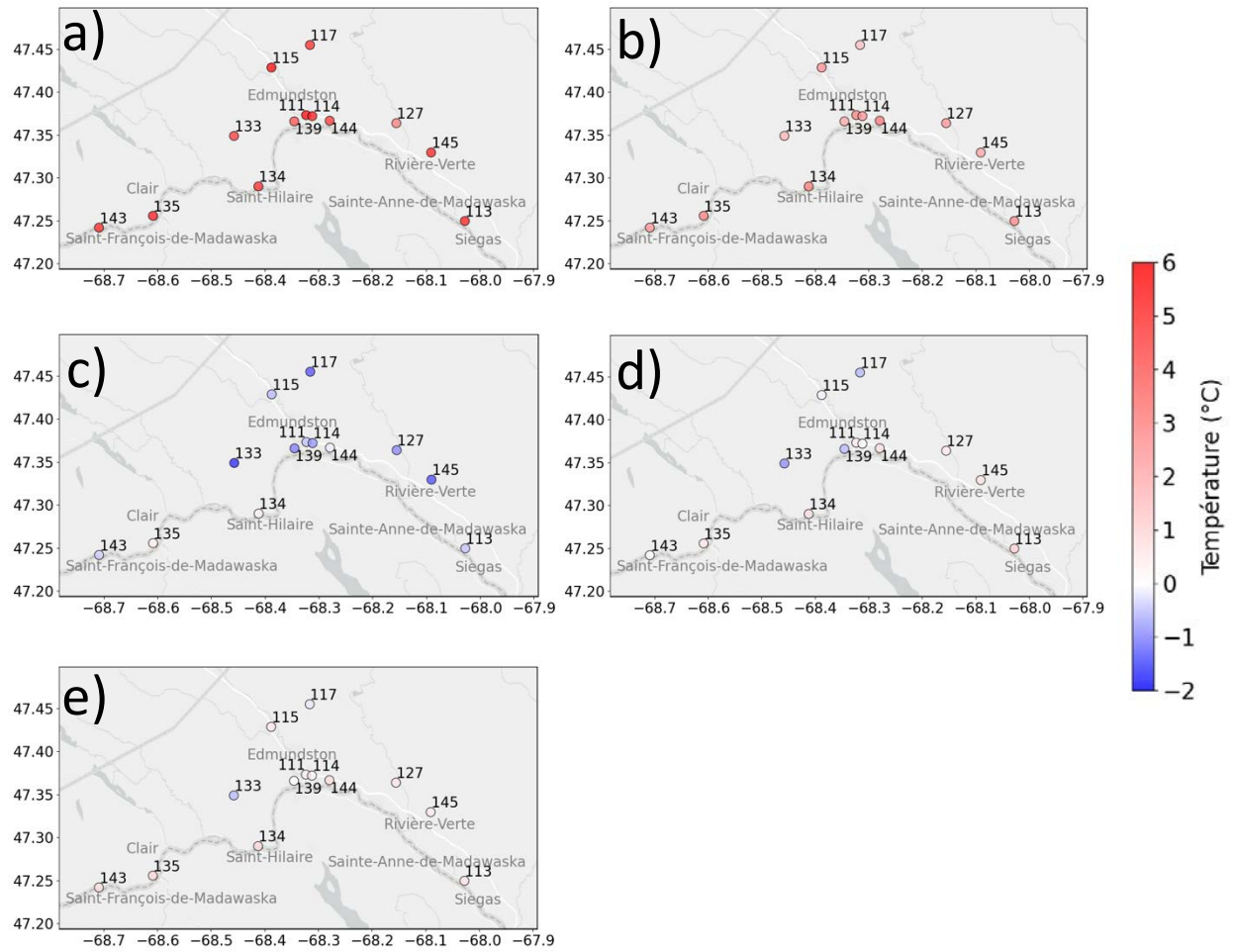


Figure 3.9 Variabilité régionale de la température de l'air près de la surface (~2 m). La température affichée est la moyenne sur chaque événement des températures enregistrées par chaque thermomètre aux stations CoCoRaHS identifiées.

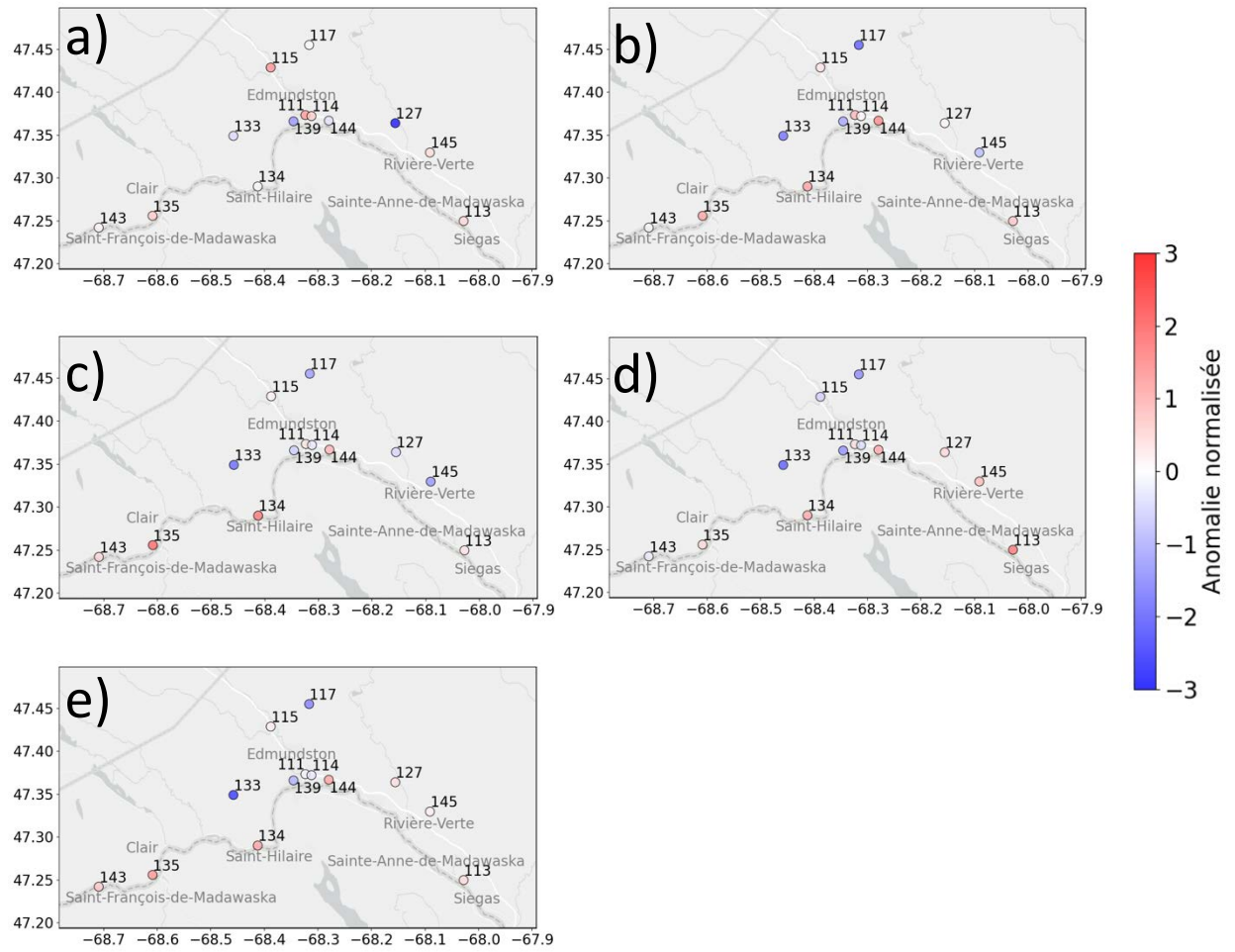


Figure 3.10 Anomalies normalisées de la température de l'air mesurée près de la surface par les thermomètres. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de la température de l'air mesurée durant l'événement par l'ensemble des thermomètres.

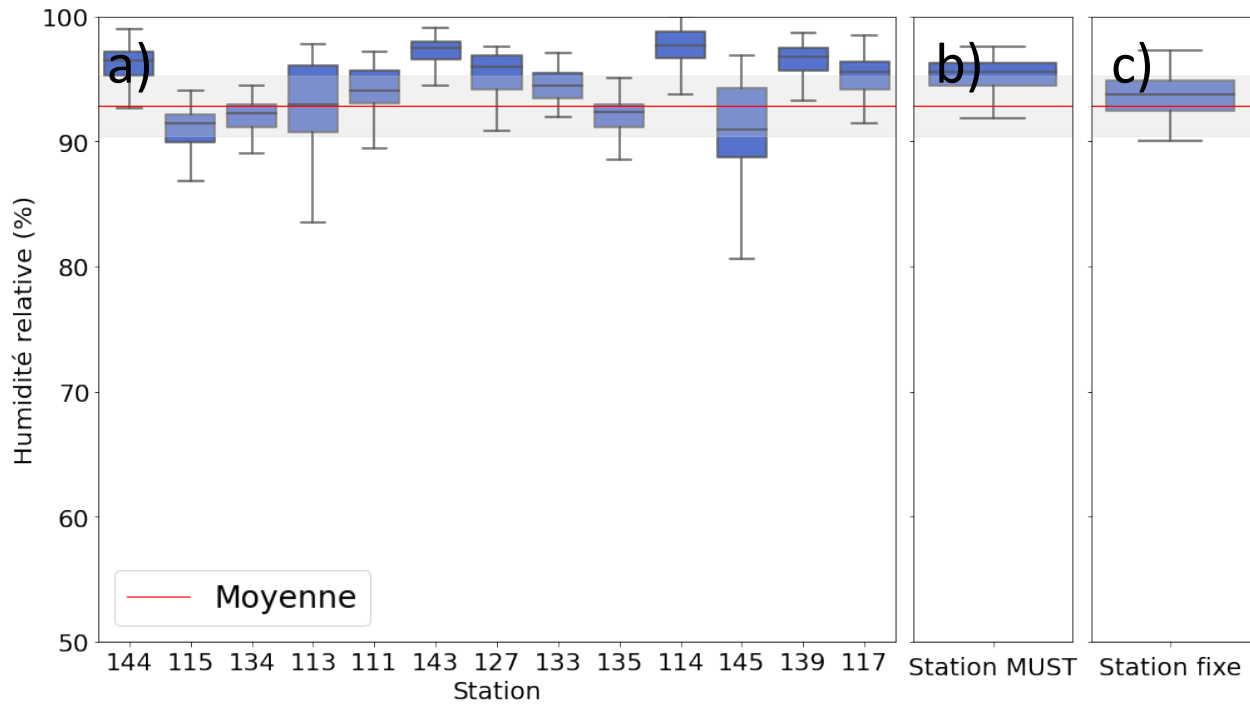


Figure 3.11 a) Distribution de l'humidité relative mesurée à chaque minute par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées pendant l'Événement 1. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. b) Distribution de l'humidité relative à 2 m mesurée à chaque minute par la sonde HMP155 à la station MUST durant l'Événement 1. c) Distribution de l'humidité relative à 2 m mesurée à chaque minute par la sonde HMP155 à la station fixe durant l'Événement 1. La ligne rouge indique la température moyenne de l'ensemble des stations. La zone gris pâle indique l'écart type.

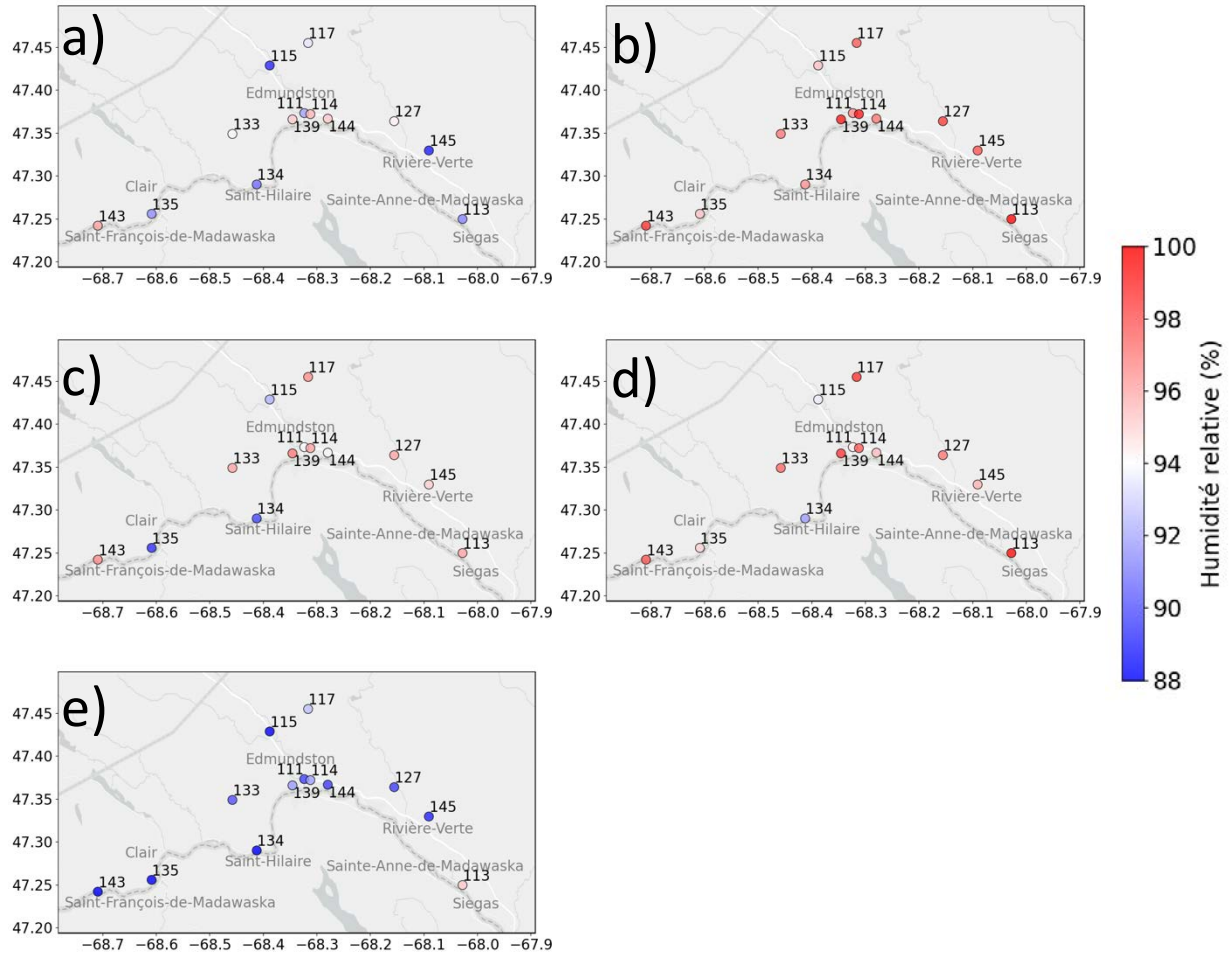


Figure 3.12 Variabilité régionale de l'humidité relative près de la surface (~2 m). L'humidité relative affichée est la moyenne sur chaque événement des valeurs d'humidité relative par chaque thermomètre aux stations CoCoRaHS identifiées.

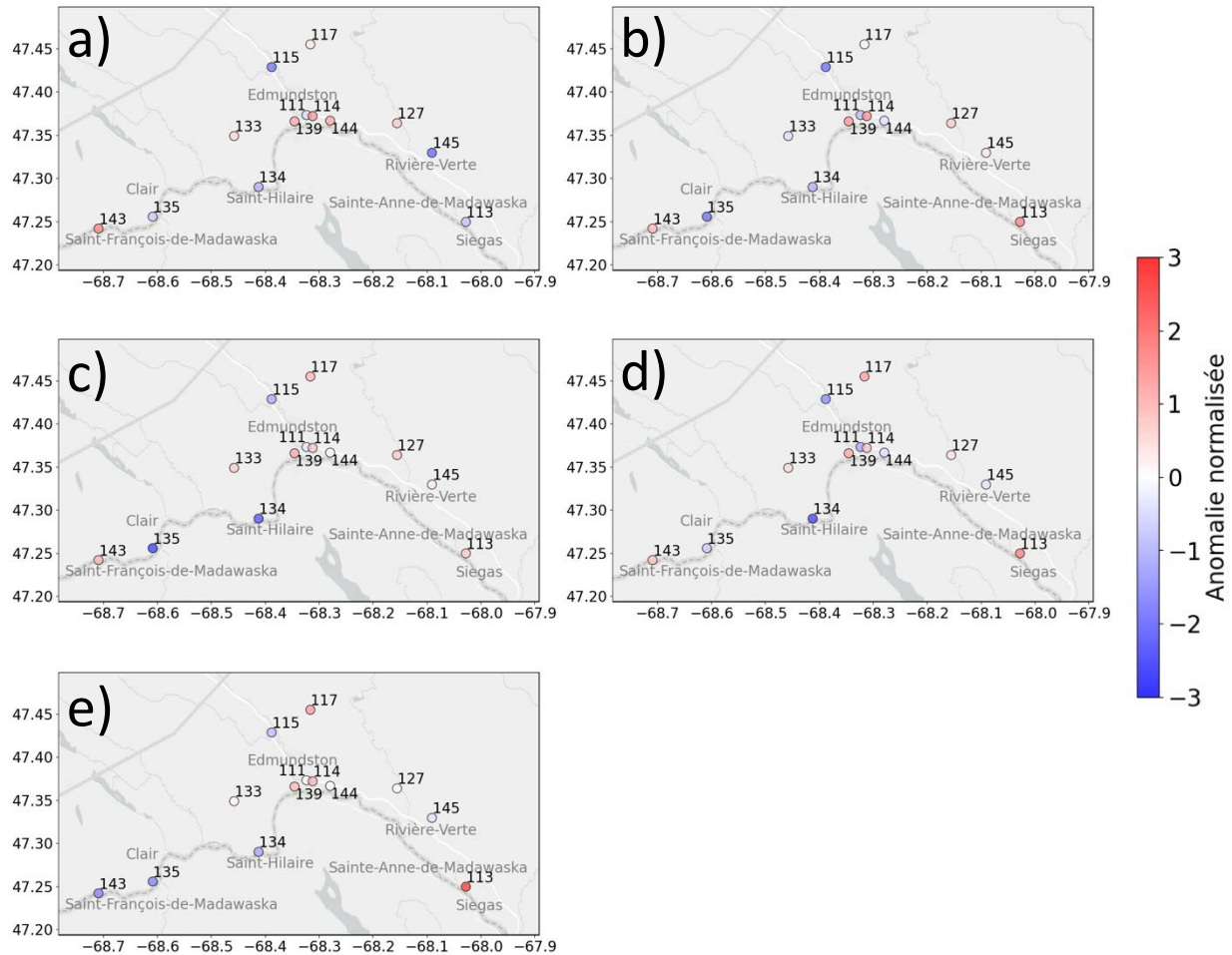


Figure 3.13 Anomalies normalisées de l'humidité relative mesurée près de la surface par les thermomètres aux stations CoCoRaHS identifiées. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de l'humidité relative mesurée durant l'événement par l'ensemble des capteurs de données.

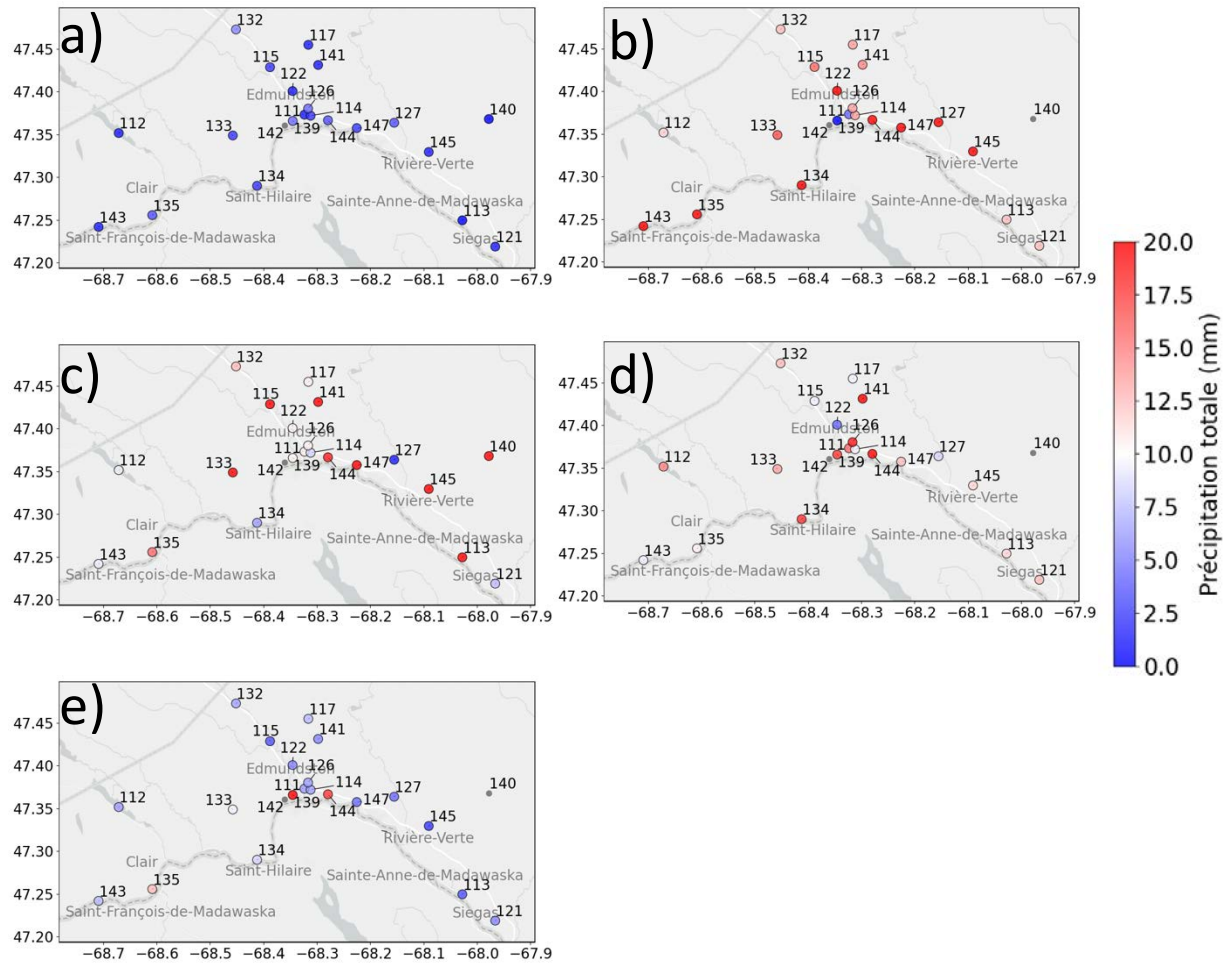


Figure 3.14 Répartition régionale des précipitations totales (en mm) récoltées par les bénévoles CoCoRaHS. Le numéro de la station CoCoRaHS est indiqué à côté de chaque point. Les stations en gris n'avaient pas récolté de données valables pour l'événement.

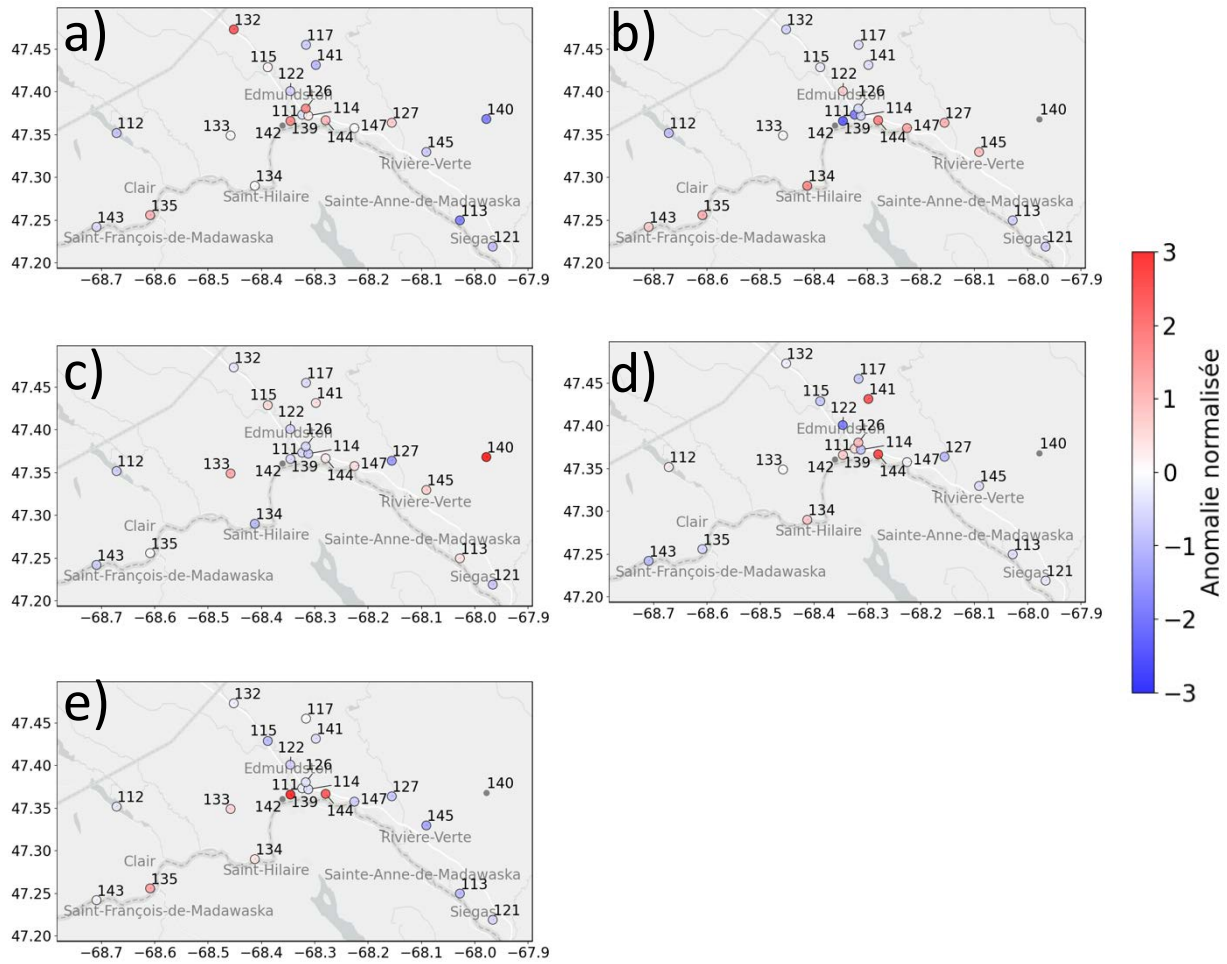


Figure 3.15 Anomalies normalisées des précipitations totales mesurées entre les différentes stations CoCoRaHS. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne de la quantité précipitations (en mm) mesurée durant l'événement par l'ensemble des stations.

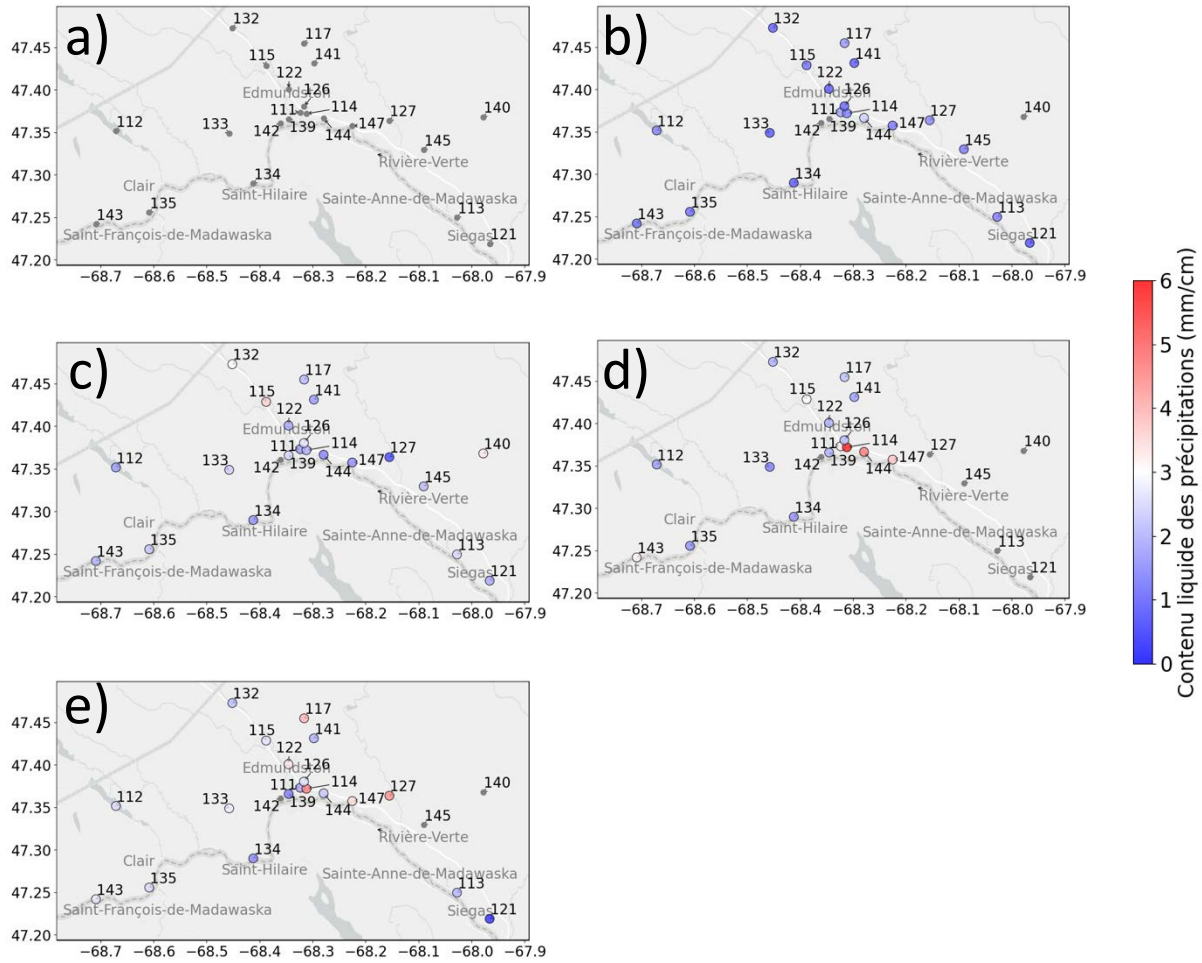


Figure 3.16 Répartition régionale du contenu liquide des précipitations (en mm/cm). Le rapport entre le contenu liquide (en mm) et la hauteur de neige au sol (en cm) est obtenu à partir des données des bénévoles CoCoRaHS. Le numéro de la station CoCoRaHS est indiqué à côté de chaque point. Les stations en gris n’avaient pas récolté de données valables pour l’événement ou n’avaient récolté que des précipitations liquides.

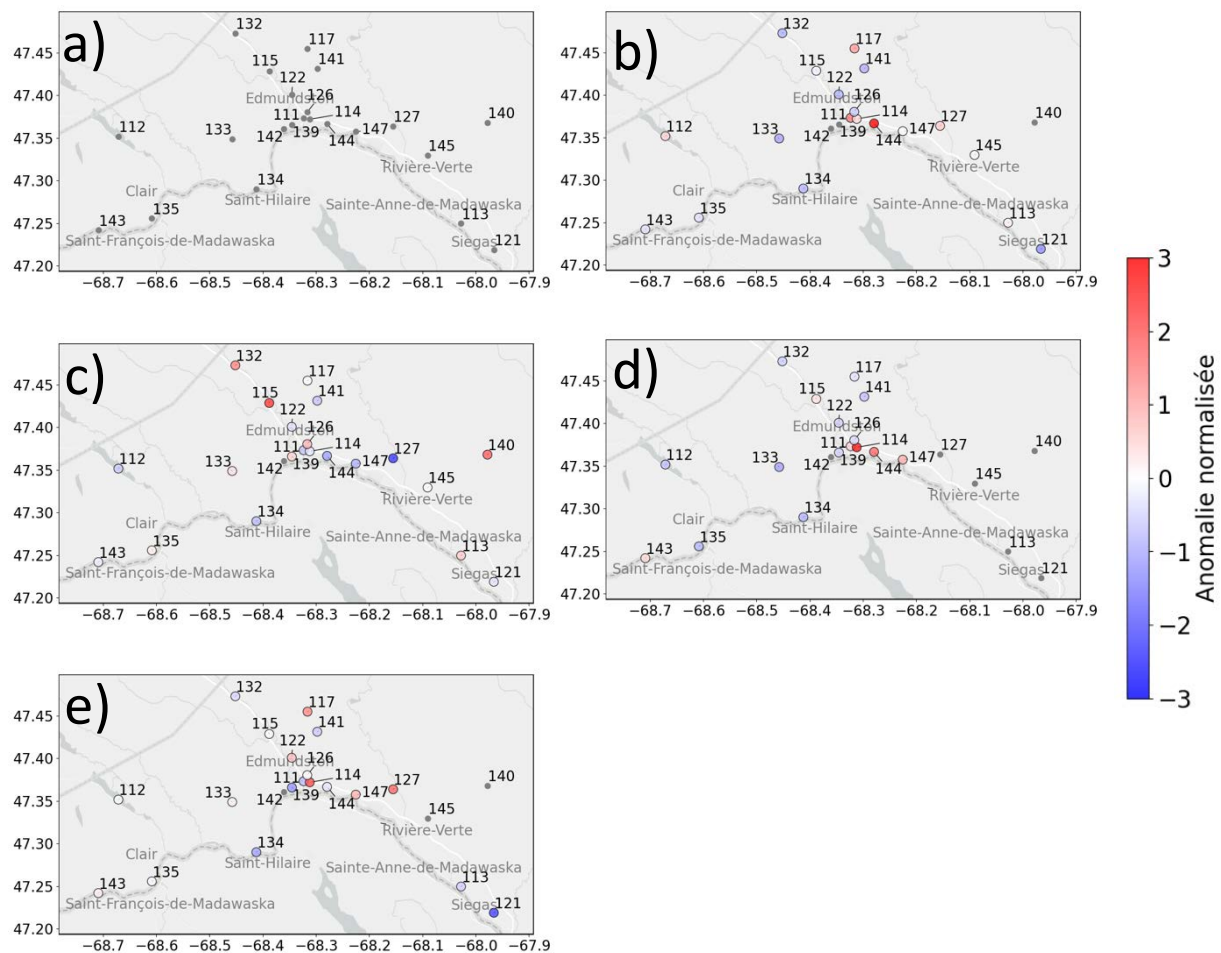


Figure 3.17 Anomalies normalisées du contenu en eau liquide des précipitations mesurées entre les différentes stations CoCoRaHS. L'anomalie d'une station est calculée par rapport à la valeur moyenne du contenu en eau liquide mesurée durant l'événement par l'ensemble des stations.

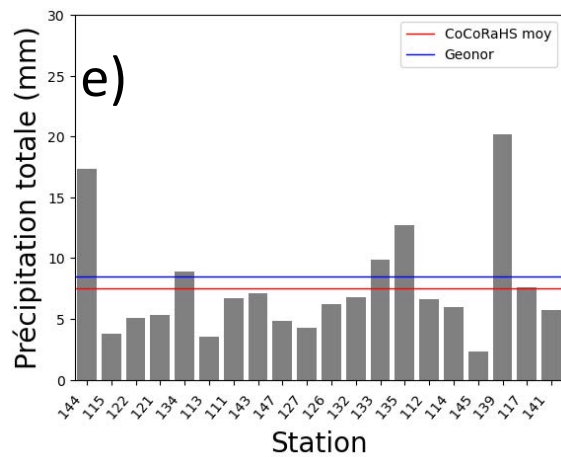
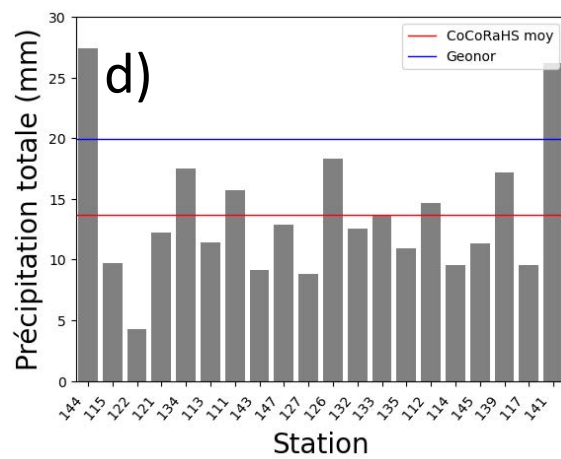
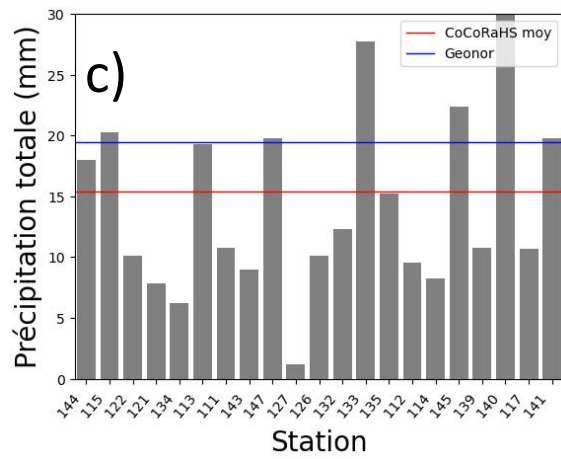
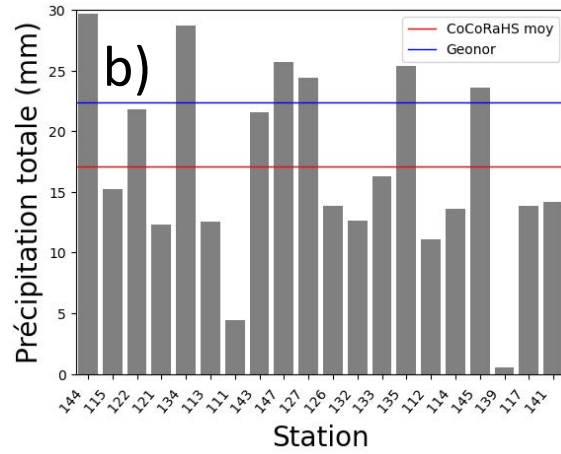
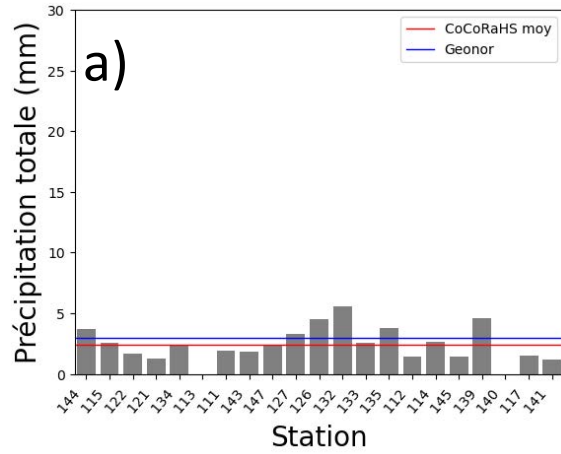


Figure 3.18 Précipitations totales mesurées à chaque station CoCoRaHS pour chaque événement. Les stations sont ordonnées par altitude croissante. La ligne rouge indique la valeur moyenne de la quantité de précipitations pour l'événement. La ligne bleue indique la quantité totale de précipitations mesurées par le pluviomètre GEONOR.

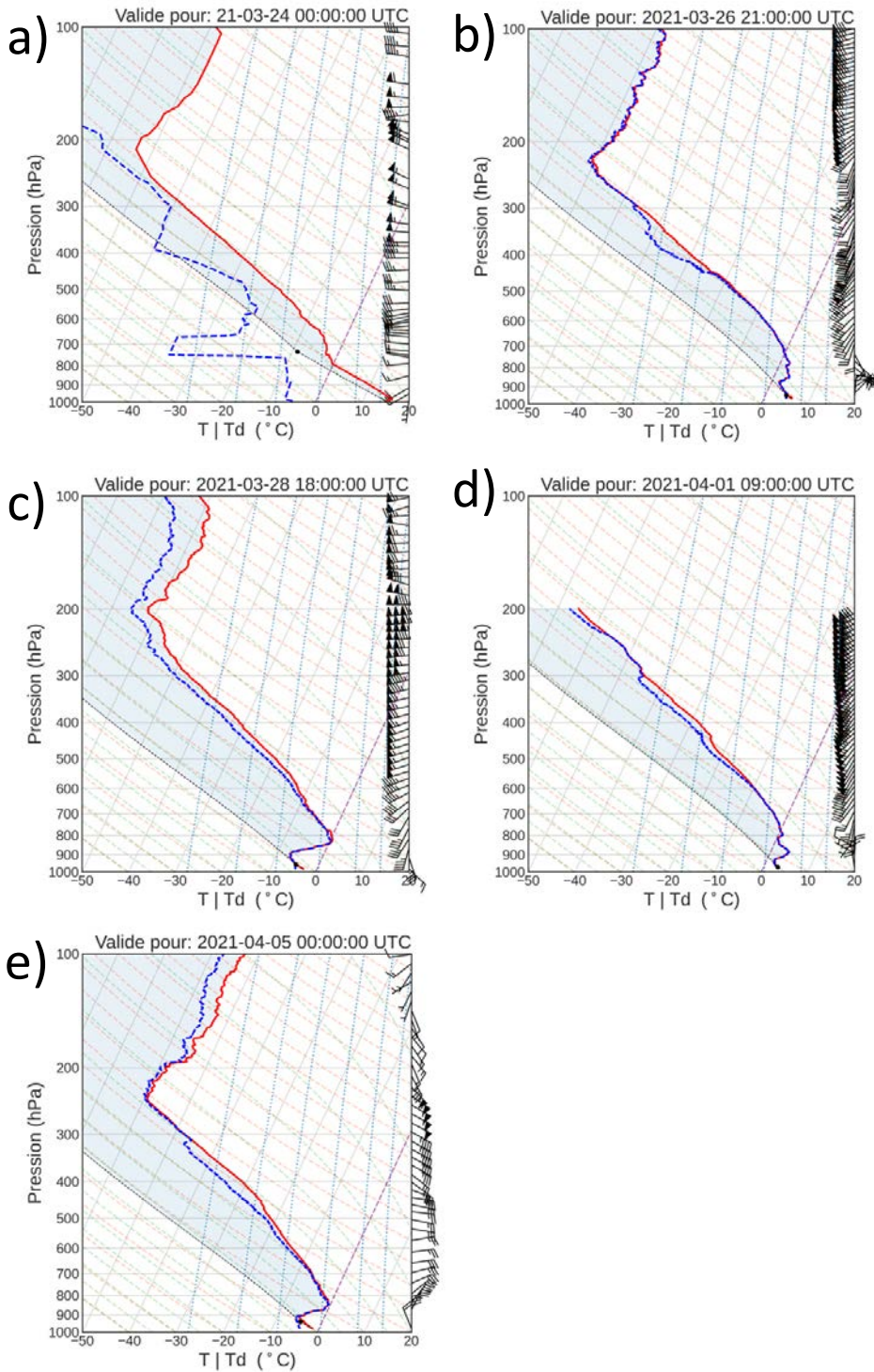


Figure 3.19 Skew-T de radiosondages au début de chaque événement documenté. Vitesse des vents en nd (1.852 km/h). a) Événement 1 – radiosondage de Caribou (Maine), valide le 25 mars 2021 à 0000 UTC. b) Événement 2 – radiosondage SAJESS, valide le 26 mars 2021 à 1800 UTC. c) Événement 3 – radiosondage SAJESS, valide le 28 mars 2021 à 1800 UTC. d) Événement 4 – radiosondage SAJESS, valide le 1 avril 2021 à 0900 UTC. e) Événement 5 – radiosondage SAJESS, valide le 5 avril 2021 à 0000 UTC.

Tableau 3.1 Liste des événements météorologiques observés durant la campagne de terrain SAJESS 2021 dans la région du Madawaska au Nouveau-Brunswick. Les événements colorés en gris n'ont pas été analysés dans cette étude. Une trajectoire « Continentale » décrit une tempête qui se dirige vers le nord-est en survolant le continent nord-américain à partir du Colorado ou du Golfe du Mexique. Une trajectoire « Nor'Easter » décrit une tempête qui se déplace vers le nord en suivant la côte est américaine et qui s'est formée dans l'Atlantique à l'est des États-Unis.

Série	Événement	Date (UTC)	Durée des précipitations	Transition de phase	Précipitations observées	Trajectoire synoptique
A	1	1 mars 2021	12h40			
B	1	9 mars 2021	7h10			
	2	11 mars 2021	1h40			
	3	12 mars 2021	1h20			
	4	13 mars 2021	1h50			
	5	18 mars 2021	6h10			
C	1	25 mars 2021	6h40	Liquide	Pluie	Continentale
	2	26-27 mars 2021	16h	Liquide-Mixte-Solide	Pluie, Neige, Grésil	Continentale
	3	28-29 mars 2021	29h	Solide	Neige, Grésil	Continentale
	4	1-2 avril 2021	16h	Liquide-Mixte-Solide	Pluie, Neige, Grésil	Nor'Easter
		2 avril 2021	4h50			
	5	4-5 avril 2021	15h10	Solide-Mixte-Liquide	Neige, Grésil, Pluie	Nor'Easter
D	1	20 avril 2021	3h			
	2	21-23 avril 2021	36h30			
	3	26-27 avril 2021	11h10			

Tableau 3.2 Données disponibles pour les 5 événements de la série analysée. Un « O » indique que l'appareil a fonctionné en continu pendant l'événement. Un « X » indique que ces données ne sont pas disponibles. Le nombre de photos et de radiosondages disponibles pour chaque événement est indiqué. En plus des radiosondages indiqués, les données des radiosondages de Caribou, MA sont disponibles chaque jour pour les temps synoptiques 00Z et 12Z. Les colonnes « Trépied météo » désignent l'ensemble des appareils fixés au trépied de chaque station.

Événement	Station MUST						Station fixe		
	Observations manuelles		Macro-photos	Radio-sondages	Trépied météo	MRRpro	Trépied météo	Disdro. Parsivel	MRR-2
	Début (UTC)	Fin (UTC)							
1	25 mars 2021 03:00	25 mars 2021 13:10	X	X	O	O	O	O	O
2	26 mars 2021 17:10	27 mars 2021 09:20	409	7	O	O	O	O	O
3	28 mars 2021 12:10	29 mars 2021 19:30	913	9	O	O	O	O	O
4	1 avril 2021 07:30	2 avril 2021 00:50	438	3	O	O	O	O	O
5	4 avril 2021 20:20	5 avril 2021 13:50	323	5	O	O	O	O	O

Tableau 3.3 Température (°C) et Humidité relative (%) moyennes à environ 2 m pour chaque événement. Vitesse (m/s) et direction (°) moyennes du vent à environ 6 m pour chaque événement. Une direction de 0° indique un vent du nord.

Événement	Température (°C)	Humidité relative (%)	Vent	
			Vitesse (m/s)	Direction (°)
1	3,98	93,95	0,76	147,5
2	2,79	91,08	1,03	115,9
3	-0,73	88,92	2,75	163,7
4	0,08	89,61	1,38	229,4
5	0,40	84,75	1,13	195,3

Tableau 3.4 Température moyenne à environ 2 m aux stations CoCoRaHS pendant les événements analysés. L'écart type est calculé à partir de la température moyenne à chaque station.

	T moy. stations CoCoRaHS (°C)	Écart type (°C)	T moy. station MUST (°C)
Événement 1	4,7	0,7	4,0
Événement 2	2,4	0,5	2,8
Événement 3	-0,6	0,6	-0,7
Événement 4	0,2	0,5	0,1
Événement 5	0,4	0,4	0,4

Tableau 3.5 Humidité relative moyenne à environ 2 m aux stations CoCoRaHS pendant les événements analysés. L'écart type est calculé à partir de l'humidité relative moyenne à chaque station.

	HR moy. stations CoCoRaHS (%)	Écart type (%)	HR moy. station MUST (%)
Événement 1	92,8	2,4	94,0
Événement 2	97,7	1,4	91,1
Événement 3	94,5	2,5	88,9
Événement 4	96,4	2,2	89,6
Événement 5	89,7	2,5	84,8

CHAPITRE 4

TYPES DE PRÉCIPITATION ET CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES À LA SURFACE

Ce chapitre décrit l'évolution des conditions météorologiques et les types de précipitation observés à la surface. Pour chaque événement, nous décrivons les conditions en surface à l'aide des données collectées à la station MUST, des observations manuelles effectuées à proximité des instruments et des macrophotographies des hydrométéores solides collectés au même endroit.

4.1 Conditions précédant et après la série d'événements et neige au sol

La série d'événements ayant eu lieu du 25 mars au 5 avril 2021 a été précédée et suivie de deux périodes relativement chaudes sans précipitations. Durant ces deux périodes, la température de l'air à 2 m suit généralement le cycle diurne et ne descend sous 0 °C que durant la nuit, sauf le 19 mars 2021. Ces conditions contrastent fortement avec celles qui ont été observées durant la série d'événements analysée.

Notons qu'en raison de la période chaude et sèche précédant la série d'événements de précipitation (du 18 au 25 mars 2021), il n'y avait plus de neige au sol lorsque la série d'événements a commencé. Les accumulations de neige au sol pendant la période étudiée ont fondu rapidement en raison de la période relativement chaude du 5 au 17 avril 2021. L'épaisseur de neige au sol à la station fixe mesurée par le SR50 sur le trépied météorologique est représentative de ce qui se produit dans le reste de la région (Figure 4.1).

4.2 Types de précipitation

Le

Tableau 4.1 résume le nombre d'heures de chaque type précipitation observé à la station MUST et l'occurrence de précipitations mixtes. Les trois types principaux de précipitation observés pendant la série d'événements sont dans l'ordre : neige (plus de 50 heures), pluie (environ 30 heures), grésil (plus de 6 heures).

4.3 Conditions en surface pendant les événements

La température au sol entre le 20 mars et le 20 avril 2021 suit généralement le cycle diurne et était presque toujours au-dessus de 0 °C à l'exception de la période correspondant à la série d'événement analysés. Durant cette période, la température de l'air près de la surface varie entre -10 °C et 10 °C et on dénombre 9 plages distinctes de température comprises entre -2 et 2 °C (Figure 4.2). Le cycle diurne est aussi difficilement observable en raison des perturbations causées par le passage successif de nombreux systèmes météorologiques. L'observation manuelle du type de précipitation est utilisée pour déterminer les types dominants de précipitation au sol durant une période donnée. De la Figure 4.2 à la Figure 4.7 le type principal de précipitation au sol pour chaque heure est utilisé pour indiquer l'évolution de la phase pendant un événement. Les périodes de précipitations « mixtes » indiquent une co-occurrence des phases liquide et solide (pluie et neige). Les périodes durant lesquelles du grésil a été observées sont identifiées même si un autre type de précipitation était présent (neige ou pluie).

La température à 2 m mesurée à la station MUST, le type de précipitation observée et le taux horaire de précipitation mesuré par le Geonor ont été analysés et comparés. La température et la température du point de rosée au cours de l'Événement 1 sont restées au-dessus de 0 °C ; seule de la pluie a été observée et le taux horaire de précipitation n'a jamais dépassé 1 mm/h (Figure 4.3). Au cours de l'Événement 2, la température était au-dessus de 0 °C de 1800 UTC le 26 mars 2021 jusqu'à 0400 UTC le 27 mars 2021 puis était sous 0 °C (Figure 4.4). La transition de la pluie à la neige correspond au moment où la température est descendue sous 0 °C. Entre 1800 UTC et 2200 UTC le 26 mars 2021, le taux de précipitation est au-dessus de 2 mm/h puis il est au-dessous de 1 mm/h jusqu'à la fin de l'événement vers 0900 UTC le 27 mars 2021 (sauf pour 2200 UTC le 26 mars 2021 ~1.1 mm/h et 0100 UTC le 27 mars 2021 ~1.5 mm/h). Au cours de l'Événement 3, la température du point de rosée est restée sous 0 °C et toute la précipitation était solide (Figure 4.5). La neige était le principal type de précipitation sauf pour les périodes de 0000 UTC à 0200 UTC et 0600 UTC à 0800 UTC le 29 mars 2021 où du grésil a été observé. Le taux horaire de précipitation est au-dessous de 1 mm/h de 1500 UTC à 2100 UTC le 28 mars 2021 et de 0000 UTC à 0100 UTC le 29 mars 2021; entre 1 mm/h et 2 mm/h de 2100 UTC à 0000 UTC le 28 mars 2021; et au-dessus de 2 mm/h de 0100 UTC à 0300 UTC le 29 mars 2021. De 0300 UTC le 29 mars 2021 jusqu'à la fin de l'événement vers 2000 UTC le 29 mars 2021, le taux de précipitation était au-dessous de 1 mm/h (sauf pour 0600 UTC le 29 mars 2021 ~1.1 mm/h). L'Événement 4 a débuté au-dessus de 0 °C vers 0800 UTC le 1 avril 2021, puis suivant le refroidissement de la température du point de rosée sous 0 °C à 1100 UTC le 1 avril 2021, de la neige et du grésil ont été observés (Figure 4.6). Le taux horaire de précipitation est au-

dessous de 1 mm/h entre 0800 UTC et 0900 UTC le 1 avril 2021; entre 1 mm/h et 2 mm/h de 0900 UTC à 1000 UTC le 1 avril 2021 ; au-dessus de 2 mm/h de 1000 UTC à 1200 UTC le 1 avril 2021. De 1200 UTC à 1700 UTC le 1 avril 2021, le taux de précipitation est entre 1 mm/h et 2 mm/h (sauf à 1600 UTC le 1 avril 2021 ~2.1 mm/h) puis est au-dessous de 1 mm/h jusqu'à la fin de l'événement vers 0100 le 2 avril 2021. La température a augmenté de façon monotone lors de l'Événement 5 (Figure 4.7). La neige était le principal type de précipitation entre 0000 UTC et 0400 UTC le 5 avril 2021, puis du grésil a été observé entre 0400 UTC et 0500 UTC le 5 avril 2021. Lorsque la température a dépassé 0 °C vers 0430 UTC le 5 avril 2021, des précipitations mixtes ont débuté, puis la pluie était le principal type de précipitation entre 0600 UTC le 5 avril 2021 et la fin des précipitations vers 1400 UTC le 5 avril 2021. Le taux de précipitation est resté au-dessous de 1 mm/h pour tout l'événement.

L'analyse des conditions météorologiques à 2 m lors de l'occurrence de précipitation mixte (pluie et neige) montre la séparation des phases liquide et solide par la mesure du point de rosée. La phase liquide est prédominante lorsque la température du point de rosée est au-dessus de 0 °C. Lors d'observation de neige et de pluie simultanées avec prédominance de pluie, plus de 50% des températures du point de rosée mesurées étaient au-dessus de 0 °C (Figure 4.8). Cette proportion monte à près de 75% si on compte également les occurrences de pluie seule (Figure 4.9). À l'inverse, l'occurrence de neige comme précipitation dominante se produit pour des températures du point de rosée au-dessous de 0 °C pour plus de 75% des périodes mesurées (mixte ou non). Les conditions à la surface pour la neige et le grésil sont toutefois similaires. Les plages de températures et de températures du point de rosée associées à l'occurrence de grésil sont confondues avec les plages associées à l'occurrence de neige (Figure 4.8).

4.4 Macrophotographie et observations manuelles

La Figure 4.10 combine les observations manuelles avec le nombre de particules détectées par le disdromètre laser pendant la série d'événements. La neige et la pluie étaient les principaux types d'hydrométéores observés entre le 25 mars et le 6 avril 2021.

On peut classifier davantage les précipitations solides à l'aide de la macrophotographie. Une analyse des macrophotographies est présentée ici afin d'illustrer la grande variété de types de précipitation observés en à peine 10 jours au cours de la même série d'événements (Figure 4.11). La grande majorité des hydrométéores photographiés étaient des cristaux irréguliers de neige et ce, peu importe les conditions permettant de la neige. Des cristaux réguliers ont également été observés. L'autre type de particule le plus

fréquent était du grésil (rappelons que cela dénote seulement une occurrence et ne tient pas compte de la fraction relative de l'hydrométéore dans la photographie). L'analyse des microphotographies a révélé que du grésil était présent beaucoup plus fréquemment que ce qui avait été noté a priori par les observations manuelles. Des particules de grésil sont souvent mêlées à de la neige en dehors des périodes de grésil identifiées par l'observation. Au moment de l'observation, plusieurs de ces particules avaient été prises pour des cristaux de neige en train de fondre ou des gouttelettes d'eau. Or, l'observation de la fonte d'une particule a révélé que l'eau liquide est rapidement absorbée par le tapis de collecte et que les sphères observées sur les tapis de collecte étaient donc encore solides. Un exemple de macrophotographie contenant de telles particules de grésil mêlées à la neige est présent à la Figure 4.12.

4.5 Diagnostic des transitions de phase à la station fixe et observations manuelles

Les types de précipitation à la station fixe n'était pas observée manuellement, mais grâce au disdromètre laser optique nous avons en continu des données de taille et de vitesse de chute des hydrométéores lors des cinq événements de la série. Grâce à la méthode d'Ishizaka et al. (2013), décrite à la section 2.3.1, on peut évaluer les types de précipitation au sol à la station fixe de même que le type et l'heure approximative des transitions de phase. On vérifie par la suite si les transitions de phase ont eu lieu aux deux sites et si elles ont eu lieu simultanément.

4.5.1 Événement 1

L'analyse du CFM à la station fixe montre que les précipitations étaient liquides pour l'ensemble de l'Événement 1 tel qu'observé à la station MUST (Figure 4.13).

4.5.2 Événement 2

L'analyse du CFM à la station fixe durant l'Événement 2 montre une transition de phase (Figure 4.14a) qui se compare à celle observée à la station MUST. Une analyse plus détaillée de la transition montre que celle-ci débute vers 0210 UTC le 27 mars 2021 et se termine vers 0250 UTC le 27 mars 2021 (Figure 4.14b). À la station MUST, la première observation de neige mêlée à la pluie a lieu à 0200 UTC le 27 mars 2021, de la neige seule est observée à 0230 UTC le 27 mars 2021.

4.5.3 Événement 3

Lors de l'Événement 3, deux périodes de grésil ont été observées à la station MUST et ces transitions correspondent à l'analyse des CFM à la station fixe (Figure 4.15a). Entre 2340 UTC le 28 mars 2021 et 0050 UTC le 29 mars 2021, tous les CFM (sauf 1) se situent entre les courbes de vitesse de la neige roulée et de la pluie (Figure 4.15b). À la station MUST, un mélange de neige et de grésil est observé entre 0030 UTC et 0120 UTC le 29 mars 2021. Puis entre 0550 UTC et 0650 UTC le 29 mars 2021 les CFM se situent entre les courbes de la neige et de la pluie tandis que du grésil est observé de façon intermittente à la station MUST entre 0540 UTC et 0740 UTC le 29 mars 2021 (Figure 4.15c). Notons qu'à partir de 0700 UTC le 29 mars 2021 les précipitations observées à la station MUST étaient légères et peuvent ne pas avoir été détectées par le disdromètre laser optique.

4.5.4 Événement 4

Lors de l'Événement 4, une transition pluie-neige et une période de grésil ont été observées à la station MUST et ces transitions sont représentées par l'analyse des CFM (Figure 4.16a). Entre 1040 UTC et 1110 UTC le 1 avril 2021, les CFM se déplacent de la courbe de pluie vers la courbe de neige roulée (Figure 4.16b). À la station MUST, de la neige mélangée à la pluie est observée à 1110 UTC le 1 avril 2021 puis de la neige seule est observée à 1120 UTC le 1 avril 2021. Entre 1650 UTC et 1710 UTC le 1 avril 2021, les CFM se déplacent entre les courbes de neige et de pluie tandis que du grésil est observé à la station MUST entre 1650 UTC et 2000 UTC le 1 avril 2021 (Figure 4.16c). Notons qu'à partir de 1830 UTC le 1 avril 2021 les précipitations observées à la station MUST étaient légères et peuvent ne pas avoir été détectées par le disdromètre laser.

4.5.5 Événement 5

Lors de l'Événement 5, une transition neige-grésil-pluie a été observée à la station MUST et l'analyse des CFM à la station fixe montre une transition de précipitations au même moment (Figure 4.17a). À 0420 UTC le 5 avril 2021 le CFM indique toujours de la neige, à 0440 UTC le 5 avril 2021 il s'est rapproché de la pluie et à 0500 UTC le 5 avril 2021 il est en contact avec la courbe de pluie (Figure 4.17b). À la station MUST, du grésil mélangé à la neige est observé à 0410 UTC le 5 avril 2021 puis de la pluie mélangée au grésil est observée à 0440 UTC le 5 avril 2021, enfin de la pluie seule est observée à partir de 0530 UTC le 5 avril 2021.

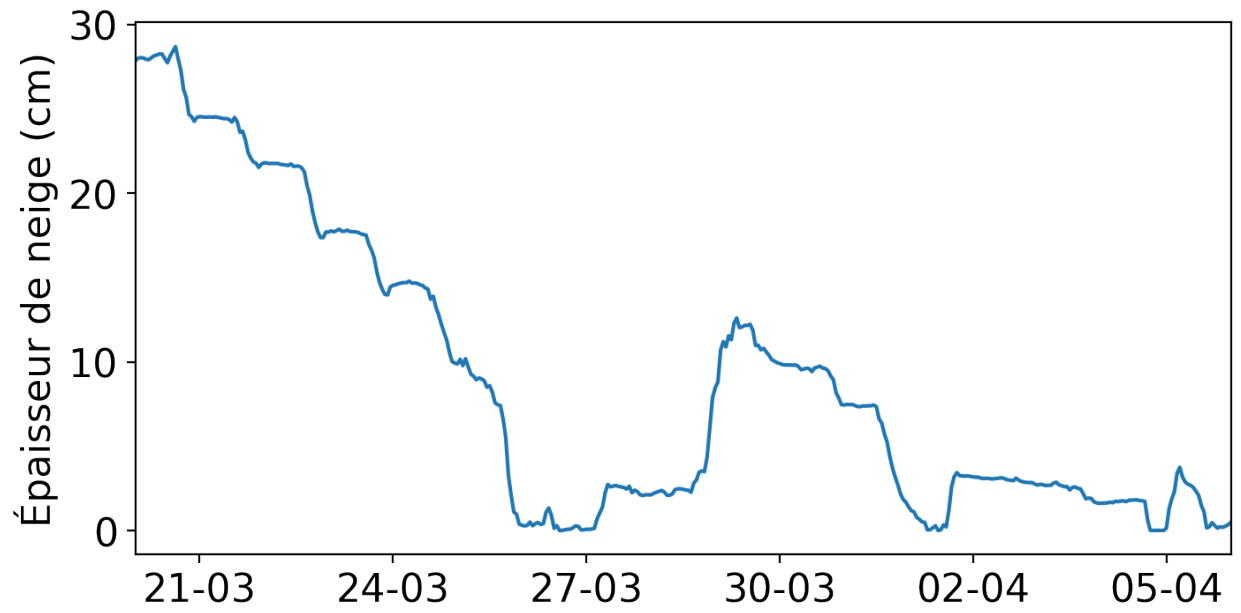


Figure 4.1 Épaisseur de neige au sol (cm) mesurée par le capteur de distance SR50A à la station fixe.

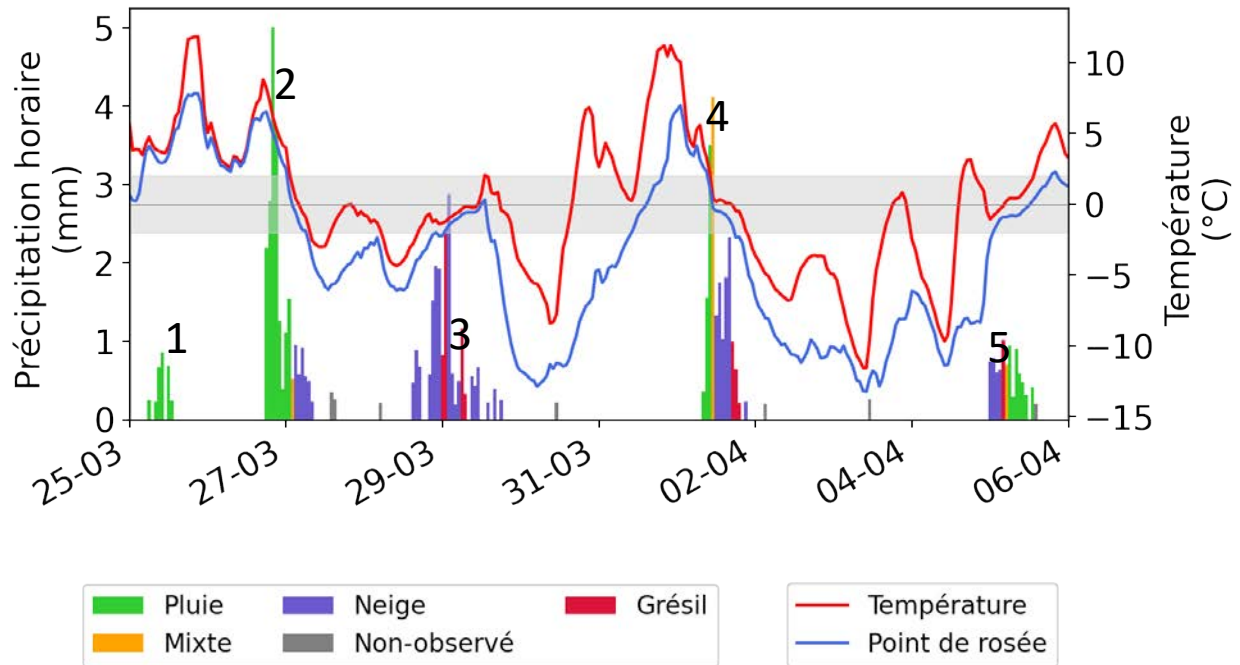


Figure 4.2 Résumé des conditions atmosphériques en surface pendant la série d'événements. Les chiffres identifient les cinq événements. Le taux de précipitation horaire mesuré par le Geonor et le type principal de précipitation observé à la station MUST sont indiqués par les rectangles de couleur. Les courbes rouge et bleue donnent la température et la température du point de rosée mesurées à la station MUST. La zone grise identifie la zone près de 0 °C (entre -2 et 2 °C).

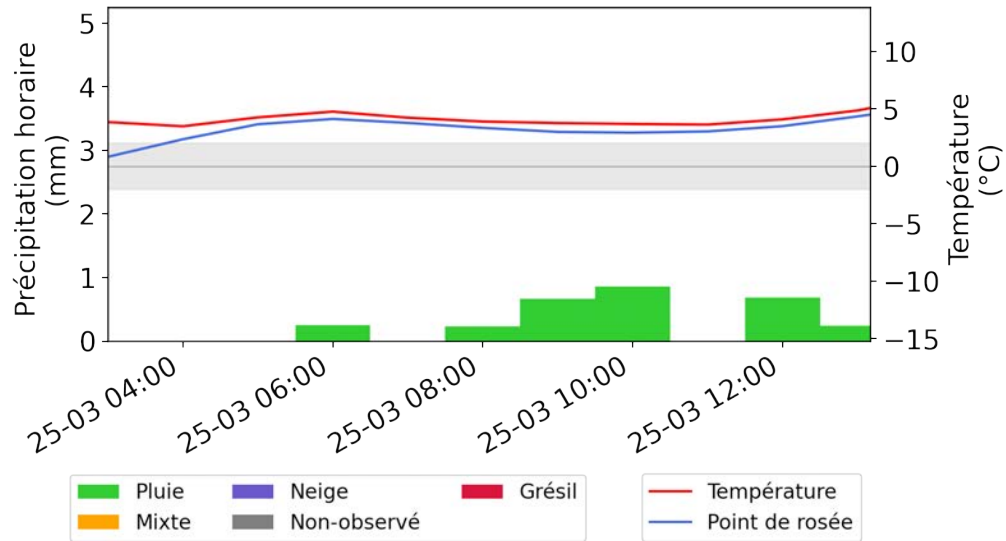


Figure 4.3 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 1. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.

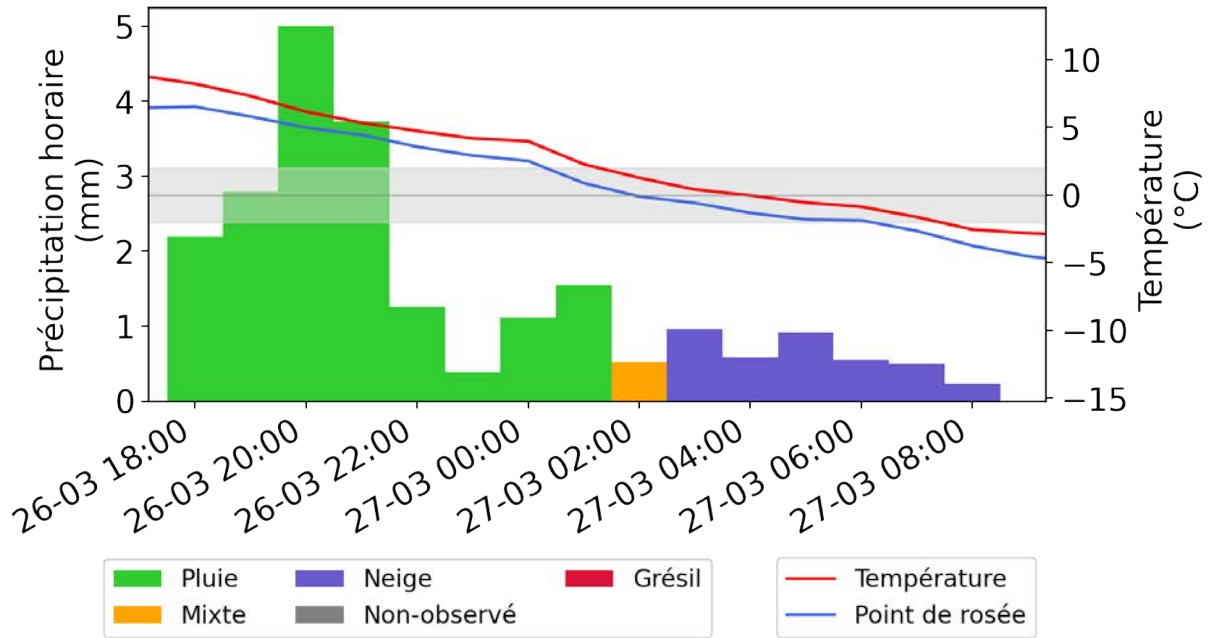


Figure 4.4 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 2. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.

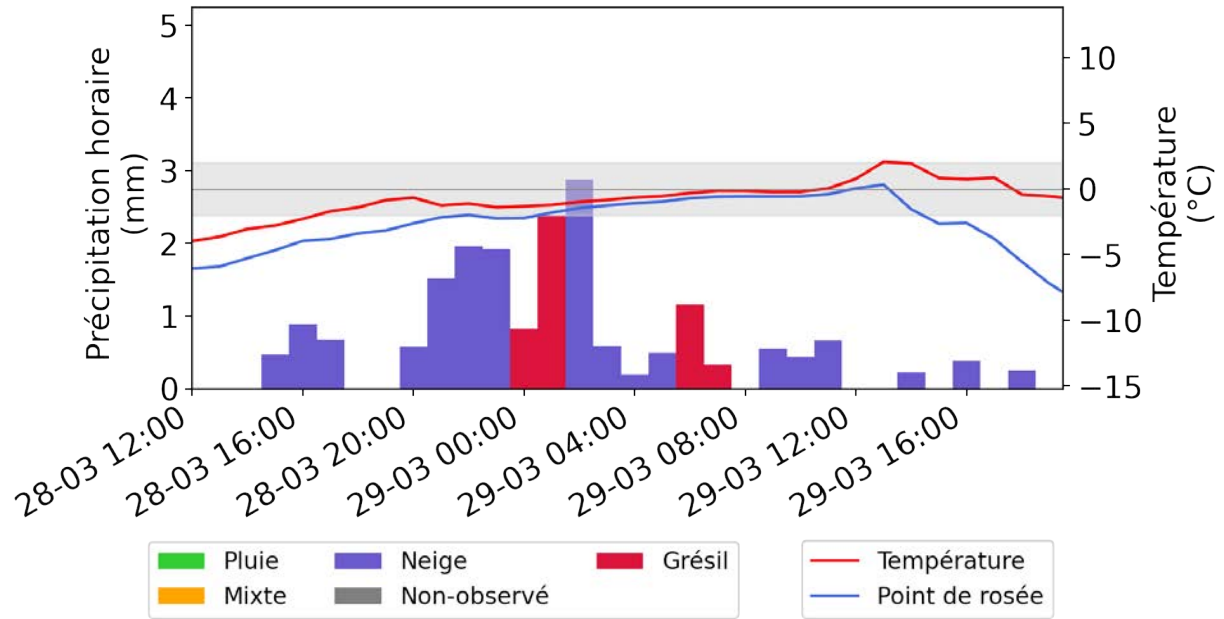


Figure 4.5 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 3. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.

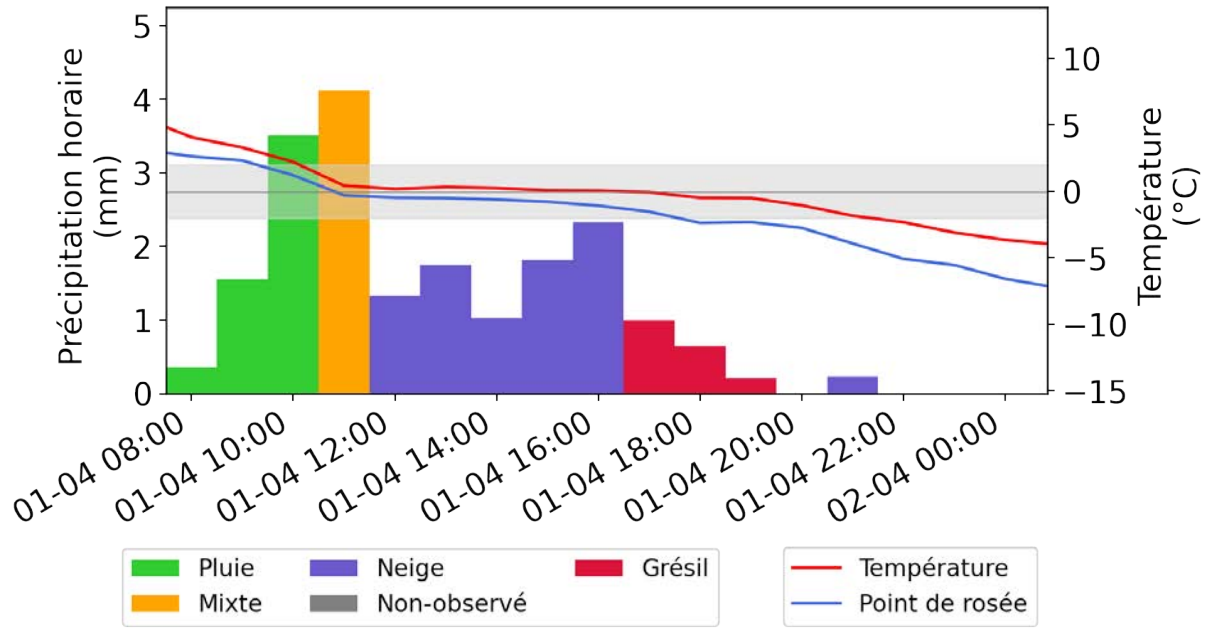


Figure 4.6 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 4. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.

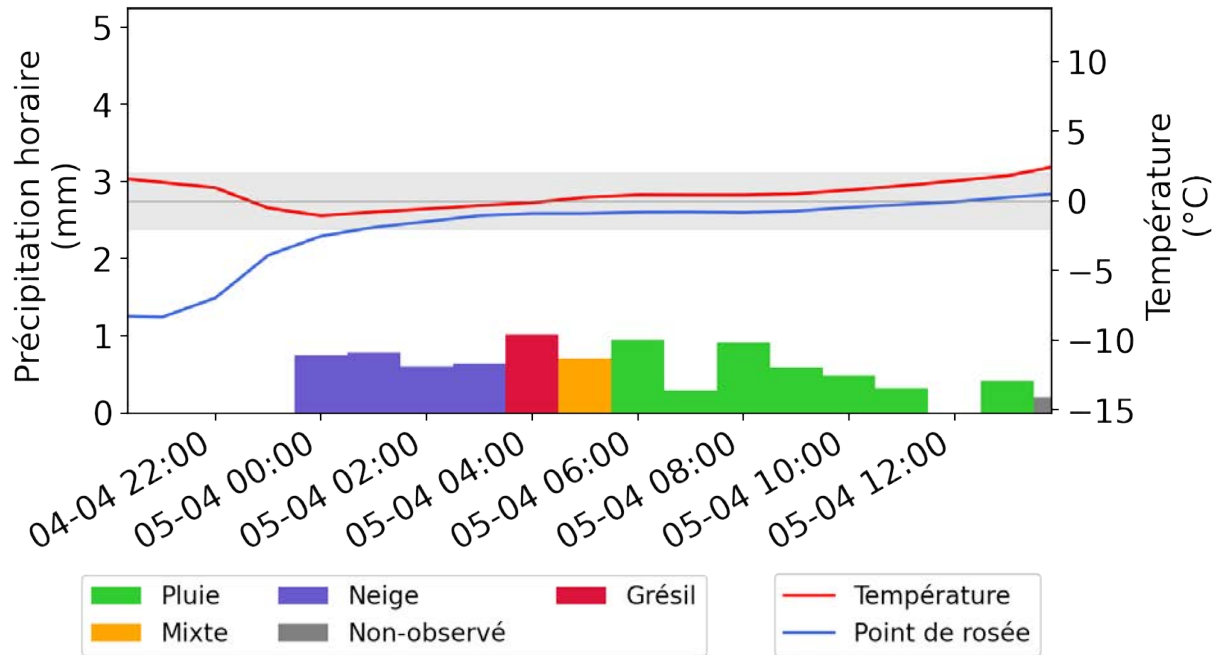


Figure 4.7 Conditions météorologiques au sol pendant l'Événement 5. La courbe rouge est la température (°C) ; la courbe bleue est la température du point de rosée (°C) à 2 m du sol à la station MUST. Les rectangles de couleur donnent l'accumulation horaire (mm) mesurée par le GEONOR à la station fixe. La couleur des rectangles dépend du principal type de précipitations observées à la station MUST.

Conditions - Neige observée

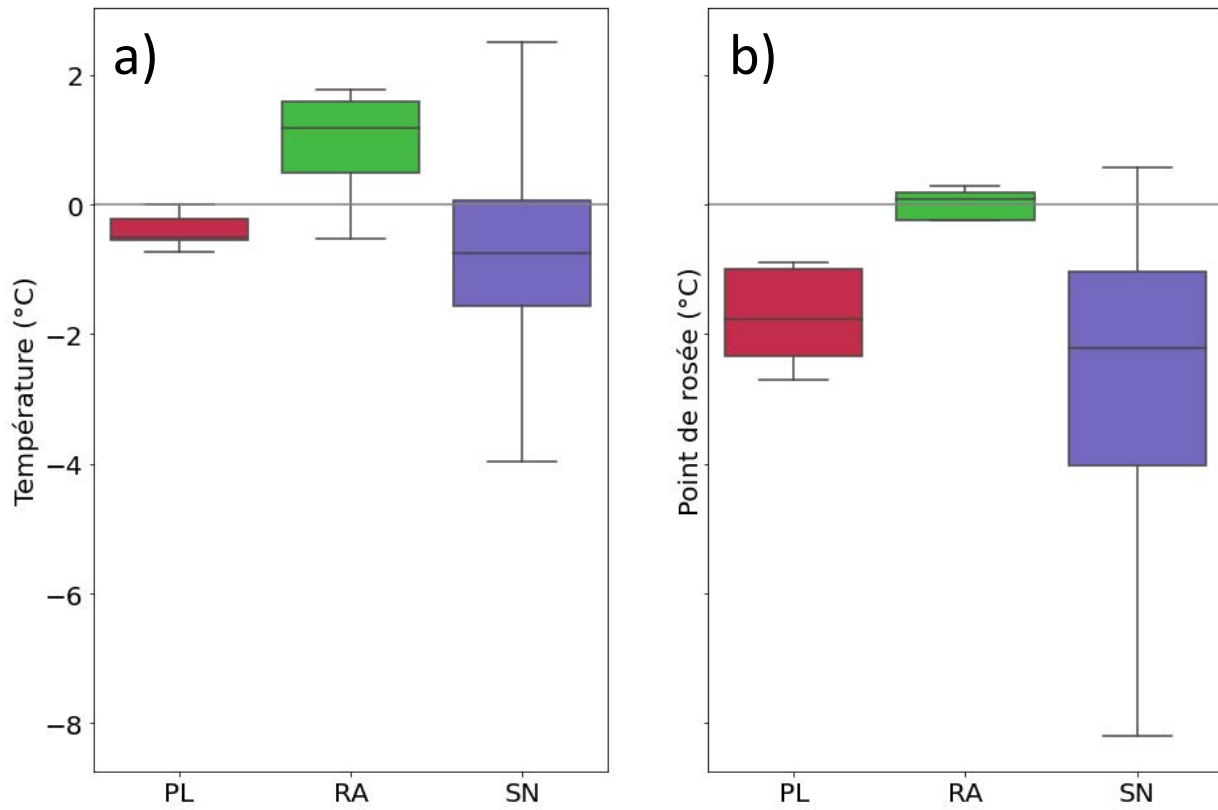


Figure 4.8 Distribution a) des températures et b) des températures du point de rosée au sol enregistrées à la station MUST lorsque de la neige était observée. Le type principal de précipitation observé est indiqué en abscisse. RA : pluie. SN : neige. PL : Grésil.

Conditions - Pluie observée

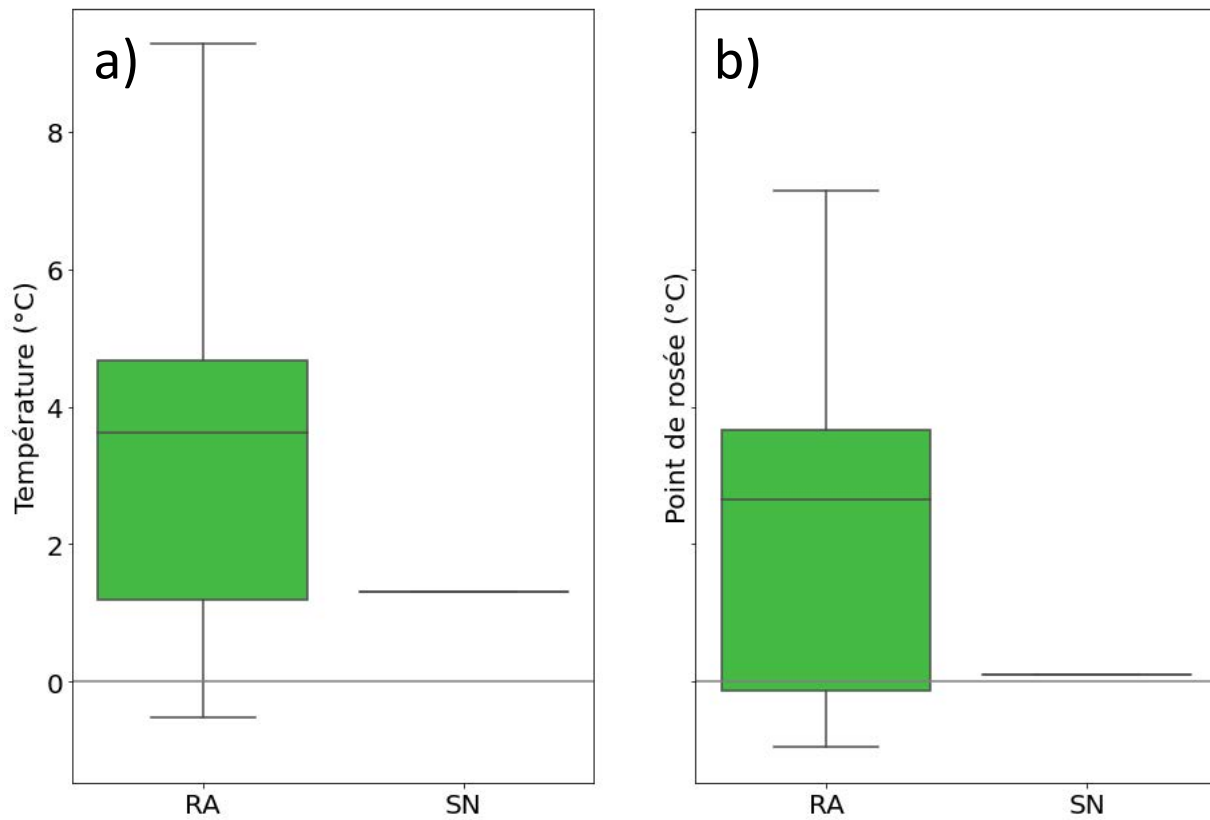


Figure 4.9 Distribution a) des températures et b) des températures du point de rosée (à droite) au sol enregistrées à la station MUST lorsque de la pluie était observée. Le type principal de précipitation observé est indiqué en abscisse. RA : pluie. SN : neige.

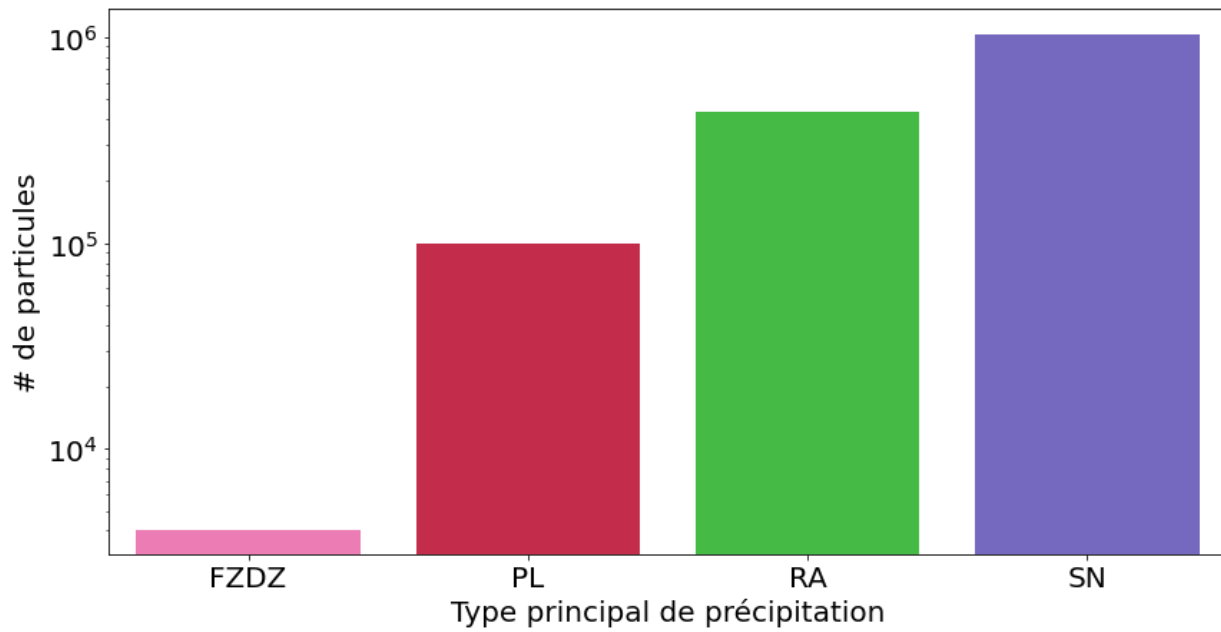


Figure 4.10 Nombre de particules détectées par le disdromètre laser optique pendant l'observation manuelle de différents types de précipitations entre le 25 mars et le 6 avril 2021. Chaque colonne correspond au principal type observé pendant une période de 10 minutes. FZDZ : Bruine verglaçante. PL : Grésil. RA : Pluie. SN : Neige.

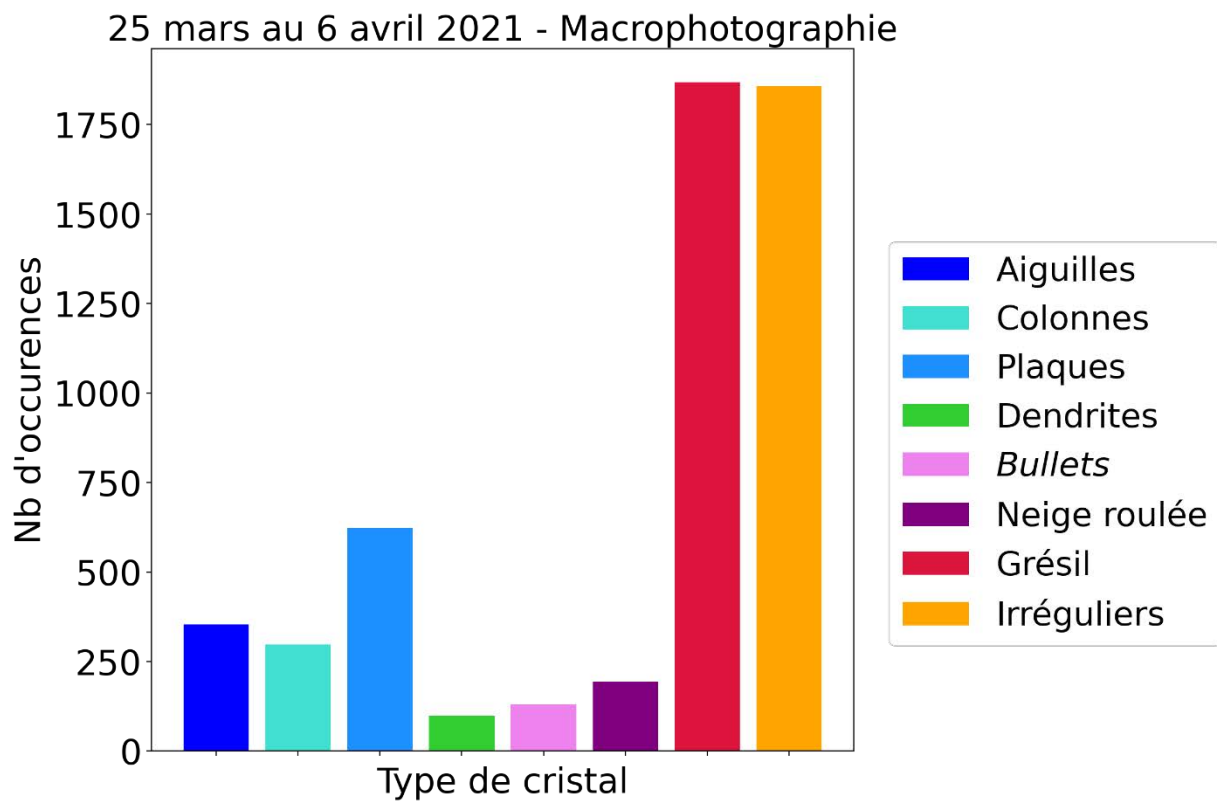


Figure 4.11 Nombre d'occurrences d'un type de cristal sur une macrophotographie. Une photo prise entre le 25 mars et le 6 avril 2021 qui contient au moins un cristal d'un certain type compte comme une occurrence de ce type de cristal.

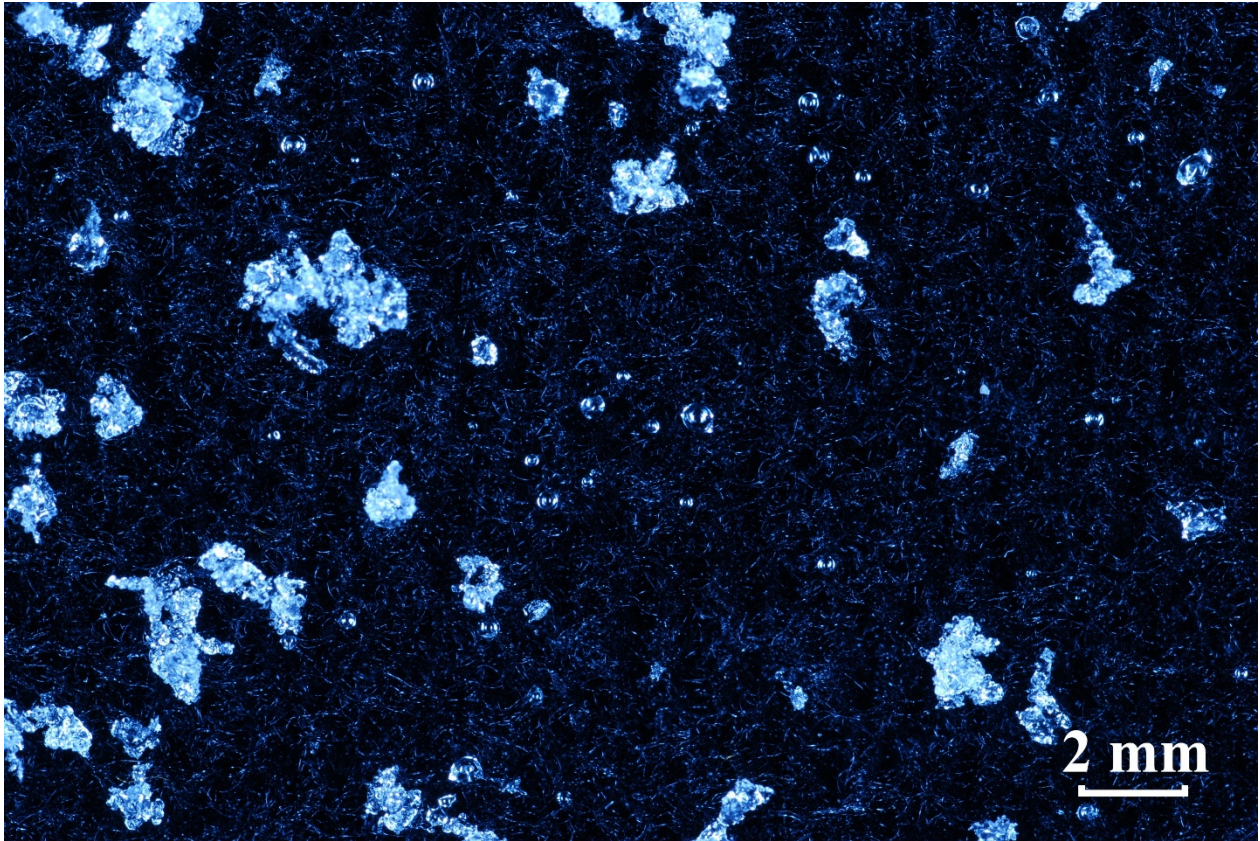


Figure 4.12 Macrophotographie prise durant l'Événement 2 à 0423 UTC le 27 mars 2021. La photo contient des cristaux irréguliers et du grésil. Aucune période de grésil n'avait été observée manuellement au moment de la prise de cette photo.

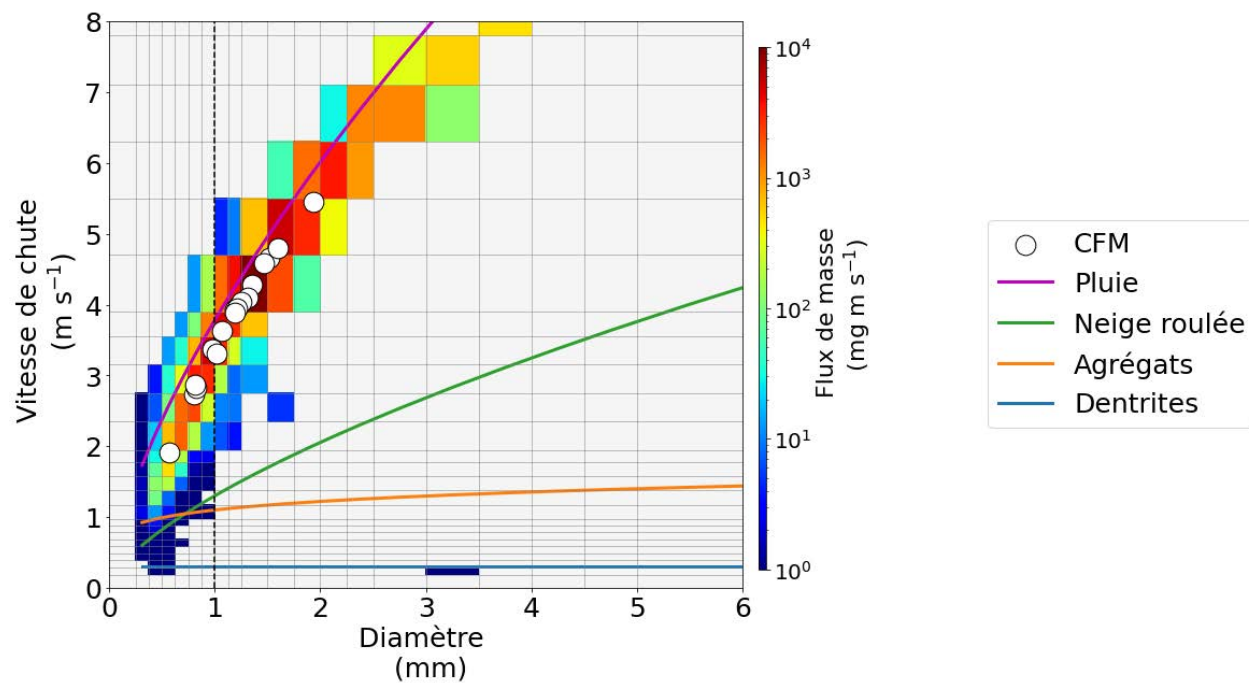


Figure 4.13 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 1. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 0300 UTC à 1310 UTC le 25 mars 2021.

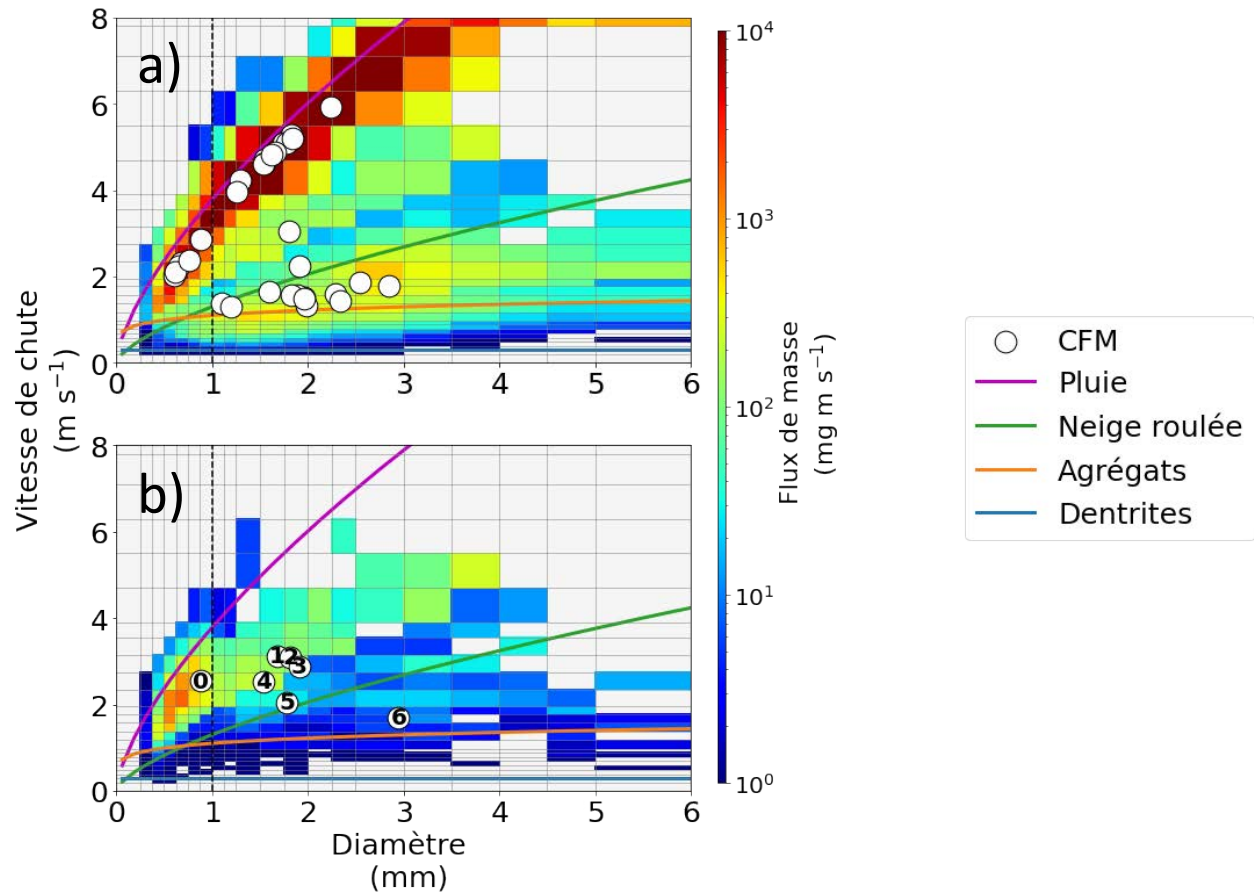


Figure 4.14 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 2. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 1710 UTC le 26 mars 2021 à 0920 UTC le 27 mars 2021. b) Transition pluie-neige de 0200 UTC à 0300 UTC le 27 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0200 UTC le 27 mars 2021; « 6 » correspond à 0300 UTC le 27 mars 2021).

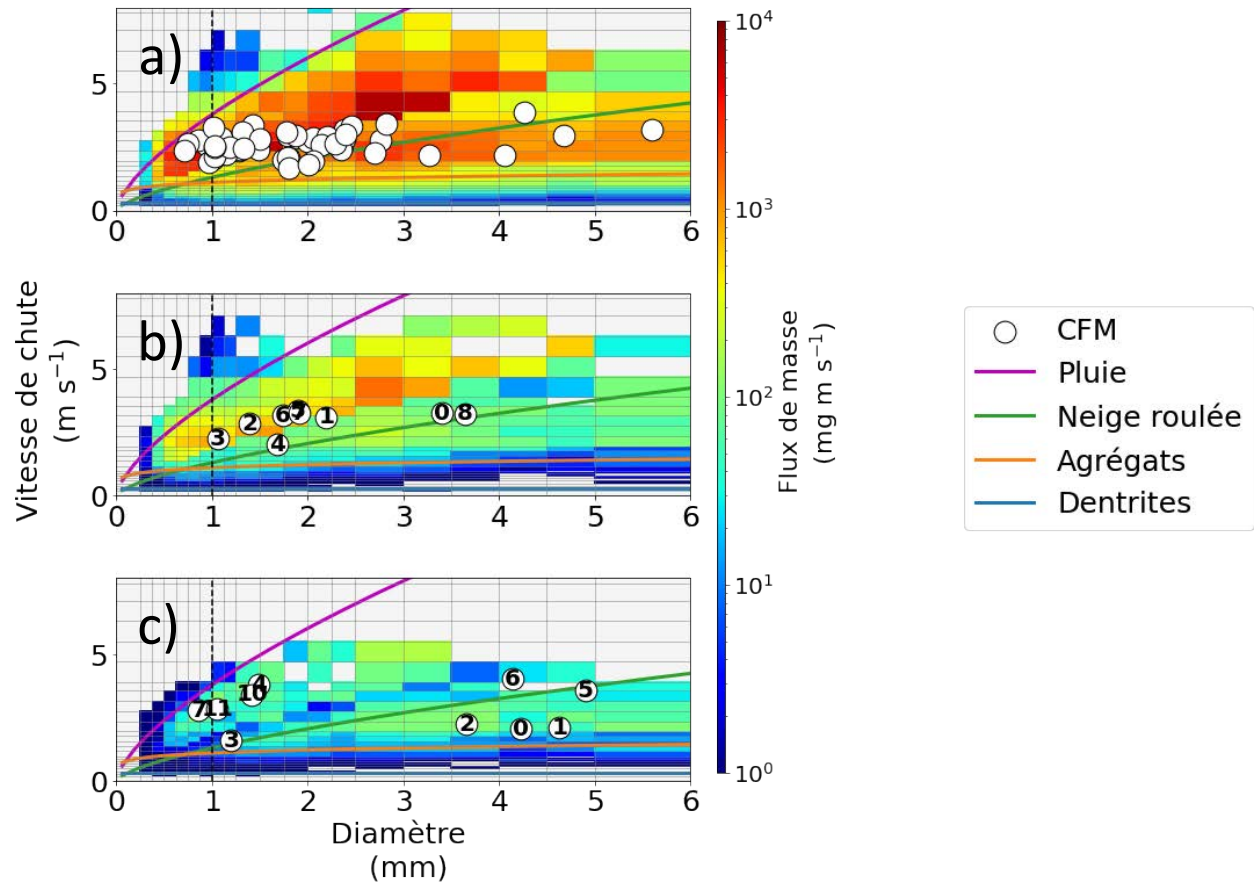


Figure 4.15 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 3. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 1210 UTC le 28 mars 2021 à 1930 UTC le 29 mars 2021. b) Transition neige-grésil de 2330 UTC le 28 mars 2021 à 0050 UTC le 29 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 2330 UTC le 28 mars 2021; « 8 » correspond à 0050 UTC le 29 mars 2021). c) Transition neige-grésil de 0500 UTC à 0650 UTC le 29 mars 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0500 UTC le 29 mars 2021; « 11 » correspond à 0650 UTC le 29 mars 2021). Un point manquant indique une absence de données pour la période.

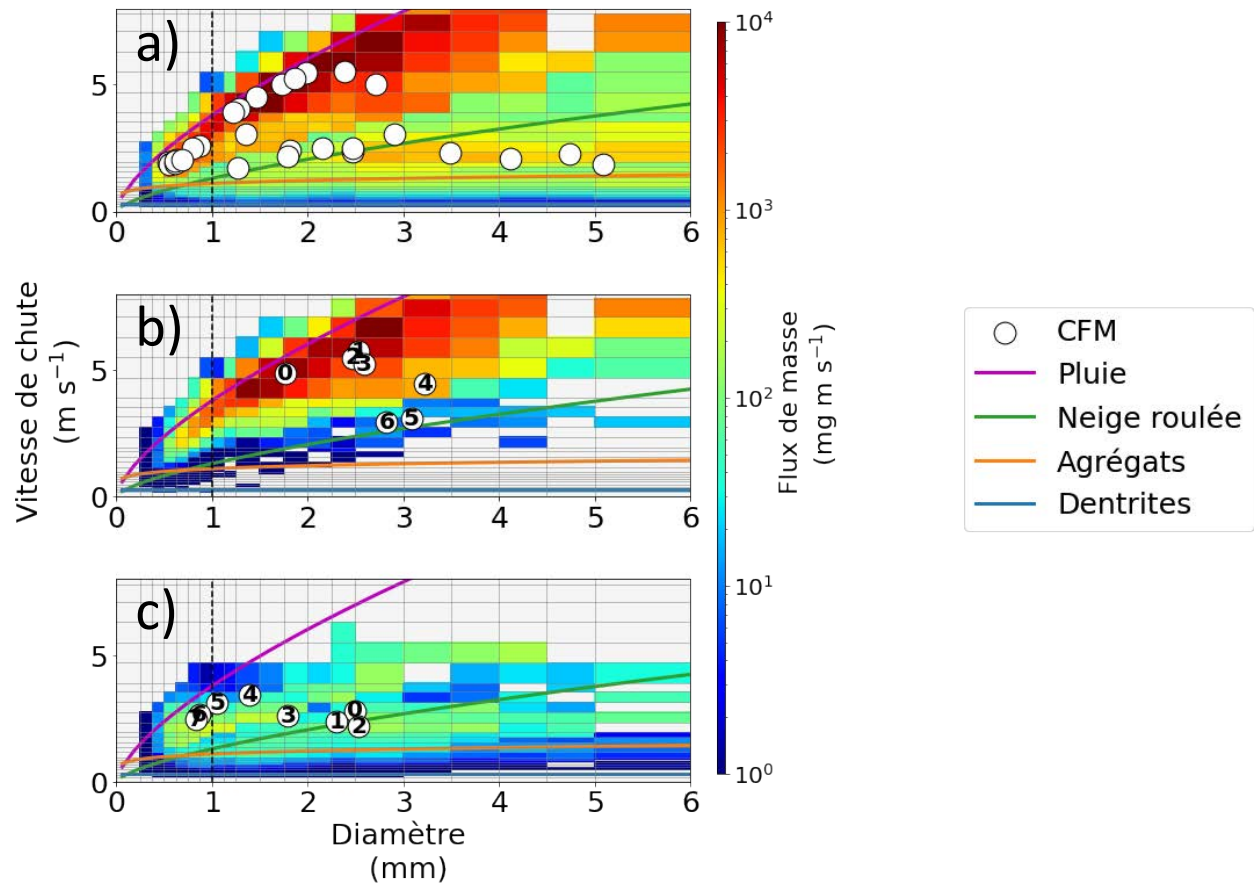


Figure 4.16 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 4. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 0730 UTC le 1 avril 2021 à 0050 UTC le 2 avril 2021. b) Transition pluie-neige de 1030 UTC à 1130 UTC le 1 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1030 UTC le 1 avril 2021; « 6 » correspond à 1130 UTC le 1 avril 2021). c) Transition neige-grésil de 1630 UTC à 1740 UTC le 1 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1630 UTC le 1 avril 2021 ; « 7 » correspond à 1740 UTC le 1 avril 2021).

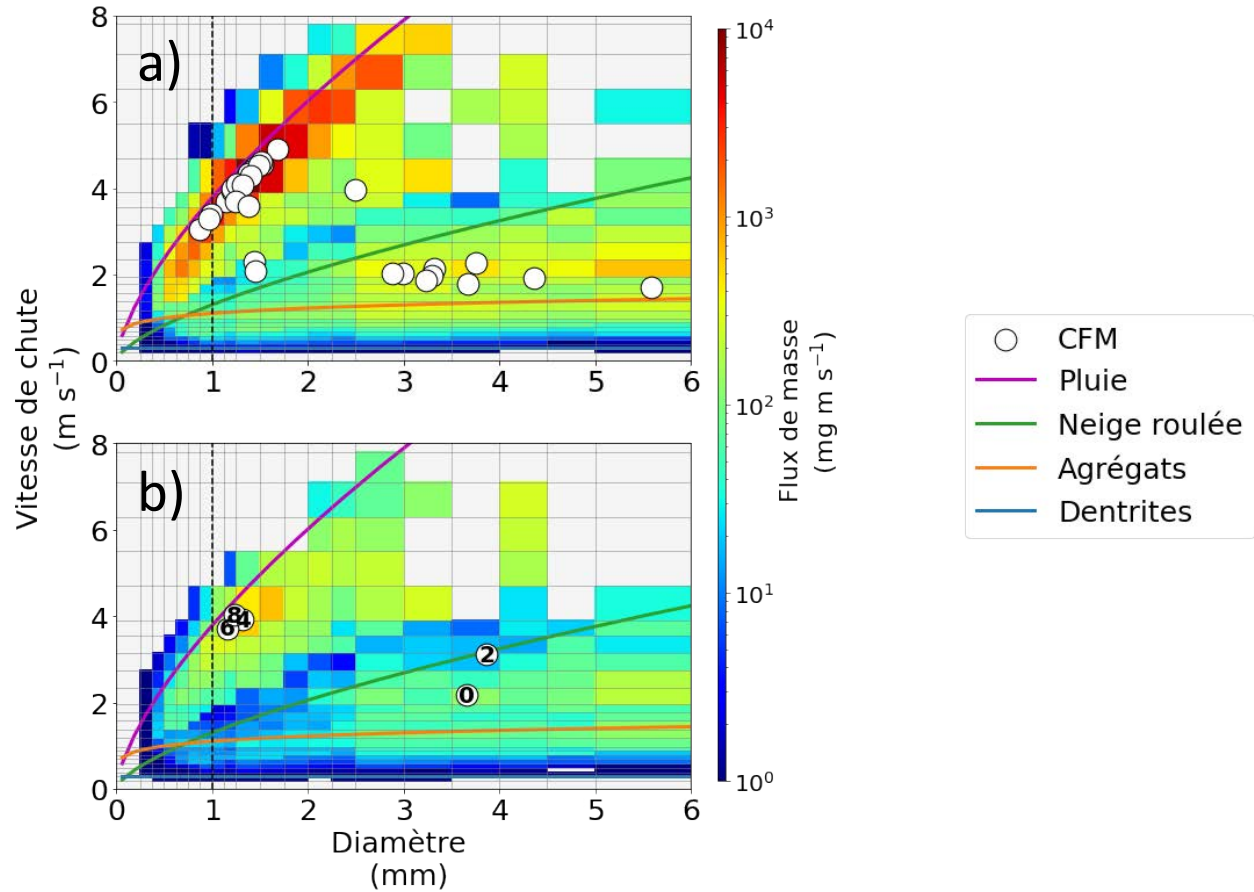


Figure 4.17 Distribution du flux de masse des particules lors de l'Événement 5. a) Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes de 2020 UTC le 4 avril 2021 à 1350 UTC le 5 avril 2021. b) Transition neige-grésil-pluie de 0400 UTC à 0530 UTC le 5 avril 2021. Les points blancs représentent la position des CFM par période de 10 minutes. Pour clarifier la présentation un point sur deux est affiché. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0400 UTC le 5 avril 2021; « 8 » correspond à 0530 UTC le 5 avril 2021).

Tableau 4.1 Nombre d'heures de chaque type de précipitations observées entre le 25 mars et le 6 avril 2021. La colonne « Près de 0 °C » indique les précipitations observées alors que la température au sol était entre -2 et 2 °C. La colonne « Total » inclut toutes les températures au sol.

Précipitations	Près de 0 °C	Total
Bruine verglaçante	0h30	0h30
Mélange pluie-neige	0h50	0h50
Grésil seul	4h10	4h10
Grésil-pluie	0h50	0h50
Grésil-neige	2h10	2h10
Pluie seule	8h40	28h30
Neige seule	37h40	51h10

CHAPITRE 5

TYPES DE PRÉCIPITATION ET CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EN ALTITUDE

Ce chapitre décrit l'évolution des conditions météorologiques en altitude pendant les 5 événements de précipitations de la série analysée dans ce mémoire. Pour chaque événement, nous décrivons les conditions en altitude au-dessus de la station MUST à l'aide des données des radiosondages et des données du MRRpro.

5.1 Radiosondages

Le profil moyen des radiosondages associés à des précipitation au-dessus de la région du haut du fleuve Saint-Jean au moment de la débâcle 2021 est montré à la Figure 5.1a. Ce profil moyen montre que la température moyenne en surface était proche de 0 °C alors qu'elle était au-dessous de 0 °C en altitude. Le profil moyen associé avec de la neige à la surface est montré à la Figure 5.1b. Il représente aussi une inversion de température entre 1 km et 1.5 km d'altitude. La présence de cette couche d'air plus chaud est typique de tempêtes hivernales associées à des fronts chauds. Ce profil de température serait propice à la formation de précipitations verglaçantes et de grésil lorsque la température de la couche d'air chaud dépasse 0 °C. Le profil de température moyen associé à de la pluie à la surface (Figure 5.1c) n'a pas d'inversion de température mais est composé d'une couche d'air chaud ($T > 0$ °C) à la surface.

La température et la température du point de rosée moyen jusqu'à 1 km au-dessus de la surface pour la neige et la pluie au sol sont montrées à la Figure 5.2 et à la Figure 5.3. Pour chaque observation manuelle aux 10 minutes coïncidant avec un radiosondage, nous avons calculé la température et la température du point de rosée moyen entre 150 m et 1000 m. Les 150 premiers mètres sont exclus en raison du bruit important observé dans les données des radiosondages.

On remarque une nette différence entre la pluie et la neige. Lorsque de la pluie était présente au sol, la température moyenne du premier kilomètre au-dessus de la surface était supérieure à 0 °C pour plus de 75% des périodes observées et la température médiane du point de rosée était supérieur à 0 °C (Figure 5.2). En revanche, Lorsque de la neige était présente au sol, tant la température moyenne que la température du point de rosée étaient inférieures à -1 °C pour l'ensemble des périodes (Figure 5.3).

Maintenant que nous avons une idée des conditions moyennes de température de l'air et de la température du point de rosée en altitude durant la série d'événements de précipitations, nous pouvons étudier un événement de précipitations à la fois. Pour ce faire, les profils de température, de vitesse et direction du vent sont montrés de la Figure 5.4 à la Figure 5.8.

L'Événement 1 n'a présenté que de la pluie. La température de l'air entre la surface et 1.5 km ne descend jamais sous 0 °C pendant toute la durée des précipitations (Figure 5.4). On remarque une inversion de température proche de la surface qui s'atténue alors que la température de l'air diminue.

L'Événement 2 présentait une transition pluie-neige avec une température de surface décroissante pendant la durée des précipitations. La température diminue également en altitude pendant la durée de l'événement (Figure 5.5). Une inversion de température est présente en début d'événement entre 1,0 km et 1,5 km (2100 UTC le 26 mars 2021) et s'atténue alors que l'air se refroidit (0000 UTC le 27 mars 2021). L'inversion de température s'intensifie à nouveau et l'altitude de son maximum augmente alors que la température continue de chuter (0200 UTC, 0400 UTC et 0600 UTC le 27 mars 2021).

L'Événement 3 comportait seulement des précipitations solides. Tandis que la température au sol a augmenté durant presque toute la durée des précipitations, la température en altitude entre 1,0 et 2,0 km a d'abord chuté entre 1800 UTC le 28 mars 2021 et 0300 UTC le 29 mars 2021 (Figure 5.6). Entre 0300 UTC et 0600 UTC le 29 mars 2021, la température de l'air entre 1,5 et 2,0 km remonte jusqu'à 0 °C. Cette couche isotherme relativement épaisse correspond à l'altitude où il y a de l'advection d'air chaud. À ce moment, l'advection d'air chaud était maximale, mais la chaleur latente de fusion des hydrométéores empêche probablement la température de passer au-dessus de 0 °C. La fusion en altitude est suggérée par la présence de grésil au sol. Entre 1800 UTC le 28 mars 2021 et 0000 UTC le 29 mars 2021, la température de l'air entre 2,0 et 2,5 km a augmenté jusqu'à 0 °C. La formation d'une couche isotherme à 0 °C indique une dissipation de chaleur latente par la fusion d'hydrométéores. Du grésil a été observé à ce moment. À 0900 UTC le 29 mars 2021, l'advection de température en altitude devient négative et ce moment correspond à une diminution de température en altitude jusqu'à la fin de l'événement.

Au début des précipitations de l'Événement 4, une inversion de température est présente entre 0,5 km et 1,0 km (Figure 5.7). L'ensemble de la couche d'air du sol jusqu'à 2,0 km est au-dessus de 0 °C et seule de la pluie est observée. La température de l'ensemble du profil décroît entre 0900 UTC et 1500 UTC le 1 avril 2021. Après une transition classique pluie-neige, l'advection d'air chaud n'est plus contrée par la fusion

des hydrométéores et la température remonte au-dessus de 0 °C entre 1,5 et 2,0 km à 1800 UTC le 1 avril 2021. La présence de cette couche de fonte au-dessus d'une épaisse couche de regel correspond à au moment où du grésil a été observé en surface. Les précipitations ont pris fin après cette période de grésil.

L'Événement 5 présente une transition neige-grésil-pluie. La température a augmenté sur l'ensemble du profil entre le début et la fin de l'événement, mais la température a augmenté plus vite dans la couche autour de 1,0 km d'altitude et a intensifié l'inversion de température (Figure 5.8). Vers 0600 UTC le 5 avril 2021, une couche de fonte est formée au-dessus d'une couche de regel qui correspond au moment de l'observation de grésil au sol. La température au sol a continué de monter et à 0900 UTC le 5 avril 2021, malgré la présence continue de la couche de fonte, la couche au-dessous n'était probablement pas assez froide pour qu'un noyau glaçogène provoque le gel des précipitations liquides. Ainsi, seulement de la pluie était observée.

5.2 Micro-radar météorologique (MRR-pro)

La présence de précipitations en altitude a été détectée par le micro-radar météorologique (MRRpro) à la station MUST. Tous les types de précipitation analysés (pluie, neige, grésil) sont associés à une augmentation de la réflectivité équivalente, de la vitesse de Doppler et de la largeur spectrale (Figure 5.9) avec l'altitude qui diminue.

Les contours de fréquence normalisée (CFAD) pour la réflectivité, la vitesse de Doppler et la largeur spectrale montrent les profils typiques de ces trois paramètres pour la présence au sol de pluie (Figure 5.10), de neige (Figure 5.11) et de grésil (Figure 5.12). Le profil de réflectivité est similaire pour tous les types de précipitation (Figure 5.10a, Figure 5.11a, Figure 5.12a). Il est cependant possible de diagnostiquer la phase des précipitations en notant l'augmentation de la vitesse verticale associée aux précipitations liquides près de la surface (Figure 5.10b). La largeur spectrale (ou la variance de la vitesse verticale) augmente davantage près de la surface pour les précipitations liquides que pour les précipitations solides (Figure 5.10c). Les profils de vitesse verticale et de largeur spectrale pour la neige ne montrent qu'une légère augmentation près de la surface (Figure 5.11b et c). L'identification du type de précipitations solides (neige ou grésil) grâce aux données du micro-radar météorologique est cependant plus difficile. On note que la vitesse verticale et la largeur spectrale du grésil près de la surface sont intermédiaires entre celles de la pluie et de la neige (Figure 5.12b et c).

En prenant les valeurs moyennes de ces paramètres (réflectivité équivalente, vitesse de Doppler, largeur spectrale) entre 150 et 1000 m pour les périodes de 10 minutes coïncidant avec l'observation de chaque type de précipitations, on peut ainsi mieux visualiser les différences. La distribution de ces valeurs est cohérente avec l'analyse des CFADs faite au paragraphe précédent. La réflectivité équivalente est similaire peu importe le type de précipitations (Figure 5.13). La vitesse verticale est plus grande pour la pluie (75% des vitesses > 3 m/s) que pour la neige (75% des vitesses < 2 m/s) et le grésil semble être intermédiaire sans pouvoir être discriminé par un seuil simple (Figure 5.14). La même chose peut être affirmée par rapport à la largeur spectrale (75% des largeurs $> 0,5$ m/s pour la pluie et 75% des largeurs $< 0,5$ m/s pour la neige) (Figure 5.15).

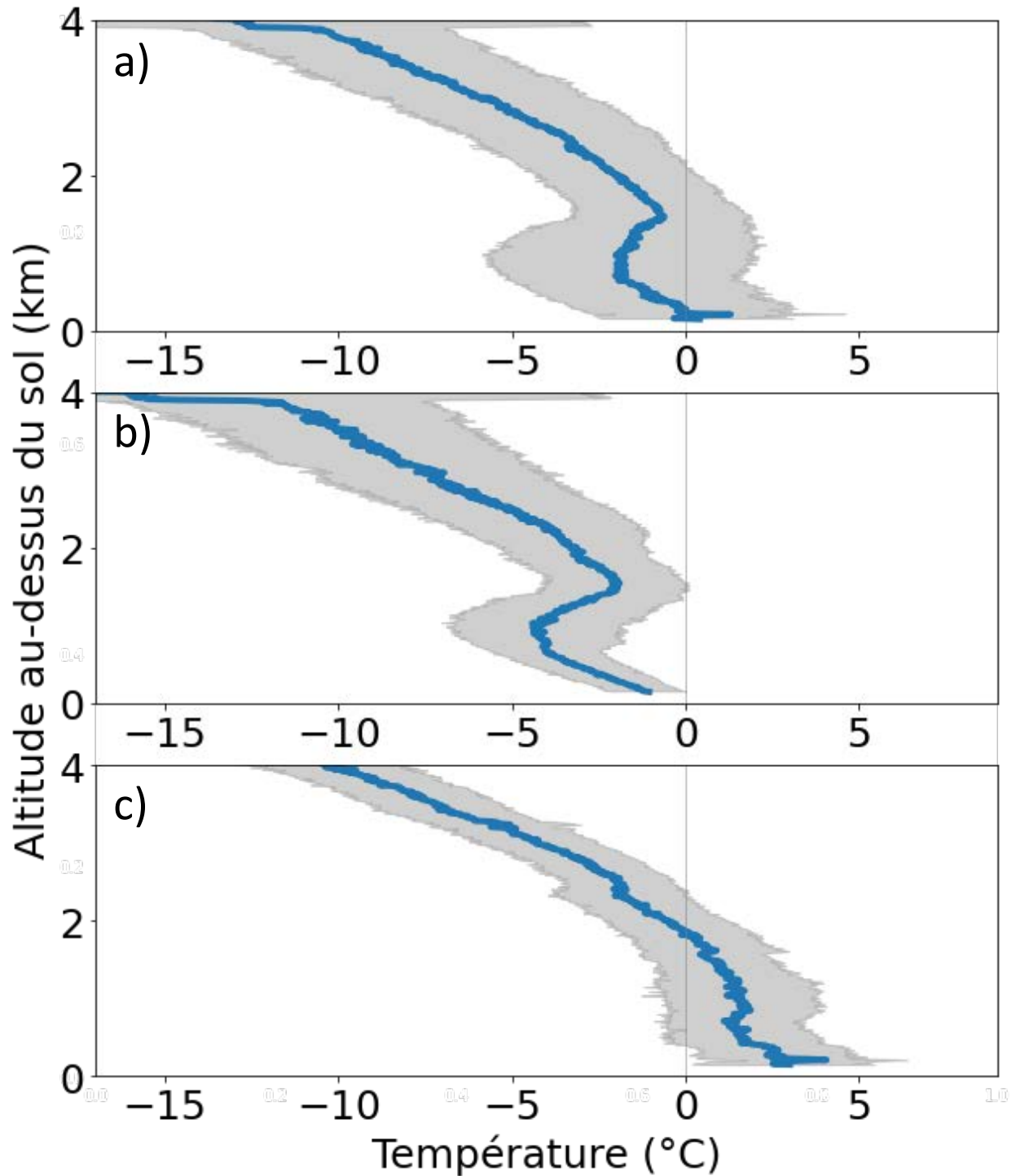


Figure 5.1 a) Profil de radiosondage moyen pour l'ensemble des événements de précipitations du 25 mars au 6 avril 2021 b) Profil de radiosondage moyen correspondant à une observation de neige au sol pour la même période c) Profil de radiosondage moyen correspondant à une observation de pluie au sol pour la même période. La ligne bleue est obtenue à partir de la moyenne des données à cette altitude. La zone grise identifie l'écart type pour cette altitude.

Conditions - Pluie observée

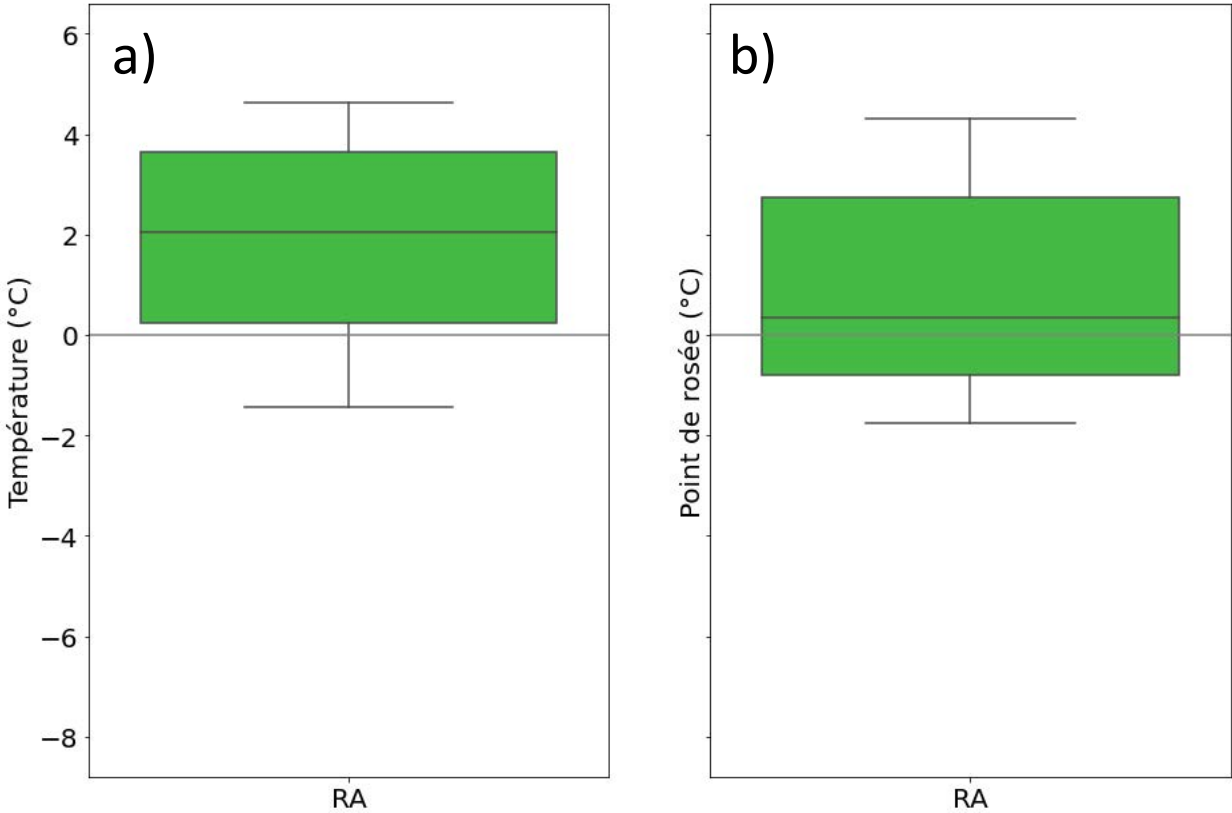


Figure 5.2 a) Température moyenne entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la pluie était observée au sol. b) Point de rosée moyen entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la pluie était observée au sol.

Conditions - Neige observée

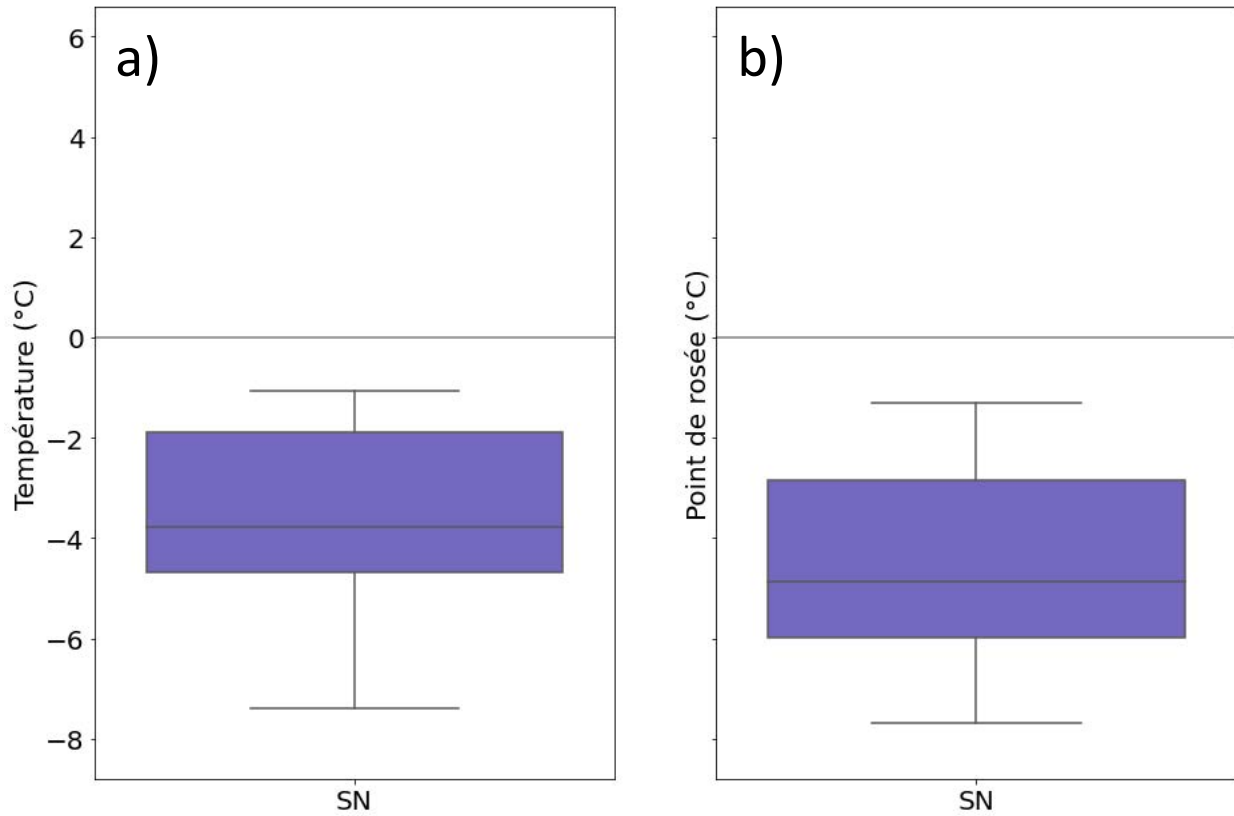


Figure 5.3 a) Température moyenne entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la neige était observée au sol. b) Température moyenne du point de rosée entre 150 et 1000 m par période de 10 minutes lorsque de la neige était observée au sol.

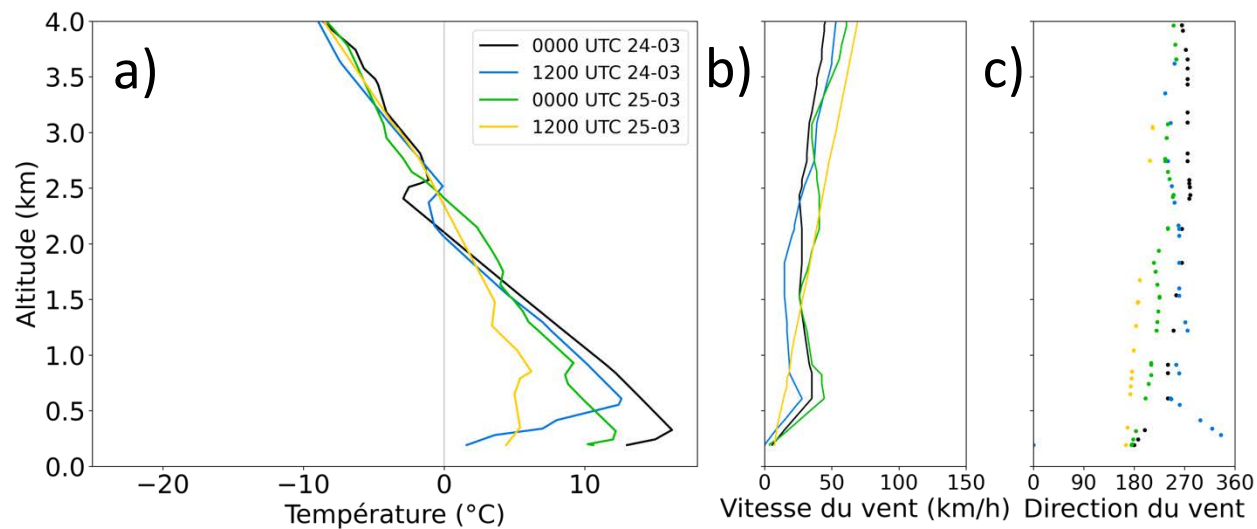


Figure 5.4 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station de Caribou durant l'Événement 1. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.

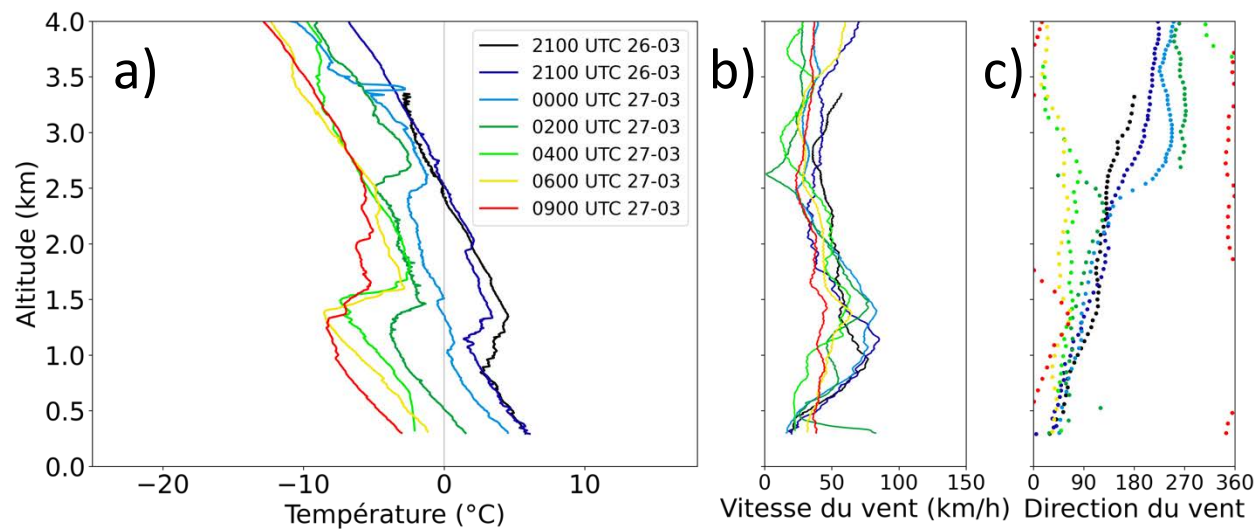


Figure 5.5 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 2. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.

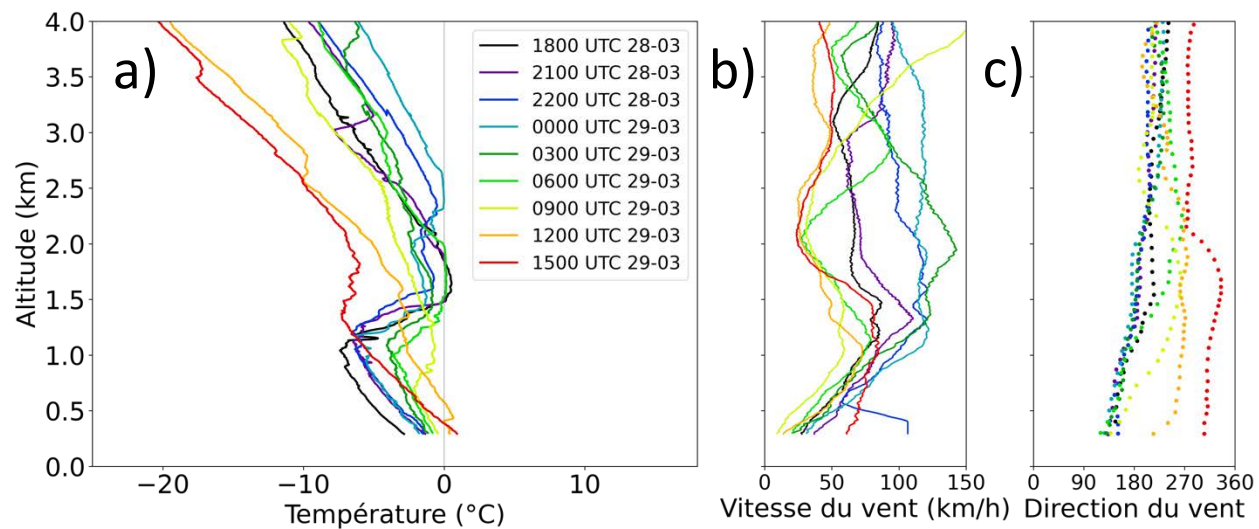


Figure 5.6 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 3. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.

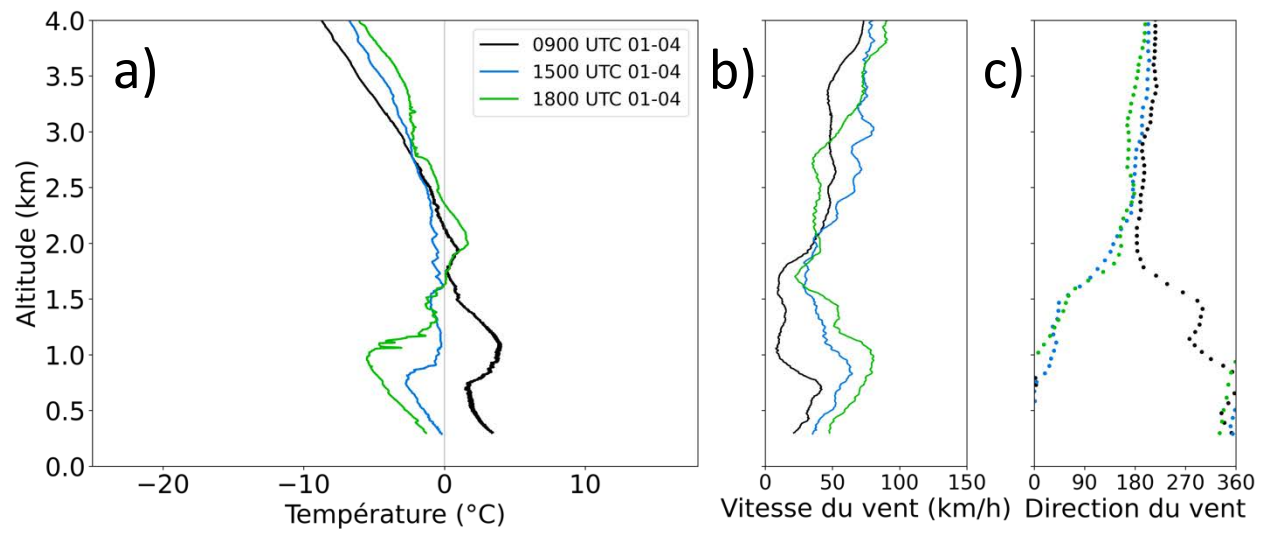


Figure 5.7 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 4. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.

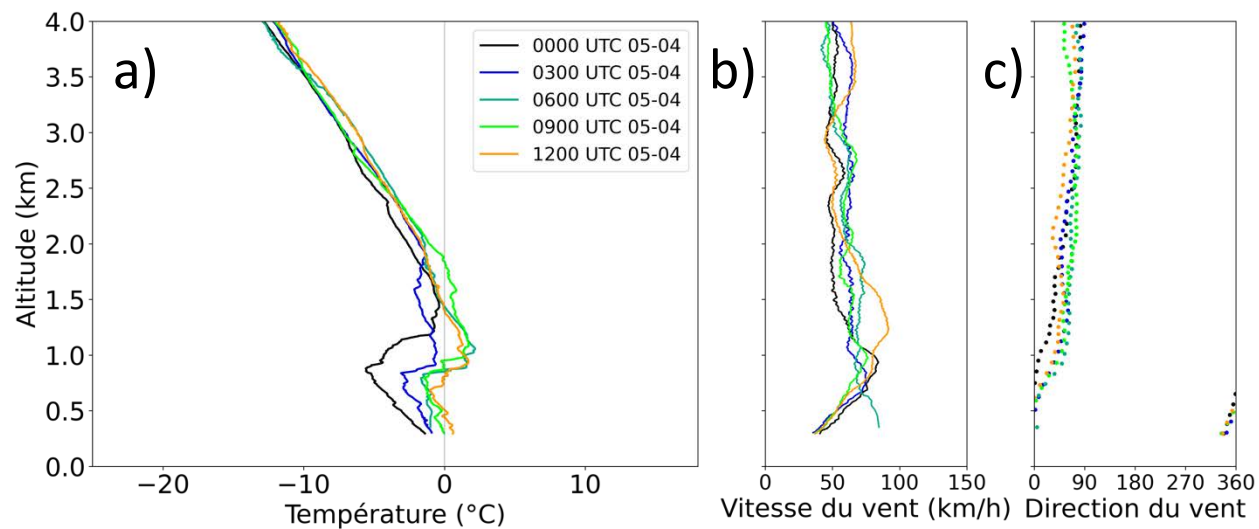


Figure 5.8 a) Température (°C) en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer (km) pour l'ensemble des radiosondages de la station MUST durant l'Événement 5. L'heure des radiosondages correspond au temps synoptique couvert. b) Vitesse du vent (km/h) en fonction de l'altitude. c) Direction d'origine du vent (°) par rapport au nord en fonction de l'altitude.

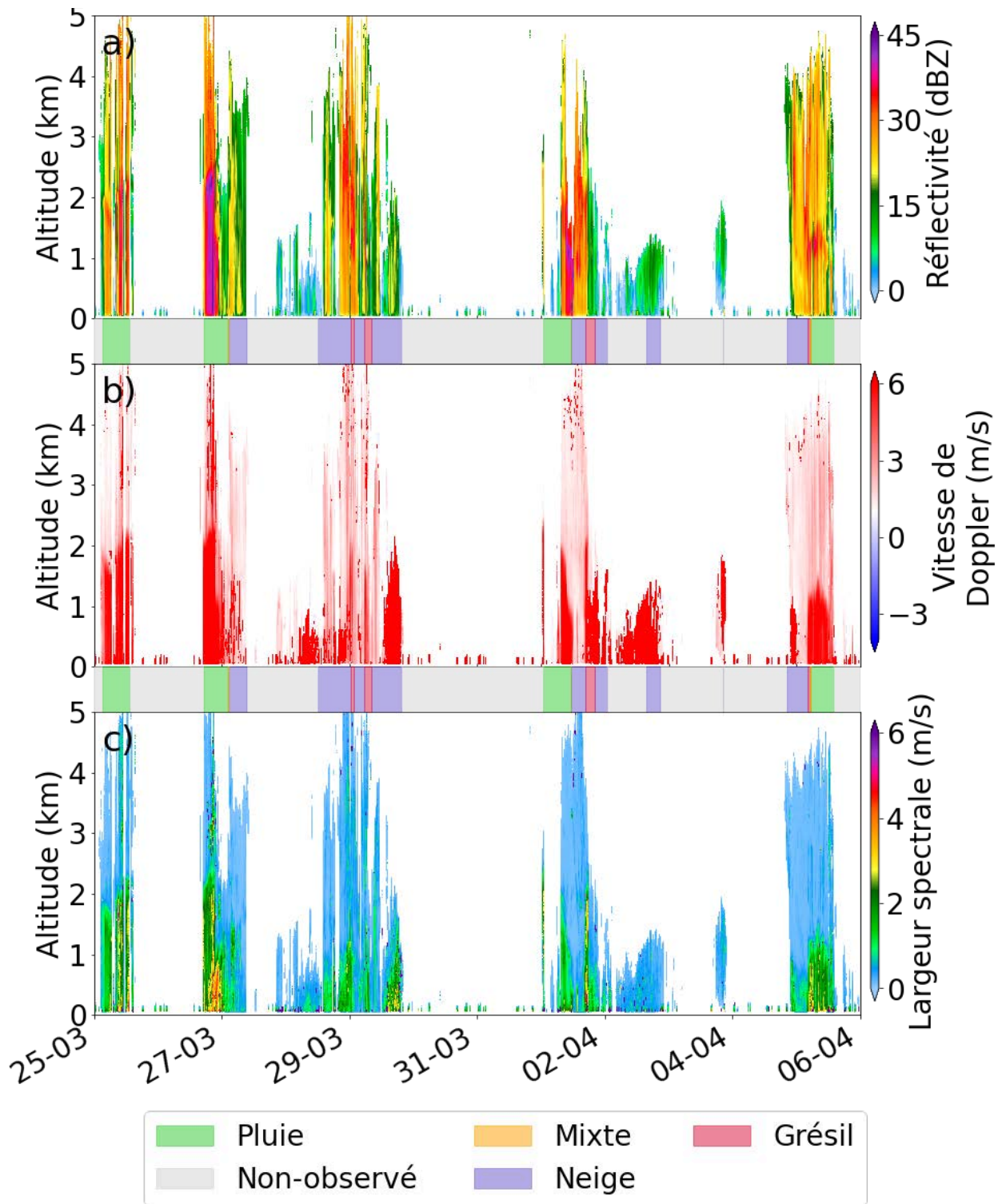


Figure 5.9 Séries temporelles des données mesurées par le MRRpro à la station MUST pour la série d'événements. Le principal type de précipitation observé à la station MUST est indiqué par les zones colorées entre les graphiques. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse de Doppler (m/s) c) Largeur spectrale (m/s)

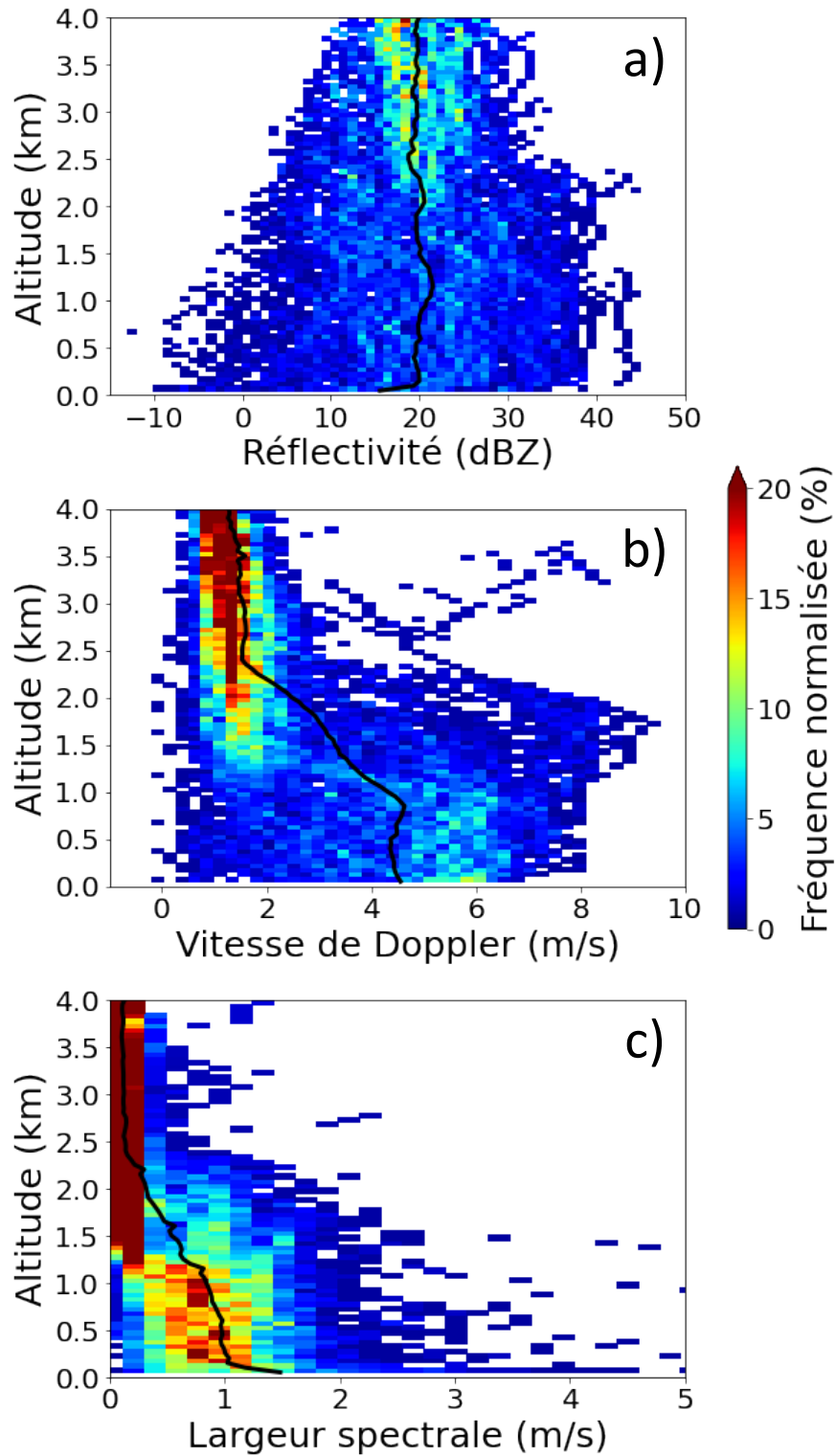


Figure 5.10 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de pluie. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de pluie. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s).

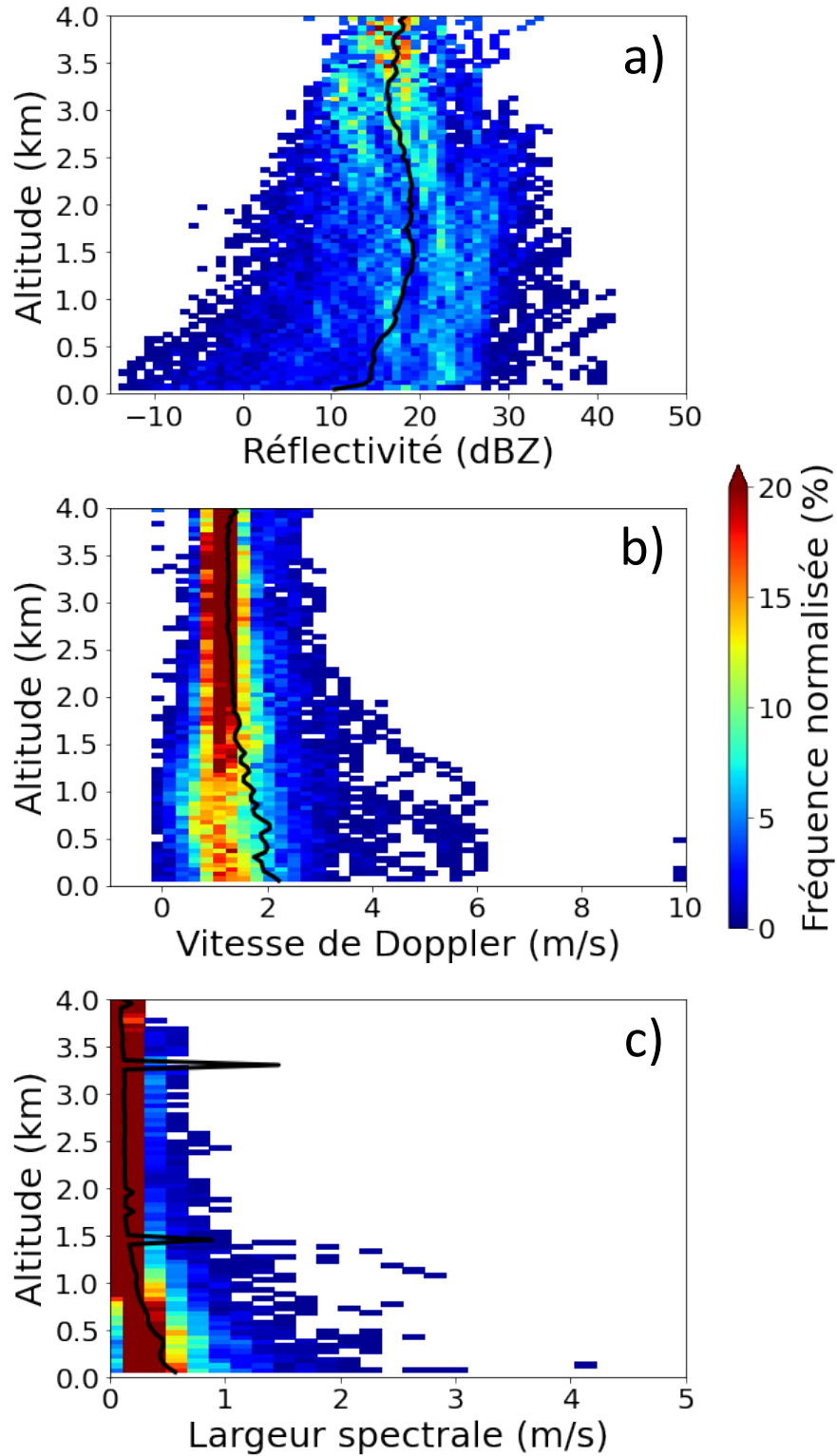


Figure 5.11 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de neige. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de neige. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s).

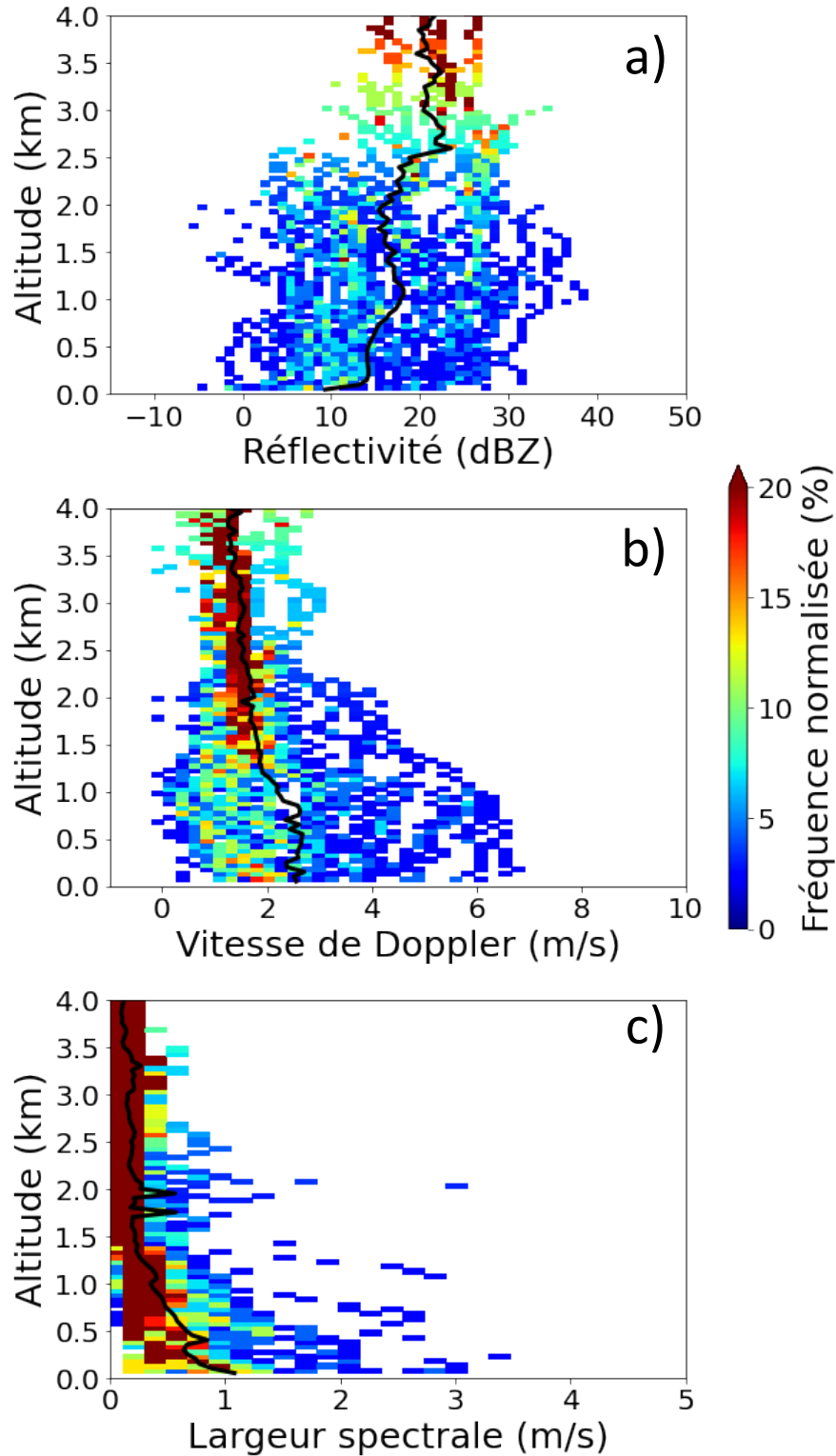


Figure 5.12 Diagrammes de contour de fréquence normalisée des données du MRRpro coïncidant avec l'observation de grésil. Les contours indiquent la proportion des valeurs à cette altitude pour l'ensemble des données enregistrées pendant les périodes de grésil. Les courbes noires indiquent les valeurs moyennes. a) Réflectivité équivalente (dBZ) b) Vitesse verticale (m/s) c) Largeur spectrale (m/s).

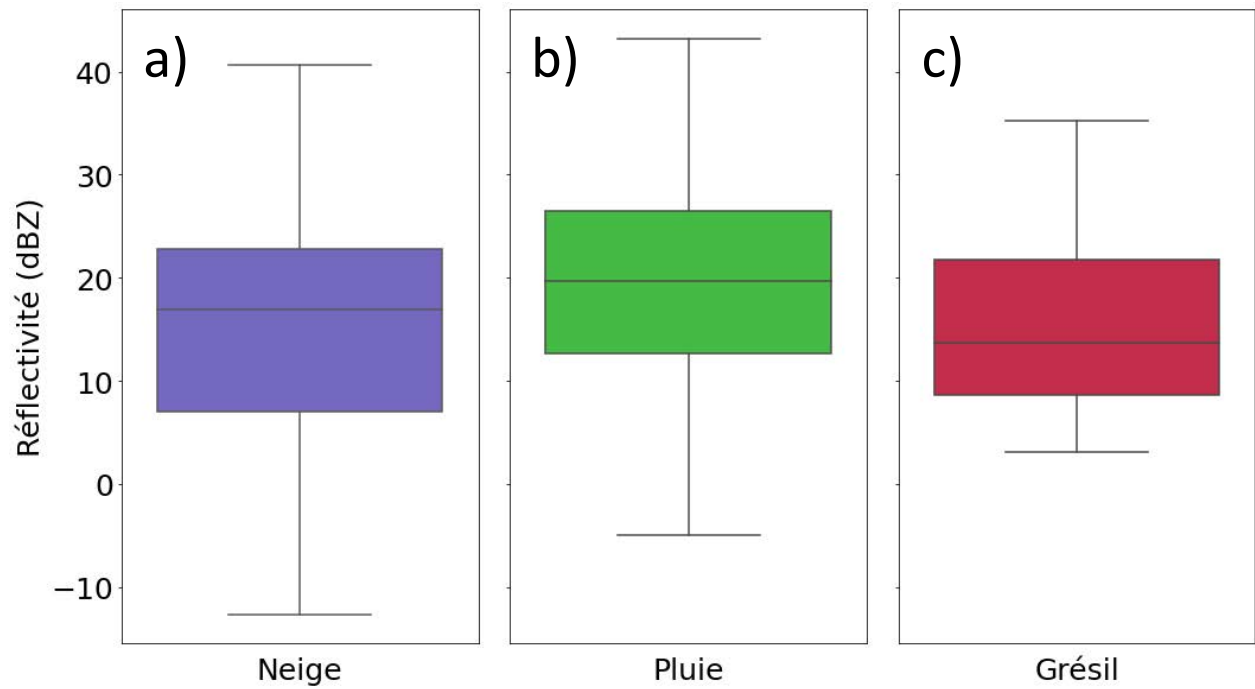


Figure 5.13 Distribution des valeurs de réflectivité équivalente mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil

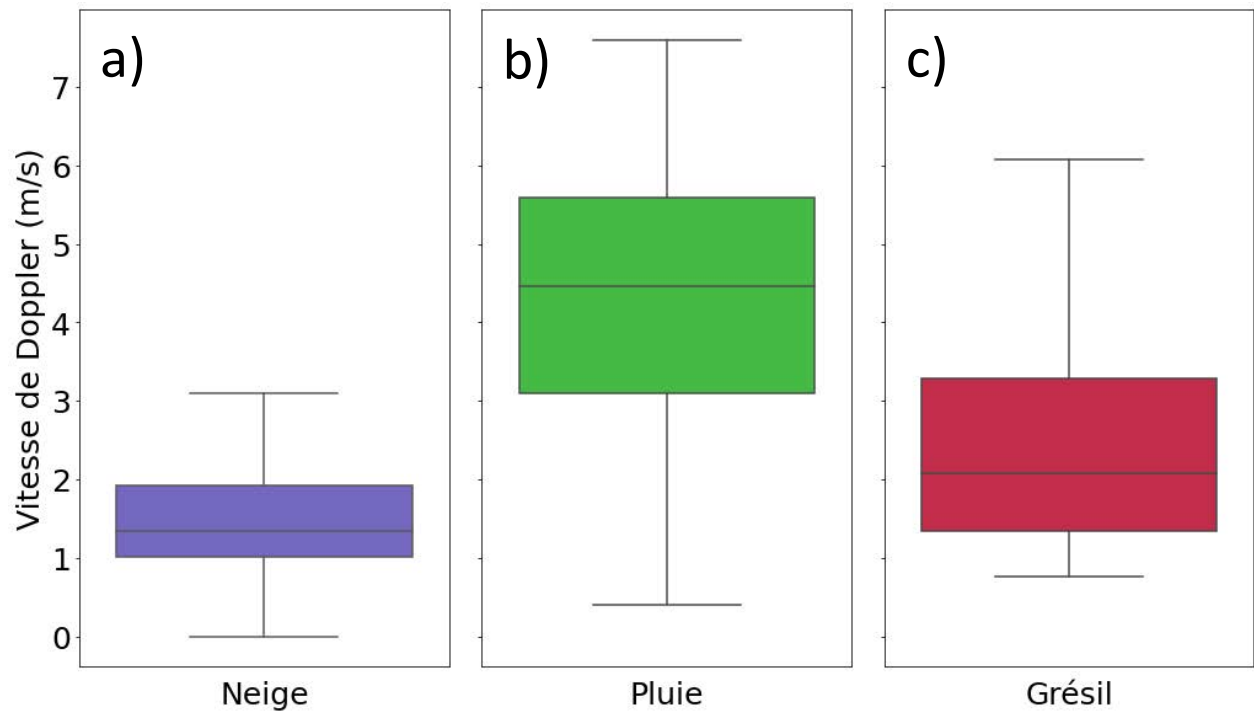


Figure 5.14 Distribution des valeurs de vitesse de Doppler verticale (m/s) mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil

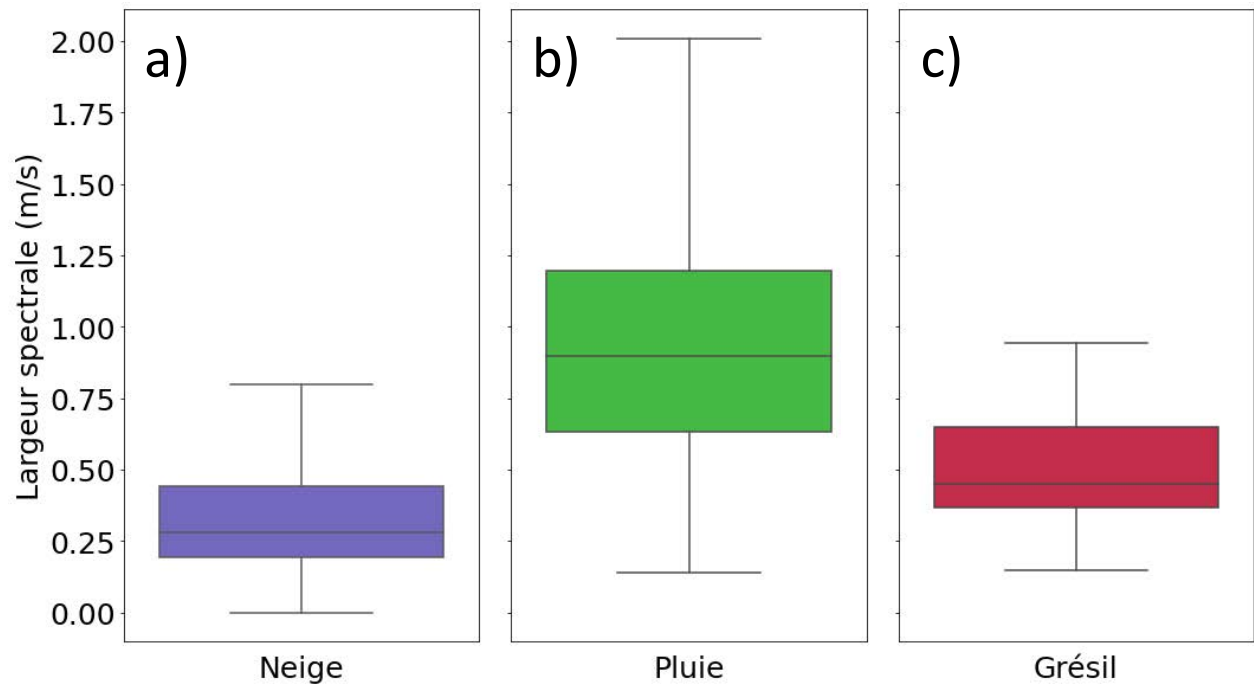


Figure 5.15 Distribution des valeurs de largeur spectrale (m/s) mesurées par le MRRpro pour la plus basse couche atmosphérique (150 m à 1000 m) pour des périodes coïncidant avec l'observation de différents types de précipitations au sol. a) Neige b) Pluie c) Grésil

CHAPITRE 6

DISCUSSION

La campagne de terrain de SAJESS dans la région d'Edmundston au printemps 2021 a permis de recueillir des données sur les conditions atmosphériques affectant le haut du fleuve Saint-Jean. Ce mémoire vise, en particulier, les épisodes de précipitation précédant et coïncidant avec la débâcle printanière dans le haut du fleuve Saint-Jean.

Au total, 15 événements de précipitations furent observés au cours de cette campagne de terrain dont une série de cinq événements chevauchant la période de la débâcle printanière dans la région d'étude. Bien que ces cinq événements aient apporté une forte quantité de précipitation (près de 75 mm) aucune inondation majeure n'a été rapportée au Nouveau-Brunswick au printemps 2021 (Environnement et Gouvernement Locaux, 2022 ; Acadie Nouvelle, 2021). Ceci pourrait s'expliquer en raison d'un hiver et d'un printemps chauds et secs. En effet, les mois de décembre à avril ont été généralement plus chauds sauf pour le mois de février. De plus, seulement 350 mm de précipitations ont été enregistrés du 1^{er} décembre 2020 au 30 avril 2021. Cette quantité est moins que la moyenne de 440 mm à la station d'Edmundston donnée par la climatologie d'Environnement et Changement climatique Canada de décembre à avril pour 2004-2019.

Les observations manuelles et la prise de macrophotographies effectuées à la station MUST près du centre-ville d'Edmundston ont permis d'établir les principaux types de précipitation au sol lors de la série d'événements documentés. En combinant ces observations avec les données des instruments déployés à la station, on a pu établir les conditions atmosphériques moyennes à la surface et en altitude pour les principaux types de précipitation observés au cours de cette série d'événements (pluie, neige, grésil). L'utilisation conjointes des profils de température et humidité obtenus par radiosondages et des profils de réflectivité, vitesse de Doppler et largeur spectrale obtenus grâce au micro-radar météorologique a permis d'établir des différences dans les conditions atmosphériques au niveau des processus de formation des trois types principaux de précipitation. Enfin, le disdromètre laser installé à la station fixe a fourni de

l'information complémentaire sur le type de précipitation tombant sur la région et sur l'intensité des précipitations.

Les données des stations CoCoRaHS et des thermomètres répartis dans la région ont permis de caractériser la répartition des précipitations dans la région et la variabilité des conditions atmosphériques en surface. Les données du Geonor à la station d'Environnement Canada et des instruments de la station fixe de SAJESS ont permis de faire le suivi de la quantité totale de précipitation et de l'accumulation de neige au sol.

La série d'événements étudiés a duré 12 jours au total. Pendant cette période la température en surface a été entre -2 et 2 °C pendant 97 heures (~1/3 de la période). Au total 84 heures de précipitations ont été observées et 54 heures de ces précipitations ont eu lieu à des températures près de 0 °C. Plusieurs types de précipitations ont eu lieu pendant la période étudiée (

Tableau 4.1). Les précipitations mixtes (incluant le grésil et les précipitations verglaçantes) ont seulement eu lieu lorsque la température au sol était près de 0 °C. Cependant, l'utilisation de la température à 2 m pour diagnostiquer le type de précipitation n'était pas suffisante. De la neige a été observée pour des températures en surface allant jusqu'à 2.7 °C et les températures de surface au-dessus de 0 °C représentent près de 25% de l'occurrence de neige (Figure 4.8). En moyenne, les conditions en surface étaient plus sèches pour l'occurrence neige entre 0° C et 2.7 °C (84.7%) que pour l'occurrence de pluie dans la même plage de températures (91.1%). Cette différence n'est pas suffisante pour prévoir la phase des précipitations en surface. En effet la température du point de rosée mesurée près de la surface est entre -1 °C et 0 °C pour 25% des périodes de pluie et il en est de même pour les périodes de neige (cela représente le quartile le plus élevé pour la neige et le plus bas dans le cas de la pluie).

Les températures moyennes du premier kilomètre au-dessus du sol étaient relativement chaudes pendant toute la période observée (2 °C en moyenne pour la pluie et -4 °C pour la neige). Même lors de l'occurrence de neige, les températures enregistrées par radiosondage ne chutent jamais sous -8 °C. Le profil moyen associé à la neige (Figure 5.1b) pendant cette semaine a d'ailleurs la forme typique d'un profil de grésil ou de pluie verglaçante c'est-à-dire avec une importante inversion de température qui donne lieu à une couche d'air chaud entre 1 et 2 km d'altitude. L'advection de température positive pendant la plupart des périodes de précipitations implique que les précipitations provenaient d'une région plus chaude que le site d'observation. En supposant que le profil moyen était représentatif des conditions atmosphériques dans la région, il est probable que ces conditions aient été propices à la formation de grésil. Si les plus petites particules ont été transportées sur des distances importantes, on peut expliquer la grande

occurrence de petites particules de grésil mélangées à la neige sur les macrophotographies en dehors des périodes d'observation de grésil. La présence relativement fréquente de grésil de petite dimension mélangé avec la neige (Chapitre 4) pendant la série d'événements peut s'expliquer en partie par la distribution de tailles d'hydrométéores : les plus petites particules ayant le temps de fondre même pour une couche de fonte peu épaisse. Ceci est seulement possible s'il y a une couche de regel proche de la surface et que la neige n'a pas été transportée par le vent en passant par la couche de fonte.

L'analyse des données de réanalyse ERA5 a montré que deux régimes synoptiques distincts ont eu lieu pendant la série d'événement. Le premier régime est associé avec les trois premiers événements. Ceux-ci étaient des tempêtes continentales formées à l'est des Rocheuses. Le deuxième régime est associé aux deux derniers événements. Ceux-ci étaient des tempêtes côtières formées au-dessus de l'Atlantique. La différence entre les trajectoires synoptiques associées aux deux régimes était significative : vers le nord-est dans le cas du régime continental et vers le nord dans le cas du régime côtier. De même, la position relative des tempêtes par rapport à Edmundston au moment des précipitations diffère pour chaque régime : les tempêtes continentales se trouvent au nord-ouest tandis que les tempêtes côtières sont à l'est. La direction des vents dominants au moment des précipitations dépend de la position des tempêtes : les vents du régime continental sont du sud-ouest tandis que les vents du régime côtier sont du nord-est.

Les types de précipitation observés ne sont cependant pas déterminés par la trajectoire synoptique des systèmes météorologiques. Ainsi, les 3 principaux types de précipitations (neige, pluie, grésil) de même que l'occurrence de précipitation de phase mixte ont lieu tant pour les événements continentaux que côtiers. Le type de transition de phase observé est plutôt déterminé par l'évolution de la température en altitude et en surface au cours de l'événement. Les mécanismes déterminant l'évolution de la température ne semblent pas non plus être toujours les mêmes. Par exemple, l'Événement 1 et l'Événement 2 débutent de façon similaire (épaisseurs de la couche 1000-500 hPa entre 546 et 552 da et pluie en surface). Le système 1 passe bien au nord de la région tandis que le système 2 traverse Edmundston d'ouest en est. La température de la couche 0-1000 m demeure au-dessus de 0 °C pendant tout l'Événement 1 durant lequel seule de la pluie est observée (Figure 5.4). Lors de l'Événement 2, la température entre 500-1000 m chute sous 0 °C alors que la température 0-500 m est toujours au-dessus de 0 °C au moment où un mélange pluie-neige est observé au sol (Figure 5.5). Lorsque toute la couche 0-1000 m est sous 0 °C de la neige est observée au sol. Cette diminution de température se produit avant que le système survole la région et que

celle-ci soit soumise à l'advection d'air froid qui suit le système. On constate en effet que la neige a débuté alors que l'advection de température était positive (Figure 3.5b et Figure 3.7).

La transition de phase observée au cours de l'Événement 4 est similaire à celle de l'Événement 2 : l'événement débute par de la pluie, puis la couche 0-1000 m se refroidit jusqu'à descendre sous 0 °C et on observe de la neige au sol. Comme pour l'Événement 2, le refroidissement enregistré par les radiosondages se produit malgré une advection d'air chaud dans cette couche d'air. La différence entre ces événements et l'Événement 1 semble être que la quantité de précipitation liquide est beaucoup plus importante pour les événements 2 et 4. On a enregistré moins de 1 mm/h en moyenne pour l'Événement 1 contre plus de 2 mm par heure en moyenne pour les événements 2 et 4. Le refroidissement causé par l'absorption de chaleur latente par la fonte de cristaux de glace pourrait refroidir cette couche d'air (Thériault et al., 2006; Thériault et Stewart, 2007). D'ailleurs, après la transition pluie-neige vers 1200 UTC le 1 avril 2021 lors de l'Événement 4, l'advection d'air chaud n'est plus contrée par la fusion des hydrométéores et la température de la couche entre 1.5 km et 2.0 km remonte au-dessus de 0 °C à 1800 UTC le 1 avril 2021.

Dans le cas des Événement 3 et 5 les épaisseurs de la couche 1000-500 hPa sont de moins de 540 da, la température de l'air entre 0-1000 m est sous 0 °C et les deux événements débutent par des chutes de neige au sol. Comme il n'y a pas de fonte de glace dans l'air étant donné la phase solide des précipitations en début d'événement, l'advection d'air chaud cause probablement une augmentation de la température de l'air entre 500 et 1000 m. Dans le cas de l'Événement 3, cette augmentation de température crée des couches d'air isothermes de 0 °C à 2 reprises (0000 UTC le 29 mars 2021 et 0600 UTC le 29 mars 2021) qui sont associées avec du grésil au sol. Le grésil observé est probablement signe qu'une fonte partielle des hydrométéores a eu lieu dans ces couches isothermes. La perte de chaleur latente associée à cette fonte pourrait expliquer que l'air n'ait pas continué de se réchauffer malgré l'advection positive de température. L'Événement 5 montre une transition similaire en début d'événement : de la neige est d'abord observée, puis l'advection d'air chaud crée une couche de fonte qui est associée avec l'observation de grésil. Cependant la fonte n'est pas suffisante pour s'opposer à l'advection d'air chaud dans la région. Ainsi, la couche de fonte demeure au-dessus de 0 °C jusqu'à la fin de l'événement. La couche de regel situé entre 0 et 500 m se réchauffe progressivement : le grésil est observé avec de la pluie et enfin toute la précipitation observée est liquide. Le taux de précipitation semble déterminant ici aussi : lorsque le taux

de précipitation dépasse 2 mm/h au cours de l'Événement 3, le grésil cesse et la neige reprend. Au cours de l'Événement 5, le taux horaire reste toujours au-dessous de 1 mm/h.

L'analyse du profil de vents (section 3.3) tend à confirmer l'advection d'air chaud au début des événements de précipitations. Pour tous les événements analysés, les vents étaient dextrogyres (*veering winds*) en raison du vent thermique, ce qui est caractéristique d'une advection de température positive. Seuls les vents de la couche de surface au début de l'Événement 4 étaient lévogyres (*backing winds*) indiquant une possible advection d'air froid près de la surface.

L'analyse des CFM montre que les transitions de phase observées manuellement à la station MUST ont également eu lieu à la station fixe. Le diagnostic par la méthode d'Ishizaka et al. (2013) tend aussi à démontrer que le type de précipitation observé au sol à la station MUST est représentatif à l'échelle de la distance entre les deux stations (~8 km) (Figure 2.3). On a également observé que la variabilité à l'échelle de la région lors d'un événement est relativement faible pour la température et l'humidité relative au sol de même que pour la quantité totale de précipitation (Figure 3.8 et Figure 3.18). Cependant, le contenu en eau des précipitations semble varier à l'échelle de la région selon les données CoCoRaHS. De même, la transition de phase observée à la station MUST et la transition de phase diagnostiquée à la station fixe ne sont pas simultanées. Il n'y a pas non plus de biais constant en fonction de l'altitude ou de la latitude sur le contenu en eau des précipitations ou sur le délai entre les transitions de phase. Les données recueillies à la station MUST sont donc représentatives de la région pour les événements de précipitation à cette échelle à l'exception de la détermination des moments des transitions, du début et de la fin des précipitations et de leur contenu en eau.

L'analyse de données ne suggère aucune corrélation entre l'altitude des stations dans la région (CoCoRaHS et thermomètres) et les différents paramètres mesurés à ces stations (température, humidité, quantité de précipitation et contenu en eau des précipitations). Cela n'implique pas qu'il n'y ait aucun effet de la topographie sur les précipitations, mais plutôt que la méthode d'échantillonnage utilisée ne puisse pas mettre un effet en évidence. Les témoignages des bénévoles et d'autres membres de la population locale semblent indiquer un effet de l'altitude sur le moment des transitions de phase. La canalisation de l'air près du fleuve Saint-Jean ou le soulèvement orographique dû au relief de la vallée pourraient avoir un effet sur la distribution de la phase des précipitations dans la région (e.g. Chartrand et al., 2022). Cet effet ne se reflète pas dans les données quotidiennes récoltées aux stations CoCoRaHS en partie en raison de la

variabilité dans la mesure de neige au sol (e.g. Rasmussen et al., 2012); il faudrait probablement que l'observation des transitions de phase soit faite systématiquement aux différentes stations pour vérifier l'effet de la topographie dans la région. En raison de l'importante incertitude associée aux données fournies par les bénévoles CoCoRaHS, il serait important de disposer de moyens de valider ou de corriger les données recueillies à ces stations lors de futurs travaux dans la région.

Il peut être difficile de faire le lien entre les types de précipitation à la surface et les mesures obtenues par radiosondage en altitude. Le déplacement horizontal de la sonde avec l'altitude mesure des conditions atmosphériques qui pourraient ne pas concorder avec les types de précipitation présents sur les photos. Par exemple lors de l'Événement 2, le radiosondage du 29 mars 2021 à 0200 UTC correspond à des photos de neige et de grésil. La forme du profil présente une inversion de température qui est cohérente avec la formation de grésil, mais le maximum de température ne dépasse pas 0 °C et ne peut donc pas être simplement interprété comme une couche de fonte. Pour expliquer la présence de grésil au sol, il faudrait avoir davantage d'information sur les trajectoires des particules. Si par exemple, les vents horizontaux transportaient les précipitations d'une région plus chaude vers le site d'observation, il est possible que l'inversion de température atteignent des températures au-dessus de 0 °C qui expliqueraient la fonte partielle de certains hydrométéores et leur regel près du site d'observation. Une analyse détaillée de la taille des particules et de la vitesse des vents pourrait permettre d'estimer la distance parcourue par les hydrométéores. Il serait également possible d'estimer la température maximale rencontrée par les particules le long de leur trajectoire. Le modèle microphysique de ce processus est connu depuis un bon moment (Donaldson et Stewart, 1993), mais la quantification sur le terrain requiert davantage d'échantillonnage en altitude. En particulier, des transects en avion combinés avec les profils de radiosondage permettraient caractériser en détail la présence de « couche de fonte verticale » créée par le transport horizontal des hydrométéores.

6.1 Sources d'erreurs

La section suivante énumère et détaille les sources potentielles d'erreurs dans la collecte et l'analyse des données présentées dans ce mémoire.

6.1.1 Observations et disdromètre

Le disdromètre laser a été utilisé avec parcimonie dans ce mémoire puisqu'il était difficile de confirmer le type de précipitations qui tombaient sur la station fixe. Pour le micro-radar météorologique (MRRpro) et

pour les radiosondages, la phase et le type de précipitation étaient confirmés par les observations manuelles et la macrophotographie. Or, comme nous l'avons établi au Chapitre 5 la phase des précipitations avait une variabilité non-négligeable à l'échelle de la région. Comme la quantité de précipitation totale était peu variable à l'échelle régionale nous avons utilisé le disdromètre pour compter le nombre de particules. Considérant que les résultats présentés sont une somme des particules détectées sur l'ensemble de la période étudiées, l'ordre de grandeur du nombre de particules et l'importance relative des différents types de précipitations présentés sont sans doute valides. Il est néanmoins important de noter que, comme l'observation et la détection instrumentale n'ont pas eu lieu au même endroit, la quantité et le type de précipitation peut varier entre les sites. La présence de l'usine de pâte et papier au centre-ville d'Edmundston peut aussi modifier les conditions à fine échelle et changer la quantité de précipitations localement.

Le diagnostic des types de précipitations à la station fixe en utilisant la méthode des CFM d'Ishizaka et al. (2013) utilise six types de précipitation ne comprenant pas le grésil. Des courbes de vitesse théorique pour le grésil ont été proposées dans la littérature (Heymsfield et Westbrook, 2010 ; Rahman et Testik, 2020) et pourraient aider à rendre la méthode du CFM plus précise pour diagnostiquer le grésil. Dans le cadre de ce mémoire, ces courbes n'ont été utilisées que de façon qualitative pour identifier le grésil sans être utilisées pour calculer le flux de masse des hydrométéores. Il faut aussi garder en tête que le flux de masse calculé à partir de la méthode du CFM dépend des courbes choisies ainsi une courbe semble se dessiner dans la région entre la neige roulée et la pluie, mais cela est dû à la combinaison linéaire des deux courbes lors du calcul du flux de masse. Pour raffiner le diagnostic des particules qui se trouvent dans cette zone il serait sans doute nécessaire d'utiliser davantage de courbes correspondant aux types de précipitation observés.

Une comparaison entre les caractéristiques moyennes des particules (vitesse, taille) obtenues à partir du nombre de particules et le CFM est présentée à l'Annexe C. Le principal avantage de la méthode du CFM est d'attribuer un poids statistique plus importants aux particules plus grosses dont le type est plus facile à distinguer que celui des petites particules. La moyenne tend au contraire à attribuer une grande importance aux petites particules plus nombreuses. Tel que mentionné au Chapitre 2, le CFM représente le type de précipitation responsable du plus important transport de masse au cours de la période sélectionnée. Ainsi, surtout lorsque la particule moyenne est de très petite taille, le CFM permet

d'identifier quel type de précipitation contenait davantage de masse sans toutefois diagnostiquer le type des petites particules.

6.1.2 Observations et radiosondages

Tel que mentionné précédemment, les particules observées à la surface n'ont pas forcément chuté sur des trajectoires verticales. Il en va de même pour la trajectoire suivie par les ballons utilisés lors des radiosondages. Par rapport au site d'observation on constate de manière générale que les hydrométéores viennent de la région au vent tandis que les radiosondages effectuent leur profil sous le vent. Lorsqu'on a tenté d'établir les conditions atmosphériques moyennes pour différents types de précipitations, ces deux sources d'erreurs s'ajoutaient l'une à l'autre et étaient amplifiées par la vitesse du vent horizontal. La plupart des événements analysés dans ce mémoire ont eu lieu lors d'advection d'air chaud, les profils des radiosondages ont donc tendance à sous-estimer les températures associées aux différents types de précipitation. C'est-à-dire que lors d'advection d'air chaud, la région d'où proviennent les précipitations observées au sol est plus chaude que la région au-dessus du site d'observation ; tandis que la région où se dirigent les ballons de radiosondages est plus froide que le site d'observation.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

L'étude des précipitations hivernales dans le haut de la vallée du fleuve Saint-Jean avant la débâcle est cruciale pour améliorer notre compréhension des inondations printanières fréquentes qui ont lieu tout au long du bassin versant. Ce mémoire démontre que le type et de la quantité de précipitations observées au sol peuvent manifester une très grande diversité pour des conditions météorologiques similaires (tant à l'échelle synoptique qu'à l'échelle locale en surface). Cette caractéristique de la région d'étude de SAJESS peut rendre la prévision météorologique difficile en particulier en ce qui concerne la phase des précipitations. La période qui a précédé la série d'événements analysés dans ce mémoire était particulièrement chaude et sèche, mais dans l'ensemble l'hiver et la débâcle printanière 2021 étaient relativement représentatifs des conditions normales ayant cours dans la région. Cette section détaille les principales observations qui découlent de l'analyse des événements de précipitation ayant eu lieu au moment de la débâcle du fleuve Saint-Jean entre le 25 mars et le 6 avril 2021.

La période entourant la débâcle saisonnière 2021 du fleuve Saint Jean est caractérisée par une série de cinq dépressions distinctes qui ont toutes amené des précipitations et des températures près de 0 °C en surface le haut de la vallée du Fleuve Saint-Jean. Deux régimes distincts se sont succédé : les trois premières dépressions ont suivi une trajectoire continentale environ du sud-ouest à partir du centre des États-Unis tandis que les deux dernières dépressions ont eu une trajectoire côtière vers le nord à partir du milieu de la côte est des États-Unis. La direction des vents dominants à la surface et à basse altitude (< 4 km) était influencée par le régime synoptique, mais les précipitations observées à la surface n'étaient pas significativement différentes entre les deux régimes.

Chaque dépression est associée à un événement de précipitations en surface. À l'exception de l'Événement 1 qui n'a comporté que de la pluie, chaque événement est associé à plus d'un type de précipitation. Une transition de phase a été observée pour les Événements 2, 4 et 5. Ceci est dû entre autres au changement rapide de température associé au passage de ces dépressions sur la région. Durant la période étudiée dans ce mémoire la température au sol a varié entre -11.5 °C et 11.9 °C. En moyenne

l'écart entre le minimum et le maximum de température au sol enregistrés pour chaque événement était de 7 °C.

La température et l'humidité relative au sol sont uniformes à l'échelle régionale durant un événement. La quantité de précipitation totale pour chaque événement est aussi uniforme à l'échelle régionale. Les différents types de précipitations ont aussi lieu sur l'ensemble de la région, mais le contenu en eau des précipitations semble varier entre les différentes stations.

Plus de 75% des heures de précipitation ont eu lieu pendant une advection d'air chaud à 850 hPa. Même lors d'advection d'air chaud, la température de l'air diminue entre 850 hPa et la surface lorsque le taux de précipitation est au-dessus de 2 mm/h. Une transition liquide-solide des précipitations au sol peut avoir lieu dans ces conditions comme dans le cas des Événements 2 et 4. Lorsque le taux de précipitation est de moins de 1 mm/h, l'advection de température domine et une transition solide-liquide peut se produire comme dans le cas de l'Événement 5. Ces processus peuvent se combiner comme dans le cas de l'Événement 3 : l'air se réchauffe jusqu'à créer une couche de fonte, une augmentation du taux de précipitation au-dessus de 2 mm/h est liée à la formation d'une couche de regel et cause l'occurrence de grésil.

Ce travail de recherche ouvre la porte à plusieurs travaux futurs. Une des difficultés auxquelles nous avons été confrontés lors de cette étude a été l'identification de la phase d'hydrométéores de très petites tailles (< 0.5 mm). Le disdromètre laser ne parvient pas à séparer les courbes de dispersion à cette échelle. Les particules de cette taille fondaient rapidement sur les tapis de collecte alors la phase ne pouvait pas être identifiée par macrophotographie. Même par observation manuelle, on peinait à confirmer si les particules étaient liquides ou solides avant d'atteindre le sol. Ces observations étaient particulièrement difficiles la nuit en raison de la faible visibilité. Un détecteur de givre pourrait aider à confirmer si les particules se solidifient au contact de l'instrument et donc qu'il s'agissait de bruine verglaçante plutôt que de cristaux de glace de petite taille. Les jauges de type Hotplate peuvent fournir une information similaire, mais elles ne sont pas conçues spécifiquement pour cette fin. Il serait également souhaitable de prévoir une certaine redondance dans les mesures afin de valider les données enregistrées ou de pallier une éventuelle panne d'instrument.

L'usage d'un ceilomètre pourrait compléter les données des micro-radars météorologiques. Les MRR donnent seulement des informations sur les précipitations en altitude. Un ceilomètre pourrait permettre

en plus de quantifier l'occurrence de nuages. Le ceilomètre pourrait aussi être utilisé de façon similaire aux MRR pour diagnostiquer la phase des nuages et des précipitations à basse altitude (< 6 km) (Guyot *et al.*, 2022).

Parmi les appareils déployés à la station MUST, la caméra multi-angle à flocons de neige (MASC) a pris des photos automatiquement pour presque toutes les heures de précipitation. Dans le cadre de ce mémoire nous n'avons pas mené l'analyse de ces photos conjointement à l'ensemble des données présentées précédemment. Avec un protocole systématique d'analyse et d'utilisation des photos du MASC, ces données constitueront un précieux complément à la macrophotographie dans l'identification des types d'hydrométéores solides survenant lors d'événements de précipitation.

L'effet de l'orographie régionale pourrait influencer le type et la quantité de précipitation. Les événements documentés n'ont pas démontré de telle corrélation, mais les témoignages recueillis auprès des bénévoles et certains travaux (e.g. Chartand *et al.*, 2022; Henson *et al.*, 2011; Roebber *et Gyakum*, 2003) suggèrent une influence possible.

Le transport des précipitations par le vent horizontal pourrait aussi jouer un rôle dans la distribution de la quantité et de la phase des précipitations. En particulier, le transport des hydrométéores d'une région plus chaude vers une région plus froide pourrait favoriser les précipitations mixtes, la pluie verglaçante et le grésil.

Pour conclure, ce mémoire démontre la grande variabilité de conditions météorologiques au moment de la débâcle du fleuve Saint-Jean. Ces résultats illustrent aussi que plusieurs types de précipitations peuvent se succéder au cours d'un même événement de précipitation. Cette étude permet d'améliorer notre compréhension des mécanismes déterminant la phase et le type des précipitations dans le haut de la vallée du fleuve Saint-Jean. Les résultats présentés dans ce mémoire pourront également servir à améliorer la paramétrisation des transitions de phase et des précipitations au sol dans des conditions près de 0 °C.

ANNEXE A

Intervalles de vitesse et dimension du disdromètre laser

Tableau A.1 Liste des intervalles de diamètres des hydrométéores (mm) utilisés par le disdromètre laser OTT Parsivel²

0.312	0.437	0.562	0.687	0.812	0.937	1.062	1.187	1.375	1.625
1.875	2.125	2.375	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.5	6.5
7.5	8.5	9.5	11	13	15	17	19	21.5	24.5

Tableau A.2 Liste des intervalles de vitesses de chute des hydrométéores (m/s) utilisés par le disdromètre laser OTT Parsivel²

0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.1	1.3
1.5	1.7	1.9	2.2	2.6	3	3.4	3.8	4.4	5.2
6	6.8	7.6	8.8	10.4	12	13.6	15.2	17.6	20.8

ANNEXE B
Niveaux de pression ERA5

Tableau B.3 Liste des niveaux de pression (en hPa) pour les données ERA5.

1000	975	950	925
900	875	850	825
800	775	750	700
650	600	550	500
450	400	350	300
250	225	200	175
150	125	100	70
50	30	20	10
7	5	3	2
1			

ANNEXE C

Comparaison de la moyenne des particules du CFM

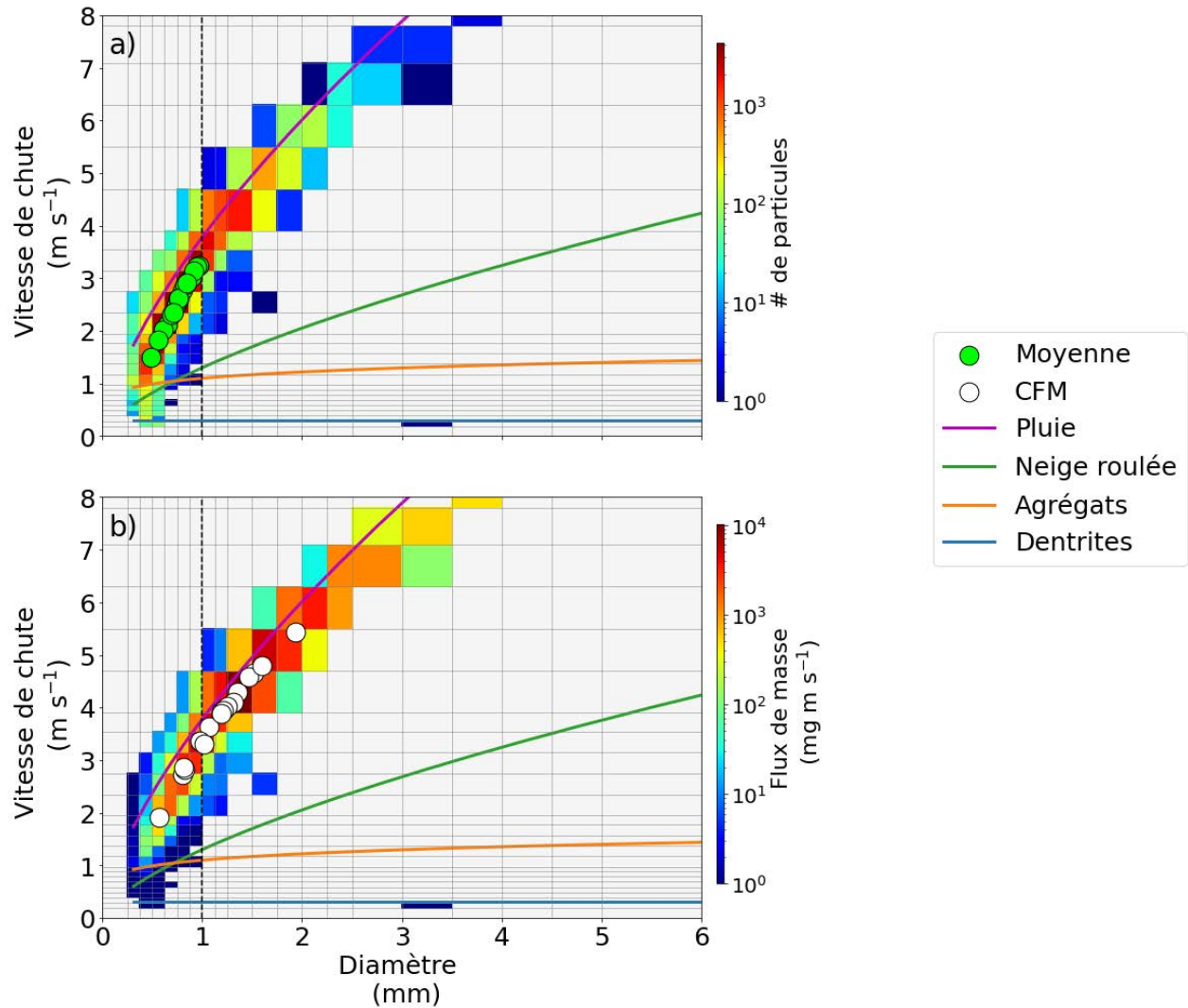


Figure C.1 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 1. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.

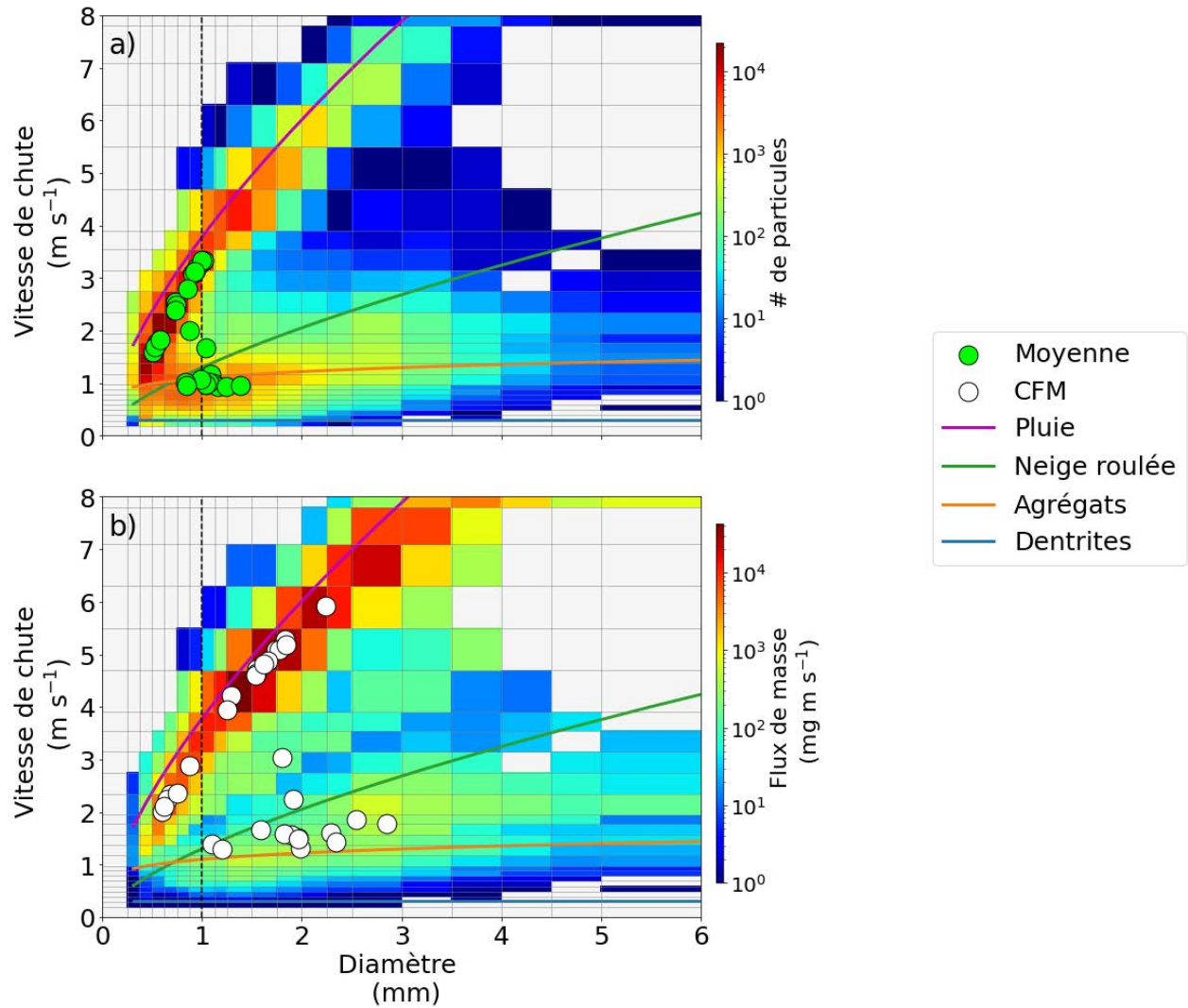


Figure C.2 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 2. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.

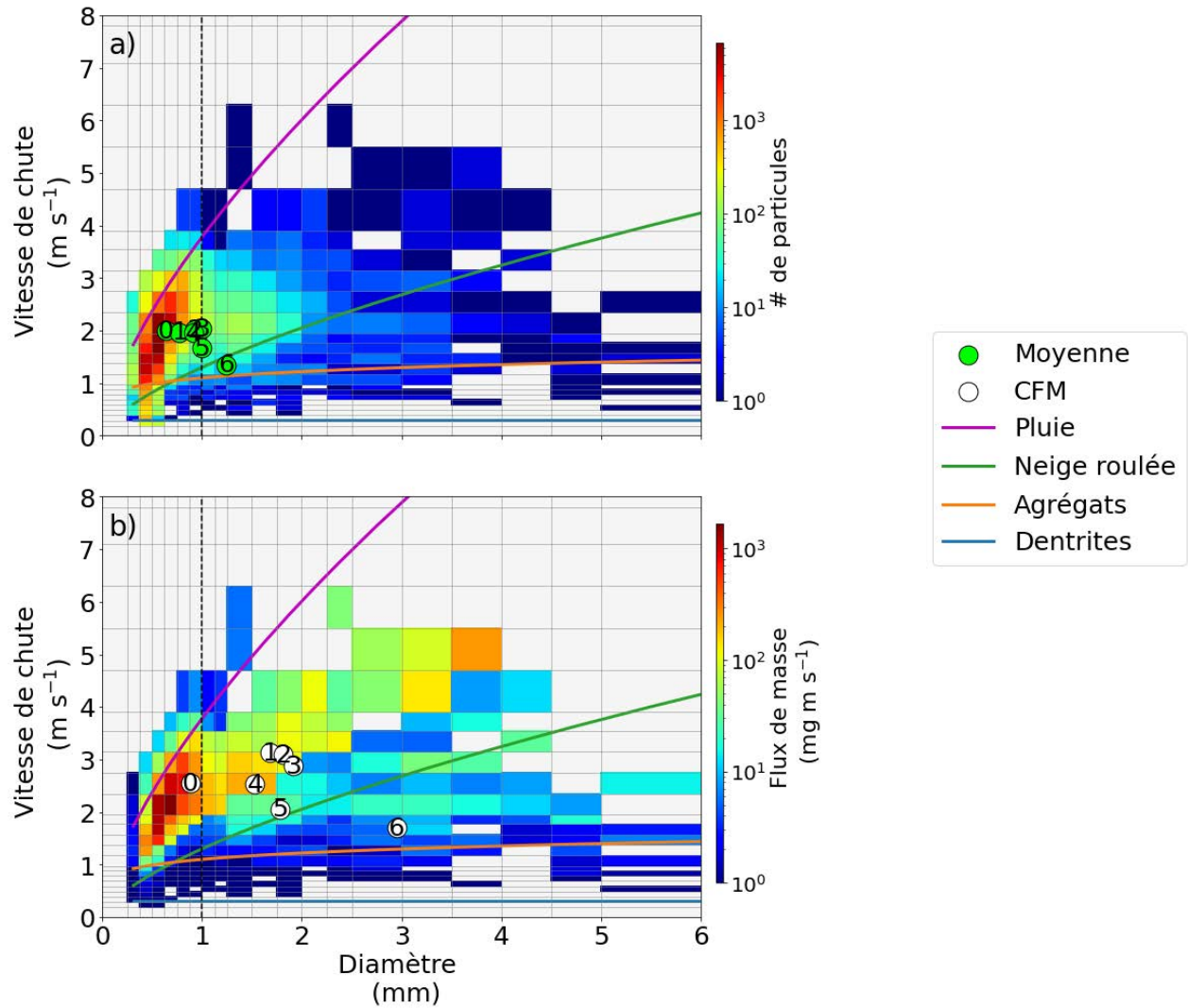


Figure C.3 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition pluie-neige pendant l'Événement 2 entre 0200 UTC et 0300 UTC le 27 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0200 UTC le 27 mars 2021; « 6 » correspond à 0300 UTC le 27 mars 2021)

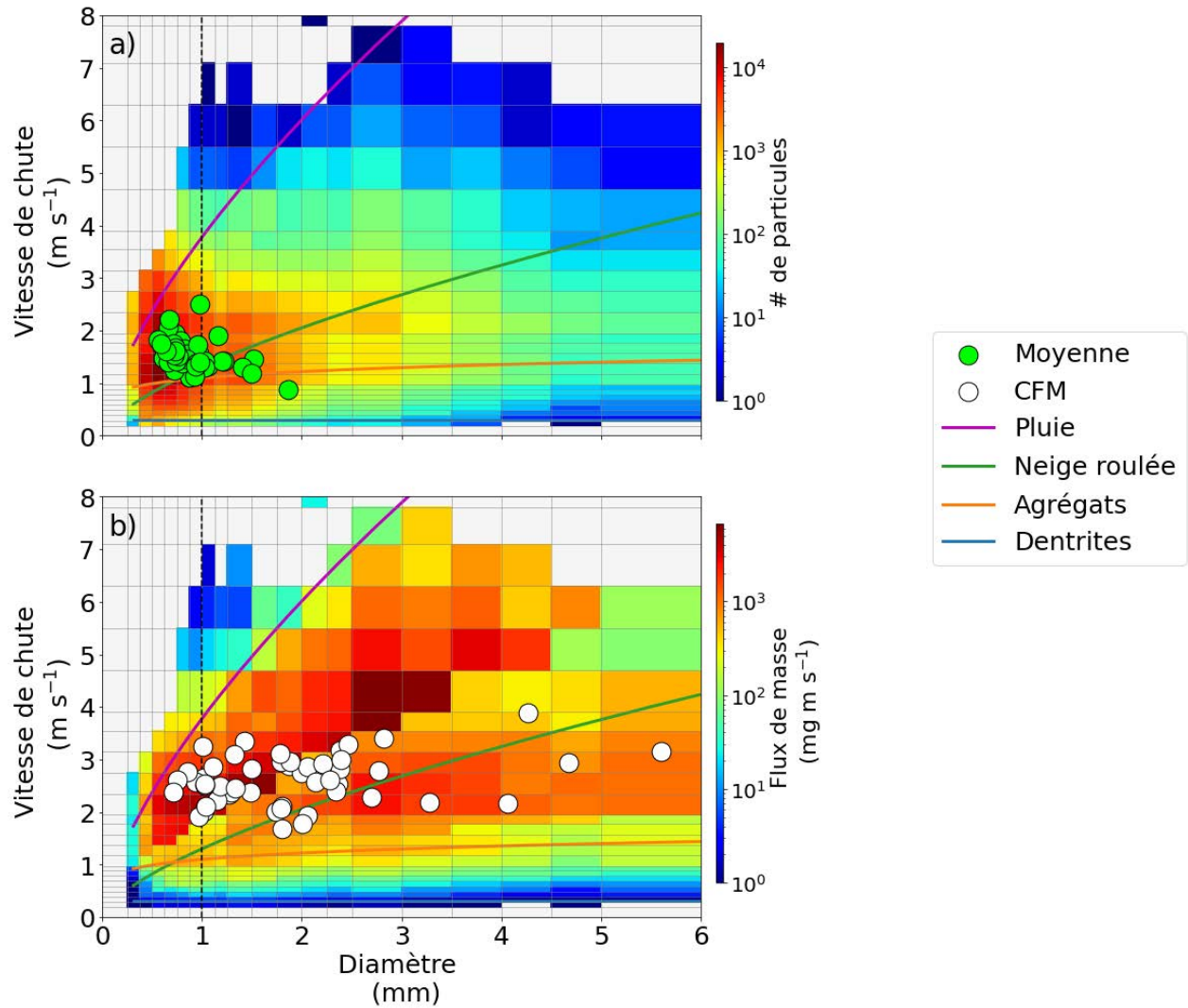


Figure C.4 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 3. a) Distribution du nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.

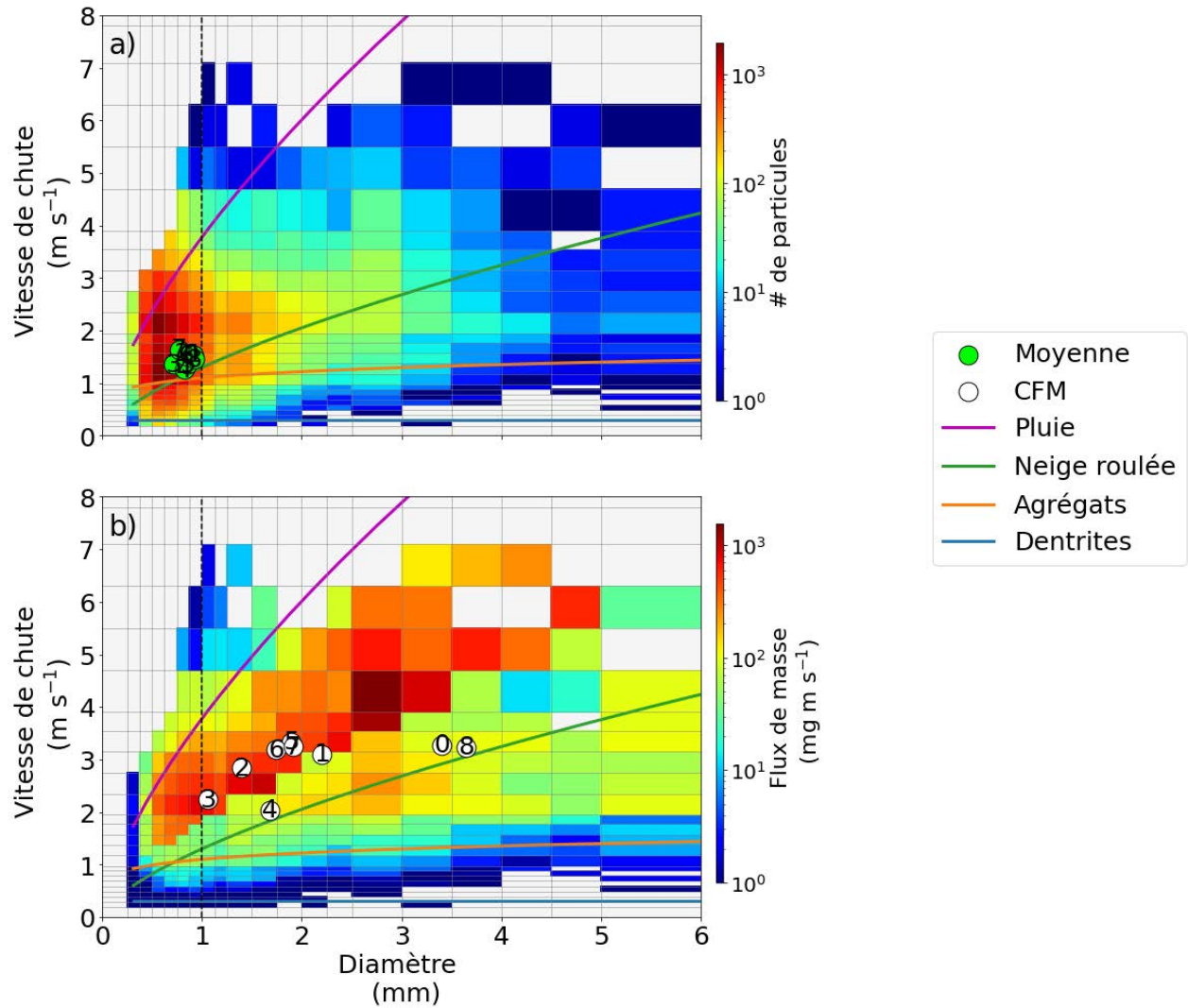


Figure C.5 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 3 entre 2330 UTC le 28 mars 2021 et 0050 UTC le 29 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 2330 UTC le 28 mars 2021 ; « 8 » correspond à 0050 UTC le 29 mars 2021)

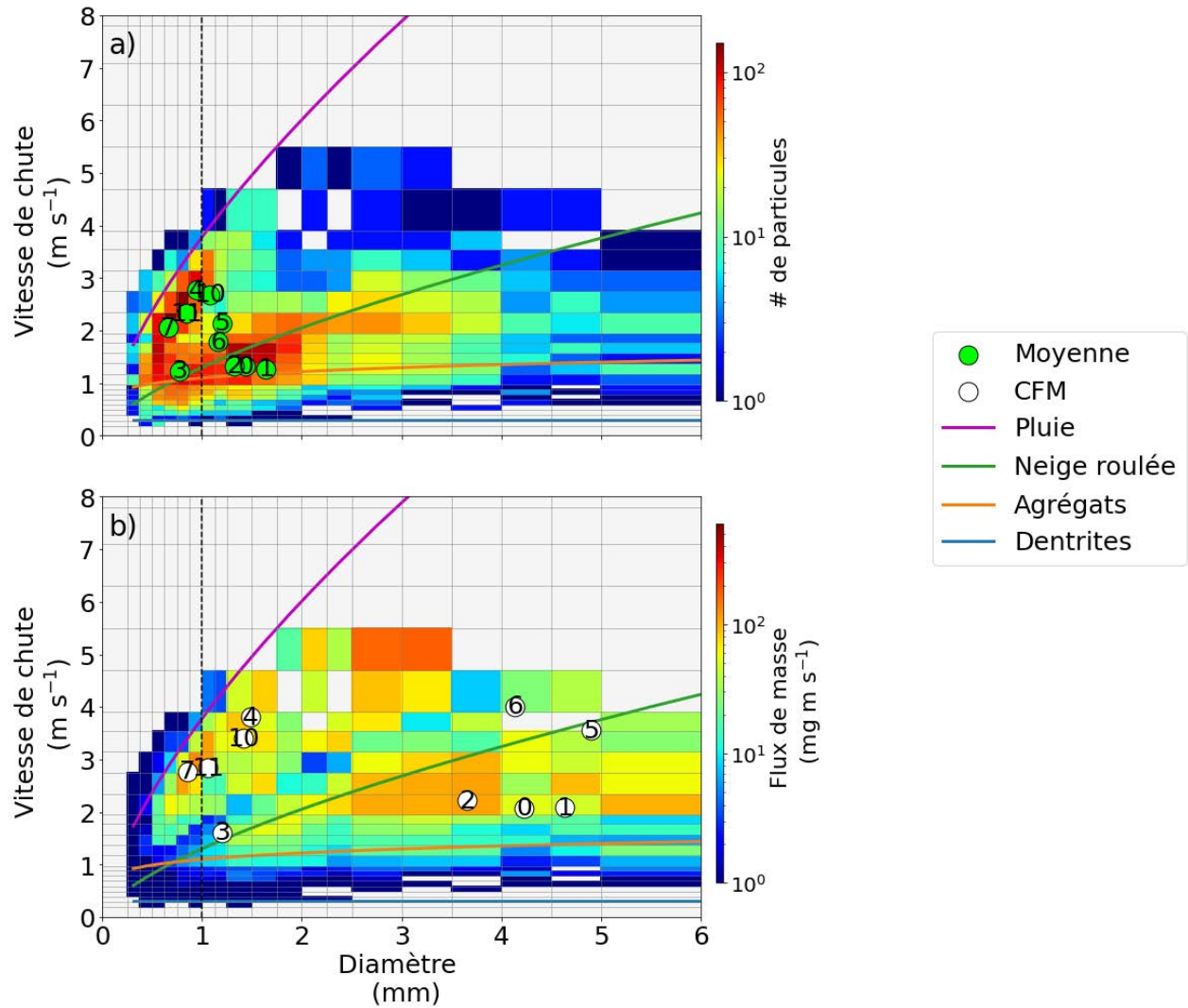


Figure C.6 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 3 entre 0500 UTC et 0650 UTC le 29 mars 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0500 UTC le 29 mars 2021; « 11 » correspond à 0650 UTC le 29 mars 2021). Un point manquant indique une absence de données pour la période.

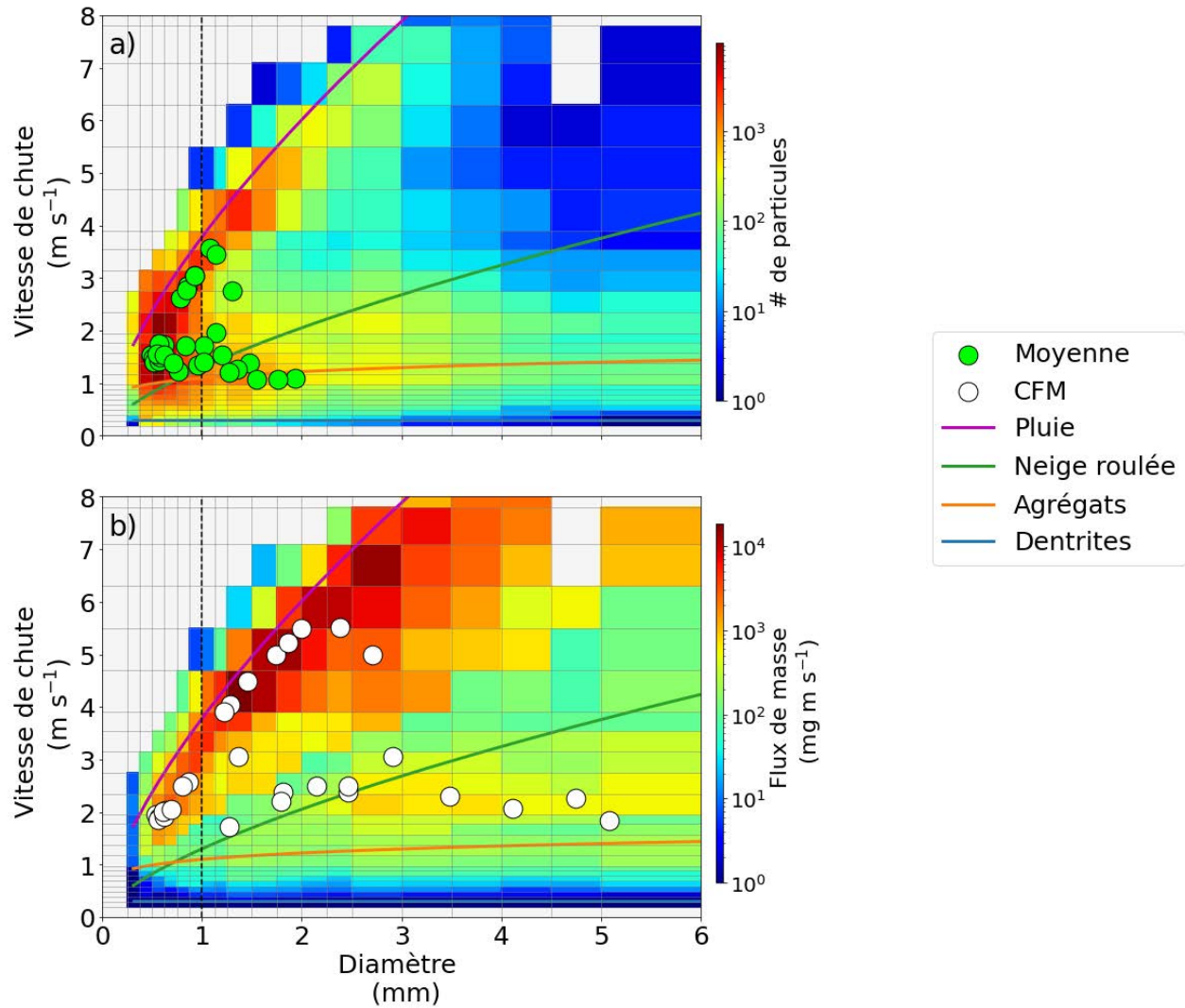


Figure C.7 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 4. a) Distribution de nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.

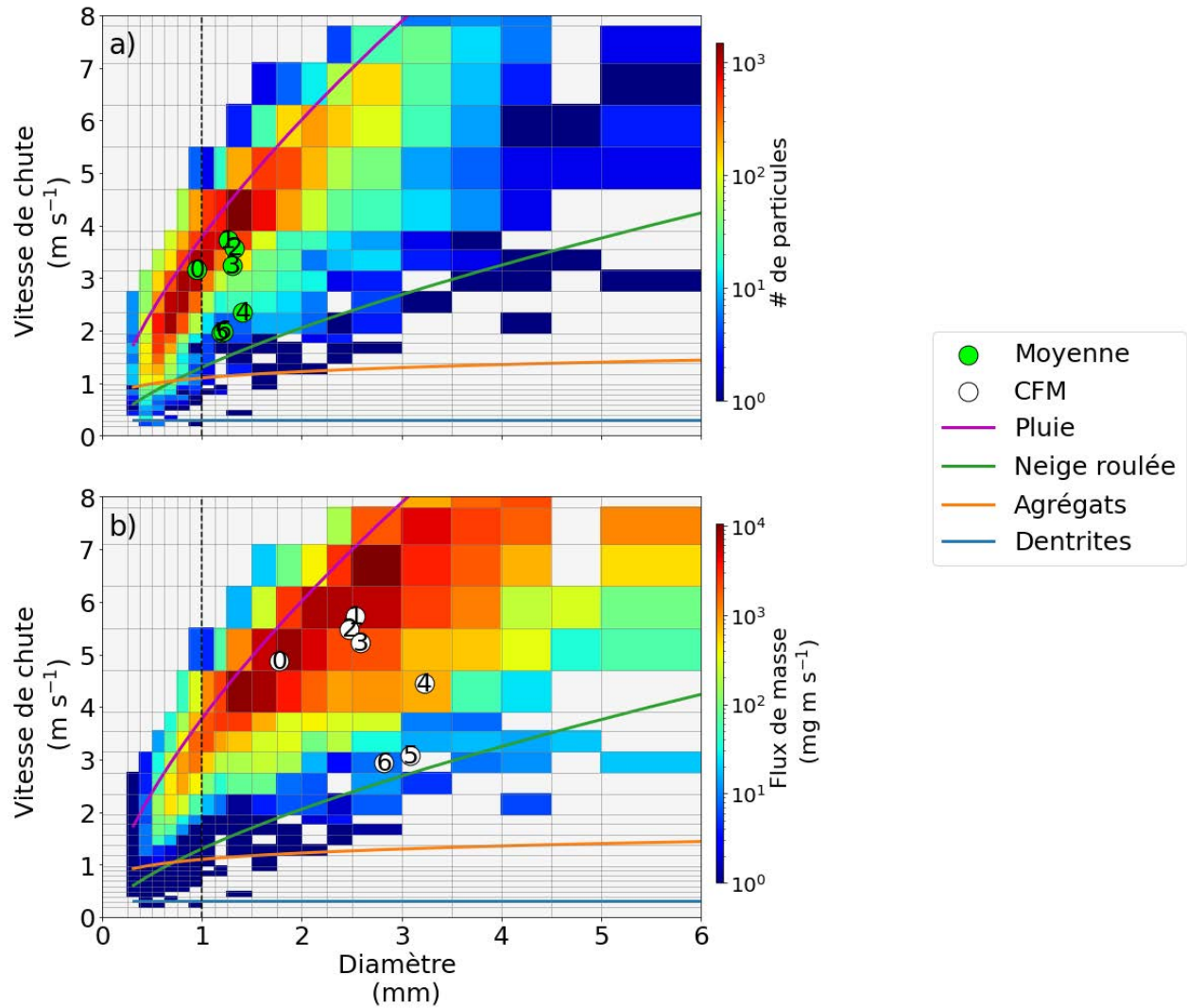


Figure C.8 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition pluie-neige pendant l'Événement 4 entre 1030 UTC et 1130 UTC le 1 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1030 UTC le 1 avril 2021 ; « 6 » correspond à 1130 UTC le 1 avril 2021)

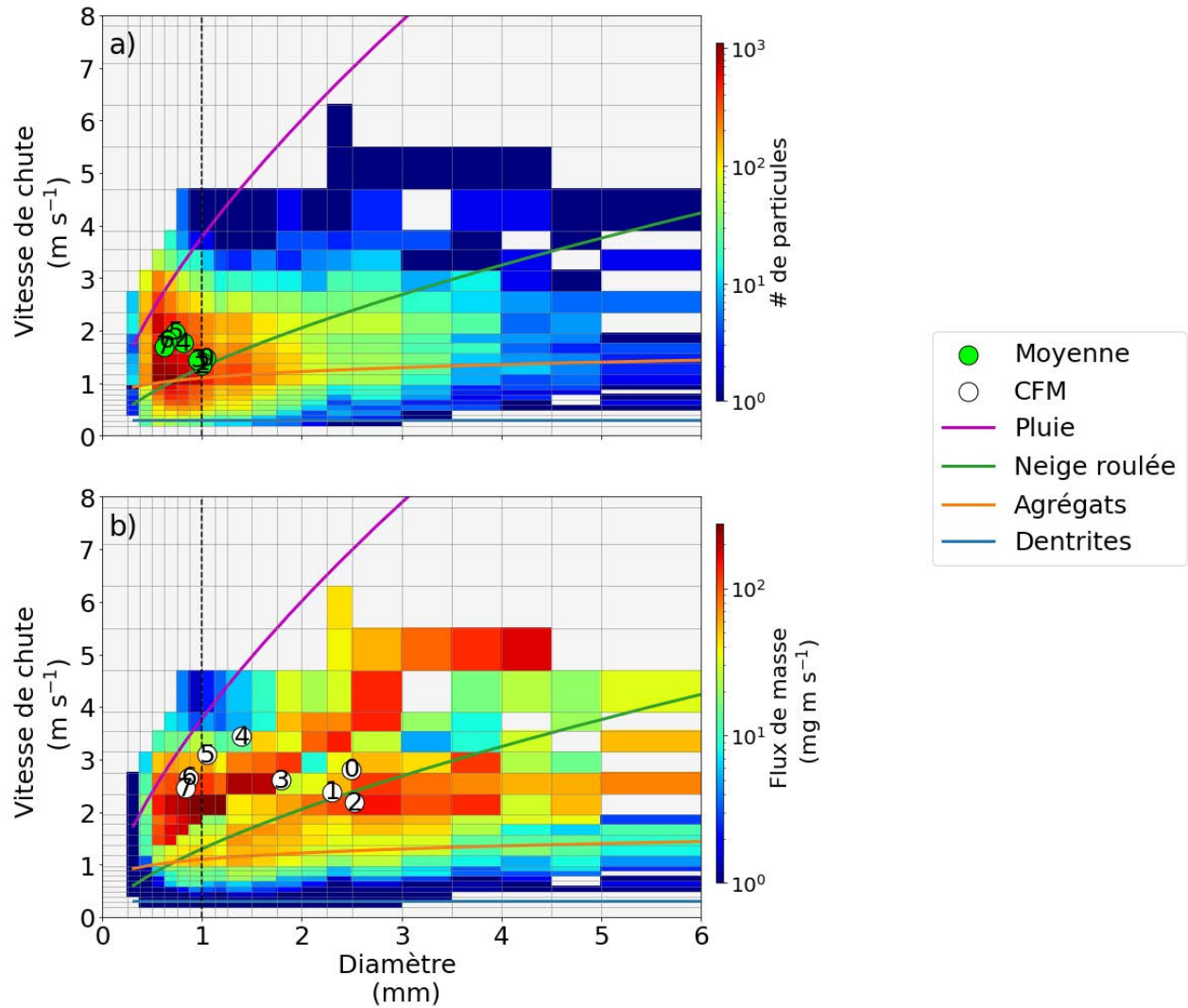


Figure C.9 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil pendant l'Événement 4 entre 1630 UTC et 1740 UTC le 1 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 1630 UTC le 1 avril 2021; « 7 » correspond à 1740 UTC le 1 avril 2021)

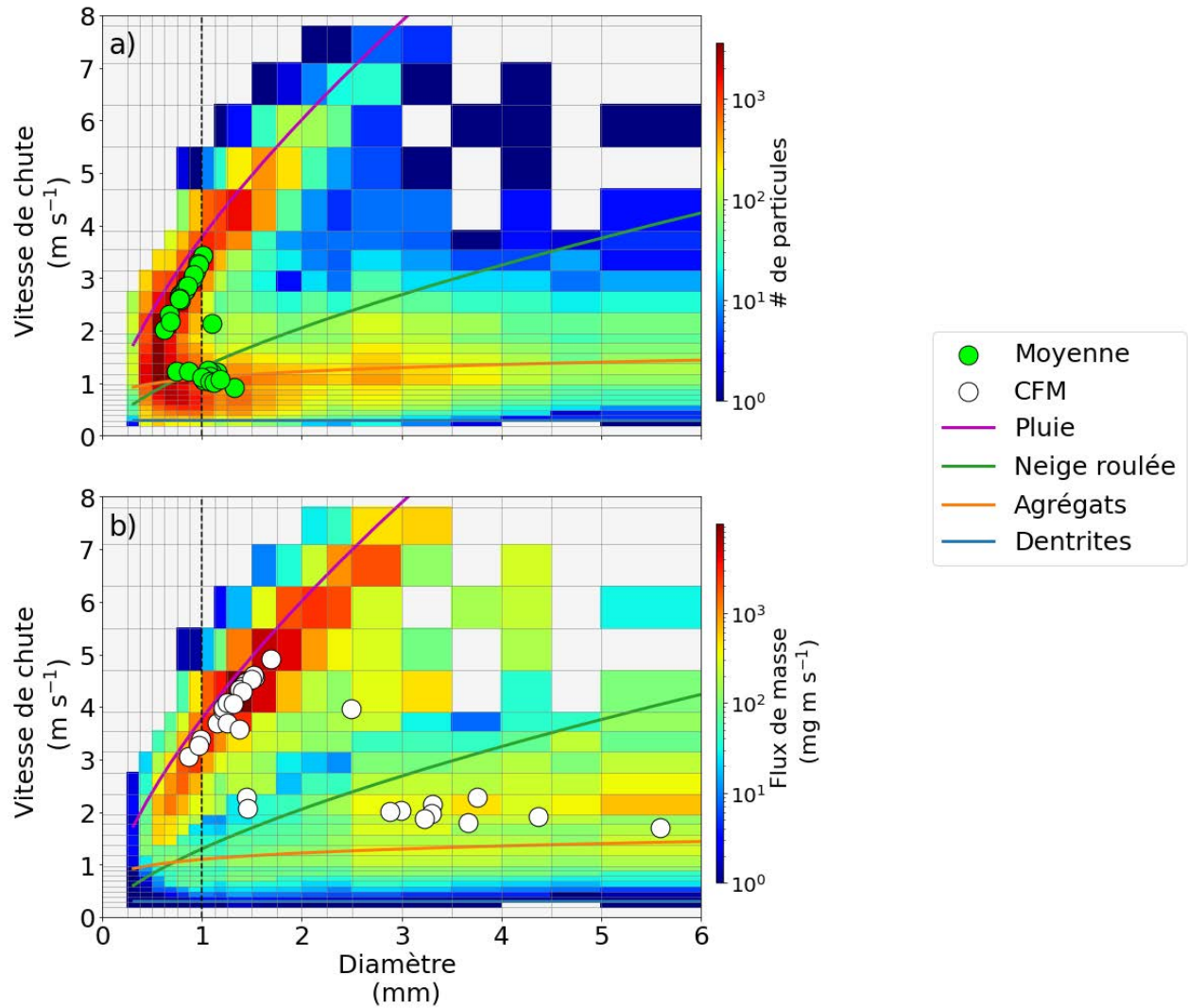


Figure C.10 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors de l'Événement 5. a) Distribution de nombre de particules durant l'ensemble de l'événement. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 30 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 30 minutes.

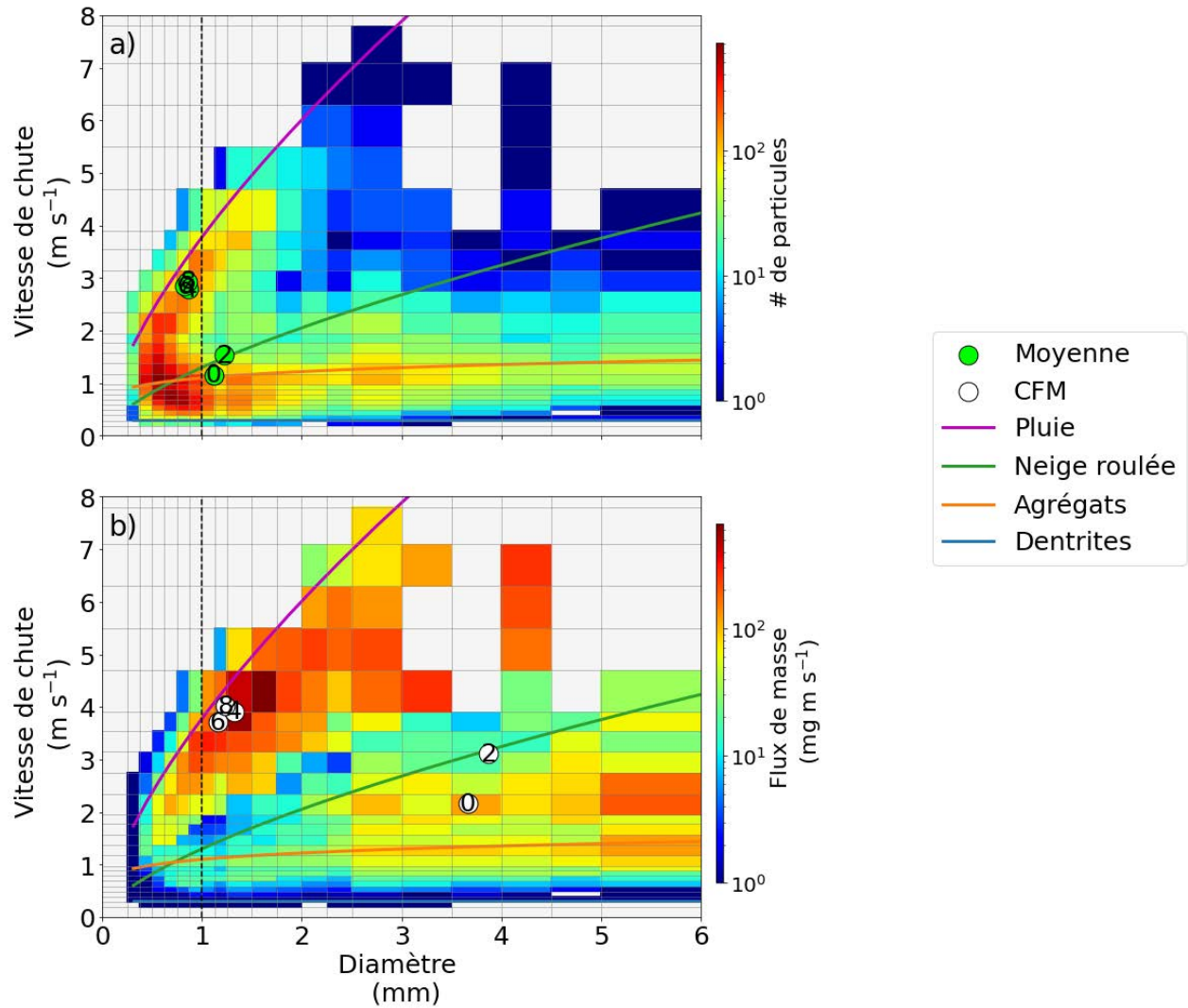


Figure C.11 Comparaison de la distribution de taille et de vitesse des particules lors d'une transition neige-grésil-pluie pendant l'Événement 5 entre 0400 UTC et 0530 UTC le 5 avril 2021. a) Distribution du nombre de particules. Les points verts représentent la taille et la vitesse moyennes des particules par période de 10 minutes. b) Distribution du flux de masse des particules. Les points blancs représentent la position du CFM par période de 10 minutes. Pour clarifier la présentation un point sur deux est affiché. Le chiffre dans chaque point donne l'ordre chronologique des CFM (« 0 » correspond à 0400 UTC le 5 avril 2021; « 8 » correspond à 0530 UTC le 5 avril 2021).

RÉFÉRENCES

- Acadie Nouvelle. (2021, avril 19). Le Nouveau-Brunswick a été épargné par les inondations ce printemps. *Acadie Nouvelle*. <https://www.acadienouvelle.com/actualites/2021/04/19/le-n-b-a-ete-epargne-par-les-inondations-ce-printemps/>
- American Meteorological Society. (2012). Northeast Storm. *Glossary of Meteorology*. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Northeast_storm
- Baronetti, A., Fratianni, S., Acquotta, F., & Fortin, G. (2019). A quality control approach to better characterize the spatial distribution of snow depth over New Brunswick, Canada. *International Journal of Climatology*, 39(14), 5470-5485. <https://doi.org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/10.1002/joc.6166>
- Bell, G.D., et Bosart, L.F. (1988). Appalachian Cold-Air Damming. *Monthly Weather Review*, 116(1), 137-161. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<0137:ACAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<0137:ACAD>2.0.CO;2)
- Beltaos, S., et Burrell, B.C. (2015). Hydroclimatic aspects of ice jam flooding near Perth-Andover, New Brunswick. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(9), 686-695. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0372>
- Beltaos, S., Ismail, S., et Burrell, B.C. (2003). Midwinter breakup and jamming on the upper Saint John River: a case study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(1), 77-88. <https://doi.org/10.1139/l02-062>
- Chartrand, J., Thériault, J.M., et Marinier, S. (2022). Freezing Rain Events that Impacted the Province of New Brunswick, Canada, and Their Evolution in a Warmer Climate. *Atmosphere-Ocean, Ahead-of-print*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2092444>
- Chouaib, W., et Caissie, D. (2021). Regional disparities in water availability and low flow conditions in rivers across Canada. *Journal of Hydrology*, 598, 126195.
- Conrad, C. T. (2009). *Severe and hazardous weather in Canada: the geography of extreme events*. Oxford University Press.
- Cortinas, J.V., Bernstein, B.C., Robbins, C.C., et 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
- Cunjak, R.A., et Newbury, R.W. (2005). Atlantic Coast Rivers of Canada, Chapter 21. Dans Benke, A.C. et Cushing, C.E. (dir.) *Rivers of North America* (1^{ère} éd., p. 939-980). Elsevier Inc. (Academic Press), San Diego, CA

- Dai, A. (2008). Temperature and pressure dependence of the rain-snow phase transition over land and ocean. *Geophysical Research Letters*, 35(12). <https://doi.org/10.1029/2008GL033295>
- Das, A., Budhathoki, S., et Lindenschmidt, K.-E. (2022). A stochastic modelling approach to forecast real-time ice jam flood severity along the transborder (New Brunswick/Maine) Saint John River of North America. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02234-x>
- Donaldson, N.R., et Stewart, R.E. (1993). On the influence of trajectories on precipitation type characteristics in winter storms. *Contributions to Atmospheric Physics*, 66, 125-136
- Environnement et Gouvernements locaux, Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2008). Photos for Flood - 2008-04-23 - 2008-05-02. Récupéré le 23 novembre 2021 de <https://www.elgegl.gnb.ca/0001/en/Flood/PhotoGallery/304>
- Environnement et Gouvernements locaux, Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2022). Base de données historiques sur les inondations. Récupéré le 4 août 2022 de <https://www.elgegl.gnb.ca/0001/fr/Inondation/Rechercher>
- Environnement Canada. (1974). New Brunswick Flood, April – May 1973. *Technical Bulletin, no. 81*.
- Environnement et Changement climatique Canada (2013). Canadian Climate Normals 1981-2010: Edmundston New Brunswick Station Data. *Gouvernement du Canada*. https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=6099&autofwd=1
- Environnement et Changement climatique Canada (2021). Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada. *Gouvernement du Canada*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/dix-evenements-meteorologiques-plus-marquants.html>
- Feiccabrino, J., Graff, W., Lundberg, A., Sandström, N. et Gustafsson, D. (2015). Meteorological Knowledge Useful for the Improvement of Snow Rain Separation in Surface Based Models. *Hydrology*, 2(4), 266-288. <https://doi.org/10.3390/hydrology2040266>
- Fortin, G., et Dubreuil, V. (2020). A geostatistical approach to create a new climate types map at regional scale : case study of New Brunswick, Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 323-334. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02961-2>
- Guyot, A., Protat, A., Alexander, S.P., Klekociuk, A.R., Kuma, P., McDonald, A. (2022). Detection of supercooled liquid water containing clouds with ceilometers: development and evaluation of deterministic and data-driven retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 3663-3681. <https://doi.org/10.5194/amt-15-3663-2022>
- Hale, K.E., Wlostowski, A.N., Badger, A.M., Musselman, K.N., Livneh, B., et Molotch, N.P. (2022). Modeling streamflow sensitivity to climate warming and surface water inputs in a montane catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 39, 100976. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100976>

- Harder, P. et Pomeroy, J. (2013). Estimating precipitation phase using a psychrometric energy balance method. *Hydrological Processes*, 27, 1901-1914. <https://doi.org/10.1002/hyp.9799>
- Hare, F.K., Dickison, R.B. et Ismail, S. (1997a). Variation of climate and streamflow over the Saint John River Basin since 1872. *Proceedings, 9th Workshop on River Ice, Fredericton, Canada*, 1–21
- Hare, F.K., Dickison, R.B. et Ismail, S. (1997b). Climatic variation over the Saint John River Basin: an examination of regional behaviour. *Climate Change Digest, Report, CCD 97-02*, Environment Canada, Downsview, Canada
- Harpold, A.A., Kaplan, M.L., Klos, P.Z., Link, T., McNamara, J.P., Rajagopal, S., Schumer, R., et Steele, C.M. (2017). Rain or snow: hydrologic processes, observations, prediction, and research needs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1–22. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1-2017>
- Henson, W., Stewart, R., Kochtubajda, B., et Thériault, J.M. (2011). The 1998 Ice storm : Local flow fields and linkages to precipitation. *Atmospheric Research*, 101(4), 852-862. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.05.014>
- Heymsfield, A.J., et Westbrook, C.D. (2010). Advances in the Estimation of Ice Particle Fall Speeds Using Laboratory and Field Measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(8), 2469-2482. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3379.1>
- Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T., et 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*, 91(6), 747-762. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-602>
- Jennings, K.S., Winchell, T.S., Livneh, B., et Molotch, N.P. (2018). Spatial variation of the rain–snow temperature threshold across the Northern Hemisphere. *Nature Communications*, 9(1), 1148. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03629-7>
- Jennings, K.S., et Molotch, N.P. (2019). The sensitivity of modeled snow accumulation and melt to precipitation phase methods across a climatic gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 3765-3786. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3765-2019>
- Jeong, D.I., et Sushama, L. (2018). Rain-on-snow events over North America based on two Canadian regional climate models. *Climate Dynamics*, 50, 303-316. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3609-x>
- Kidd, S.D., Curry, R.A. et Munkittrick, K.R. (2011). The Saint John River : A State of the Environment Report. Canadian Rivers Institute. Récupéré le 21 octobre 2021 de https://www.unb.ca/research/institutes/cri/ resources/pdfs/criday2011/cri_sjr_so_e_final.pdf
- Kienzle, S.W. (2008). A new temperature based method to separate rain and snow. *Hydrological Processes*, 22, 5067–5085. <https://doi.org/10.1002/hyp.7131>
- Leukauf, D., Gohm, A., Rotach, M.W., et Wagner, J.S. (2015). The Impact of the Temperature Inversion Breakup on the Exchange of Heat and Mass in an Idealized Valley: Sensitivity to the Radiative

- Forcing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(11), 2199-2216.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0091.1>
- Li, D., Lettenmaier, D.P., Margulis, S.A., et Andreadis, K. (2019). The Role of Rain-on-Snow in Flooding Over the Conterminous United States. *Water Resources Research*, 55, 8492-8513.
<https://doi.org/10.1029/2019WR024950>
- Mahdi, T. F., Jain, G., Patel, S., & Sidhu, A. K. (2019). A Review of Cyclone Track Shifts Over the Great Lakes of North America: Implications for Storm Surges. *Natural Hazards*, 98(1), 119-135.
- Matsuo, T., et Sasyo, Y. (1981). Melting of Snowflakes below Freezing Level in the Atmosphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 59(1), 10-25. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.59.1_10
- Mekis, E., Stewart, R.E., Theriault, J.M., Kochtubajda, B., Bonsal, B.R. et Liu, Z. (2020). Near-0 °C surface temperature and precipitation type patterns across Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 1741–1761. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1741-2020>
- Metek (2017). *Micro-Rain-Radar MRR-2 and MRR-PRO : a Tutorial*. METEK Meteorologische Messtechnik GmbH. https://metek.de/wp-content/uploads/2016/12/2018-0206-MRR_tutorial.pdf
- Newton, B. et Burrell, B.C. (2016). The April–May 2008 flood event in the Saint John River Basin: Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 41(1-2), 118-128. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1009950>
- O’Sullivan, A., Devito, K.J., et Curry, R.A. (2019). The influence of landscape characteristics on the spatial variability of river temperatures. *CATENA*, Volume 177, 70-83.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.006>
- Poirier, É., Thériault, J.M., et Leriche, M. (2019). Role of sublimation and riming in the precipitation distribution in the Kananaskis Valley, Alberta, Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4097-4111. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4097-2019>
- Rahman, K., et Testik, F.Y. (2020). Shapes and Fall Speeds of Freezing and Frozen Raindrops. *Journal of Hydrometeorology*, 21(6), 1311-1331. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0204.1>
- Ralph, F.M., Rauber, R.M., Jewett, B.F., Kingsmill, D.E., Pisano, P., Pagner, P., Rasmussen, R.M., Reynolds, D.W., Schlatter, T.W., Stewart, R.E., Tracton, S., et Waldstreicher, J.S. (2005). Improving Short-Term (0-48 h) Cool-Season Quantitative Precipitation Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 1619–1632.
- Rasmussen, R., Baker, B., Kochendorfer, J., Meyers, T., Landolt, S., Fischer, A. P., Black, J., Thériault, J. M., Kucera, P., Gochis, D., Smith, C., Nitu, R., Hall, M., Ikeda, K., et Gutmann, E. (2012). How Well Are We Measuring Snow?: The NOAA/FAA/NCAR Winter Precipitation Test Bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(6), 811–829. <http://www.jstor.org/stable/26219296>
- Roebber, P.J., et Gyakum, J.R. (2003). Orographic Influences on the Mesoscale Structure of the 1998 Ice Storm. *Monthly Weather Review*, 131(1), 27-50. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0027:OIOTMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0027:OIOTMS>2.0.CO;2)

- Sankaré, H., et Thériault, J.M. (2016). On the relationship between the snowflake type aloft and the surface precipitation types at temperatures near 0 °C. *Atmospheric Research, Volume 180*, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.003>.
- Stewart, R.E. (1992). Precipitation Types in the Transition Region of Winter Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(3), 287-296. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1992\)073<0287:PTITTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<0287:PTITTR>2.0.CO;2)
- Stewart, R.E., Thériault, J.M. et Henson, W. (2015). On the Characteristics of and Processes Producing Winter Precipitation Types near 0 °C. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(4), 623-639.
- Stewart, R.E., Shaw, R.W., et Isaac, G.A. (1987). Canadian Atlantic Storms Program : The Meteorological Field Project. *American Meteorological Society*, 68(4), 338-345.
- Stuart, R.A. et Isaac, G.A. (1999). Freezing Precipitation in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 37(1), 87-102.
- Thériault, J.M., Stewart, R.E., Milbrandt, J.A. et Yau, M.K. (2006). On the simulation of winter precipitation types. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D18), D18202. <https://doi.org/10.1029/2005JD006665>
- Thériault, J.M. et Stewart, R.E. (2007). On the effects of vertical air velocity on winter precipitation types. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 231–242. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-231-2007>
- Thériault, J.M. et Stewart, R.E. (2010). A Parameterization of the Microphysical Processes Forming Many Types of Winter Precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(5), 1492-1508
- Thériault, J.M., Stewart, R.E., et Henson, W. (2010). On the Dependence of Winter Precipitation Types on Temperature, Precipitation Rate, and Associated Features. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(7), 1429-1442. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2321.1>
- Thériault, J.M., Milbrandt, J.A., Doyle, J., Minder, J.R., Thompson, G., Sarkadi, N., et Geresdi, I. (2015). Impact of melting snow on the valley flow field and precipitation phase transition. *Atmospheric Research, Volume 156*, 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.006>
- Thériault, J.M., Hung, I., Vaquer, P., Stewart, R.E., et Pomeroy, J.W. (2018). Precipitation characteristics and associated weather conditions on the eastern slopes of the Canadian Rockies during March–April 2015. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4491–4512. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4491-2018>
- Thompson, H. D., Thériault, J. M., Déry, S. J., Stewart, R. E., Boisvert, D., Rickard, L., Leroux, N. R., Colli, M., et Vionnet, V. (2022). Atmospheric and surface observation data collected during the Saint John River Experiment on Cold Season Storms, Federated Research Data Repository. <https://doi.org/10.20383/103.059>. Dataset in preparation.
- Zerr, R.J. (1997). Freezing Rain : An Observational and Theoretical Study. *American Meteorological Society*, 36, 1647-1660