

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DISTRIBUTION DES NUAGES ET DES PRÉCIPITATIONS À TRAVERS LA LIGNE CONTINENTALE DE PARTAGE  
DES EAUX DANS LES ROCHEUSES CANADIENNES DANS UN CLIMAT ACTUEL ET DANS UN CLIMAT PLUS  
CHAUD ET HUMIDE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ(E)

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

JADE SEGUIN

AVRIL 2026

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.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à ma directrice de recherche, Julie Thériault, pour ses nombreux encouragements, son soutien constant et son expertise tout au long de la réalisation de ce projet. Je souhaite également remercier mes collègues pour leur appui, et plus particulièrement Katja Winger et François Roberge, pour leur précieuse aide en matière de programmation et de traitement des différents fichiers de données. Enfin, j'aimerais adresser mes plus sincères remerciements à ma famille et mes proches pour leur soutien émotionnel inconditionnel et leur présence bienvillante lors des deux dernières années.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES FIGURES .....	v
RÉSUMÉ.....	vii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	8
1.1 Mise en contexte .....	8
1.2 Précipitation orographiques .....	9
1.3 Microphysique des nuages et des précipitations .....	10
1.4 Phase des précipitations .....	10
1.5 Rivières atmosphériques .....	11
1.6 Précipitation dans les Prairies Canadiennes .....	12
1.7 Inondations .....	13
1.8 Campagnes de mesure dans les montagnes américaines .....	14
1.9 <i>Storms and Precipitation Across the Continental Divide Experiment (SPADE)</i> .....	15
1.10 Hypothèses sur l'impact des changements climatiques dans les régions montagneuses .....	16
1.11 Méthodes pour simuler un climat futur .....	17
1.12 Objectifs .....	19
CHAPITRE 2 DISTRIBUTION DES NUAGES ET DES PRÉCIPITATIONS À TRAVERS LA LIGNE CONTINENTALE DE PARTAGE DES EAUX DANS LES ROCHEUSES CANADIENNES DANS UN CLIMAT ACTUEL ET DANS UN CLIMAT PLUS CHAUD ET HUMIDE.....	20
2.1 Introduction .....	23
2.2 Methodology.....	26
2.2.1 Description of the simulation used .....	26
2.2.2 Description of the historical simulation's evaluation .....	27
2.2.3 Identification of events.....	28
2.2.4 Data analysis .....	29
2.3 Clouds and precipitation distribution at Powerline and Nipika .....	30
2.3.1 Precipitation events divided by phase.....	30
2.3.2 Precipitation events associated with direction of the flow aloft .....	33
2.3.3 Seasonal distribution of precipitation across the divide .....	34
2.4 Precipitation events across the divide.....	37
2.5 Discussion .....	44
2.6 Conclusion.....	47

CHAPITRE 3 CONCLUSION ..... 50

RÉFÉRENCES ..... 54

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. The domain of the CRCM6/GEM5 simulations used in this study, including the topography. The two sites used in this study are indicated by the dots ..... 25

Figure 2.2. (a-c) Mean annual precipitation accumulation between 1 January 2012 and 8 April 2023 produced by (a) CTRL, (b) CaPA and (c) the difference between CTRL and CaPA. (d-f) Mean daily 2-m temperature between 1 January 2012 and 8 April 2023 produced by (d) CTRL, (e) Daymet and (f) the difference between CTRL and Daymet..... 27

Figure 2.3. Average annual number of simulated rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation events binned by event accumulation in mm at (a-e) Nipika and (f-j) Powerline in (a, f) winter, (b, g), spring, (c, h), summer, (d, i), fall and (e, j) annual. .... 31

Figure 2.4. Average annual number of simulated simultaneous rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation events binned by event accumulation in mm at (a-e) Nipika and (f-j) Powerline in (a, f) winter, (b, g), spring, (c, h), summer, (d, i), fall and (e, j) annual. .... 32

Figure 2.5. Annual and seasonal average accumulation of rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation during simulated simultaneous events in CTRL and PGW simulations, binned by 600-hPa wind direction at (a,b) Nipika and (c,d) Powerline. .... 34

Figure 2.6. (a) Cross sections where total precipitation (PR), snow precipitation (SN) and liquid precipitation (RN) accumulation per season were calculated. Average cross section of the annual accumulation of (b) total precipitation, (c) snow precipitation and (d) liquid precipitation per season with CTRL and PGW simulation. Average cross section of the annual difference of accumulation of (b) total precipitation, (c) snow precipitation and (d) liquid precipitation per season between CTRL and PGW simulation. The vertical black dashed line indicates the location of continental divide. .... 35

Figure 2.7. Seasonal average integrated water vapor transport (IVT) from the PIKART (Vallejo-Bernal et al., 2025) during atmospheric river conditions. Only IVT values during atmospheric conditions were used to calculate the average at each grid point..... 36

Figure 2.8. Simulated integrated water vapor transport (IVT) maps during storm 1 with (a,b) CTRL and (c,d) PGW. Nipika is navy and Powerline is purple..... 37

Figure 2.9. (a, e) Accumulated precipitation during storm 1 simulated with CTRL, (b) accumulated precipitation during storm 1 simulated from CaPA, (c) difference in accumulated precipitation during storm 1 between CTRL and CaPA, (d) accumulated precipitation during storm 1 simulated with PGW, (f) difference in accumulated precipitation during storm 1 between PGW and CTRL. Nipika is green and Powerline is orange..... 38

Figure 2.10. Temporal and spatial ice condensates mixing ratio mean along the cross sections (Figure 6) during storm 1 in (a) CTRL and (b) PGW. Temporal and spatial of total precipitation, rain and snow accumulation during storm 1 with (c) CTRL and PGW and difference between (d) CTRL and PGW. The vertical dashed line (white in a and b, black in c and d) indicates the location of the continental divide. .... 39

Figure 2.11. (a) Western cross section (grey), continental divide (red) and eastern cross section (black) where vertical moisture fluxes were calculated. (b) Total water vapor flux flowing perpendicularly to the three cross sections shown in (a) during storm 1..... 40

Figure 2.12. Simulated integrated water vapor transport (IVT) maps during storm 2 with (a,b) CTRL and (c,d) PGW. Nipika is navy and Powerline is purple. .... 41

Figure 2.13. (a, e) Accumulated precipitation during storm 2 simulated with CTRL, (b) accumulated precipitation during storm 1 simulated from CaPA, (c) difference in accumulated precipitation during storm 1 between CTRL and CaPA, (d) accumulated precipitation during storm 1 simulated with PGW, (f) difference in accumulated precipitation during storm 1 between PGW and CTRL. .... 42

Figure 2.14. Temporal and spatial ice condensates mixing ratio mean along the cross sections (Figure 6) during storm 2 in (a) CTRL and (b) PGW. Temporal and spatial of total precipitation, rain and snow accumulation during storm 2 with (c) CTRL and PGW and difference between (d) CTRL and PGW. The vertical dashed line (white in a and b, black in c and d) indicates the location of the continental divide. .... 43

Figure 2.15. (a) Western cross section (grey), continental divide (red) and eastern cross section (black) where vertical moisture fluxes were calculated. (b) Total water vapor flux flowing perpendicularly to the three cross sections shown in (a) during storm 2..... 44

## RÉSUMÉ

Les Rocheuses canadiennes constituent une source majeure d'eau pour les provinces avoisinantes, puisqu'elles agissent comme réservoir naturel durant l'hiver. Cette chaîne de montagnes délimite approximativement la ligne continentale de partage des eaux, qui abrite *Snow Dome*, l'un des deux tripoints hydrographiques nord-américains, où se séparent les bassins versants des océans Arctique, Pacifique et Atlantique. Il a été observé que, dans certains cas, les précipitations peuvent traverser la ligne continentale de partage des eaux, ce qui influence le bilan hydrologique des bassins versants concernés ainsi que la disponibilité régionale en eau. Par ailleurs, les changements climatiques pourraient modifier les régimes de précipitations ainsi que leur distribution spatiale en milieu montagneux, soulignant la nécessité d'étudier davantage cette région. Ainsi, le but de cette étude est de quantifier la distribution des précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux dans un climat passé et futur. Pour ce faire, deux simulations couvrant l'ouest canadien ont été utilisées : une simulation d'un climat historique (CTRL) ainsi qu'une simulation d'un climat futur basée sur l'approche du pseudo-réchauffement global (PRG), qui permet de reproduire des événements passés dans des conditions climatiques perturbées. Les événements de précipitation non simultanés et simultanés des deux côtés des Rocheuses ont été comparés, en plus de deux études de cas où les précipitations traversaient la ligne de partage des eaux. Les résultats montrent que, lors des événements simultanés, une plus grande accumulation de précipitations étaient associée à des vents d'ouest qu'à des vents d'est, particulièrement durant l'automne. Sur une base annuelle, plus de précipitations tombaient du côté ouest que du côté est. Dans un climat plus chaud, les précipitations provenant du côté ouest augmenteraient, tandis que celles issues de l'est diminueraient. Les études de cas révèlent que l'évènement originaire directement de l'océan Pacifique et associé à une rivière atmosphérique présentaient des vents ainsi que des flux de vapeur d'eau plus élevés, ce qui a favorisé le transport d'une plus grande quantité de précipitations de l'autre côté de la ligne de partage des eaux, comparativement à l'évènement provenant des Prairies canadiennes. La simulation PRG a montré que les précipitations augmentaient uniquement lors de l'évènement associé à la rivière atmosphérique, grâce à des flux de vapeur d'eau plus puissants. Dans l'ensemble, ces résultats permettent de mieux comprendre le contexte météorologique lié aux événements où les précipitations traversent la ligne de partage des eaux, leur variabilité saisonnière et leur évolution probable dans un climat plus chaud et futur.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

Les précipitations provenant des régions montagneuses constituent une source majeure d'eau pour les territoires avoisinants, notamment dans l'ouest des États-Unis et du Canada, qui présentent un climat semi-arides (Pavelsky et al., 2012; Pederson et al., 2011). Durant l'hiver, les précipitations s'accumulent au sommet des montagnes pour former un manteau neigeux agissant comme un réservoir naturel d'eau (Cann et Friedrich, 2020). La fonte de cette neige entraîne des ruissellements d'eau douce durant au printemps, en été et en automne.

Certaines régions dépendent grandement de ces réservoirs d'eau naturels. Par exemple, les activités agricoles de la vallée du San Joaquin, ainsi que les métropoles de San Francisco et de Los Angeles, en Californie, sont principalement approvisionnées en eau grâce à l'accumulation de neige provenant de la chaîne de montagnes du Sierra Nevada (Pavelsky et al., 2012). Les provinces des Prairies canadiennes offrent un autre exemple, où près de 90 % du débit fluvial des rivières principales provient de la fonte des neiges et des glaciers des Rocheuses canadiennes (Fang et Pomeroy, 2023).

Les Rocheuses canadiennes abritent un tripoint hydrographique, c'est-à-dire un point de rencontre entre trois bassins versants majeurs, à partir duquel les eaux peuvent s'écouler vers les océans Arctique, Pacifique et Atlantique (Craig, 2019; Thériault et al., 2022). *Snow Dome*, l'un des deux apex hydrologiques reconnus en Amérique du Nord, a une élévation de 3,456 m et se situe à la frontière entre la Colombie-Britannique et l'Alberta. Ce sommet se trouve sur la ligne continentale de partage des eaux, une frontière naturelle séparant les bassins versants associés à différents océans, suivant approximativement la crête des Rocheuses canadiennes (Rood et al., 2005).

Il a été observé que, dans certains cas, les précipitations peuvent traverser la ligne de partage des eaux dans les Rocheuses canadiennes, modifiant ainsi la répartition des écoulements et le bilan hydrologique des bassins versants majeurs concernés (Thériault et al., 2022). Une telle redistribution peut avoir des conséquences importantes sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau de ces bassins.

Malgré l'importance de l'eau en milieu montagneux, peu d'études se sont intéressées aux précipitations dans les Rocheuses canadiennes, soulignant la nécessité d'approfondir les recherches sur ce sujet. Face aux changements climatiques, une meilleure compréhension des contextes météorologiques influençant la distribution spatiale actuelle et future des précipitations à travers la ligne de partage des eaux permettra d'améliorer la gestion des ressources hydriques dans les principaux bassins versants.

## 1.2 Précipitation orographiques

La présence de reliefs montagneux peut favoriser la formation de nuages et de précipitations orographiques lorsque l'air humide interagit avec la topographie (Chow et al., 2013; Roe, 2005). Ce phénomène se produit généralement lorsqu'une tempête déjà existante, telle qu'une tempête convective ou un front, se déplace au-dessus d'un terrain complexe (Houze, 2012).

Lorsque l'air atteint la montagne, il est forcé à s'élever le long de la pente, provoquant un refroidissement adiabatique sur le versant au vent. Ce refroidissement favorise la condensation ainsi que la formation de nuages et de précipitations lorsqu'il y a suffisamment d'humidité. En général, les nuages orographiques produisent des précipitations si efficacement que la majorité tombe rapidement sur le versant au vent (Geerts et al., 2011). Du côté sous le vent, l'air redescend, se réchauffe et s'assèche, ce qui met généralement fin aux précipitations. Cette réduction de précipitations correspond à un phénomène appelé « ombre de pluie » (*rain shadow*; Roe, 2005; Siler et al., 2013; Stockham et al., 2018). Cet effet est souvent associé aux vents de Foehn, des vents chauds, secs et rapides qui descendent en aval de la montagne (Cape et al., 2015; Elvidge et Renfrew, 2016; MacDonald et al., 2018).

Il est commun d'observer de l'air chaud et sec à l'est des Rocheuses Canadiennes. Cet air descendant le versant est, appelé le chinook, s'étend du sud de l'Alberta jusqu'au Nouveau-Mexique (Cullen et Marshall, 2011; MacDonald et al., 2018; McGinn, 2010). Ce phénomène a un impact particulièrement marqué en hiver, car il peut entraîner des hausses de température atteignant parfois 20 °C dans le sud de l'Alberta. Ce réchauffement provoque une diminution du manteau neigeux allant de 1.2 à 2 mm/jour, en raison de l'évaporation et de la sublimation (Golding, 1978).

Les caractéristiques topographique d'une montagne, telles que sa taille et sa forme, peuvent influencer la distribution spatiale des précipitations orographiques à la surface (Roe, 2005). Par exemple, les massifs plus larges présentent des taux de précipitations maximums du côté au vent, tandis que, pour les

montagnes de moindre largeur, le maximum est généralement atteint près de la crête. La forme du relief joue également un rôle dans la microphysique des nuages, puisque les particules de glace ont nettement moins de chance de traverser du côté sous le vent lorsque les montagnes sont plus hautes ou plus larges.

### 1.3 Microphysique des nuages et des précipitations

Différents processus microphysiques contribuent à la formation et à l'évolution des hydrométéores présents dans les nuages, notamment la diffusion de vapeur, la collection et la fonte (Chow et al., 2013; Houze, 2014). La croissance des gouttelettes de nuage dépend de plusieurs facteurs, tels que la concentration des noyaux de condensation, la distribution des tailles initiales et le contenu en eau liquide disponible dans le nuage.

Le type de nuage dépend en partie de la phase des gouttelettes qui le compose (Chow et al., 2013). La microphysique des nuages chauds concerne les nuages constitués uniquement de gouttelettes liquides (Jonas, 1996). Une fois que l'air atteint la saturation, les gouttelettes commencent à croître par condensation, puis, éventuellement, par coalescence, un processus au cours duquel les gouttes les plus grandes absorbent les plus petites sous l'effet de la gravité. Les nuages chauds peuvent se former même à des températures négatives lorsqu'ils contiennent des gouttelettes surfondues.

Dans les nuages froids, la croissance des particules de glace peut se produire par plusieurs mécanismes. Le mécanisme de déposition permet la formation de glace lorsque la vapeur d'eau se solidifie directement sur les cristaux existants (Chow et al., 2013). L'agrégation correspond à la collision et à la fusion de particules de glace entre elles, formant ainsi des flocons plus volumineux. Enfin, le processus de givrage survient lorsque des gouttelettes d'eau surfondues entrent en contact avec des cristaux de glace, les recouvrant et les solidifiant.

### 1.4 Phase des précipitations

La phase et le type de précipitation sont principalement influencés par le profil vertical de température (Bourgouin, 2000; Thériault et al., 2006). Les transformations microphysiques, telles que la fusion et la congélation, jouent un rôle essentiel dans la formation des différents types de précipitations solides (Stewart et al., 2015). Ainsi, lorsque les hydrométéores traversent une ou plusieurs isothermes à 0 °C, le type de précipitation à la surface peut varier (Bourgouin, 2000). La formation de la majorité des précipitations solides implique la présence d'une couche d'air chaude en altitude et d'une couche d'air

sous 0 °C plus près du sol (Thériault et al., 2006). Par exemple, la pluie verglaçante ou le grésil se forment lorsque des hydrométéores traversent une couche d'air chaude avant de pénétrer dans une couche d'air froid. Cependant, si la couche chaude est trop mince, les précipitations atteignant la surface seront de la neige. Enfin, d'autres facteurs atmosphériques, tels que la distribution de l'humidité, le mouvement vertical, la couverture nuageuse et la concentration en noyaux glaçogènes, peuvent également influencer le type de précipitation hivernale (Bourgouin, 2000).

La structure verticale de la température atmosphérique contrôle non seulement le type de précipitation, mais délimite également des zones de transition entre les précipitations solides et liquides. Ces zones peuvent se situer en montagne, à des altitudes moyennes, où la neige domine en haute altitude tandis que la pluie prévaut à des altitudes plus basses (Stewart et al., 2015; Thériault et al., 2023). Elles sont particulièrement sensibles aux variations de température, puisque la phase dominante peut rapidement changer. Dans les Rocheuses canadiennes, des précipitations solides peuvent atteindre la surface même lorsque la température de l'air s'élève jusqu'à 9 °C lorsque l'humidité relative est de 45 % (Harder et Pomeroy, 2013; Thériault et al., 2018). Par conséquent, la zone de transition n'est pas nécessairement associée à l'isotherme de 0 °C, et son altitude varie selon la température, l'humidité et la topographie (Almonte et Stewart, 2019; Thériault et al., 2023).

Les zones de transition pluie-neige en milieu montagneux sont particulièrement vulnérables aux épisodes de pluie-sur-neige, un phénomène pouvant contribuer à des inondations et des avalanches (Brandt et al., 2022; Kormos et al., 2014; López-Moreno et al., 2021). Ce phénomène survient généralement au printemps et au début de l'été, lorsque des précipitations liquides tombent sur un manteau neigeux, accélérant la fonte et entraînant un ruissellement important (Pomeroy, Stewart, et al., 2016; Vionnet et al., 2020). L'intensité de ce processus dépend de plusieurs facteurs, notamment de la quantité de précipitations, de l'altitude du niveau de congélation, ainsi que de la masse et l'étendue du manteau de neige (López-Moreno et al., 2021; McCabe et al., 2007).

### 1.5 Rivières atmosphériques

Sur la côte ouest de l'Amérique du Nord, la présence des rivières atmosphériques joue un rôle majeur dans le régime des précipitations des régions touchées (Radić et al., 2015; Sharma et Déry, 2020). Ces rivières atmosphériques sont définies comme de longs (> 2,000 km) et étroits (< 1,000 km) corridors de transport de vapeur d'eau (Guan et al., 2023; Neiman et al., 2008). Elles se forment généralement aux moyennes

latitudes, à l'avant du front froid d'un cyclone extratropical (DeFlorio et al., 2018; Ralph et al., 2017; Rutz et al., 2014). Elles constituent une composante majeure du cycle global de l'eau, assurant plus de 90% du transport de vapeur d'eau des régions (sub)tropicales vers les moyennes latitudes et les pôles (Guan et al., 2023; Kim et Chiang, 2022; Sharma et Déry, 2020). Par conséquent, leurs fréquence, leur position et leur intensité influencent directement les inondations, les sécheresses et la disponibilité des ressources en eau (Ralph et al., 2017).

La Colombie-Britannique est particulièrement exposée à ce phénomène, puisqu'elle est située sur la côte ouest du Canada et directement influencée par les vents d'ouest dominants des latitudes moyennes provenant de l'océan Pacifique (Sharma et Déry, 2020). La quantité et la phase des précipitations associées à ces phénomènes varient selon la saison, la latitude, l'altitude et la proximité de la côte. Les rivières atmosphériques sont plus fréquentes durant les saisons froides, soit à l'automne et en hiver, en raison de la présence de cyclones extratropicaux provenant du nord du Pacifique. À l'échelle synoptique, elles constituent le principal mécanisme d'apport de précipitations hivernales dans les Rocheuses canadiennes.

L'effet orographique de la région amplifie les précipitations associées aux rivières atmosphériques, pouvant mener à des événements extrêmes tels que des inondations ou des avalanches (Radić et al., 2015). En Colombie-Britannique, 90 % des épisodes de précipitation extrêmes sont liés à ce phénomène (Sharma et Déry, 2020). Par exemple, la province a subi des inondations catastrophiques en novembre 2021 en raison du passage consécutif de deux rivières atmosphériques (Gillett et al., 2022; Richards-Thomas et al., 2024). Ces événements ont forcé l'évacuation de plus de 20,000 personnes, causé plus de 40 blessés et fait 5 victimes. Au total, les pertes assurées ont été estimées à plus de 5 milliards de dollars.

Cependant, les rivières atmosphériques perdent une partie de leur vapeur d'eau par précipitation lorsqu'elles franchissent les barrières montagneuses (Neiman et al., 2008; Rutz et al., 2014;). Par exemple, dans la chaîne des Cascades, la fréquence et la durée de ces événements diminuent rapidement entre les zones côtières et le versant sous le vent. En Colombie-Britannique, l'influence des rivières atmosphériques sur les précipitations décroît fortement avec la distance à la côte (Sharma et Déry, 2020).

## 1.6 Précipitation dans les Prairies Canadiennes

Du côté est des Rocheuses canadiennes, des épisodes de précipitations intenses et des inondations peuvent être générés par des flux d'humidité en provenance des Prairies canadiennes et des États-Unis

(Thériault et al., 2023). Au printemps, les régimes météorologiques à grande échelle favorisent des vents d'est ascendant le long des pentes, pouvant induire des précipitations orographiques (Thériault et al., 2018). Par exemple, les inondations qui ont touchées le sud de l'Alberta en 2013 ont notamment été alimentées par une masse d'air humide issue des Prairies canadiennes, transportée vers l'Alberta par un courant-jet de basse altitude provenant du sud-est (Liu et al., 2016). Durant cet évènement, l'humidité a traversé la ligne de partage des eaux jusqu'au sud de la Colombie-Britannique (Thériault et al., 2022).

## 1.7 Inondations

Les Rocheuses canadiennes sont une région particulièrement vulnérable aux inondations, en raison des sources d'humidité pouvant provenir à la fois du versant pacifique et du versant continental. Les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus importantes au Canada, représentant le type d'évènement le plus fréquent et le plus coûteux (Gaur et al., 2019; Tsang et Scott, 2020). Entre 1900 et 2005, 241 catastrophes liées aux inondations ont été recensées, soit près de cinq fois plus que celles associées aux feux de forêt (Sandink et al., 2010). Elles ont engendré des coûts supérieurs à 2 milliards de dollars et causé la mort de plus de 200 personnes au cours du 20<sup>e</sup> siècle (Buttle et al., 2016). Ces évènements peuvent survenir sur l'ensemble du territoire canadien et à tout moment de l'année.

Les inondations peuvent être déclenchées à la fois par des processus naturels, tels que de fortes précipitations, des épisodes de pluie-sur-neige et des crues subites, et par les activités anthropiques, comme la construction de barrages ou l'urbanisation (Buttle et al., 2016; Richards-Thomas et al., 2024). Au printemps, elles résultent principalement de la fonte de la neige et de la formation d'embâcles de glace, tandis qu'en été, elles sont généralement provoquées par des crues subites liées à une convection plus intense, favorisant des précipitations de forte intensité.

Historiquement, plusieurs inondations majeures ont touché les métropoles canadiennes : Toronto en 2005 et 2013, Winnipeg en 2009, ainsi que Calgary en 2010 et 2013 (Armenakis et Nirupama, 2014; Gaur et al., 2019; Tsang et Scott, 2020; Wazney et Clark, 2016). Parmi celles-ci, la catastrophe du sud de l'Alberta en 2013 a été particulièrement marquante. Entre le 19 et le 21 juin, plus de 200 mm de précipitations sont tombés sur de vastes zones du versant est des Rocheuses canadiennes (Pomeroy, Stewart, et al., 2016; Vionnet et al., 2020). Cet évènement, déclenché par une combinaison de fortes précipitations, du phénomène de pluie-sur-neige et d'une fonte printanière marquée dans les Rocheuses canadiennes, constitue la catastrophe naturelle la plus coûteuse dans l'histoire du Canada, avec des dommages estimés

à plus de 5 milliards de dollars (Milrad et al., 2015). Dans ce cas, la phase des précipitations a été un facteur clé pour expliquer l'ampleur des inondations (Thériault et al., 2023).

### 1.8 Campagnes de mesure dans les montagnes américaines

De nombreuses campagnes de mesure et études ont été menées afin de mieux comprendre les processus orographiques influençant les précipitations dans les montagnes américaines (e.g. Houze et al., 2017; Lundquist et al., 2015; McMurdie et al., 2018; Tessendorf et al., 2019). Dans ce contexte, l'une des variables déterminantes pour la distribution spatiale des précipitations orographiques est la trajectoire suivie par les particules précipitantes.

Cann et Friedrich (2020) ont étudié le rôle des trajectoires des flux d'humidité sur la quantité et la distribution spatiale de la neige dans les montagnes Payette, en Idaho. Lors de l'expérience *Seeded and Natural Orographic Wintertime clouds: the Idaho Experiment (SNOWIE)*, 24 événements précipitants ont été observés entre janvier et mars 2017. Trois trajectoires typiques reliant le Pacifique à cette chaîne de montagnes ont été identifiées. La plus fréquente mettait en jeu un blocage du flux d'humidité par la Sierra Nevada, située au nord de la Californie. Ce flux était alors redirigé parallèlement à cette chaîne de montagnes par un jet de barrière transportant l'humidité vers le nord. Par la suite, le flux d'humidité parvenait à traverser la région située entre le lac Tahoe et le *Burney Gap*, où le relief est moins élevé. Dans les deux autres trajectoires, le flux d'humidité n'était pas bloqué par le jet de barrière et les vents dominants provenant de l'ouest ou du sud-ouest permettaient au flux de franchir directement les chaînes de montagnes de la Californie et du Nevada pour atteindre les montagnes Payette.

Au cours de SNOWIE, la majorité des trajectoires ont été bloquées par la Sierra Nevada. Cette situation était associée à des masses d'air plus chaudes, plus humides et plus venteuses, ainsi qu'une couche nuageuse plus épaisse dans les montagnes Payette (Cann et Friedrich, 2020). De plus, les taux de chute de neige étaient plus élevés et la distribution de neige plus uniforme que pour les autres trajectoires. Cette étude a ainsi démontré l'importance des trajectoires de flux d'humidité en provenance du Pacifique vers les montagnes de l'ouest sur la quantité et la distribution de neige dans cette région, qui dépend fortement du manteau neigeux pour ses ressources en eau.

Une autre campagne de mesure, *Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver 2010 (SNOW-V10)*, menée à *Cypress Mountain* à Vancouver, a permis d'observer plusieurs événements de précipitations

entre janvier et avril 2010. Berg et al (2017) ont montré que la trajectoire des précipitations dans les régions montagneuses influence à la fois le type de précipitation et leur distribution spatiale. Selon leur modèle conceptuel, une particule de précipitation débute sous forme de flocon de neige en amont du relief, puis fond en goutte de pluie lorsqu'elle traverse l'isotherme de 0 °C. En approchant de la montagne, le mouvement ascendant de l'air peut être suffisamment intense pour soulever la goutte, ce qui peut provoquer de la pluie verglaçante si la température est inférieure à 0 °C. Autrement, la goutte peut être transportée telle quelle vers le versant sous le vent de la montagne.

### 1.9 *Storms and Precipitation Across the Continental Divide Experiment (SPADE)*

Les précipitations orographiques dans les chaînes de montagnes canadiennes ont fait l'objet de moins d'études que dans les régions montagneuses américaines. L'expérience *Storms and Precipitation Across the Continental Divide Experiment (SPADE)* a été initiée afin d'étudier la distribution des précipitations dans la région de la ligne continentale de partage des eaux des Rocheuses canadiennes, située entre la Colombie-Britannique et l'Alberta. Cette étude s'est concentrée sur 13 événements survenus entre avril et juin 2019 à proximité de cette ligne. L'objectif principal était de mieux comprendre les conditions atmosphériques et les processus dynamiques permettant aux précipitations de traverser la ligne de partage des eaux.

À partir de leurs observations, Thériault et al. (2022) ont établi un modèle conceptuel décrivant les facteurs déterminants pour que les précipitations puissent franchir la ligne de partage des eaux. Le contexte météorologique de chaque événement influençait directement la quantité de précipitations tombant de chaque côté de la ligne. Par exemple, lorsqu'un flux d'humidité parallèle ou quasi parallèle provenait du nord-ouest, il ne générait pas de précipitations simultanées sur les deux versants. En revanche, un flux perpendiculaire favorisait des précipitations plus abondantes du côté d'origine de l'humidité et permettait leur transport vers l'autre versant, à condition que la teneur en humidité soit suffisante et que les condensats n'aient pas subi d'évaporation ou de sublimation.

Les précipitations pouvaient également traverser la ligne lorsque la couche précipitante se développait bien au-dessus de l'altitude de la ligne de partage. Il était fortement suggéré que des cristaux de glace se formaient en altitude avant d'être transportés vers le versant opposé. En surface, des précipitations plus larges et mixtes ont été observées, car l'épaisseur de la couche précipitante favorisait la fonte des particules ou leur croissance par déposition, agrégation et givrage.

### 1.10 Hypothèses sur l'impact des changements climatiques dans les régions montagneuses

En raison de la grande sensibilité des conditions atmosphériques dans les régions montagneuses face aux changements climatiques, l'augmentation des températures pourrait fortement modifier leur régime de précipitations. D'abord, la zone de transition pluie-neige dans les régions montagneuses de l'Ouest canadien et américain risque de se déplacer vers des altitudes plus élevées, entraînant une augmentation de la proportion de précipitations liquides atteignant la surface (e.g. Almonte et Stewart, 2019; Fang et Pomeroy, 2023; Klos et al., 2014; Leung et al., 2004; Pavelsky et al., 2012; Pomeroy et al., 2015; Thériault et al., 2023). Un réchauffement de seulement de 2 °C, soit un scénario optimiste, suffirait à provoquer une transition vers une dominance de précipitations liquides dans les Rocheuses canadiennes (Pomeroy et al., 2015). Ce changement de phase accélérerait la vitesse de chute des particules et pourrait modifier la distribution spatiale et temporelle des précipitations (Pavelsky et al., 2012; Thériault et al., 2022). Cependant, l'ampleur de ces impacts sur la phase et la vitesse de chute des précipitations dépend de l'altitude, de la topographie, de la circulation atmosphérique et de la période de l'année.

Une autre conséquence majeure du réchauffement climatique réside dans la diminution de l'épaisseur du manteau neigeux saisonnier, particulièrement en montagne dans les zones où les températures hivernales avoisinent 0 °C. Gottlieb et Mankin (2024) ont montré que le manteau neigeux de 31 des 169 principaux bassins versants de l'hémisphère Nord est déjà affecté par la hausse des températures directement liée aux activités anthropiques. Cette réduction pourrait accroître les risques d'inondation, entraîner une fonte printanière plus précoce et raccourcir la durée des saisons enneigées, modifiant ainsi le moment et le volume d'eau des apports en eau pour les communautés avoisinantes (Fang et Pomeroy, 2023; López-Moreno et al., 2020; Pavelsky et al., 2012; Pomeroy et al., 2015). Par exemple, dans le *Marmot Creek Research Basin*, alimenté par les Rocheuses canadiennes, une augmentation du débit printanier de 236 % et du débit en début d'automne de 13 % est anticipée (Fang et Pomeroy, 2020). Toutefois, la sensibilité du manteau neigeux à la température est non linéaire et celui-ci devient marginalement plus sensible à un réchauffement de 1 °C lorsque les températures hivernales climatologiques sont supérieures à -8 °C (Gottlieb et Mankin, 2024).

Les événements de pluie-sur-neige pourraient, quant à eux, diminuer en fréquence, mais augmenter en intensité (López-Moreno et al., 2021). Malgré la hausse du nombre d'événements de précipitations liquides, la réduction de la durée de la saison enneigée limiterait la période propice à leur occurrence.

Toutefois, le réchauffement climatique pourrait accroître le volume de fonte pour chaque évènement, entraînant un ruissellement plus important.

Sur la côte ouest des États-Unis, les changements liés au réchauffement se manifesteraient plus fortement en dessous de 3,000 m d'altitude (Pavelsky et al., 2012). Par exemple, dans la chaîne du Sierra Nevada, plus de 80 % des zones de stockage de neige se trouvent sous ce seuil, rendant la région particulièrement vulnérable à une transition vers des précipitations majoritairement liquides (Hayhoe et al., 2004). Les montagnes côtières proche du Pacifique seraient également fortement affectées avec des précipitations majoritairement sous forme de pluie, même durant l'hiver, réduisant jusqu'à 70 % du manteau neigeux et provoquant des crues significatives 2 à 3 mois plus tôt (Ikeda et al., 2021).

Dans les Rocheuses canadiennes, la quantité et la distribution spatiale des précipitations pourraient également être altérées. Une intensification des rivières atmosphériques est probable, car une atmosphère plus chaude pouvant contenir davantage de vapeur d'eau, ce qui augmenterait le transport d'humidité et les apports en précipitations (Radić et al., 2015; Sharma et Déry, 2020). Bien qu'une transition vers des précipitations liquides réduise le transport horizontal des particules, une humidité et des températures plus élevées favoriseraient la formation de couches précipitantes plus épaisses, permettant à une plus grande quantité d'eau de franchir la ligne continentales de partage des eaux (Thériault et al., 2022).

En résumé, les évènements de précipitations extrêmes risquent de devenir plus fréquents dans les régions urbaines canadiennes au cours des prochaines décennies en raison des changements climatiques qui intensifient les systèmes météorologiques (Buttle et al., 2016). Selon plusieurs projections, entre 40 % et 60 % des 100 villes canadiennes les plus peuplées vont connaître une augmentation de la fréquence des inondations (Gaur et al., 2019). Les villes situées dans les provinces des Prairies canadiennes sont particulièrement à risques, en raison de l'intensification saisonnière des précipitations, avec des hivers plus humides et des étés plus pluvieux.

### 1.11 Méthodes pour simuler un climat futur

Pour quantifier les effets des changements climatiques, l'approche pseudo-réchauffement global (PRG) peut être utilisée. Cette technique consiste à simuler des évènements historiques en modifiant les conditions aux limites issues des données de réanalyse initiales afin de représenter des perturbations

climatiques (e.g. Brogli et al., 2023; Cholette et Thériault, 2021; Schär et al., 1996). Cela permet d'estimer la réponse thermodynamique d'un climat modifié, tout en conservant en grande partie la configuration synoptique initiale. L'un des intérêts de cette approche est d'évaluer la manière dont un événement peut évoluer dans un climat différent. De nombreuses études ont recours à cette approche pour évaluer plus précisément les impacts futurs des changements climatiques (e.g. Almonte et Stewart, 2019; Cholette et Thériault, 2021; Fang et Pomeroy, 2020).

Par exemple, Ikeda et al (2021) ont étudié les précipitations solides et le manteau neigeux dans l'ensemble des chaînes de montagneuses de la côte ouest des États-Unis, pour un climat actuel et futur. Selon leurs simulations PRG, des changements significatifs devraient survenir d'ici 2100 et les chaînes de montagnes situées à proximité du Pacifique seraient les plus touchées.

Thériault et al. (2023) ont également utilisé les simulations PRG afin d'analyser l'impact des changements thermodynamiques liés au réchauffement climatique sur les zones de transition pluie-neige dans le sud des Rocheuses canadiennes. L'une de leurs conclusions principales est que, dans un climat plus chaud, la couche correspondant à 0 °C se situerait à une altitude plus élevée des deux côtés de la ligne de partage des eaux.

Lenderink et al. (2025) ont analysé trois événements de précipitations extrêmes ayant entraîné des inondations, ainsi qu'un événement lié à un système convectif de méso-échelle accompagné de grêle et de fortes rafales de vent. L'approche PRG a permis d'estimer la réponse de ces événements aux changements climatiques. Dans un climat plus chaud, les trois épisodes de précipitations ont généré des quantités de précipitations plus élevées que prévu, et deux des cas ont montré que les précipitations étaient concentrées sur une zone plus restreinte, ce qui augmente le risque de crues soudaines.

Toutefois, l'approche PRG présente certaines limitations. Par exemple, comme la simulation PRG conserve le même cadre synoptique imposé par les conditions aux limites, elle peut réduire la variabilité intra-annuelle et interannuelle entre les simulations historiques et PRG (Brogli et al., 2023; Lenderink et al., 2025b). Par conséquent, le nombre de systèmes météorologiques ainsi que la diversité des situations synoptiques à grande échelle varient peu.

## 1.12 Objectifs

Étant donné l'impact anticipé du réchauffement climatique sur les régimes de précipitation et les événements météorologiques extrêmes, il est essentiel de continuer à étudier l'évolution des précipitations en région montagneuse. Bien que de nombreuses études se soient intéressées aux chaînes de montagnes américaines, peu se sont focalisées sur les Rocheuses canadiennes et sur la distribution spatiale des précipitations à travers la ligne de partage des eaux. Cela souligne l'importance de mieux comprendre la climatologie de cette région, notamment pour améliorer la gestion des ressources en eau ainsi que de mieux anticiper les épisodes d'inondations afin d'en réduire les impacts.

L'objectif de l'étude est de caractériser les conditions météorologiques pouvant mener à des précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux dans un climat passé et futur. Pour ce faire, des simulations climatiques couvrant l'ouest du Canada dans un climat historique et plus chaud sur une période de 11 ans ont été utilisées. Les simulations historiques ont été comparées aux observations issues du *Canadian Precipitation Analysis System* (CaPA; Mahfouf et al., 2007) et Daymet (Thornton et al., 2022) pour évaluer le modèle. La quantité, la phase et l'origine des précipitations à travers la ligne de partage des eaux ont été analysées entre différents événements. Enfin, l'impact d'un climat plus chaud et humide a été quantifié à l'aide des simulations PRG. Afin de mieux comprendre les conditions atmosphériques menant à des précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux, des études de cas ont été menées.

## **CHAPITRE 2**

### **DISTRIBUTION DES NUAGES ET DES PRÉCIPITATIONS À TRAVERS LA LIGNE CONTINENTALE DE PARTAGE DES EAUX DANS LES ROCHEUSES CANADIENNES DANS UN CLIMAT ACTUEL ET DANS UN CLIMAT PLUS CHAUD ET HUMIDE**

Ce chapitre, présenté sous la forme d'un article scientifique rédigé en anglais, sera soumis à un journal scientifique revu par les paires. L'article porte sur les précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux dans les Rocheuses canadiennes dans un climat passé et futur.

**Cloud and precipitation distribution across the continental divide in the Canadian Rockies in  
current and future climate conditions**

Jade Séguin<sup>a</sup>, Julie M. Thériault<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Centre ESCER, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Université du Québec à Montréal,  
Montréal, Québec, Canada*

Corresponding author: [seguin.jade.2@courrier.uqam.ca](mailto:seguin.jade.2@courrier.uqam.ca)

## ABSTRACT

The Canadian Rockies form a major mountain range, in which the continental divide is located. It is the home to a hydrological apex that separates the Arctic, Pacific and Atlantic Ocean drainage basins. Previous studies have shown that precipitation events can cross the divide and that climate change may modify precipitation distribution in this mountainous region. This study aims to quantify the partitioning of precipitation across the continental divide in the Canadian Rockies under both historical and warmer climate conditions. A historical simulation and a pseudo-global warming (PGW) simulation were used. Precipitation events occurring non-simultaneously and simultaneously on both sides of the Rockies were compared, and two case studies in which precipitation crossed the divide were examined. Simultaneous events exhibited greater precipitation accumulation when associated with westerlies, particularly during fall. Under warmer conditions, precipitation originating from the west increased, whereas precipitation arriving from the east decreased. The two case studies showed that the event from the Pacific Ocean associated with an atmospheric river carried more water vapor horizontally and resulted in more precipitation on the other side of the divide, compare to the storm east of the Canadian Rockies. With PGW simulation, only the event with moisture coming from the west showed an increase in precipitation across the divide. Overall, these results improve our understanding of the mechanisms and seasonal variability under which precipitation crosses the continental divide and how they may evolve under warmer conditions.

## 2.1 Introduction

The Canadian Rockies are home to a hydrological apex, a point where three major drainage basins meet, allowing water to flow toward the Arctic, Pacific, and Atlantic oceans (Craig, 2019; Thériault et al., 2022). The Snow Dome, which is an altitude of 3,456 m above sea level (ASL), is located on the border between the provinces of Alberta and British Columbia, and Triple Divide Peak, which is at an altitude of 2,445 m ASL, is in Montana (United States), are both triple continental divides in North America. These two peaks are on the Continental Divide, a topographic boundary that approximately traces the crest of the Rocky Mountains.

The Canadian Rockies are susceptible to extreme flooding events triggered by intense rainfall, such as the Calgary floods in 2013 (Flesch and Reuter, 2012; Pomeroy et al., 2016; Vionnet et al., 2020). The complex topography contributes to orographic precipitations when moist air is forced to rise as it encounters elevated terrain (Chow et al., 2013). This ascending motion leads to cloud and precipitation formation on the windward side of the mountain. Orographic precipitation can occur on both the western slopes, such as the Coastal Mountains and the western side of the Canadian Rockies, and the eastern slopes of the Canadian Rockies. The western slopes of the Rocky Mountains are often impacted by atmospheric rivers, which can lead to extreme precipitation events and flooding (Sharma and Déry, 2020; Radić et al., 2015). On the east side, precipitation is produced by easterly winds associated with low-pressure systems located in southeastern Saskatchewan. In the spring, large-scale weather patterns often support easterly winds, leading to ascending motion along the mountainside, occasionally resulting in heavy precipitation events (Thériault et al., 2018). For example, the 2013 Calgary flood was initiated by moisture originating from the Great Plains and transported to Alberta by a southeasterly low-level jet (Liu et al., 2016).

In the Canadian Rockies, precipitation phase varies spatially and temporally, with both snow and rain occurring throughout the year (Harder and Pomeroy, 2013). Factors such as temperature and moisture patterns in proximity to topography influence the type of precipitation that occurs in mountainous regions (Thériault et al., 2022). In this region, solid precipitation can reach the surface at temperatures as high as 9 °C when the air is dry, with relative humidity as low as 45 % (Harder and Pomeroy, 2013; Thériault et al., 2018). Airflow associated with complex topography can also influence precipitation phase (Berg et al., 2017).

Precipitation trajectories influence both the precipitation types and its spatial distribution near mountainous regions. Berg et al. (2017) developed a conceptual model of precipitation particle trajectories during the Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver 2010 (SNOW-V10) field campaign at Cypress Mountain, conducted between January and April 2010. In this model, a precipitation particle begins as a snowflake falling upstream of the mountain, melting into a raindrop upon crossing the 0°C isotherm. As it reaches the mountain, upward airflow may become strong enough to carry the drop upward, causing it to fall as freezing rain if temperatures are below 0 °C. Alternatively, the raindrop may be transported downstream of the mountain. Poirier et al. (2019) also shows that rimed snow versus dry snow falling simultaneously at the same location do not have the same origin in the clouds.

In a warming climate, the strong sensitivity of mountainous atmospheric conditions to temperature increases means that orographic precipitation is more likely to fall as rain rather than as snow (Pavelsky et al., 2012). Pomeroy et al. (2015) found that even a 2°C warming could lead to a shift toward liquid precipitation. Changes in precipitation phase and fall speed are expected to vary depending on several factors, including altitude, topography, atmospheric circulation, and time of year (Pavelsky et al., 2012). These changes could reduce the depth of the seasonal mountain snowpack. Regions with winter temperatures near 0°C are particularly at risk. As a result, spring snowmelt is likely to occur earlier in the year, shortening the duration of the snow-covered season (Vionnet et al., 2020). Moreover, Almonte and Stewart (2019) concluded that a warmer climate would shift transition regions to higher elevations, with more frequent occurrences and increased precipitation amounts in southern Canadian Cordillera, a mountainous region that includes the Rocky Mountains.

To better understand precipitation distribution in the Canadian Rockies, the Storms and Precipitations Across the Continental Divide Experiment (SPADE) experiment was conducted in 2019. The study focused on precipitation events that occurred between April and June 2019. Thériault et al. (2022) found that precipitation could cross the continental divide when it reached altitudes higher than the divide itself. In addition, sufficient moisture had to be transported on both sides to prevent evaporation or sublimation. The meteorological context of each event largely determined the quantity of precipitation that had fallen on each side of the continental divide. For instance, a moisture flux oriented parallel to the divide did not produce precipitation on both sides. When precipitation did cross the divide, mixed precipitation was observed at the surface and was associated with deeper precipitation layers.

Given that the water availability across North America depends on the moisture and condensate reaching the surface in the Canadian Rockies, it is essential to better understand the precipitation processes responsible for major precipitation events in this region. The goal of this study is to characterize the precipitation partitioning across the continental divide in the Canadian Rockies under both historical and warmer climate conditions. To achieve this, 11-year convection-permitting climate simulations were used over western Canada (Figure 2.1). First, the simulations were evaluated against observational dataset, including the Canadian Precipitation Analysis (CaPA; Mahfouf et al., 2007) and Daymet (Thornton et al., 2022). Second, precipitation amounts and phases across the continental divide were compared. The origin of the precipitation, whether the system was located on the eastern side or the western side of the divide, or if the flow originated from the south or the north, was also quantified. Precipitation and cloud depth were analyzed for events where precipitation did and did not cross the divide. Third, simulated changes under warmer conditions were quantified.

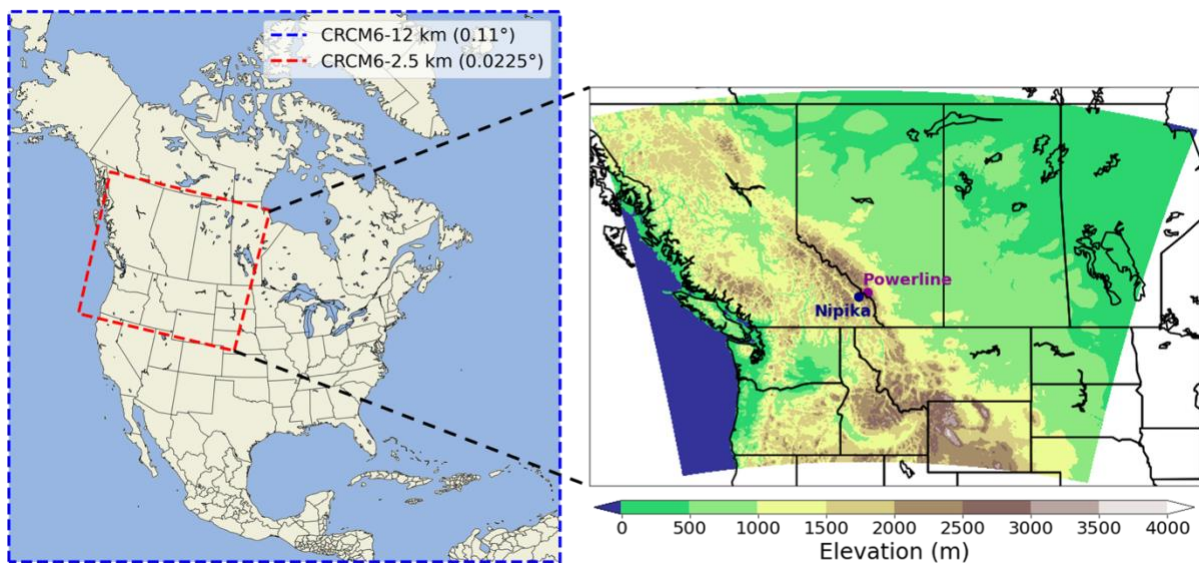


Figure 2.1. The domain of the CRCM6/GEM5 simulations used in this study, including the topography. The two sites used in this study are indicated by the dots.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 describes the methodology used. Section 3 presents the seasonal and annual distribution of precipitation events at Nipika and Powerline, based on the CTRL and PWG simulations. Section 4 examines case studies of events that either crossed or did not cross the continental divide, under both historical and warmer climate conditions. Section 5 discusses the results, and section 6 provides the conclusions.

## 2.2 Methodology

### 2.2.1 Description of the simulation used

Two simulations conducted with the Canadian Regional Climate Model version 6 (CRCM6/GEM5; Roberge et al., 2025) were used in this study. Both have a domain size of 940 x 844 grid points with a spatial resolution of 0.0225°, corresponding to a 2.5-km grid spacing over western Canada (Figure 2.1). The simulations covered the period from 1 January 2012 to 8 April 2023 and provided hourly outputs. The data are available at (Roberge et al., 2025).

First, a historical simulation (CTRL), was driven by an intermediate simulation with a 12-km grid-spacing. That simulation was driven by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5 (ERA5; Hersbach et al., 2020) to represent the current climate conditions. The second simulation, called the pseudo-global warming (PGW), was also driven by the 12-km grid-spacing simulation driven by ERA5 perturbed to simulate warmer and more humid climate conditions. The PGW approach simulates historical events under perturbed climate conditions by modifying the boundary conditions of the reanalysis data originally used (Brogli et al., 2023; Cholette and Thériault, 2021; Schär et al., 1996). The perturbation applied alter atmospheric fields, including humidity, to simulate a warmer and more humid climate. This method is primarily used to evaluate the thermodynamic response of past events to warmer climate conditions. Only mesoscale dynamic perturbation are simulated due to the thermodynamics feedbacks. Because this approach uses the same lateral boundary condition for both the historical and PGW simulations, it limits the changes in large-scale circulation and interannual variability (Brogli et al., 2023; Lenderink et al., 2025b).

The parameterizations of the model are the same for both simulations. The Canadian Land Surface Scheme (CLASS) was used to simulate interactions between the atmosphere, land surface, and lakes (Verseghy, 2000). The lakes were modelled by Fresh-water Lake (Flake; Mironov et al., 2003). Both simulations use 16 pressure levels with a 100 hPa top level.

The Predicted Particle Properties (P3) microphysics scheme (Morrison and Milbrandt, 2015) was used in both simulations to represent cloud and precipitation particles through the evolution of their physical properties in space and time. This scheme uses a single ice particle category with four prognostic variables: total ice mass mixing ratio, ice number mixing ratio, rime mass mixing ratio and bulk rime volume mixing ratio. From these conserved variables, several predicted properties, including rime mass fraction and mean

particle size, can be calculated through various ice-growth processes such as vapor deposition, riming, and aggregation. Because the simulations are convection-permitting, the Kain-Fritsch convective parametrization (Kain, 2004) was not applied in these simulations.

### 2.2.2 Description of the historical simulation's evaluation

The CTRL was compared to gridded precipitation from the Canadian Precipitation Analysis System (CaPA; Mahfouf et al., 2007) and the 2-m air temperature from Daymet (Thornton et al., 2022; Figure 2.2). CaPA is a 10-km gridded product that provides precipitation analysis over North America every 6 hours, based on a combination of forecast data and surface observations (Mahfouf et al., 2007). Daymet is a 1-km gridded dataset that offers daily estimates of weather variables, including precipitation and temperature, by interpolating station observations across North America (Thornton et al., 2022). Only the historical simulation was evaluated against observations to assess the model's ability to simulate precipitation and 2-m air temperature.

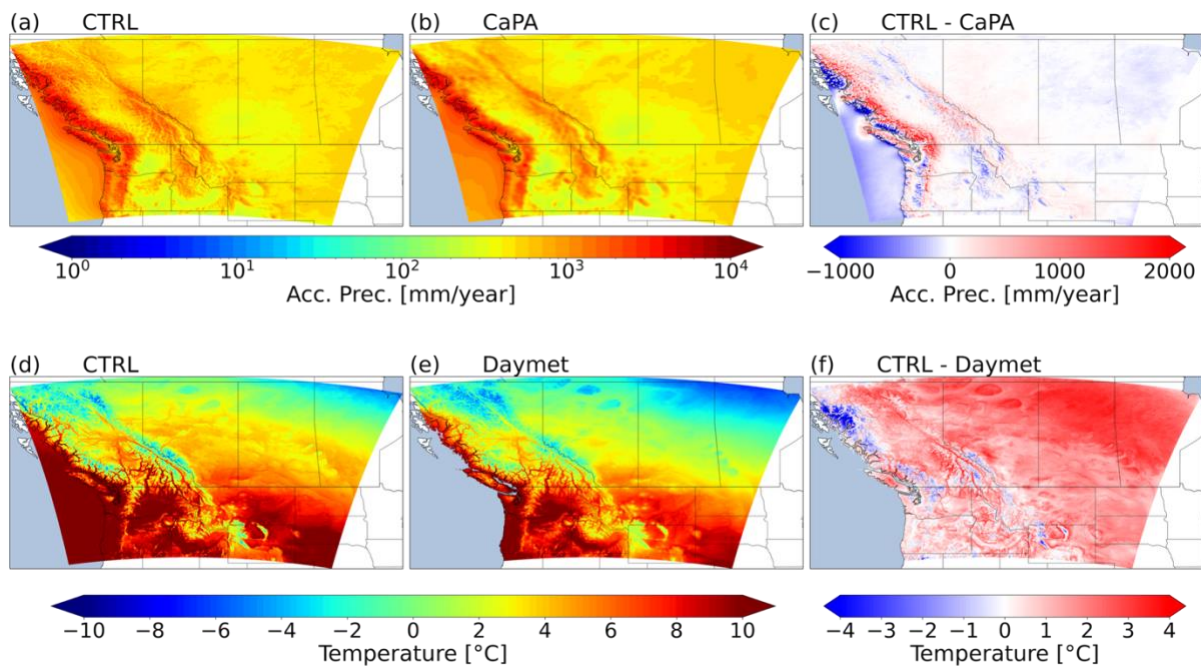


Figure 2.2. (a-c) Mean annual precipitation accumulation between 1 January 2012 and 8 April 2023 produced by (a) CTRL, (b) CaPA and (c) the difference between CTRL and CaPA. (d-f) Mean daily 2-m temperature between 1 January 2012 and 8 April 2023 produced by (d) CTRL, (e) Daymet and (f) the difference between CTRL and Daymet.

CaPA data were downscaled from 10 km to 2.5 km grid-spacing using a conservative interpolation method, which is more effective at conserving state variables as well as heat and water fluxes during remapping (Jones, 1999). The bias and the root mean squared error (RMSE) of the mean annual accumulated precipitation between the CTRL and CaPA calculated over the entire simulation domain and 11.28 years period were 14 mm and 252 mm, respectively. These values were obtained by computing the mean annual accumulated precipitation at each grid point for both datasets and comparing the results. Figure 2.2c shows mostly a positive bias near the Canadian Rockies. However, CaPA tends to underestimate precipitation over complex terrain in western Canada, especially at higher elevations, which may explain this positive bias (e.g. Almonte and Stewart, 2019; Carrera et al., 2010; Fortin et al., 2018).

Similarly, Daymet (Thornton et al., 2022) data were upscaled from 1 km to 2.5 km grid-spacing, also using a conservative interpolation method, which is well suited for transitioning to a coarser resolution (Diaconescu et al., 2015). The mean bias and the RMSE for the mean daily 2-m temperature between the CTRL and Daymet over the full simulation period were 1.38 °C and 1.82 °C, respectively. These were calculated by comparing the mean daily 2-m air temperature at each grid point across the two datasets. Figure 2.2f shows a warm bias in CTRL relative to Daymet over most of the domain, especially in northern Canada, but a cold bias near the Canadian Rockies. This may lead to more liquid precipitation over most of the domain.

### 2.2.3 Identification of events

A precipitation event is defined as a sequence of consecutive hours with precipitation exceeding 0.2 mm h<sup>-1</sup> (e.g. Thériault et al., 2023; Almonte and Stewart, 2019). Events are considered distinct if they are separated by at least six consecutive hours without precipitation, while shorter dry periods are treated as part of the same event.

Precipitation events were identified throughout the entire CTRL simulation at two sites located on opposite side of the continental divide: Fortress Powerline (East) and Nipika Mountain Resort (West). For each event, hourly liquid, solid and total precipitation were calculated to assess both precipitation phase and accumulation.

Simultaneous events, defined as events occurring at both Powerline and Nipika, with hourly precipitation exceeding 0.2 mm h<sup>-1</sup> (e.g. Thériault et al., 2023; Almonte and Stewart, 2019) at both sites were also

identified to represent cases where precipitation may have crossed the divide. The same event can be separated by less than 6 hours without precipitation at either sites or both sites. For these events, hourly values of liquid, solid, and total precipitation were again computed. The same procedure was applied to the PGW simulation to compare precipitation phase and accumulation during simultaneous events under warmer conditions.

To identify the moisture source, wind direction at 600 hPa was determined for each simultaneous precipitation event by computing the mode of wind direction across the event duration. Winds at 600 hPa were chosen because this pressure level is above the continental divide, reducing the influence of local topography on wind direction. Winds were classified as westerlies when their modal direction fell within an angle of  $45^\circ$  with a margin of  $15^\circ$ , corresponding to a northeastward flow approximately perpendicular to the divide. Winds were considered as easterlies when their modal direction fell within  $225^\circ \pm 15^\circ$ , corresponding to a southwestward flow perpendicular to the divide. These values were chosen to be approximately perpendicular to the divide as this is a condition for orographic precipitation. All remaining wind directions were grouped into the “Other” category and were excluded for subsequent analysis.

To determine whether moisture source could be linked to atmospheric rivers, data from the PIK Atmospheric River Trajectories (PIKART) catalog, a high-resolution dataset of atmospheric rivers, were used (Vallejo-Bernal et al., 2025). Seasonal averages of integrated water vapor transport (IVT) during atmospheric river conditions were calculated over most of North America domain for the period between 2012 and 2022.

#### 2.2.4 Data analysis

Precipitation events at Nipika and Powerline were analyzed based on seasonal and annual distributions of events accumulation. Events were also classified by precipitation phase: rain, snow or mixed (mixture of rain and snow). The same classification was applied to simultaneous events to compare precipitation phase during events occurring simultaneously at Nipika and Powerline, on opposite sides of the divide. The 600-hPa wind direction was also compared for simultaneous events. The PGW simulation was then used to assess if warmer conditions influence precipitation phase and accumulation as well as wind direction during simultaneous events at both sites.

Two events in which precipitation was able to cross the divide were selected as case studies to compare situations in which moisture originated from the western versus the eastern side of the divide. One of these two events was also analyzed in SPADE (Storm 1). For each storm, maps of precipitation accumulation from the CTRL, PGW and CaPA dataset were plotted. This comparison allows for the evaluation of the model performance against observations, as well as an analysis of how warmer conditions could affect these precipitation events. These events were analyzed in greater details using both CTRL and PGW simulations. Several variables were examined in two dimensions, including, wind speed and direction, condensate, moisture flux and the 0°C isotherm, to determine the moisture origin and why precipitation were able to cross the divide or not. The integrated water vaport transport was calculated as follows (eg. Mo et al., 2019):

$$Q = g^{-1} \int_{P_0}^{Pt} qV_h dp, \quad (1)$$

where  $Q$  is the integrated water vapor transport (IVT in  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $q$  is the water vapor mass mixing ratio ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $V_h$  is the horizontal wind speed in two dimensions ( $\text{m s}^{-2}$ ),  $g$  is the gravitational acceleration ( $\text{m s}^{-2}$ ),  $p$  is the pressure (Pa),  $P_0$  is the pressure at the surface and  $Pt$  is the pressure at the top of the column (100 hPa).

## 2.3 Clouds and precipitation distribution at Powerline and Nipika

### 2.3.1 Precipitation events divided by phase

The seasonal distribution of precipitation events revealed distinct differences throughout the seasons between Nipika and Powerline (Figure 2.3). At Nipika, rain-only events accounted for 47% of all events, whereas at Powerline, 54% were snow-only. Snowfall dominated in winter at both sites, while rainfall generally prevailed in summer, representing 95% of events at Nipika and 67% at Powerline. In spring, Nipika experienced mostly rain-only and mixed-phase, each representing approximately 35% of events, while Powerline was characterized by snow-only (71%), followed by mixed-phase (19%) and rain-only (10%). In fall, Nipika's events were primarily rain-only, nearly twice as frequent as mixed-phase or snow-only, whereas Powerline recorded more than half of its events as snow-only.

High-accumulation precipitation events ( $>30$  mm) were less frequent at Nipika ( $1.44 \text{ yr}^{-1}$ ) than at Powerline ( $2.89 \text{ yr}^{-1}$ ). These occurred more often in summer at Nipika ( $0.72 \text{ yr}^{-1}$ ) and in fall at Powerline ( $1.09 \text{ yr}^{-1}$ ). Annually, they were most often mixed-phase at both sites, while the second-most frequent type was rain-

only at Nipika and snow-only at Powerline. Seasonally, high-accumulation events were exclusively snow-only in winter. In spring, they were mixed-phase at Nipika, while they were equally split between snow-only and mixed-phase at Powerline. In summer, Nipika's events were nearly twice as likely to be rain-only as mixed, whereas Powerline's were exclusively mixed-phase. In fall, Nipika recorded only mixed-phase intense events, while Powerline's were more snow-only compared to mixed-phase. Overall, events over 30 mm tended to be rain-only or mixed-phase at Nipika, whereas they were more often mixed-phase or snow-only at Powerline.

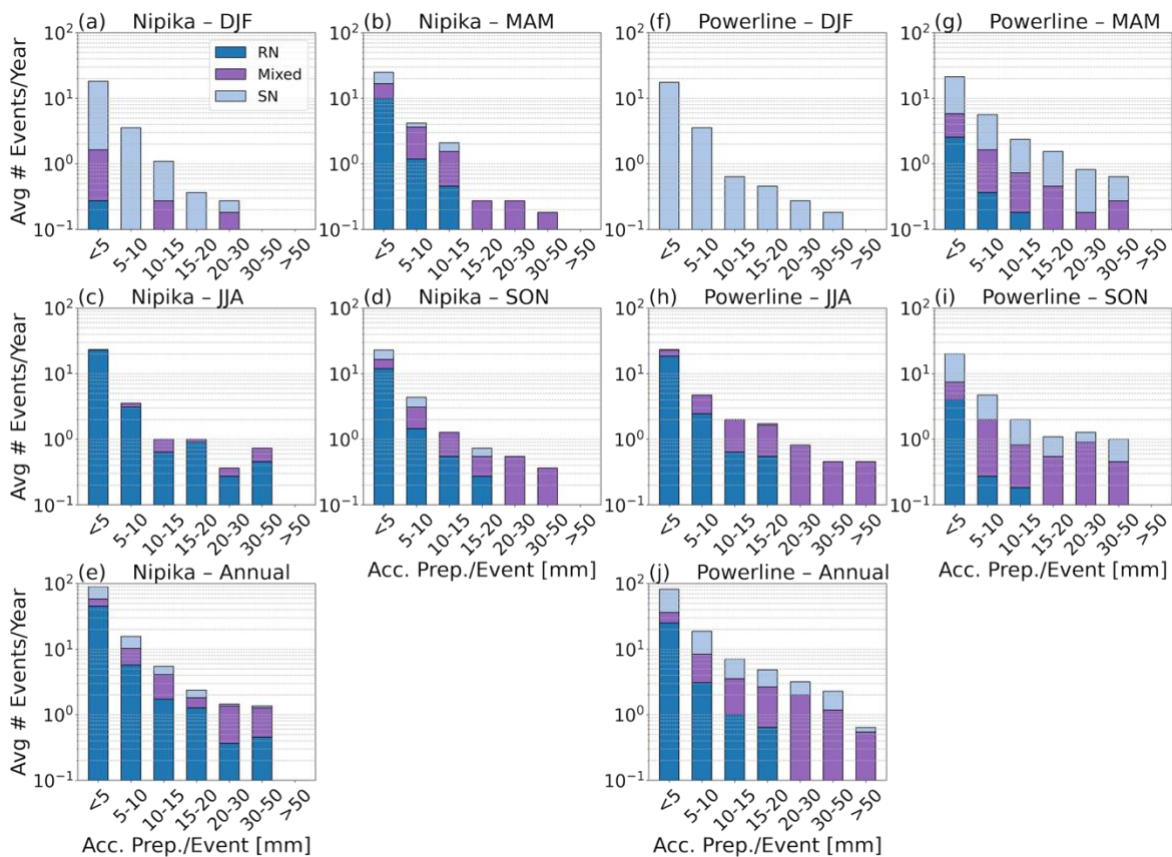


Figure 2.3. Average annual number of simulated rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation events binned by event accumulation in mm at (a-e) Nipika and (f-j) Powerline in (a, f) winter, (b, g), spring, (c, h), summer, (d, i), fall and (e, j) annual.

During simultaneous events, precipitation phase patterns varied by season and location, though the overall distribution remained relatively stable at both Nipika and Powerline (Figure 2.4). Annually, the fraction of snow-only events slightly increased, whereas rain-only events decreased at both sites relative to non-simultaneous events.

On average, Nipika recorded approximately one high-accumulation (>30 mm) simultaneous event per year, compared to 1.45 at Powerline. These events were most frequent in summer at both stations, representing a seasonal shift at Powerline. Among the most intense simultaneous events, those occurring in winter remained exclusively snow-only at both sites. In spring, a shift occurred at Powerline, where mixed-phase events became twice more common than snow-only. In summer, rain-only events remained dominant at Nipika, but mixed-phased events showed a slightly stronger contribution. In fall, snow-only events remained dominant compared to mixed phase at Powerline. Overall, simultaneous high-accumulation events did not shift to new dominant phases, but seasonal changes in their relative proportions sometimes altered phase dominance at each site.

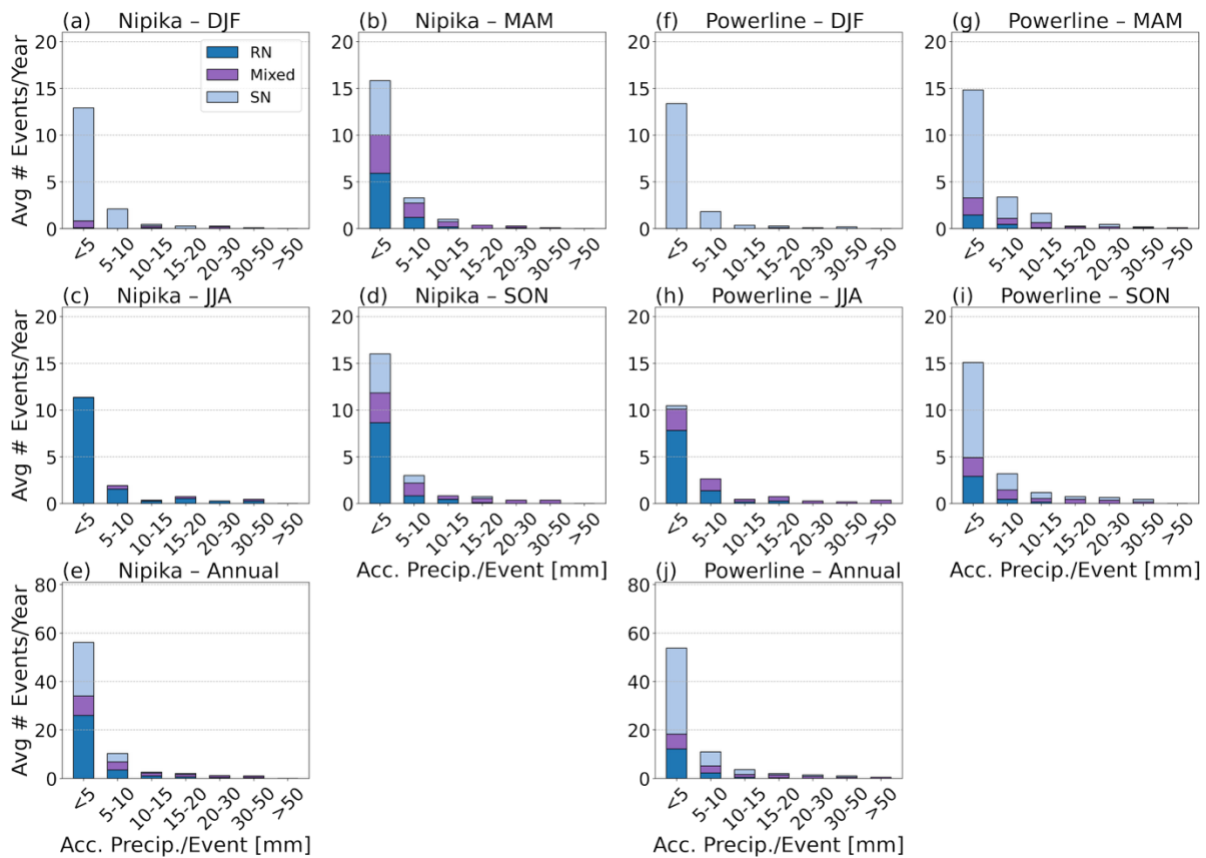


Figure 2.4. Average annual number of simulated simultaneous rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation events binned by event accumulation in mm at (a-e) Nipika and (f-j) Powerline in (a, f) winter, (b, g), spring, (c, h), summer, (d, i), fall and (e, j) annual.

### 2.3.2 Precipitation events associated with direction of the flow aloft

The precipitation events diagnosed in section 2.3.1 were classified by the direction of the flow aloft. In total, 806 simultaneous events were simulated in CTRL. Simultaneous events associated with 600-hPa westerly winds were more frequent than events with easterly winds at both Nipika and Powerline, representing about 24% of all events compared to only 2% for easterly winds (Figure 2.5). These westerly winds events produced the highest total precipitation accumulation in fall, with approximately 40 mm for both locations. During fall, mixed-phase precipitation contributed the most at Nipika (28 mm), followed by rain-only (7 mm) and snow-only (3 mm). Powerline also received predominantly mixed-phase precipitation (22 mm), followed by snow-only (15 mm) and rain-only (4 mm). In contrast, simultaneous events with 600-hPa easterly winds produced the highest accumulation during summer at Nipika (7 mm), where over half of it was rain-only, and during spring at Powerline (6 mm), where snow-only largely dominated.

In PGW, 902 simultaneous events were simulated. Those associated with 600-hPa easterly winds were less frequent, accounting for less than 2% at both locations. Meanwhile, events associated with 600-hPa westerly represented 25 % of total events at Nipika and 28 % at Powerline. Both Nipika and Powerline received an annual increase of 30 mm and 44 mm, respectively, in total precipitation amounts during simultaneous events with 600-hPa westerly winds. At Nipika, rain-only increased the most, surpassing mixed-phase accumulation, while at Powerline, mixed-phase precipitation became the dominant type over snow-only. Fall showed the greatest increase in total precipitation accumulation at both locations. In contrast, simultaneous events with 600-hPa easterly winds produced less accumulated precipitation for Nipika and Powerline under PGW.

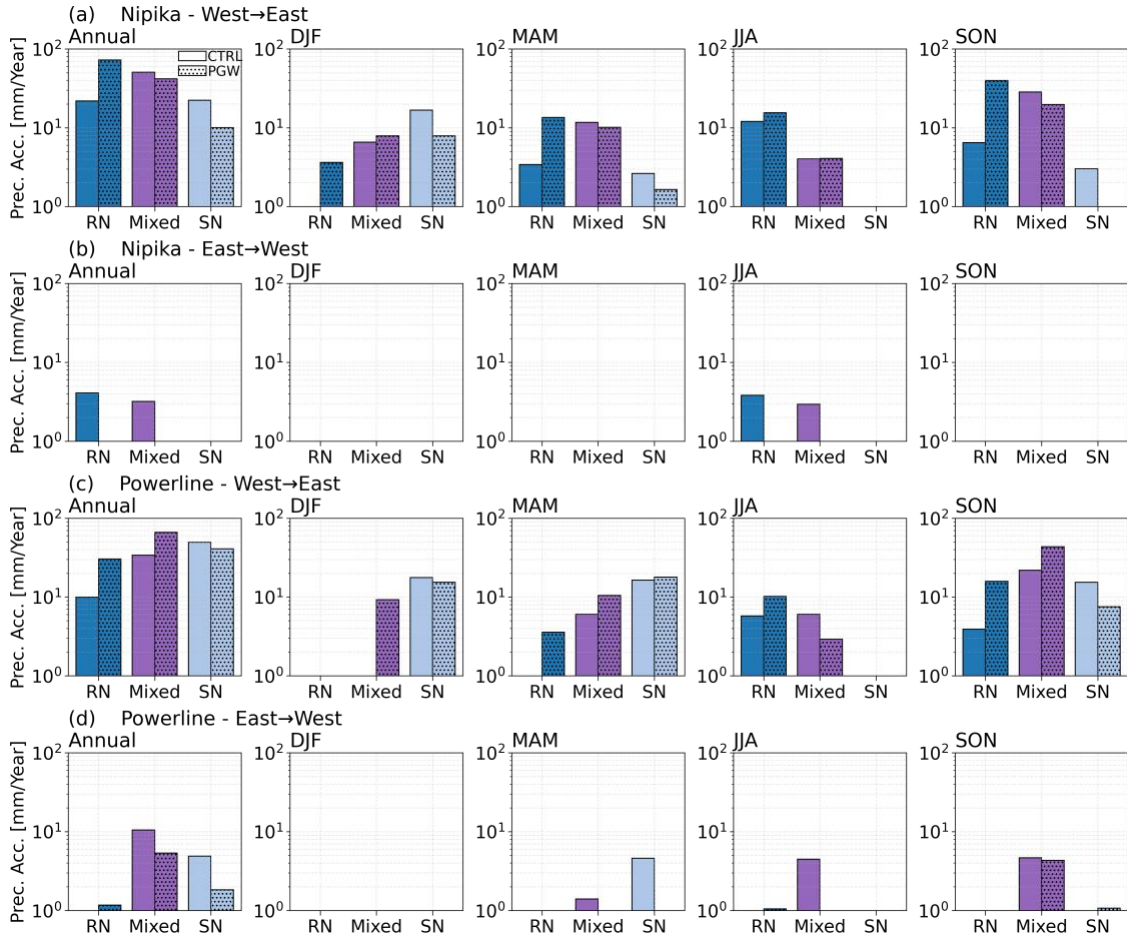


Figure 2.5. Annual and seasonal average accumulation of rain-only, snow-only, mixed-phase (rain and snow) and total precipitation during simulated simultaneous events in CTRL and PGW simulations, binned by 600-hPa wind direction at (a,b) Nipika and (c,d) Powerline.

### 2.3.3 Seasonal distribution of precipitation across the divide

Simulated average annual precipitation accumulation per season across the cross-sections showed greater amounts on the west side of the divide in all seasons except summer (Figure 2.6). In winter, spring, and fall, local total accumulated precipitation peaks slightly west of the divide, before decreasing toward the east, with spring and fall showing more precipitation on the eastern side. In summer, precipitation accumulation remained constant across the cross-sections, ranging from 100 to 250 mm/year. Meanwhile, winter, spring and fall reached total amounts exceeding 300 mm/year, with greater spatial variability. In these seasons, snow accumulation followed the shape of the total precipitation curves, whereas rain remained relatively constant along the cross-sections.

With PGW, total precipitation amounts increased on both sides of the divide in all seasons except summer. The increase varies across the divide and remains below 100 mm/year. Fall exhibited the most notable increase, with total accumulation increasing by up to 90 mm/year. For most seasons, snow accumulation decreased while rain accumulation increased, especially on the west side of the divide. The largest decrease in snow accumulation occurred in fall, with a decrease of 112 mm/year on the west side of the divide. In contrast, rain amounts increased the most in fall, reaching 182 mm/year along the divide on the west side.

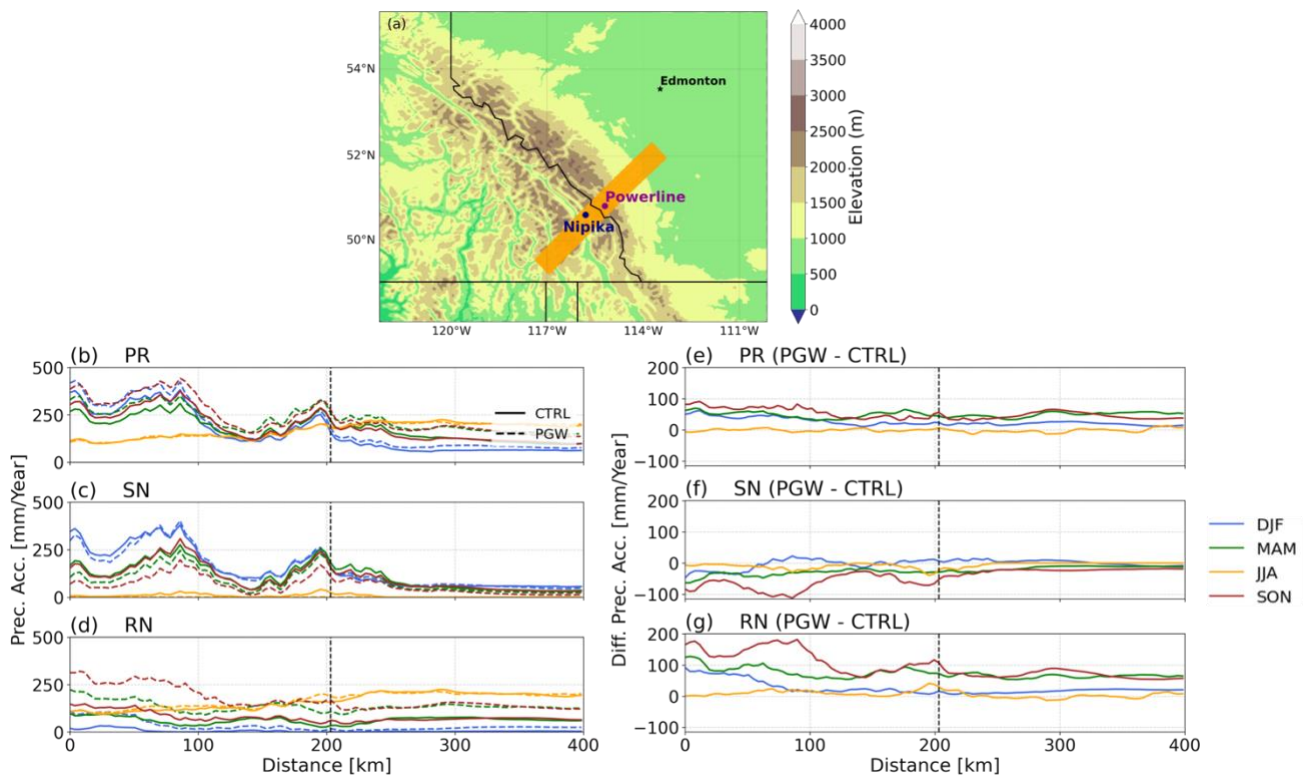


Figure 2.6. (a) Cross sections where total precipitation (PR), snow precipitation (SN) and liquid precipitation (RN) accumulation per season were calculated. Average cross section of the annual accumulation of (b) total precipitation, (c) snow precipitation and (d) liquid precipitation per season with CTRL and PGW simulation. Average cross section of the annual difference of accumulation of (b) total precipitation, (c) snow precipitation and (d) liquid precipitation per season between CTRL and PGW simulation. The vertical black dashed line indicates the location of continental divide.

Annual average integrated water vapor transport associated with atmospheric rivers exhibits seasonal spatial variability (Figure 2.7). During winter, spring and fall, water vapor is transported inland along the west coast. On average, approximately  $250 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  of IVT is crossing the continental divide toward the eastern slopes in each of these three seasons. Water vapor is also carried from the Atlantic towards the

eastern slopes. In contrast, summer is the only season with almost no inland moisture transport from Pacific-origin atmospheric rivers. Instead, the highest summer values of water vapor transport occur from the Atlantic towards the Canadian Prairies, though with limited penetration across the divide. Fall marks the season when the Canadian Rockies experience the strongest influence from atmospheric rivers, with moisture arriving from both the Pacific and the Atlantic, with some crossing the divide at multiple locations. During this season, larger amounts of water vapor are transported farther inland from the west coast.

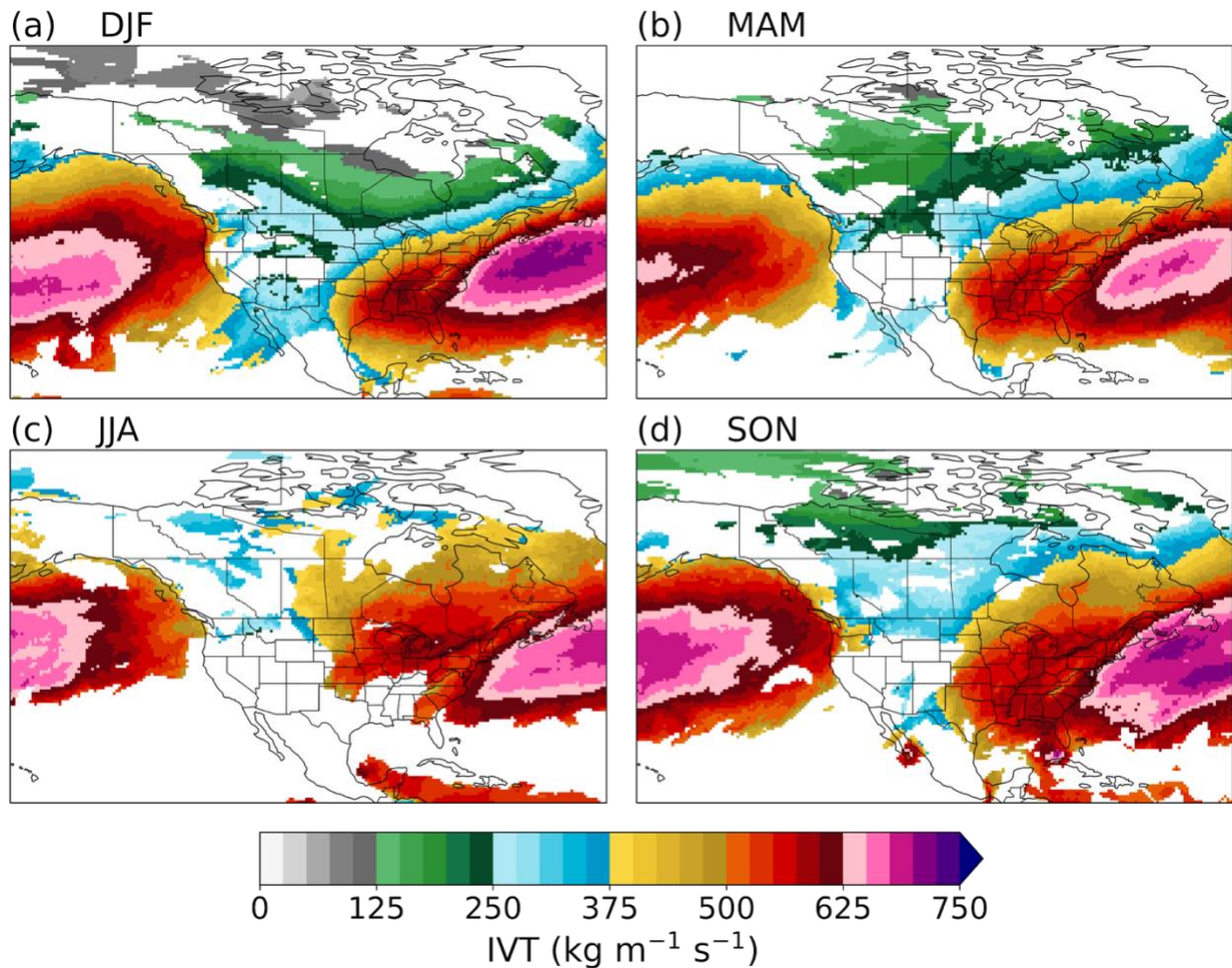


Figure 2.7. Seasonal average integrated water vapor transport (IVT) from the PIKART (Vallejo-Bernal et al., 2025) during atmospheric river conditions. Only IVT values during atmospheric conditions were used to calculate the average at each grid point.

## 2.4 Precipitation events across the divide

The first case study investigated occurred on 27-28 April 2019. This event was associated with easterly winds carrying moisture on both sides of the continental divide. However, moisture from this storm originated over the Pacific Ocean and was transported eastward by the westerlies over the northern United States (Figure 2.8). Upon reaching southern Saskatchewan, the moisture flux recirculated towards the Canadian Rockies from the east, but much of it was blocked by the continental divide. In the PGW simulation, greater amounts of moisture were advected across the northern United States and crossed the divide farther north of Nipika and Powerline. In PGW, the integrated moisture flux is higher, with greater moisture concentrations in the northern United States and northeast of Powerline. Nevertheless, the amount of moisture crossing the divide toward Nipika remains comparable to CTRL.

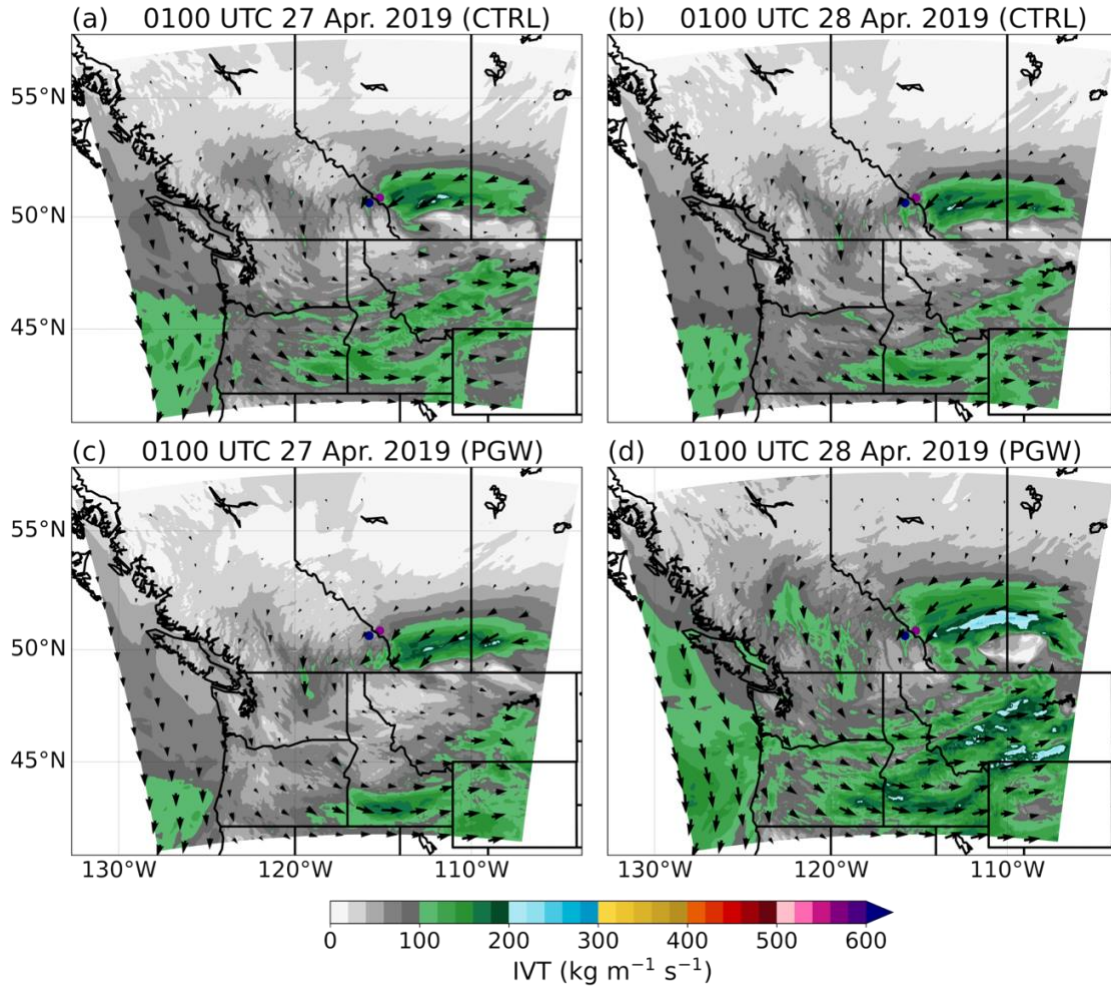


Figure 2.8. Simulated integrated water vapor transport (IVT) maps during storm 1 with (a,b) CTRL and (c,d) PGW. Nipika is navy and Powerline is purple.

In CTRL, most precipitation occurred on the eastern side of the continental divide (Figure 2.9). Powerline received up to 48 mm, while only 5 mm reached Nipika. However, CaPA reported precipitation exclusively on the eastern side (5 mm), and none crossed the continental divide. In PGW, slightly less precipitation occurred at Powerline (45 mm), while Nipika received almost the same amount (6 mm).

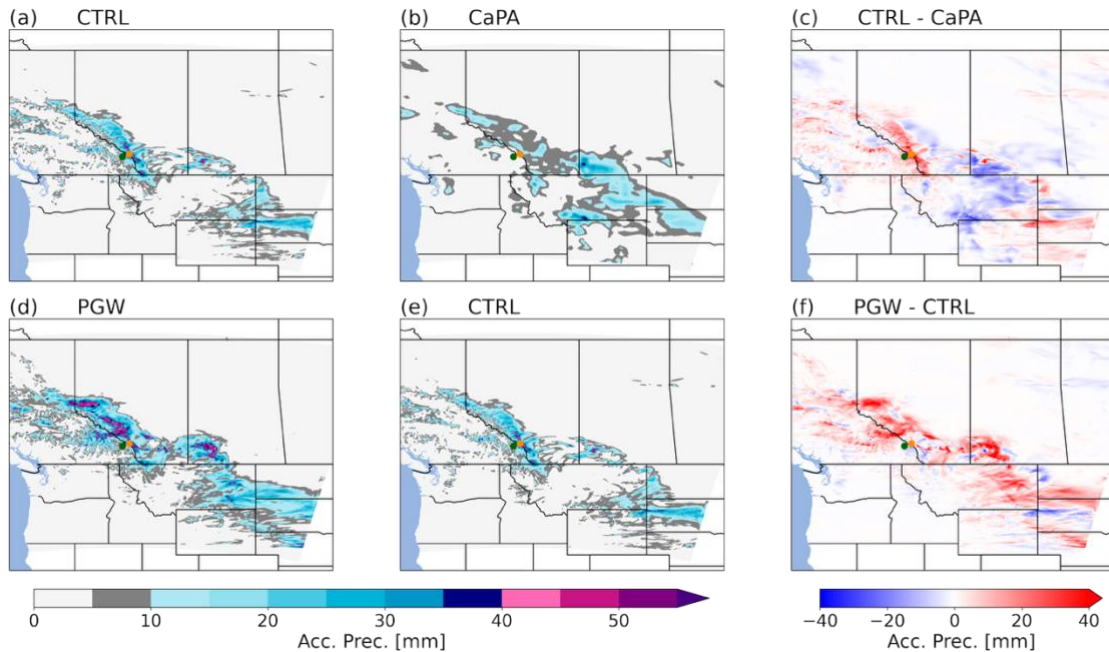


Figure 2.9. (a, e) Accumulated precipitation during storm 1 simulated with CTRL, (b) accumulated precipitation during storm 1 simulated from CaPA, (c) difference in accumulated precipitation during storm 1 between CTRL and CaPA, (d) accumulated precipitation during storm 1 simulated with PGW, (f) difference in accumulated precipitation during storm 1 between PGW and CTRL. Nipika is green and Powerline is orange.

Figure 2.10 shows the temporal and spatial mean of the condensate mass mixing ratio along the cross sections during the event. In CTRL, ice condensates were predominantly concentrated on the eastern side, near the divide, with some crossing toward the west. Winds at higher altitude exhibited a dominant eastward component. At lower levels, winds on the west side flowed eastward, while winds on the eastern side flowed westward, both converging toward the divide. The 0 °C isotherm was below the altitude of the divide. Precipitation accumulation at the surface peaked on the eastern side and was mostly snow. Although some precipitation crossed to the west side, its intensity weakened as it moved away from the divide.

In PGW, ice condensates extended less far west and condensate depth decreased, compared to CTRL (Figure 2.10). The 0 °C isotherm was higher, reaching slightly above the divide. More rain reached the surface, especially on the east side of the divide, while total precipitation amounts decreased on the western side of the divide. Rain accumulation increased, whereas snow accumulation decreased along most of the cross section. A second peak of precipitation accumulation was recorded further east of the divide.

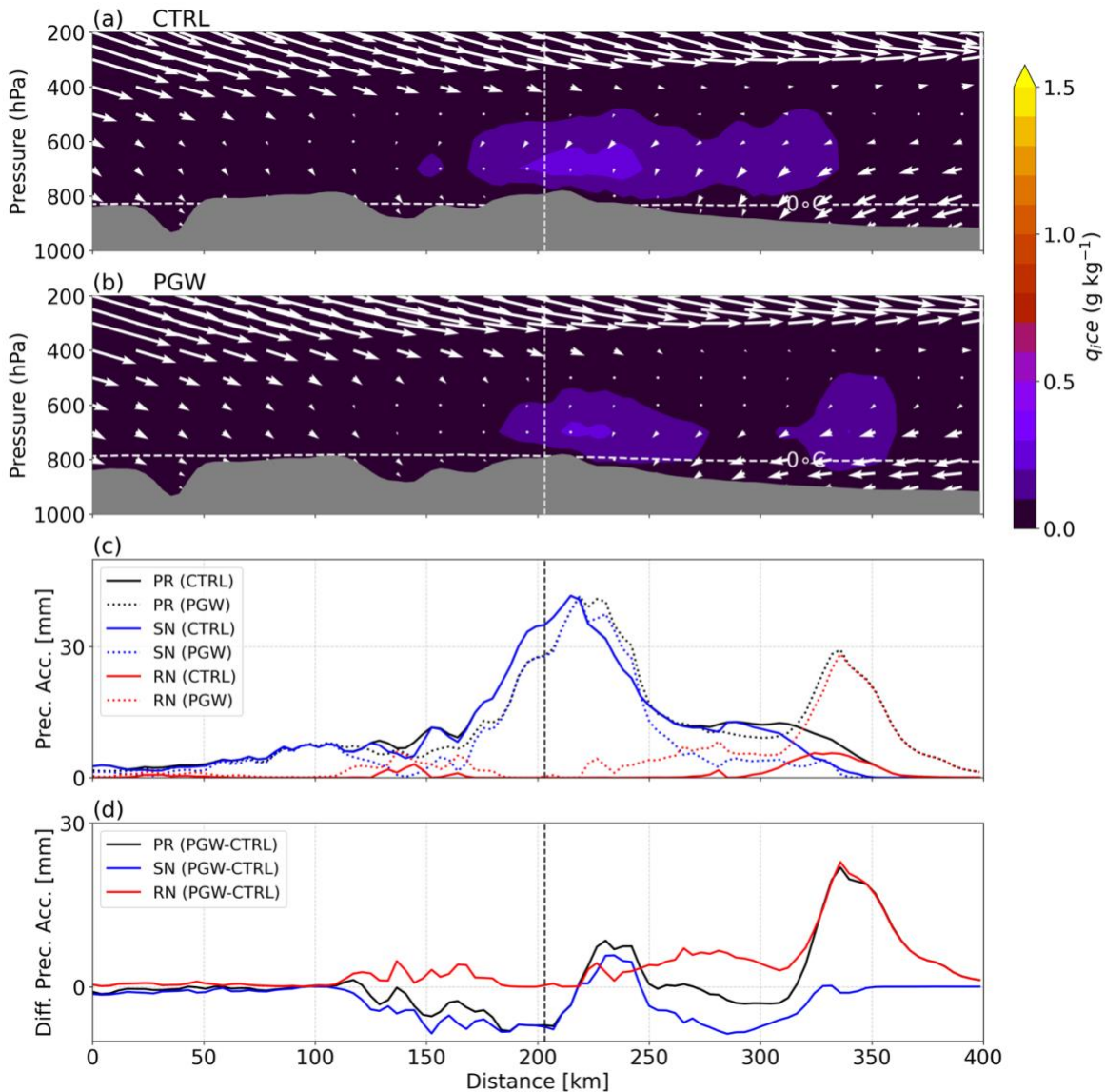


Figure 2.10. Temporal and spatial ice condensates mixing ratio mean along the cross sections (Figure 6) during storm 1 in (a) CTRL and (b) PGW. Temporal and spatial of total precipitation, rain and snow accumulation during storm 1 with (c) CTRL and PGW and difference between (d) CTRL and PGW. The vertical dashed line (white in a and b, black in c and d) indicates the location of the continental divide.

In CTRL, moisture fluxes were directed toward southwest in all three cross sections, perpendicular to the divide (Figure 2.11). Peak moisture transport occurred near 750 hPa. The strongest moisture flux was simulated by the eastern cross section, followed by the western cross section and the divide, indicating flow weakened as it crossed the divide. Above 650 hPa, moisture fluxes magnitudes were more consistent across the three sections and decreased until 500 hPa, indicating less moisture was carried at these pressure levels.

In PGW, southwestward moisture flux increased more noticeably along the eastern cross section, with the maximum value occurring near 750 hPa. Fluxes along the western cross section showed minimal change under warmer conditions, suggesting that moisture did not extend further west.

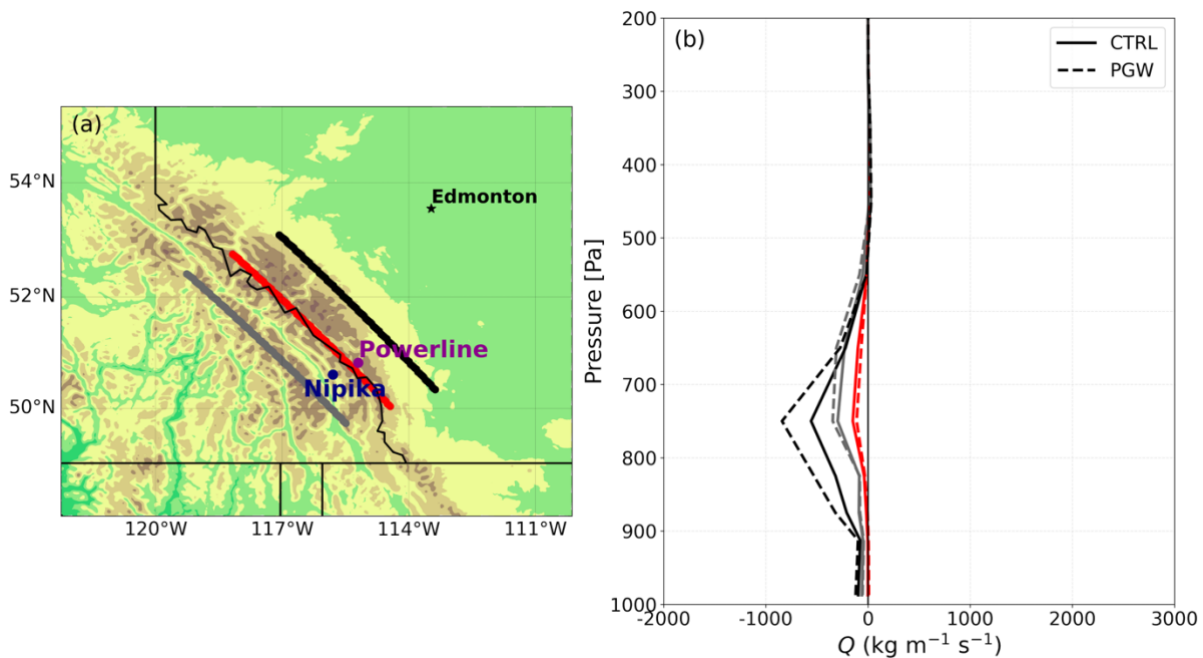


Figure 2.11. (a) Western cross section (grey), continental divide (red) and eastern cross section (black) where vertical moisture fluxes were calculated. (b) Total water vapor flux flowing perpendicularly to the three cross sections shown in (a) during storm 1.

The second study case occurred on 14-16 November 2021. This event was associated with an atmospheric river that transported large amounts of moisture and caused substantial damages in British Columbia (Richards-Thomas et al., 2024). Westerlies carried the water vapor across southern Canada and northern United States, with precipitation reaching as far east as Manitoba (Figure 2.12). In PGW, higher amounts

of moistures were transported across the continent, allowing more moisture to cross the divide toward Powerline.

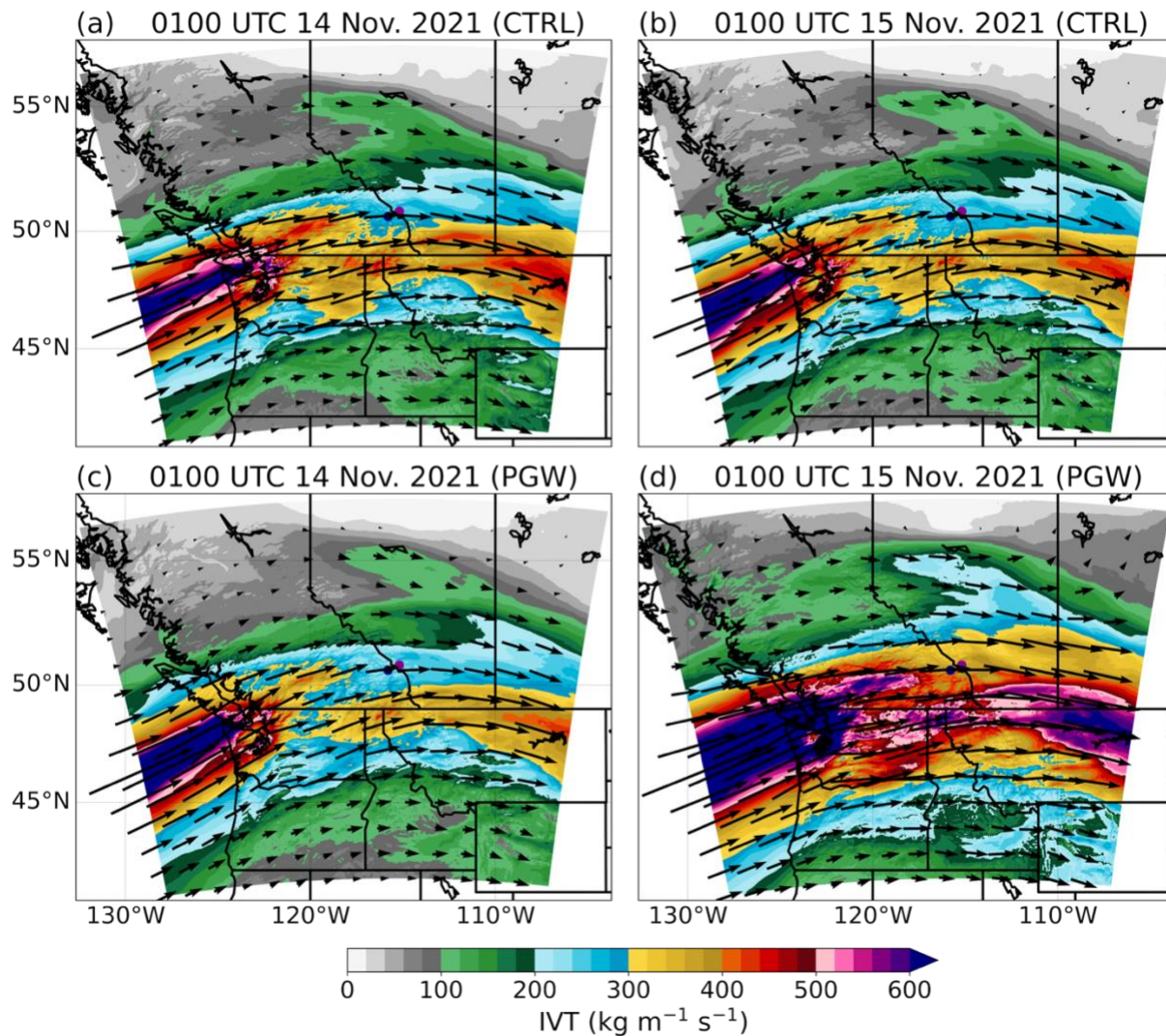


Figure 2.12. Simulated integrated water vapor transport (IVT) maps during storm 2 with (a,b) CTRL and (c,d) PGW. Nipika is navy and Powerline is purple.

This event generated high amounts of precipitation across Canada, particularly in British Columbia and near the Canadian Rockies (Figure 2.13). Overall, this event produced more precipitation than the first case study (Figure 2.9). In CTRL, both Nipika and Powerline received 45 mm of precipitation. In CaPA, both sites received less precipitation, with 36 mm at Nipika and 33 mm at Powerline. In PGW, more precipitation fell across southern British Columbia, with 70 mm at Nipika and 69 mm at Powerline.

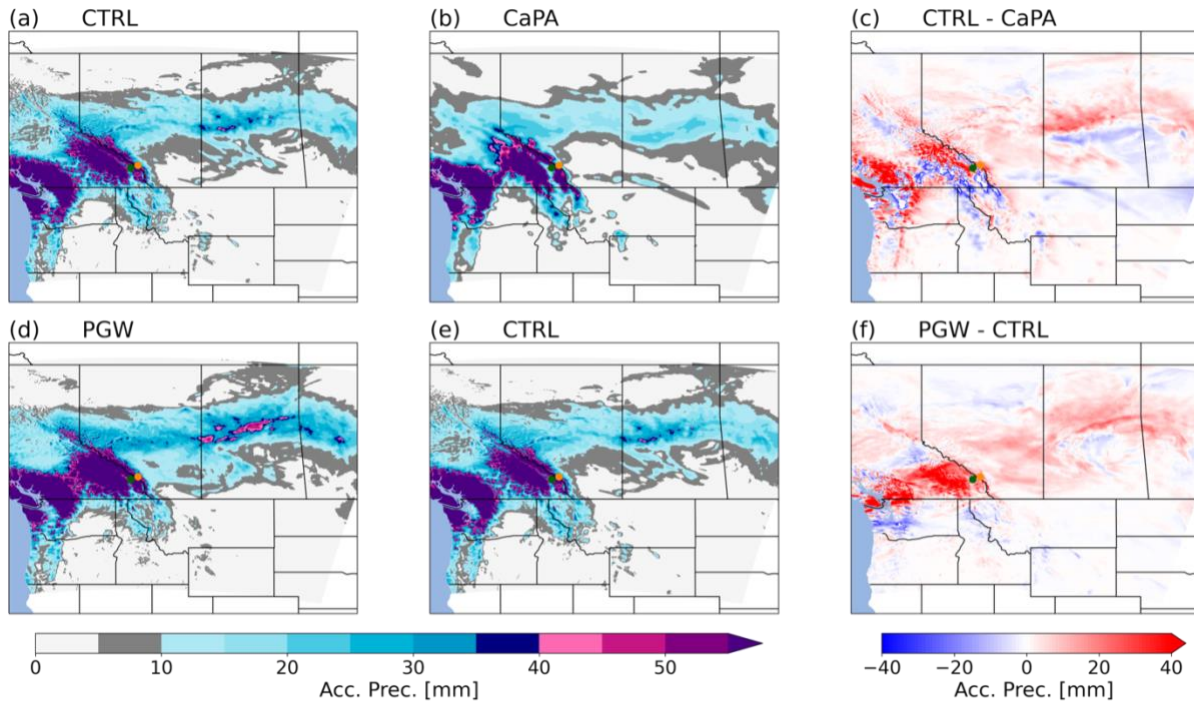


Figure 2.13. (a, e) Accumulated precipitation during storm 2 simulated with CTRL, (b) accumulated precipitation during storm 1 simulated from CaPA, (c) difference in accumulated precipitation during storm 1 between CTRL and CaPA, (d) accumulated precipitation during storm 1 simulated with PGW, (f) difference in accumulated precipitation during storm 1 between PGW and CTRL.

During storm 2, ice condensates covered most of the western side and extended slightly into the eastern side of the continental divide (Figure 2.14). Strong westerly winds were present at all pressure levels, consistently directed toward the east. The 0°C isotherm remained below the divide. Precipitation accumulation at the surface reached over 90 mm at two peaks on the western side, with most of it as snow. Precipitation was able to cross the divide, but amounts decreased further east from the divide.

In PGW, ice condensates reached the same location east of the divide for CTRL, but their layer slightly deepened, compared with CTRL. Winds remained eastward, and the 0 °C isotherm rose above the divide. Furthermore, surface precipitation increased, reaching almost 150 mm on the western side, with more rain and less snow. A slightly higher precipitation accumulation was simulated on the eastern side, suggesting that a greater portion of moisture was able to cross the divide.

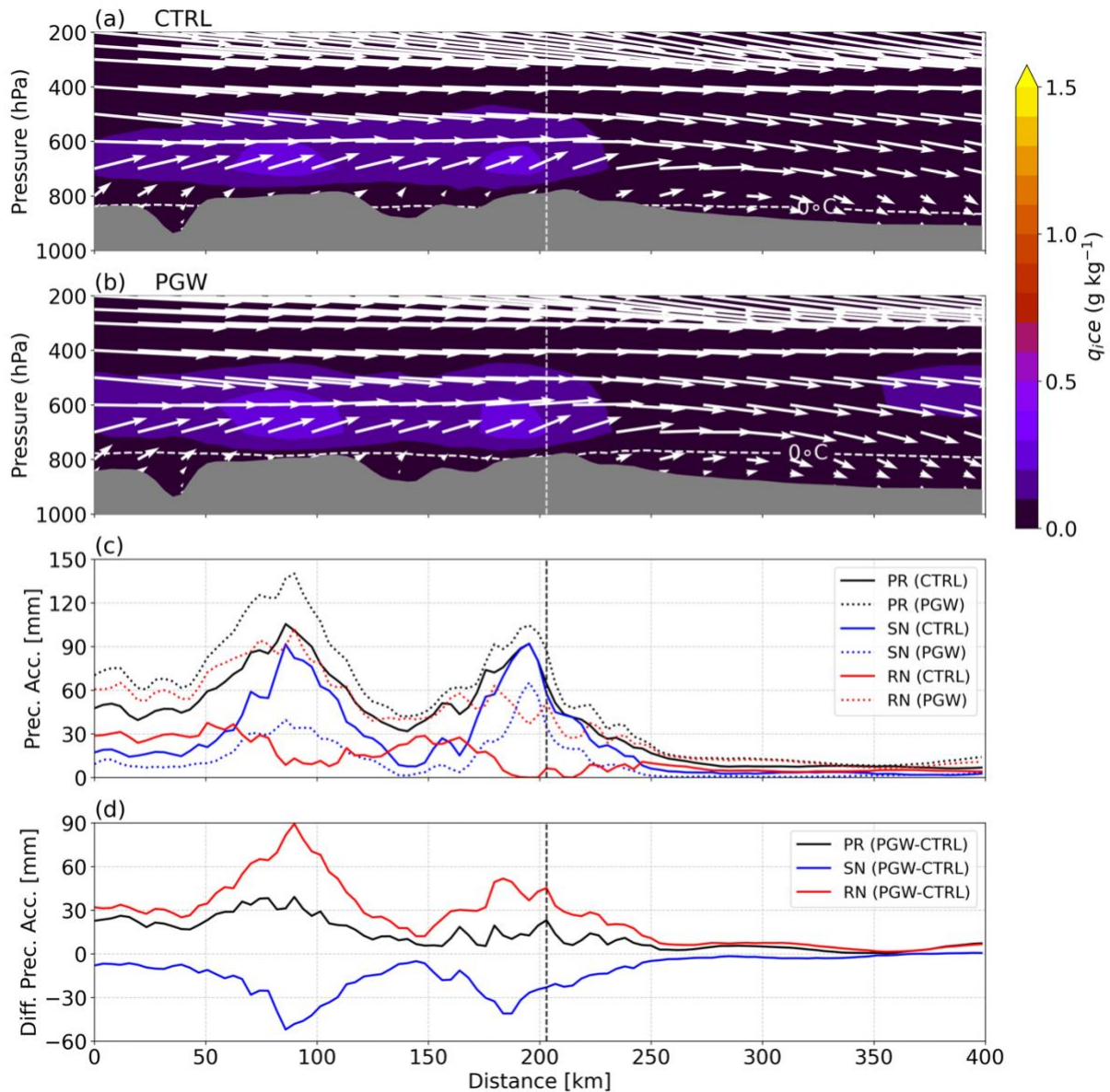


Figure 2.14. Temporal and spatial ice condensates mixing ratio mean along the cross sections (Figure 6) during storm 2 in (a) CTRL and (b) PGW. Temporal and spatial of total precipitation, rain and snow accumulation during storm 2 with (c) CTRL and PGW and difference between (d) CTRL and PGW. The vertical dashed line (white in a and b, black in c and d) indicates the location of the continental divide.

In CTRL, moisture fluxes flowed northeastward, perpendicular to the divide, with maximum values above the divide, near 650 hPa (Figure 2.15). Fluxes were strongest along the western cross section and the divide, followed by the eastern cross section, on the eastern side. This pattern indicates that moisture flux weakened as it travelled further east of the divide. Compared with Storm 1, the magnitude of the moisture fluxes was larger, and moisture was carried up to 300 hPa, allowing more to cross the divide vertically.

In PGW, moisture values at all three cross sections increased, indicating enhanced transport across the divide. Along the eastern cross section, peak increase was between 750 and 650 hPa, suggesting more moisture was allowed to travel across the divide at this altitude.

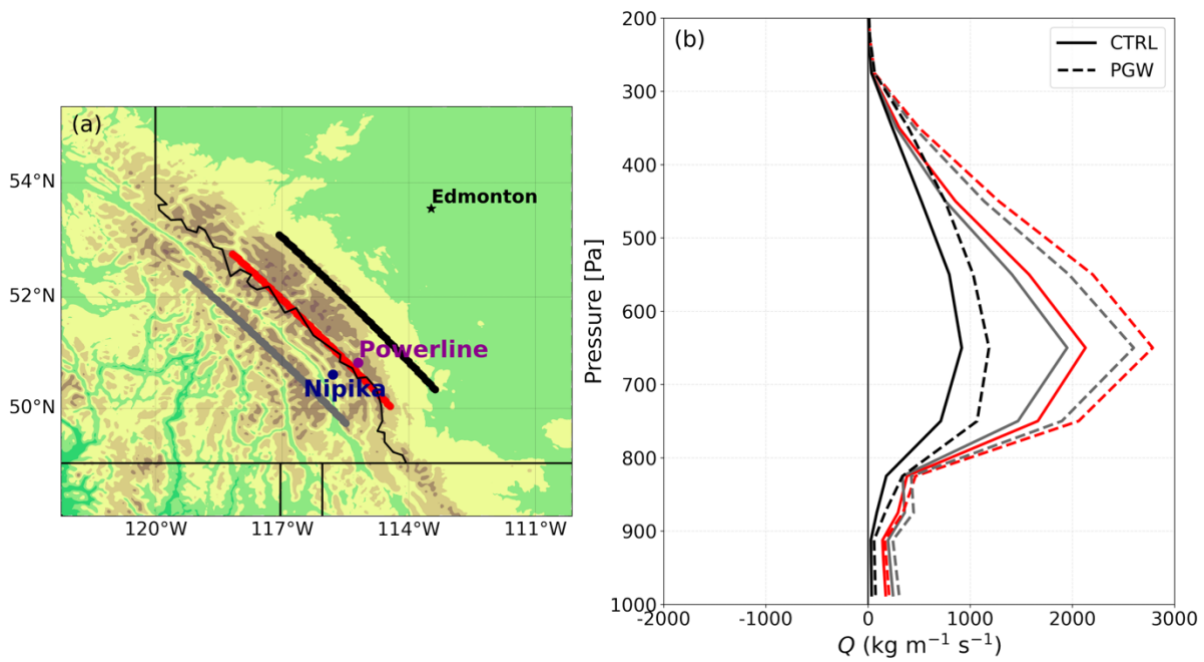


Figure 2.15. (a) Western cross section (grey), continental divide (red) and eastern cross section (black) where vertical moisture fluxes were calculated. (b) Total water vapor flux flowing perpendicularly to the three cross sections shown in (a) during storm 2.

## 2.5 Discussion

Both non-simultaneous and simultaneous precipitation events exhibited strong seasonal contrasts across the divide (Figures 2.3 and 2.4). Powerline recorded more snow-dominated and high-accumulation precipitation events ( $> 30$  mm) than Nipika. This could be attributed to the elevation contrast between the two locations, with Powerline at 2076 m and Nipika at 1087 m. Events with larger precipitation totals were more frequent in summer at Nipika and in fall at Powerline. During simultaneous events, those with higher accumulation became more frequent in summer at each location, without inducing major changes in seasonal precipitation phase behavior. Annually, slightly more snow-only precipitation were recorded.

To investigate the origin of moisture, wind direction during simultaneous events was classified. Simultaneous events with 600-hPa westerlies dominated over those with easterlies at both Nipika and Powerline, suggesting that moisture was advected from the west more frequently and in larger quantities

than from the east (Figure 2.5). Precipitation phase and accumulation varied across seasons, with westerly events generating the most precipitation in fall, where mixed-phase precipitation dominated. Events with easterlies were associated with stronger precipitation accumulation in summer at Nipika and in spring at Powerline.

The seasons showing the most accumulated precipitation during events with easterly winds in CTRL correspond to the SPADE observation period (April-June), when many precipitation events were also influenced by easterly flow (Thériault et al., 2022). However, while CTRL suggests easterly events generated some precipitation during these seasons, the SPADE observations indicate that moisture was primarily transported from the Canadian Prairies, highlighting a difference in dominant moisture source. During SPADE, events with westerly winds contributed to smaller precipitation accumulations on both sides of the divide. Although the western side of the divide is directly influenced by moisture from the Pacific Ocean, the extent to which this moisture can reach the eastern side remain uncertain. Even if atmospheric rivers can transport large amounts of water vapor inland, precipitation tends to decrease as they move farther from the coast (Sharma and Déry, 2020). The CTRL results suggest precipitation may extent to the eastern side of the divide.

Analysis of seasonal precipitation totals along multiple cross sections across the divide revealed that average values were higher on the western side and decreased toward the east during winter, spring and fall (Figure 2.6). This pattern suggests that a larger portion of events was linked to moisture originating from the western side rather than from the eastern side. Seasonal IVT maps suggest that atmospheric rivers may transport sufficient water vapor inland to enhance precipitation on the western side of the continental divide during winter, spring and fall (Figure 2.7). Water vapor was more likely to cross the divide to the eastern side during these seasons. During summer, higher precipitation accumulation on the eastern side of the cross sections may be linked to river atmospheric transporting water vapor from the Atlantic toward the Canadian Prairies.

Two case studies were selected to analyse precipitation events crossing the divide with different moisture sources to illustrate why events crossed the divide from the Pacific to the eastern slope. In both storms, CTRL generally overestimated total precipitation accumulation near the divide compared to CaPA but overall was able to represent precipitation pattern well (Figures 2.9 and 2.13). In CTRL, Storm 1 produced almost exclusively solid precipitation on the eastern side of the divide, with low precipitation amounts

crossing to the western side, which is consistent with observations from SPADE for this event (Thériault et al., 2022). Storm 2 was associated with the presence of an atmospheric river and generated substantially more precipitation, with moisture travelling directly from the Pacific Ocean (Figure 2.12). During this event, precipitation, mostly solid phase, was primarily simulated on the western side of the divide, with some crossing to the eastern side. Unlike Storm 1, winds were strong and flowing eastward at all pressure levels (Figures 2.10 and 2.14). The depth of the vertical layer of condensate mass mixing ratio was similar for both storms. However, moisture fluxes perpendicular to the divide were more than twice as strong during Storm 2 compare to storm 1 (Figures 2.11 and 2.15).

Under PGW, warmer conditions can enhance simultaneous precipitation events across the divide (Figure 2.5–). Events associated with westerly winds produced larger precipitation totals, while precipitation type shifted towards liquid precipitation. Fall shows the largest increase in precipitation, which may be linked to the intensification of atmospheric rivers under a warming climate, as they are more frequent during this season (Radić et al., 2015; Sharma and Déry, 2020). In contrast, the total precipitation amounts were reduced during events with easterly winds under warmer conditions.

Along the cross sections, fall also exhibited the largest increase in precipitation and rain accumulation at the surface on both sides of the continental divide, as well as the strongest decrease in snow under PGW (Figure 2.6). Again, this pattern is consistent with the projected increase in atmospheric rivers associated to global warming, which are more frequent during this season (Radić et al., 2015; Sharma and Déry, 2020). Such events may transport greater amounts of moisture inland, contributing to increased precipitation on both sides of the continental divide.

Storm 1 produced more precipitation farther north along the divide under PGW, but less on the western side along the cross sections (Figure 2.9). Condensate presence decreased and its vertical layer did not deepen, while the magnitude of the moisture flux perpendicular to the divide showed little change (Figure 2.10). The increase in precipitation on the eastern side of the divide appears inconsistent with previous results indicating that spring events associated with 600-hPa easterly produced no increase in precipitation at either site under PGW. However, winds near the divide at this pressure level do not appear to be predominantly easterly in warmer conditions, which could explain the higher precipitation amounts on the eastern side and the reduced transport across the divide toward the western side. In contrast, Storm 2 generated higher precipitation totals in southern British Columbia under PGW, as well as with increased

total precipitation on the eastern side the divide (Figure 2.13). The condensate layer slightly deepened, while moisture flow perpendicular to the divide strengthened across all three cross sections, indicating enhanced moisture transport toward the Canadian Prairies (Figure 2.14 and 2.15). This is consistent with previous results showing that events associated with 600-hPa westerly winds increase precipitation accumulation at both Nipika and Powerline under PGW, particularly during fall. This may be linked to the anticipated intensification of atmospheric rivers.

Warmer conditions in the PGW simulation altered the phase of precipitation on both sides of the continental divide. An increase in rain accumulation and a decrease in snow during the two study cases were observed (Figures 2.10 and 2.14). Moreover, an increase in rainfall in almost all seasons across the divide, especially during spring and fall was recorded (Figure 2.6). This transition towards rain dominance is consistent with previous studies projecting reduced snow occurrence in mountainous regions under warmer climates (eg. Fang and Pomeroy; 2023; Pomeroy et al., 2015). In addition to phase change, events originating from the western side had an increase in precipitation crossing the divide in PGW (Figure 2.5). This gain could be linked to the intensification of atmospheric rivers in this region in response to a warmer climate (e.g. Radić et al., 2015; Sharma and Déry, 2020). On the opposite, a decrease in precipitation crossing the divide was observed with events originating from the eastern side, with less than one annual event in Nipika.

## 2.6 Conclusion

In this study, precipitation events across the continental divide in the Canadian Rockies were analyzed to improve our understanding of seasonal water distribution in this region. A CTRL simulation and a PGW-perturbed simulation were used to assess how warmer atmospheric conditions associated with climate change may alter precipitation patterns in the future. Results highlighted seasonal contrast in both precipitation phase and accumulation across the divide, as well as moisture source.

This study showed that when events occurred simultaneously across the divide, moisture originated more frequently and in larger quantities from the western side, in British Columbia, particularly in fall, which could be impacted by the presence of atmospheric rivers. A shift towards liquid precipitation was simulated with warmer conditions, while study cases highlighted that larger precipitation amounts could cross the divide in some events with certain conditions, such as when moisture fluxes perpendicular to the

divide are sufficiently strong. Events with moisture transport originating directly from the Pacific Ocean and accompanied by strong westerly winds exhibited a stronger response to warmer conditions.

There are some limitations. First, the two sites selected on each side of the continental divide are located at different elevations. The Nipika Mountain Resort (Nipika) is at 1087 m, while Fortress Mountain Powerline (Powerline) is higher at 2076 m. This difference may have influenced precipitation type as well as accumulation (Ding et al., 2014; Thériault et al., 2022). Using stations with similar elevations could have reduced the impact of this limitation. Second, only two case studies were analyzed in this study, which limits the ability to fully characterize moisture fluxes contributing to precipitation on both sides of the continental divide. Third, a few assumptions were made, such as assuming that simultaneous precipitation at Nipika and Powerline was associated with the same meteorological event crossing the divide. In addition, this study assumed that the dominant wind direction during each event could be used to determine the origin of the moisture. Fourth, the PGW approach only simulates mesoscale dynamical perturbations and uses similar lateral boundary conditions as the historical simulation, but with warmer and more humid conditions (Brogli et al., 2023; Lenderink et al., 2025b). Therefore, it does not account for changes in large-scale circulation or interannual variability between the PGW and historical simulations.

Future studies are needed to better understand precipitation events capable of crossing the continental divide under both current and warmer conditions, and to assess the extent to which these events are associated with atmospheric rivers. For instance, SPADE documented a precipitation event in which an atmospheric river along the west coast of California transported moisture northward, resulting in precipitation on both sides of the continental divide (Thériault et al., 2022). Additional case studies are needed to better characterize how different moisture origins and wind directions contribute to precipitation on both sides of the divide. Moreover, this study highlighted strong seasonal contrasts between precipitation distribution and accumulation, and further work is needed to better understand these patterns. While the Canadian Rockies are already a region at risk of extreme precipitation, improving our understanding of cross-divide storm behavior, particularly those associated with atmospheric rivers, could provide more reliable projections of future mountain water distribution under warming conditions.

These findings contribute to a better understanding of seasonal precipitation distribution across the Canadian Rockies in current and future climate conditions. This study identifies several meteorological conditions, such as the source and path of moisture, that make it more likely for precipitation to cross

the continental divide. The results suggest that atmospheric rivers can enhance moisture transport during these events and precipitation will cross even more the divide from west to east in warmer and moisture climate conditions.

## CHAPITRE 3

### CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de mieux comprendre la distribution des précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux dans les Rocheuses canadiennes, dans un climat passé et plus chaud et humide. Lorsque les précipitations parviennent à traverser de l'autre côté, elles peuvent affecter le bilan hydrologique des bassins versants concernés ainsi que la disponibilité régionale en eau. Étant donné que les précipitations en terrains montagneux sont particulièrement à risque d'être impactées par les changements climatiques, une meilleure compréhension de la distribution de l'eau dans cette région est essentielle pour optimiser la gestion des ressources naturelles.

Deux simulations ont été utilisées : une simulation représentant le climat historique (CTRL) et une simulation basée sur l'approche pseudo-réchauffement global (PRG), qui permet d'imposer des perturbations climatiques à des simulations historiques. Les deux simulations ont été conduites par le Modèle régional canadien du climat version 6 (CRCM6/GEM5; Roberge et al., 2025), avec une résolution spatiale de 2.5 km couvrant l'Ouest canadien et la période allant du 1er janvier 2022 au 8 avril 2023.

Les résultats de cette étude montrent que les événements de précipitations présentent une variabilité saisonnière à travers la ligne de partage des eaux, tant en termes de type de précipitation que d'accumulation. Powerline, qui se situe du côté est, recevait davantage de précipitation solide, avec deux fois plus d'évènements produisant plus de 30 mm de précipitations, comparativement à Nipika, situé du côté ouest. Lors des évènements simultanés entre ces deux sites, les précipitations solides étaient plus fréquentes aux deux sites. Les évènements produisant les plus fortes précipitations étaient plus fréquents durant l'été pour les deux sites.

Les évènements simultanés ont montré une moyenne d'accumulation annuelle plus élevée lorsque les vents à 600 hPa provenaient de l'ouest, comparativement à ceux provenant de l'est. Ces accumulations associées aux vents d'ouest étaient majoritairement mixtes et supérieures durant l'automne pour Nipika et Powerline. Cet apport d'humidité pourrait être lié à la présence des rivières atmosphériques, qui est associé à des forts vents d'ouest et dont la fréquence est supérieure durant les saisons froides, soient en hiver et en automne (Sharma et Déry, 2020). À l'inverse, les évènements associés aux vents d'est produisaient davantage de précipitation durant l'été à Nipika et au printemps à Powerline. Ces résultats

suggèrent que plus d'humidité est advectée depuis l'océan Pacifique que depuis les Prairies canadiennes lorsque les précipitations traversent la ligne de partage.

Avec la simulation PRG, les événements associés aux vents d'ouest produisent davantage de précipitations, qui sont désormais dominées par la pluie. Cette hausse de précipitations liquides pourrait être attribuable à l'intensification des rivières atmosphériques dans des conditions plus chaudes (Radić et al., 2015; Sharma et Déry, 2020). Les accumulations associées aux vents d'est, au contraire, diminuent avec les conditions plus chaudes.

Les coupes transversales à travers la ligne de partage des eaux ont montré que le côté ouest produit plus de précipitations, qui diminuent du côté est durant l'hiver, le printemps et l'automne, suggérant un apport plus important d'humidité du côté du Pacifique. L'été est la seule saison où il y a plus de précipitations du côté est, suggérant davantage d'humidité provenant des Prairies canadiennes. Cette variabilité saisonnière pourrait être liée à la présence des rivières atmosphériques. Les cartes saisonnières de transport intégré de vapeur d'eau (IVT) lors des conditions de rivières atmosphériques montrent que celles-ci affectent davantage la côte ouest durant l'hiver, le printemps et l'automne. Au contraire, l'est de la ligne de partage des eaux est davantage impactée durant l'été, où la vapeur d'eau est associée à des rivières atmosphériques provenant du sud-est des États-Unis. L'hiver et l'automne sont les deux saisons durant lesquelles la vapeur d'eau traverse la ligne de partage des eaux.

Avec la simulation PRG, les précipitations totales sur les coupes transversales augmentent durant toutes les saisons, sauf en été, notamment du côté ouest. L'automne présente la hausse la plus importante, avec des hausses d'accumulation totale allant jusqu'à 90 mm/an, accompagnée d'une augmentation de la proportion de pluie et d'une diminution de la neige. Ces résultats suggèrent qu'avec le réchauffement climatique, les précipitations seront davantage de forme liquide, ce qui est cohérent avec la littérature scientifique (eg. Fang et Pomeroy, 2023; Pomeroy et al., 2015).

Deux événements de précipitation, ayant des sources d'humidité provenant des versants ouest et est et ayant franchi la ligne de partage des eaux, ont été utilisés comme études de cas afin de mieux comprendre pourquoi les tempêtes en provenance directe du Pacifique peuvent traverser vers le côté est. Les études de cas révèlent que la simulation CTRL a surestimé l'accumulation de précipitation près de la ligne de partage des eaux comparativement à CaPA pour les deux tempêtes, tout en représentant correctement les régimes généraux de précipitation. Le rapport de mélange et la profondeur verticale des condensats

de glace étaient similaires pour les deux tempêtes. Cependant, la tempête 2, associée à une rivière atmosphérique, a produit davantage de précipitations de chaque côté des Rocheuses canadiennes. Durant cet événement, les vents étaient d'ouest à tous les niveaux verticaux, contrairement à la tempête 1, où les vents n'avaient pas la même orientation. Durant la tempête 2, les flux de vapeur d'eau perpendiculaire à la ligne de partage des eaux étaient plus de deux fois plus élevés que durant la tempête 1, permettant aux précipitations de se former plus loin après avoir franchi les Rocheuses canadiennes.

Avec la simulation PRG, les deux tempêtes ont subi une augmentation de la quantité de pluie, ce qui demeure cohérent avec la littérature (Fang et Pomeroy, 2023; Pomeroy et al., 2015). Pour la tempête 1, les paramètres météorologiques ont peu changé, et moins de précipitations ont traversé vers le côté ouest, en Colombie-Britannique. Pour la tempête 2, l'épaisseur verticale des condensats de glace a augmenté légèrement, et plus de précipitation ont traversé vers le côté est de la ligne de partage. Les flux de vapeur d'eau dans les trois coupes parallèles à la ligne de partage des eaux ont augmenté, indiquant un transport accru d'humidité sur le versant opposé. Ces études de cas supportent que les événements liés aux vents d'ouest apportent davantage de précipitations sur le versant est. Les résultats issus de la simulation PRG suggèrent que les événements provenant directement du Pacifique produiront plus de précipitations des deux côtés des Rocheuses canadiennes, comparativement à ceux provenant des Prairies Canadiennes.

Malgré les résultats obtenus, cette étude présente différentes limitations. La première réside dans la différence d'altitudes entre les deux sites utilisés (Nipika et Powerline). Le *Nipika Mountain Resort* (Nipika) est situé à une altitude de 1087 m, tandis que *Fortress Mountain Powerline* (Powerline) se situe à 2076 m. Cette différence d'élévation peut influencer la quantité et le type de précipitation mesuré à la surface (eg. Ding et al., 2014; Thériault et al., 2022). L'utilisation de plusieurs stations réparties des deux côtés de la ligne de partage des eaux, avec des altitudes plus comparables, aurait permis de limiter l'impact de cette variable sur les précipitations observées. Deuxièmement, seulement deux études de cas ont été présentées dans cette étude. Il aurait été pertinent d'analyser un plus grand nombre d'événements associés à des flux d'humidité provenant de différentes directions. Par exemple, SPADE a observé un cas associée à une rivière atmosphérique sur la côte ouest de la Californie, dont l'humidité a été transporté vers les deux côtés de la ligne de partage des eaux sous des vents se dirigeant vers le nord (Thériault et al., 2022). Il aurait également pu être pertinent de comparer des événements représentatif de chaque saison, compte tenu de la variabilité saisonnière des précipitations dans la région. Troisièmement, quelques hypothèses ont été formulées lors de l'identification des événements simultanés et de l'attribution de leur

source d'humidité. L'étude a supposé que la présence de précipitations simultanées à Nipika à Powerline indiquait qu'elles étaient associées au même système météorologique. De plus, l'utilisation du mode de la direction des vents à 600 hPa pour caractériser l'origine de l'humidité présente certaines limites. Quatrièmement, l'approche PRG présente certaines limitations. Étant donné que les simulations historiques et PRG utilisent les mêmes conditions aux limites, cela limite la variabilité de la fréquence et de la diversité des systèmes météorologiques (Brogli et al., 2023). Cinquièmement, la simulation CTRL présentait un biais chaud de la température à 2 m sur l'ensemble du domaine, ce qui pourrait affecter le type de précipitations. Cependant, la simulation CTRL a produit presque uniquement des précipitations solides sur les coupes transversales lors de la tempête 1, ce qui concorde avec les observations de SPADE, qui indiquent également des précipitations presque exclusivement solides à Nipika et Powerline.

Finalement, cette étude contribue à une meilleure compréhension de la répartition saisonnière des précipitations à travers la ligne continentale de partage des eaux dans les Rocheuses canadiennes, dans les conditions climatiques actuelles et plus chaudes et humides. Les résultats mettent en évidence certaines conditions météorologiques, notamment l'origine de l'humidité et la direction des vents, sous lesquelles les précipitations sont plus susceptibles de traverser vers le versant opposé des Rocheuses. Les analyses suggèrent que les rivières atmosphériques pourraient contribuer à renforcer le transport d'humidité lors de ces événements. Davantage d'études visant à mieux comprendre le lien avec les rivières atmosphériques et son évolution dans des conditions climatiques futures seraient utiles.

## RÉFÉRENCES

- Almonte, J. D., & Stewart, R. E. (2019). Precipitation transition regions over the southern Canadian Cordillera during January–April 2010 and under a pseudo-global-warming assumption. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3665-3682. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3665-2019>
- Armenakis, C., & Nirupama, N. (2014). Flood Risk Mapping for the City of Toronto. *Procedia Economics and Finance*, 18, 320-326. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00946-0](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00946-0)
- Berg, H. W. S., Stewart, R. E., & Joe, P. I. (2017). The characteristics of precipitation observed over Cypress Mountain during the SNOW-V10 campaign. *Atmospheric Research*, 197, 356-369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.009>
- Bourgouin, P. (2000). A Method to Determine Precipitation Types. *Weather and Forecasting*, 15(5), 583-592. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015%253C0583:AMTDPT%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015%253C0583:AMTDPT%253E2.0.CO;2)
- Brandt, W. T., Haleakala, K., Hatchett, B. J., & Pan, M. (2022). A Review of the Hydrologic Response Mechanisms During Mountain Rain-on-Snow. *Frontiers in Earth Science*, 10, 791760. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.791760>
- Brogli, R., Heim, C., Mensch, J., Sørland, S. L., & Schär, C. (2023). The pseudo-global-warming (PGW) approach : Methodology, software package PGW4ERA5 v1.1, validation, and sensitivity analyses. *Geoscientific Model Development*, 16(3), 907-926. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-907-2023>
- Buttle, J. M., Allen, D. M., Caissie, D., Davison, B., Hayashi, M., Peters, D. L., Pomeroy, J. W., Simonovic, S., St-Hilaire, A., & Whitfield, P. H. (2016). Flood processes in Canada : Regional and special aspects. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 41(1-2), 7-30. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1131629>
- Cann, M. D., & Friedrich, K. (2020). The Role of Moisture Pathways on Snowfall Amount and Distribution in the Payette Mountains of Idaho. *Monthly Weather Review*, 148(5), 2033-2048. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0350.1>

Cape, M. R., Vernet, M., Skvarca, P., Marinsek, S., Scambos, T., & Domack, E. (2015). Foehn winds link climate-driven warming to ice shelf evolution in Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(21). <https://doi.org/10.1002/2015JD023465>

Carrera, M. L., Bélair, S., Fortin, V., Bilodeau, B., Charpentier, D., & Doré, I. (2010). Evaluation of Snowpack Simulations over the Canadian Rockies with an Experimental Hydrometeorological Modeling System. *Journal of Hydrometeorology*, *11*(5), 1123-1140. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1274.1>

Cholette, M., & Thériault, J. M. (2021). Precipitation Type Distribution and Microphysical Processes During the 1998 Ice Storm Simulated Under Pseudo-Warmer Conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(8). <https://doi.org/10.1029/2020jd033577>

Chow, F. K., De Wekker, S. F. J., & Snyder, B. J. (Éds.). (2013). *Mountain Weather Research and Forecasting : Recent Progress and Current Challenges*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4098-3>

Craig, P. (2019). *Catchment boundaries of ocean drainage basins* [Dataset]. University of Reading. <https://doi.org/10.17864/1947.195>

Cullen, R. M., & Marshall, S. J. (2011). Mesoscale Temperature Patterns in the Rocky Mountains and Foothills Region of Southern Alberta. *Atmosphere-Ocean*, *49*(3), 189-205. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.592130>

DeFlorio, M. J., Waliser, D. E., Guan, B., Lavers, D. A., Ralph, F. M., & Vitart, F. (2018). Global Assessment of Atmospheric River Prediction Skill. *Journal of Hydrometeorology*, *19*(2), 409-426. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0135.1>

Diaconescu, E. P., Gachon, P., & Laprise, R. (2015). On the Remapping Procedure of Daily Precipitation Statistics and Indices Used in Regional Climate Model Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, *16*(6), 2301-2310. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0025.1>

Ding, B., Yang, K., Qin, J., Wang, L., Chen, Y., & He, X. (2014). The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization. *Journal of Hydrology*, *513*, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.038>

Elvidge, A. D., & Renfrew, I. A. (2016). The Causes of Foehn Warming in the Lee of Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(3), 455-466. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00194.1>

Fang, X., & Pomeroy, J. W. (2020). Diagnosis of future changes in hydrology for a Canadian Rockies headwater basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, *24*(5), 2731-2754. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2731-2020>

Fang, X., & Pomeroy, J. W. (2023). Simulation of the impact of future changes in climate on the hydrology of Bow River headwater basins in the Canadian Rockies. *Journal of Hydrology*, *620*, 129566. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129566>

Flesch, T. K., & Reuter, G. W. (2012). WRF Model Simulation of Two Alberta Flooding Events and the Impact of Topography. *Journal of Hydrometeorology*, *13*(2), 695-708. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-035.1>

Fortin, V., Roy, G., Stadnyk, T., Koenig, K., Gasset, N., & Mahidjiba, A. (2018). Ten Years of Science Based on the Canadian Precipitation Analysis : A CaPA System Overview and Literature Review. *Atmosphere-Ocean*, *56*(3), 178-196. <https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1474728>

Gaur, A., Gaur, A., Yamazaki, D., & Simonovic, S. P. (2019). Flooding Related Consequences of Climate Change on Canadian Cities and Flow Regulation Infrastructure. *Water*, *11*(1), 63. <https://doi.org/10.3390/w11010063>

Geerts, B., Miao, Q., & Yang, Y. (2011). Boundary Layer Turbulence and Orographic Precipitation Growth in Cold Clouds : Evidence from Profiling Airborne Radar Data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *68*(10), 2344-2365. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05009.1>

Gillett, N. P., Cannon, A. J., Malinina, E., Schnorbus, M., Anslow, F., Sun, Q., Kirchmeier-Young, M., Zwiers, F., Seiler, C., Zhang, X., Flato, G., Wan, H., Li, G., & Castellani, A. (2022). Human influence on the

2021 British Columbia floods. *Weather and Climate Extremes*, 36, 100441.

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100441>

Golding, D. L. (1978). Calculated Snowpack Evaporation during Chinooks along the Eastern Slopes of the Rocky Mountains in Alberta. *Journal of Applied Meteorology*, 17(11), 1647-1651.

[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017%253C1647:CSFDA%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017%253C1647:CSFDA%253E2.0.CO;2)

Gottlieb, A. R., & Mankin, J. S. (2024). Evidence of human influence on Northern Hemisphere snow loss.

*Nature*, 625(7994), 293-300. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06794-y>

Guan, B., Waliser, D. E., & Ralph, F. M. (2023). Global Application of the Atmospheric River Scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(3), e2022JD037180. <https://doi.org/10.1029/2022JD037180>

Harder, P., & Pomeroy, J. (2013). Estimating precipitation phase using a psychrometric energy balance method. *Hydrological Processes*, 27(13), 1901-1914. <https://doi.org/10.1002/hyp.9799>

Hayhoe, K., Cayan, D., Field, C. B., Frumhoff, P. C., Maurer, E. P., Miller, N. L., Moser, S. C., Schneider, S. H., Cahill, K. N., Cleland, E. E., Dale, L., Drapek, R., Hanemann, R. M., Kalkstein, L. S., Lenihan, J., Lunch, C. K., Neilson, R. P., Sheridan, S. C., & Verville, J. H. (2004). Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(34), 12422-12427.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0404500101>

Houze, R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, 50(1),

2011RG000365. <https://doi.org/10.1029/2011RG000365>

Houze, R. A. (2014). Cloud Microphysics. Dans *International Geophysics* (Vol. 104, p. 47-76). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374266-7.00003-2>

Houze, R. A., McMurdie, L. A., Petersen, W. A., Schwaller, M. R., Baccus, W., Lundquist, J. D., Mass, C. F., Nijssen, B., Rutledge, S. A., Hudak, D. R., Tanelli, S., Mace, G. G., Poellot, M. R., Lettenmaier, D. P., Zagrodnik, J. P., Rowe, A. K., DeHart, J. C., Madaus, L. E., Barnes, H. C., & Chandrasekar, V. (2017). The Olympic Mountains Experiment (OLYMPEX). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(10), 2167-2188. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0182.1>

Ikeda, K., Rasmussen, R., Liu, C., Newman, A., Chen, F., Barlage, M., Gutmann, E., Dudhia, J., Dai, A., Luce, C., & Musselman, K. (2021). Snowfall and snowpack in the Western U.S. as captured by convection permitting climate simulations : Current climate and pseudo global warming future climate. *Climate Dynamics*, 57(7-8), 2191-2215. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05805-w>

Jonas, P. R. (1996). Turbulence and cloud microphysics. *Atmospheric Research*, 40(2-4), 283-306. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00035-6](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00035-6)

Jones, P. W. (1999). First- and Second-Order Conservative Remapping Schemes for Grids in Spherical Coordinates. *Monthly Weather Review*, 127(9), 2204-2210. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%253C2204:FASOCR%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%253C2204:FASOCR%253E2.0.CO;2)

Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization : An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043%253C0170:tkcpau%253E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043%253C0170:tkcpau%253E2.0.co;2)

Kim, K.-H., Lee, E.-H., & Hong, S.-Y. (2018). Potential of Voronoi Diagram for the Conserved Remapping of Precipitation. *Monthly Weather Review*, 146(7), 2237-2246. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0350.1>

Kim, S., & Chiang, J. C. H. (2022). Atmospheric river lifecycle characteristics shaped by synoptic conditions at genesis. *International Journal of Climatology*, 42(1), 521-538. <https://doi.org/10.1002/joc.7258>

Klos, P. Z., Link, T. E., & Abatzoglou, J. T. (2014). Extent of the rain-snow transition zone in the western U.S. under historic and projected climate. *Geophysical Research Letters*, 41(13), 4560-4568. <https://doi.org/10.1002/2014GL060500>

Kormos, P. R., Marks, D., McNamara, J. P., Marshall, H. P., Winstral, A., & Flores, A. N. (2014). Snow distribution, melt and surface water inputs to the soil in the mountain rain–snow transition zone. *Journal of Hydrology*, 519, 190-204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.051>

Lenderink, G., De Vries, H., Van Meijgaard, E., De Rooy, W., Van Uft, L., Thompson, V., Qiu, X., & Fowler, H. J. (2025a). A pseudo global warming based system to study how climate change affects high impact rainfall events. *Weather and Climate Extremes*, 49, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2025.100781>

Lenderink, G., De Vries, H., Van Meijgaard, E., De Rooy, W., Van Ulft, L., Thompson, V., Qiu, X., & Fowler, H. J. (2025b). A pseudo global warming based system to study how climate change affects high impact rainfall events. *Weather and Climate Extremes*, *49*, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2025.100781>

Leung, L. R., Qian, Y., Bian, X., Washington, W. M., Han, J., & Roads, J. O. (2004). Mid-Century Ensemble Regional Climate Change Scenarios for the Western United States. *Climatic Change*, *62*(1-3), 75-113. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013692.50640.55>

Liu, A. Q., Mooney, C., Szeto, K., Thériault, J. M., Kochtubajda, B., Stewart, R. E., Boodoo, S., Goodson, R., Li, Y., & Pomeroy, J. (2016). The June 2013 Alberta Catastrophic Flooding Event : Part 1—Climatological aspects and hydrometeorological features. *Hydrological Processes*, *30*(26), 4899-4916. <https://doi.org/10.1002/hyp.10906>

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E., & Revuelto, J. (2020). Decoupling of warming mountain snowpacks from hydrological regimes. *Environmental Research Letters*, *15*(11), 114006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb55f>

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F. M., Vidaller, I., & Alonso-González, E. (2021). Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, *16*(9), 094021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde>

Lundquist, J. D., Abel, M. R., Henn, B., Gutmann, E. D., Livneh, B., Dozier, J., & Neiman, P. (2015). High-Elevation Precipitation Patterns : Using Snow Measurements to Assess Daily Gridded Datasets across the Sierra Nevada, California\*. *Journal of Hydrometeorology*, *16*(4), 1773-1792. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0019.1>

MacDonald, M. K., Pomeroy, J. W., & Essery, R. L. H. (2018). Water and energy fluxes over northern prairies as affected by chinook winds and winter precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, *248*, 372-385. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.025>

- Mahfouf, J., Brasnett, B., & Gagnon, S. (2007). A Canadian precipitation analysis (CaPA) project : Description and preliminary results. *Atmosphere-Ocean*, *45*(1), 1-17.  
<https://doi.org/10.3137/ao.v450101>
- McCabe, G. J., Clark, M. P., & Hay, L. E. (2007). Rain-on-Snow Events in the Western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *88*(3), 319-328. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-3-319>
- McGinn, S. M. (2010). Weather and climate patterns in Canada's prairie grasslands. Dans K. Floate, *Arthropods of Canadian Grasslands (Volume 1) : Ecology and Interactions in Grassland Habitats* (p. 105-119). Biological Survey of Canada. <https://doi.org/10.3752/9780968932148.ch5>
- McMurdie, L. A., Rowe, A. K., Houze, R. A., Brodzik, S. R., Zagrodnik, J. P., & Schuldt, T. M. (2018). Terrain-Enhanced Precipitation Processes Above the Melting Layer : Results From OLYMPEX. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(21). <https://doi.org/10.1029/2018JD029161>
- Milrad, S. M., Gyakum, J. R., & Atallah, E. H. (2015). A Meteorological Analysis of the 2013 Alberta Flood : Antecedent Large-Scale Flow Pattern and Synoptic–Dynamic Characteristics. *Monthly Weather Review*, *143*(7), 2817-2841. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00236.1>
- Mironov, D., Kirillin, G., Heise, E., Golosov, S., Terzhevik, A., & Zverev, I. (2003). Parameterization of lakes in numerical models for environmental applications. *Proc. of the 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters*, 135-143. [https://www.academia.edu/download/42621065/mkhgtz\\_ppnw7\\_extabs.pdf](https://www.academia.edu/download/42621065/mkhgtz_ppnw7_extabs.pdf)
- Mo, R., Brugman, M. M., Milbrandt, J. A., Goosen, J., Geng, Q., Emond, C., Bau, J., & Erfani, A. (2019). Impacts of Hydrometeor Drift on Orographic Precipitation : Two Case Studies of Landfalling Atmospheric Rivers in British Columbia, Canada. *Weather and Forecasting*, *34*(5), 1211-1237.  
<https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0176.1>
- Morrison, H., & Milbrandt, J. A. (2015). Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I : Scheme Description and Idealized Tests. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *72*(1), 287-311. <https://doi.org/10.1175/jas-d-14-0065.1>

Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wick, G. A., Kuo, Y.-H., Wee, T.-K., Ma, Z., Taylor, G. H., & Dettinger, M. D. (2008). Diagnosis of an Intense Atmospheric River Impacting the Pacific Northwest : Storm Summary and Offshore Vertical Structure Observed with COSMIC Satellite Retrievals. *Monthly Weather Review*, 136(11), 4398-4420. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2550.1>

Pavelsky, T. M., Sobolowski, S., Kapnick, S. B., & Barnes, J. B. (2012). Changes in orographic precipitation patterns caused by a shift from snow to rain. *Geophysical Research Letters*, 39(18), 2012GL052741. <https://doi.org/10.1029/2012GL052741>

Pederson, G. T., Gray, S. T., Ault, T., Marsh, W., Fagre, D. B., Bunn, A. G., Woodhouse, C. A., & Graumlich, L. J. (2011). Climatic Controls on the Snowmelt Hydrology of the Northern Rocky Mountains. *Journal of Climate*, 24(6), 1666-1687. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3729.1>

Poirier, É., Thériault, J. M., & 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>

Pomeroy, J. W., Fang, X., & Marks, D. G. (2016). The cold rain-on-snow event of June 2013 in the Canadian Rockies—Characteristics and diagnosis. *Hydrological Processes*, 30(17), 2899-2914. <https://doi.org/10.1002/hyp.10905>

Pomeroy, J. W., Fang, X., & Rasouli, K. (2015). *Sensitivity of snow processes to warming in the Canadian Rockies*.

Pomeroy, J. W., Stewart, R. E., & Whitfield, P. H. (2016). The 2013 flood event in the South Saskatchewan and Elk River basins : Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 41(1-2), 105-117. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1089190>

Radić, V., Cannon, A. J., Menounos, B., & Gi, N. (2015). Future changes in autumn atmospheric river events in British Columbia, Canada, as projected by CMIP5 global climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9279-9302. <https://doi.org/10.1002/2015JD023279>

Ralph, F. M., Dettinger, M., Lavers, D., Gorodetskaya, I. V., Martin, A., Viale, M., White, A. B., Oakley, N., Rutz, J., Spackman, J. R., Wernli, H., & Cordeira, J. (2017). Atmospheric Rivers Emerge as a Global Science and Applications Focus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(9), 1969-1973.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0262.1>

Richards-Thomas, T. S., Déry, S. J., Stewart, R. E., & Thériault, J. M. (2024). Climatological context of the mid-November 2021 floods in the province of British Columbia, Canada. *Weather and Climate Extremes*, 45, 100705. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100705>

Roberge, F., Di Luca, A., Argüeso, D., Thériault, J., & Lucas-Picher, P. (2025). *High-Resolution Historical and Pseudo Global Warming (PGW) Simulations for northeastern North America Catalogue (HR-HiPNENAC), V1* [Dataset]. Federated Research Data Repository / dépôt fédéré de données de recherche. <https://doi.org/10.20383/103.01137>

Roe, G. H. (2005). OROGRAPHIC PRECIPITATION. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 645-671. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122541>

Rood, S. B., Samuelson, G. M., Weber, J. K., & Wywrot, K. A. (2005). Twentieth-century decline in streamflows from the hydrographic apex of North America. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 215-233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.010>

Rutz, J. J., Steenburgh, W. J., & Ralph, F. M. (2014). Climatological Characteristics of Atmospheric Rivers and Their Inland Penetration over the Western United States. *Monthly Weather Review*, 142(2), 905-921. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00168.1>

Sandink, D., Kovacs, P., Oulahan, G., & McGillivray, G. (2010). *Making flood insurable for Canadian homeowners : A discussion paper* [Discussion paper]. Institute for Catastrophic Loss Reduction & Swiss Reinsurance Company Ltd.

Schär, C., Frei, C., Lüthi, D., & Davies, H. C. (1996). Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters*, 23(6), 669-672. <https://doi.org/10.1029/96gl00265>

Sharma, A. R., & Déry, S. J. (2020). Contribution of Atmospheric Rivers to Annual, Seasonal, and Extreme Precipitation Across British Columbia and Southeastern Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(9), e2019JD031823. <https://doi.org/10.1029/2019JD031823>

Siler, N., Roe, G., & Durran, D. (2013). On the Dynamical Causes of Variability in the Rain-Shadow Effect : A Case Study of the Washington Cascades. *Journal of Hydrometeorology*, *14*(1), 122-139. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-045.1>

Stewart, R. E., Thériault, J. M., & 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. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00032.1>

Stockham, A. J., Schultz, D. M., Fairman, J. G., & Draude, A. P. (2018). Quantifying the Rain-Shadow Effect : Results from the Peak District, British Isles. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *99*(4), 777-790. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0256.1>

Tessendorf, S. A., French, J. R., Friedrich, K., Geerts, B., Rauber, R. M., Rasmussen, R. M., Xue, L., Ikeda, K., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., Parkinson, S., Snider, J. R., Aikins, J., Faber, S., Majewski, A., Grasmick, C., Bergmaier, P. T., Janiszewski, A., Springer, A., ... Bruintjes, R. (2019). A Transformational Approach to Winter Orographic Weather Modification Research : The SNOWIE Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *100*(1), 71-92. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0152.1>

Thériault, J. M., Hung, I., Vaquer, P., Stewart, R. E., & 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*(8), 4491-4512. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4491-2018>

Thériault, J. M., Leroux, N. R., Stewart, R. E., Bertonecchini, A., Déry, S. J., Pomeroy, J. W., Thompson, H. D., Smith, H., Mariani, Z., Desroches-Lapointe, A., Mitchell, S., & Almonte, J. (2022). Storms and Precipitation Across the continental Divide Experiment (SPADE). *Bulletin of the American Meteorological Society*, *103*(11), E2628-E2649. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0146.1>

Thériault, J. M., Leroux, N. R., Tchuem Tchuente, O., & Stewart, R. E. (2023). Characteristics of Rain-Snow Transitions Over the Canadian Rockies and their Changes in Warmer Climate Conditions. *Atmosphere-Ocean*, 61(5), 352-367. <https://doi.org/10.1080/07055900.2023.2251938>

Thériault, J. M., Stewart, R. E., Milbrandt, J. A., & Yau, M. K. (2006). On the simulation of winter precipitation types. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D18), 2005JD006665. <https://doi.org/10.1029/2005JD006665>

Thornton, M. M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P. E., & Kao, S.-C. (2022). *DaymetDaymet : Monthly Climate Summaries on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1* (Version 4.1, p. 0 MB) [netCDF, GTiff, COG]. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNDAAC/2131>

Tsang, M., & Scott, D. M. (2020). An integrated approach to modeling the impact of floods on emergency services : A case study of Calgary, Alberta. *Journal of Transport Geography*, 86, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102774>

Vallejo-Bernal, S. M., Braun, T., Marwan, N., & Kurths, J. (2025). PIKART : A Comprehensive Global Catalog of Atmospheric Rivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(15), e2024JD041869. <https://doi.org/10.1029/2024JD041869>

Verseghy, D. L. (2000). The Canadian land surface scheme (CLASS) : Its history and future. *Atmosphere-Ocean*, 38(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649637>

Vionnet, V., Fortin, V., Gaborit, E., Roy, G., Abrahamowicz, M., Gasset, N., & Pomeroy, J. W. (2020). Assessing the factors governing the ability to predict late-spring flooding in cold-region mountain basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2141-2165. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2141-2020>

Wazney, L., & Clark, S. P. (2016). The 2009 flood event in the Red River Basin : Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 41(1-2), 56-64. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1009949>