

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DE L'IMPACT DE L'ASSIMILATION DES RADARS CANADIENS
POUR LES PRÉCIPITATIONS SOLIDES SUR LE CANADIAN PRECIPITATION
ANALYSIS SYSTEM

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

FLORENCE BEAUDRY

DECEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

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

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma directrice de recherche, Julie Thériault, et à Stéphane Bélair pour leur aide indispensable, leur disponibilité et leur expertise sans lesquelles ce projet n'aurait été possible. Je tiens également à remercier Pei-Ning Feng, Dikra Khedhaouiria et Franck Lespinas pour leur soutien tout au long du projet. Enfin, je suis éternellement *grateful* à mes collègues Catherine Aubry et Olivier Chalifour pour leur appui et leurs suggestions, mais surtout pour l'amitié que nous avons développée.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans les systèmes collaboratifs et les données fournies par Environnement et Changement Climatique Canada et l'Université du Québec À Montréal. Je également à souligner le soutien financier fourni par Manitoba Hydro.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLAUX.....	9
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	10
RÉSUMÉ	11
CHAPITRE 1.....	12
INTRODUCTION	12
1.1 Mise en contexte.....	12
1.2. Le système CaPA.....	13
1.3. Radar météorologique.....	16
1.4. Le produit radar Canadien.....	18
1.5. Objectifs.....	25
CHAPITRE 2.....	27
IMPACT DE L'ASSIMILATION DES DONNÉES RADAR SUR LES PRÉCIPITATIONS SOLIDES DANS LE SYSTÈME CANADIEN D'ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS .	27
ABSTRACT	29
1 Introduction	30
2. Data and Methodology	32
2.1. The Canadian Precipitation Analysis (CaPA) system	33
2.2. Surface precipitation networks	35
2.2.1. Surface station networks.....	35

2.2.2. Canadian radar network.....	36
2.2.3. Adjusted Daily Rainfall Snowfall (AdjDlyRS) dataset.....	37
2.3.1. Case studies	37
2.3.2. Objective evaluation.....	38
2.4. Experimental setup	40
Table 2: Description of experiments.	41
3. Results	42
3.1. Case studies	42
3.2. Objective evaluation of the impact of DPQPE in winter.....	45
3.2.1. Impact of radars for solid QPE.....	46
3.2.2. Impact of radars in a configuration with more surface observations.....	50
3.2.3 Impact of all modifications (surface observations, UTF, and radars)	52
4. Discussion.....	54
4.1. Bias evaluation	54
4.2. Evaluation limitations.....	57
5. Conclusions	57
CHAPITRE 3.....	59
CONCLUSION	59
ANNEXE A	64
EVALUATION OBJECTIVE CONTRE LA BASE DE DONNÉES ADJUSTED DAILY RAINFALL SNOWFALL (AdjDlyRS).....	64
ANNEXE B	68
ÉVALUATION DU BIAS DES RADARS EN FONCTION DE LA DISTANCE DES RADARS	68

ANNEXE C	70
ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DE L'ASSIMILATION DES RADARS POUR DONNER SUITE AUX ÉTUDES DE CAS	70
RÉFÉRENCES.....	73

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Analysis domain (black contour) with the surface stations considered for assimilation in CaPA. The automatic stations are represented by red dots and the manual stations by green squares. The location of the radars is indicated by the “+” symbols, together with their range of 120-km in CaPA shown with a black contour. The AdjDlyRS stations used for evaluation are presented with blue triangles. Observations from these networks are for CaPA’s analysis valid at 00 UTC on March 20th, 2021..... 33
- Figure 2 : Case study for an event occurring on 27 March 2021. Precipitation accumulations are presented for a 24-h period ending at 12 UTC on the reporting day with the analysis from the Control (a), Radar (b), Control-TF (c) and Radar-TF (d) experiments against the AdjDlyRS observations, represented by small circles. Radar range (120-km) and site identifiers are also presented in this figure. The radars’ locations and ranges are only displayed to help their localisation in the analysis. 43
- Figure 3 : As in Figure 2 but for an event occurring on 18 January 2021..... 44
- Figure 4 : Impact of the assimilation of DPQPE for precipitation events in cold conditions (Radar; red lines with rounds) compared to the DPQPE only assimilated for liquid precipitation events (Control; blue lines with squares) on the POD (top left panel), FAR (top right panel), FBI-1 (bottom left panel), and ETS (bottom right panel). The impact is for 6-h precipitation thresholds. The white background is present when the difference between the analyses and the observations are statistically significant (95%) and the grey background indicates a difference that is not statistically significant. The statistical significance is determined from a stationary block bootstrap approach. The evaluation is performed over periods from 1 December 2020 to 1 April 2021 and from 1 December 2021 to 1 April 2022. 47
- Figure 5 : Impact of assimilating DPQPE on the partial sums of precipitation for Radar (red line with rounds) and Control (blue line with squares) experiments. Partial sums of precipitation for observations are indicated using black dashed line with crosses..... 48
- Figure 6 : As in Figure 3, but for the temporal evolution in weekly increments (x-axis), where the grey vertical line indicates the separation of both winters (2020-2021 and 2021-2022).

The POD; first row, the FAR; second row, FBI-1; third row and ETS; second row are subdivided in four 6-hourly precipitation thresholds (0.2 mm, first column; 0.5 mm, second column; 1 mm, third column and 2 mm; fourth column). The red percentage present in every panel shows the percentage of points where the Radar experiment performs better than the Control experiment according to the definition of the four metrics (displayed at the bottom left of the panels in red; in blue is when Control is better than Radar). Each metric's average through the two winters is displayed by the small lines at the furthest right of every panel.

..... 49

Figure 7 : As in Figure 4, but for the comparison between Control-TF and Radar-TF. 51

Figure 8 : As in Figure 5, but for the comparison between Control-TF and Radar-TF. 52

Figure 9 : As in Figure 9, but for the comparison between Control and Radar-TF. 53

Figure 10 : As in Figure 5, but for the comparison between Control and Radar-TF. 54

Figure 11 : Bias (radar QPE/observations) -1 as function of precipitation intensity for Radar and Radar-TF, for the two winters combined. The mean field bias, calculated as the weighted mean of the bias in function of intensity in relation to the number of cases per bin, is displayed by the dashed line, and is 0.39. The average number of cases per bin per 6h period is equal to 34.58, 20.80, 4.67 and 5.39 for the displayed bins that show statistical significance respectively..... 56

Figure A 1 : Impact de l'assimilation du DPQPE pour des événements de précipitations en conditions froides avec la relaxation du critère de vent maximum pour l'assimilation des stations de surface automatiques et l'ajustement de ces dernières avec la fonction de transfert universelle (Radar-TF; lignes rouges avec ronds) par rapport au DPQPE uniquement assimilé pour les événements de précipitations liquides (CTL; lignes bleues avec carrés) sur le POD (panneau supérieur gauche), FAR (panneau supérieur droit), FBI-1 (panneau inférieur gauche), et le ETS (panneau inférieur droit). L'impact concerne les seuils de précipitations de 6 heures. Le fond blanc est présent lorsque la différence entre les analyses et les observations est statistiquement significative (95%) et le fond gris indique une différence qui

n'est pas statistiquement significative. La signification significative est déterminée à partir d'une approche bootstrap par blocs stationnaires. L'évaluation est réalisée sur des périodes allant du 1^{er} décembre 2020 au 1^{er} avril 2021 et du 1^{er} décembre 2021 au 1^{er} avril 2022. Les observations utilisées pour l'évaluation sont issues de la base de données AdjDlyRS..... 65

Figure A 2 : Impact de l'assimilation du DPQPE sur les sommes partielles de précipitations pour les expériences Radar-TF (ligne rouge avec ronds) et CTL (ligne bleue avec carrés). Les sommes partielles des précipitations pour les observations issues de la base de données AdjDlyRS sont indiquées par une ligne noire en pointillés avec des croix..... 67

Figure B 1 : Biais (QPE radar/observations) -1 en fonction de la distance des radars pour Radar et Radar-TF, pour les deux hivers combinés. Le biais est moyenné pour les huit radars du domaine. 69

Figure C 1 : Étude de cas pour un événement survenu le 18 janvier 2021. Les intervalles de confiance (CFIA) sont présentés sous forme de moyenne pour une période de 24 heures se terminant à 12 UTC le jour du rapport avec l'analyse des expériences Control (a), Radar (b), Control-TF (c) et Radar-TF (d). La portée des radars (120 km) et leurs noms sont également présentés sur cette figure. Les emplacements et les portées des radars ne sont affichés que pour faciliter leur localisation dans l'analyse..... 72

LISTE DES TABLAUX

Table 1 : Skill scores (based on contingency tables) with their definition and references...	39
Table 2: Description of experiments.	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CaPA Canadian Precipitation Analysis

RDPS Regional Deterministic Prediction System

HREPA High-Resolution Deterministic Prediction Analysis

HRDPS High Resolution Deterministic Prediction System

GEM Global Environmental Multiscale

QPE Quantitative Precipitation Estimates

DPQPE Dual Polarized Quantitative Precipitation Estimates

ECCC Environment and Climate Change Canada

NWP Numerical Weather Prediction

AdjDlyRS Adjusted Daily Rainfall Snowfall

SWE Snow Water Equivalent

FAR False Alarm Ratio

FBI Frequency Bias Index

POD Probability Of Detection

ETS Equitable Threat Score

CMC Centre Météorologique Canadien

SMC Service Météorologique du Canada

NWP Numerical Weather Prediction

RÉSUMÉ

Le système d'analyse des précipitations Canadien (CaPA) fournit des analyses de précipitations en temps quasi réel sur le Canada en combinant des observations avec des prévisions météorologiques numériques à court terme. Le produit CaPA sur les chutes de neige est limité en raison du manque de mesures précises des précipitations pour corriger la première estimation. Les radars météorologiques ont le potentiel d'ajouter des mesures de précipitations au système CaPA en hiver. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'ajout du produit radar canadien pour les chutes de neige dans le système CaPA afin d'estimer les précipitations. Deux approches de l'assimilation des radars dans CaPA ont été testées ; la première utilise une configuration proche de celle utilisée dans les opérations d'Environnement et Changements Climatiques Canada et la seconde utilise une version où le contrôle de qualité sur le seuil de la vitesse du vent pour l'assimilation de stations de surfaces automatiques est relâché. Les résultats ont montré que l'assimilation du produit radar améliore les quantités de précipitations solides produites par CaPA. En particulier, l'augmentation de la probabilité de détection suggère une amélioration de la distribution spatiale des précipitations et la diminution du taux de fausses alarmes suggère une amélioration de la précision de la détection des précipitations. En outre, les résultats ont montré des améliorations pour le biais général de la quantité de précipitations et le biais de fréquence pour les faibles quantités de précipitations. La diminution générale du biais, cependant, se traduit en une dégradation du biais pour les précipitations plus importantes. Les résultats indiquent également que l'impact des radars reste également positif pour les deux configurations de CaPA testées dans cette étude.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Il est crucial d'avoir une bonne connaissance de la quantité, de la distribution et de l'intensité des précipitations, car les précipitations sont une des variables météorologiques les plus importantes pour la société (Balica et al., 2013). En effet, de fortes précipitations peuvent entraîner des dommages importants causés par des inondations, des coulées de débris ou des glissements de terrain. D'autre part, l'absence de précipitations peut provoquer des sécheresses et des impacts sur l'approvisionnement en eau et en énergie hydroélectrique (AghaKouchak et al., 2015; Prein et al., 2016). En conséquence, détenir des informations en temps réel sur les précipitations est crucial. En effet, la gestion de l'irrigation, de la prévision des crues et des ressources en eau est plus facile si des estimations fiables des précipitations sont disponibles. Avec les changements climatiques, les événements de précipitations extrêmes devraient augmenter, ce qui rend les estimations de précipitations encore plus pertinentes (Feng et al., 2019). Les estimations hivernales sont également importantes pour surveiller l'évolution de l'épaisseur et de la couverture de la neige, ainsi que pour gérer les ressources en eau et fournir des alertes en cas d'événements extrêmes (Carles et al., 2020; Zarenistanak et al., 2015).

Cependant, l'estimation des précipitations représente des défis majeurs. La simulation des précipitations représente un défi en raison du large éventail de processus impliqués. Trois facteurs principaux affectent les précipitations, à savoir les processus nuageux et la convection, l'interaction du flux atmosphérique avec la surface et la circulation atmosphérique à grande échelle (Sawyer, 1956). Les transitions de phase des processus nuageux sont l'une des principales sources d'incertitude dans les simulations climatiques (McCoy et al., 2015). De plus, les régions plus isolées font face à davantage d'obstacles considérant que les réseaux de mesures au sol, tels que les pluviomètres et les radars météorologiques, sont rares en raison du coût élevé de la mise en place et de la maintenance des infrastructures (Wan et al., 2023). Ces conditions limitent la fiabilité et la faisabilité des

prévisions hydrologiques et des systèmes d'alerte précoce dans les régions éloignées (Wan et al., 2023; Yilmaz et al., 2005).

Le Canada est un vaste pays qui compte de nombreuses régions éloignées et peu peuplées soumises à des conditions climatiques extrêmes. Il est donc impératif de mettre en place un système d'estimation des précipitations fiable et de haute qualité. Le système d'analyse des précipitations canadiennes (CaPA) est développé et maintenu par le Service météorologique du Canada (SMC) et la Division de la recherche météorologique d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). Il s'agit du premier fournisseur canadien d'estimations quantitatives des précipitations (QPE) en temps quasi réel à l'échelle du Canada. CaPA a été développé en 2003 et a été motivé par le manque d'estimations de précipitations disponibles sur le Canada (Mahfouf et al., 2007).

1.2. Le système CaPA

CaPA est utilisé de manière opérationnelle au Centre Météorologique Canadien (CMC) depuis avril 2011 et permet d'obtenir des estimés de précipitations à une fine résolution spatiale. Les produits sont principalement utilisés pour la modélisation hydrologique (Abbasnezhadi, 2017; Deacu et al., 2012) et les applications agricoles (NIDIS, 2015). CaPA est également utilisé pour l'initialisation des modèles d'ECCC, la vérification de leurs prévisions météorologiques et le soutien de ses services climatiques (Fortin et al., 2018). Le système fournit également des informations utilisées par le Système canadien d'assimilation des données sur les terres (CaLDAS) pour la production opérationnelle des analyses canadiennes de l'humidité du sol, de la neige terrestre et de la température de surface (Carrera et al., 2015).

CaPA est un produit QPE maillé qui utilise une combinaison optimale d'observations de précipitations en temps quasi réel provenant de stations de surface, de réseaux de radars et de données satellitaires avec un champ de fond (first guess) fourni par un modèle de prévision numérique du temps (NWP) pour compenser le manque de densité des radars et des réseaux in situ (Fortin et al., 2015; Fortin et al., 2018). La prévision à court terme du NWP est générée par deux systèmes de prédiction déterministes. La première configuration

du système de prévision est le système de précipitation déterministe régional (RDPS; Bélair et al., 2000) avec une résolution de 10 km couvrant l'Amérique du Nord. La seconde est le système de précipitation déterministe à haute résolution (HRDPS; Milbrandt et al., 2016) avec une résolution de 2,5 km couvrant le nord du continent. Ils reposent tous deux sur les prévisions à court terme du modèle atmosphérique Global Environmental Multiscale (GEM; Côté et al., 1998).

CaPA produit des estimations de précipitations sur des grilles de 10 km et 2,5 km à quatre heures synoptiques, 0000, 0600, 1200 et 1800 UTC (toutes les 6 heures) (Lespinas et al., 2015). Les accumulations sur six heures sont initialisées une heure après la fin de la période (première coupure). Les accumulations sont ensuite mises à jour six heures plus tard afin de pouvoir assimiler les observations supplémentaires arrivant après la première heure de coupure. Il existe également une analyse de 24 heures valable à 1200 UTC pour les stations des États-Unis et d'autres observations, généralement rapportées par des volontaires.

Deux couches d'information sont générées sur une grille régulière. Les deux produits d'information sont un QPE et un indice de confiance, entre 0 et 1, indiquant si des informations supplémentaires provenant du fond, ou une première estimation, sont utilisées dans l'analyse. Un indice de confiance de 0 indique que l'analyse de CaPA repose entièrement sur le champ de fond et à l'opposé, un indice de confiance de 1 indique qu'uniquement les observations de précipitations sont utilisées pour produire l'analyse.

Les observations sont d'abord soumises à un processus de contrôle de la qualité (CQ) à chaque moment de l'assimilation afin de supprimer les observations qui présentent des erreurs importantes. Un CQ temporel est appliqué pour traiter les problèmes sur une période spécifique (erreurs systématiques) (Lespinas et al., 2015). Cette procédure est basée sur la distribution statistique des différences entre les observations et l'analyse obtenue sur les cas les plus récents, qui décide si une station de surface est rejetée ou conservée pour l'analyse. Un CQ spatial est en outre appliqué pour identifier les erreurs aléatoires, telles que les stations qui rapportent des quantités de précipitations divergentes par rapport à leurs stations voisines (Khedhaouria et al., 2022).

Le système CaPA est construit selon une approche modulaire qui prépare l'analyse en suivant plusieurs étapes de manière séquentielle. Les principales étapes sont la préparation d'une pseudo-analyse de la température de surface, la lecture et le traitement des observations météorologiques des stations de surface, la préparation du champ d'essai, la construction des composites radar, la réalisation de l'analyse proprement dite et la création d'un fichier contenant les paramètres du semi-variogramme théorique. La méthode d'interpolation utilisée pour combiner les observations avec la première estimation, la prévision GEM, est l'interpolation optimale. Cette interpolation résiduelle par krigeage simple est effectuée sur la base de la différence, également appelée innovation, entre la racine cubique des observations de surface et le fond. Les innovations sont ajoutées à la première estimation avec une correction du biais pour créer l'analyse (Evans, 2013). Si une même cellule de grille comporte plusieurs observations, elle devient une super-station en faisant la moyenne des innovations.

La première version de CaPA utilisait le modèle atmosphérique GEM comme champ de fond (Mahfouf et al., 2007). Ensuite, la version deux a utilisé des versions améliorées de GEM, entraînant une augmentation de la résolution à 10km, contre 15km dans sa première version, sur toute l'Amérique du Nord. De plus, pour compléter les données des stations de surface, une version de CaPA (la 3e) a été produite avec des données radars assimilés provenant de tous les radars canadiens pour les mois d'été. La version la plus récente, la 4e, comprend une deuxième configuration avec un fond à haute résolution, ce qui conduit à une résolution de 2,5 km sur le Canada, sauf dans la région arctique (Fortin et al., 2018). Les nouvelles versions non opérationnelles de CaPA mettent en œuvre les données de précipitations de la mission Global Precipitation Measurement (GPM) comme sources de données supplémentaires pour les mois d'été et utilisent des produits radar en hiver. Un autre produit est généré avec le système CaPA; le système d'analyse des précipitations d'ensemble à haute résolution (HREPA). Il utilise des ensembles de 6 heures pour estimer les incertitudes de l'analyse des précipitations sur grille avec un espacement de grille de 2,5 km dans le but de produire une version améliorée de CaPA. Une évaluation montre que HREPA est un ensemble fiable pour les précipitations liquides et solides (Khedhaouria et al., 2020).

La principale faiblesse de CaPA en hiver réside dans ses produits de précipitations solides (Lespinas et al., 2015). En général, le système a tendance à sous-estimer les chutes de neige (Khedhaouiria et al., 2020). En fait, les performances de CaPA en hiver restent mises à mal en raison du manque de mesures précises des précipitations. Peu de stations sont présentes au Canada dû à la taille du territoire et au coût de maintenir les infrastructures. Les stations présentes sont aussi soumises à davantage d'incertitudes en hiver (faible maintenance, cycles gel-dégel, incertitudes liées aux vents, etc), donc de nombreuses observations de surface sont automatiquement rejetées par le contrôle de qualité lorsque la température est moins de 0°C. Le manque d'assimilation des données satellitaires et radar par rapport aux analyses estivales contribue également à la faible performance en hiver. Ces caractéristiques limitent la qualité de l'estimation des précipitations solides. La correction supplémentaire des observations de surface (jauges de précipitations) à l'aide de fonctions de transfert, qui ajustent la sous-captation causée par le vent (Kochendorfer et al., 2018; Smith et al., 2020), et l'ajout de données satellitaires (telles que IMERG; Pradhan et al., 2022) et de radars météorologiques en hiver pourraient améliorer l'analyse pendant les mois d'hiver.

1.3. Radar météorologique

Le RADIO Detection And Ranging (radar) météorologique est un système d'émission-réception de rayonnement électromagnétique de grandes longueurs d'onde. Ils émettent des ondes électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes, de 1 à 10 cm. Cela permet une faible interaction avec les gaz atmosphériques, les aérosols et les gouttelettes de nuages (Fukao et al., 2013). Le système radar fonctionne en envoyant des impulsions et en mesurant le rayonnement qui est rétrodiffusé ou réfléchi vers le radar par les hydrométéores. La réflectivité radar, ou l'intensité du rayonnement renvoyé, fournit des informations sur l'intensité des précipitations et est mesurée à une altitude donnée. Le type de balayage effectué par les radars pour obtenir des informations à une hauteur constante est un Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI). Cette mesure est ensuite utilisée pour estimer les quantités de précipitations au niveau du sol. La principale façon d'estimer les taux de précipitations à la surface à partir de la réflectivité est la relation réflectivité-pluie ou réflectivité-équivalent en eau de la neige au sol (Jameson & Kostinski, 2001; Laws &

Parsons, 1943; Marshall & Gunn, 1952). Ces relations ont été établies par Marshall & Palmer (1948).

L'émission des ondes radar se fait par des impulsions, caractérisées par une fréquence de répétition des impulsions. Quatre types différents de bandes de fréquences radar sont couramment utilisés. Les bandes K ont une longueur d'onde de 1 cm, soit une fréquence de 30 GHz, une excellente résolution spatiale et peuvent détecter les gouttelettes de nuages. Les radars de la bande X fonctionnent dans une longueur d'onde de 3 cm (fréquence de 10 GHz), tandis que les bandes C sont dans une longueur d'onde de 5 cm (fréquence de 6 GHz). Les radars en bande S sont dans des longueurs d'onde de 10 cm (fréquences de 3 GHz), ce qui leur permet d'avoir une très faible atténuation, mais la résolution est plus faible et ne peut détecter que des gouttelettes d'eau (objets plus gros). La réflectivité mesurée dépend de la nature des précipitations, la neige ayant tendance à moins réfléchir que la pluie. Cela pose un problème pour représenter avec précision les quantités de chutes de neige (ECCC, 2021). Les radars à double polarisation peuvent également montrer la réflectivité différentielle et la classification des hydrométéores (Laramée & Li, 2019).

Pour minimiser les interférences entre les impulsions émises et les impulsions renvoyées au radar, une portée limite, considérée comme la longueur sans ambiguïté à laquelle le radar peut détecter les précipitations et les nuages, est fixée pour des radars spécifiques (Boyuan et al., 2021). Cette limite permet de s'assurer que le signal réfléchi par une cible correspond à l'impulsion transmise la plus récente, et contribue à limiter les erreurs d'interférence. Par ailleurs, la mesure de la réflectivité elle-même peut entraîner des erreurs telles qu'un mauvais étalonnage électronique et l'effet de portée, qui est une atténuation due à l'augmentation du volume de l'échantillon en raison de l'élargissement du faisceau (Alexander et al., 2022; Kumjian et al., 2022). Lors de l'estimation des précipitations et des chutes de neige au niveau du sol, comme dans le cas de CaPA, des incertitudes supplémentaires apparaissent. Elles sont dues au profil vertical non uniforme de la réflectivité et aux équations de conversion Z-R/Z-S. De plus, même avec un faible angle d'élévation, le taux de précipitation mesuré peut toujours être non représentatif du taux sur le sol en dessous (Fortin et al., 2015).

Les radars présentent d'autres problèmes courants lorsqu'ils perçoivent des échos erronés (Boodoo et al., 2018; Hubbert et al., 2009; Maki et al., 2005; Park et al., 2005; Perry & Biss, 2007; Vivekanandan et al., 1999). Tout d'abord, le faisceau bloquant se produit lorsque des collines ou des montagnes bloquent le faisceau radar et laissent des lacunes notables dans la configuration. Deuxièmement, le faisceau de dépassement se produit lorsque des nuages sont proches du sol et provoquent de fortes précipitations, comme des bourrasques de neige à effet de lac. Cela peut conduire le faisceau radar à dépasser la majeure partie de la zone de précipitation et à indiquer à tort des échos faibles, même en présence de fortes précipitations. Le troisième problème est la propagation anormale. Elle se produit lorsque des inversions de température se produisent dans les basses couches de l'atmosphère, ce qui signifie que le faisceau radar ne peut pas traverser les couches et est dévié vers le sol. Il en résulte un faux signal fort réfléchi vers le radar. Quatrièmement, le fouillis de sol. C'est lorsqu'une partie du faisceau radar rencontre des bâtiments élevés, des arbres ou des collines, ce qui a pour effet de bloquer le signal.

L'efficacité du radar est également déterminée par le type de précipitations (Alexander et al., 2022; Fassnacht et al., 1999). En général, la pluie est plus efficacement détectée que la neige. Les données du radar Doppler conventionnel rencontrent généralement des incertitudes lorsque la température descend en dessous de zéro, notamment lorsque la couche de fonte est échantillonnée par le radar (Fortin et al., 2015). Les estimations de chutes de neige par les radars représentent de nombreux problèmes car elles sont également soumises à la variabilité de la distribution de la taille des gouttes, à l'atténuation, à la variation du profil de réflectivité verticale, au radôme humide, au fouillis, au blocage du faisceau, au remplissage non uniforme du faisceau et au mauvais calibrage du radar (Boodoo et al., 2018). L'angle d'incidence est également plus élevé en été qu'en hiver puisque les systèmes météorologiques générant les précipitations sont plus élevés en été qu'en hiver, ce qui entraîne plus d'incertitudes (ECCC, 2021c).

1.4. Le produit radar Canadien

Les radars sont utilisés pour ajouter des sources de données à l'analyse des précipitations, comme dans le cas de CaPA. La version du système lancée en 2014 a mis en

œuvre l'assimilation des trente et un radars météorologiques canadiens opérationnels avec une portée limitée à 120 km. Les estimations quantitatives de précipitations (QPE) des radars canadiens sont utilisées comme des observations et non comme un champ de fond (Fortin et al., 2015). Au réseau opérationnel, s'ajoutent les trente-trois radars américains proches de la frontière canadienne, à l'intérieur du bassin versant des Grands Lacs et de la zone du fleuve Saint-Laurent. Le programme qperad (ECCC, 2021a) est utilisé dans CaPA pour effectuer le post-traitement des données radar, l'assimilation et la création de masques afin d'estimer et de corriger les biais des données avant leur assimilation. Ces erreurs peuvent être liées à la présence d'obstacles permanents et de zones d'ombre qui doivent être évaluées et déterminées géographiquement dans un objectif de création de masques radar. Ces biais sont corrigés à partir des données des stations terrestres situées dans la zone de couverture du radar (ECCC, 2021a, 2021b).

Jusqu'en 2018, le réseau canadien de radars utilisait des radars Doppler en simple polarisation en bande C avec une fréquence de 5,6 à 5,65 GHz (Khedhaouria et al., 2020). Ils ont une couverture Doppler de 113 km et une portée maximale de couverture de 256 km. Ils fonctionnent avec une résolution verticale, qui correspond au nombre d'angles d'élévation, de 24. Le produit bidimensionnel est calculé avec un angle d'élévation de balayage du radar le plus proche du sol pour permettre une meilleure représentation des précipitations proches de la surface, avec 0,4 degrés pour la plupart des radars. Une limitation dans l'utilisation de ces radars est l'estimation incertaine des précipitations neigeuses (Fortin et al., 2015).

De 2017 à 2023, le programme de remplacement des radars météorologiques canadien est établi avec pour objectif de faire évoluer le réseau vers des radars polarimétriques à double polarisation. Le produit mosaïque radar est disponible sur l'ensemble du domaine canadien à une fréquence de 6 minutes. La mosaïque représente également la pluie en mm/h et la neige en cm/h avec des relations Z-R et Z-S respectivement pour la pluie et la neige. Ces radars en bande S ont une fréquence de 2,7 à 2,9 GHz et permettent de mieux distinguer les précipitations liquides et solides (ECCC, 2021). Le produit est également bidimensionnel avec un taux de précipitation estimé au plus bas du balayage radar disponible, soit 0,4 degré d'élévation pour la plupart des radars en bande S. L'estimation du taux de précipitation est

produite aussi près du sol que possible. Le produit est basé sur une série de traitements des mesures polarimétriques pour le contrôle de qualité dans le but d'éliminer les artefacts non météorologiques des données brutes (balayage volumétrique). Ils sont progressivement ajoutés à la base de données des observations de CaPA. Ces radars ont une couverture Doppler et une portée maximale de 240 km, ce qui permet de détecter la vitesse des hydrométéores. Il dispose de 17 scans pour la résolution verticale. Le Double Polarisation Quantitative Precipitation Estimates (DPQPE) pour les radars en bande S canadiens et NEXRAD, l'analogue QPE pour les produits radar en bande S américains, sont disponibles depuis 2020 (ECCC, 2021).

Le passage de la technologie des radars à polarisation simple à celle des radars à polarisation double présente de nombreux avantages et est considéré comme la meilleure procédure pour augmenter l'efficacité de la classification des hydrométéores (Saltikoff et al., 2021). L'alternance des impulsions transmises entre les polarisations horizontale et verticale permet également une amélioration de la mesure du taux de précipitation qui améliore significativement la précision des estimations quantitatives des précipitations. Il en résulte également un meilleur traitement de la bande brillante (couche de fusion). Elle permet de simplifier et d'améliorer les algorithmes de contrôle de qualité utilisés pour localiser les signaux météorologiques. Elle permet également d'augmenter la confiance dans les données radar, qui joue un rôle clé dans la préparation des alertes d'événements extrêmes. La technologie fournit également des informations utiles pour estimer les précipitations, ce qui contribue à la prévision et à la détection des inondations et aide les autorités municipales à gérer les ressources en eau. Elle a également des applications dans le domaine de l'aviation puisqu'elle permet de distinguer les échos non météorologiques, comme les oiseaux, et de détecter les conditions de givrage dans les avions (ECCC, 2021).

Les données radar sont acheminées vers le centre régional du Service météorologique du Canada (SMC) le plus proche. Chaque centre envoie ensuite les données au Centre météorologique canadien pour archivage, en vue de leur utilisation dans des modèles de prévision numérique du temps, comme CaPA, ou par des utilisateurs spécifiques. Les données doivent ensuite être prétraitées pour évaluer leur qualité. Ce traitement permet

d'éliminer les échos non précipités avant d'appliquer les algorithmes de récupération des précipitations.

L'algorithme actuel des précipitations hivernales utilisé par le Réseau Radar Canadien d'ECCC est basé sur l'équivalent en eau de la neige développé par Sekhon & Srivastava (1970) et sur une distribution de diamètre fondu basée sur Gunn & Marshall (1958). Cela crée un rapport entre le facteur de réflectivité radar et le taux de précipitation en équivalent en eau liquide (mm/h). Une étude a été faite en 2017 pour améliorer l'algorithme a évalué qu'il sous-estime sévèrement l'équivalent en eau liquide, mais montre tout de même de bons résultats pour les événements dans les régions de Toronto et St John's (Hassan et al., 2017). Il y a aussi l'approche consistant à utiliser la température de l'air près de la surface et les observations de précipitations des jauges pour ajuster les estimations de précipitations solides. C'est ainsi qu'un modèle prédictif non paramétrique a été construit par Sivasubramaniam et al. (2018) et a montré une réduction de l'erreur quadratique moyenne jusqu'à 15% par rapport aux modèles utilisant les taux de précipitation radar comme prévision principale. Fassnacht et al. (1999) ont également utilisé la température de l'air de surface pour quantifier la fraction de neige dans les précipitations mixtes et ajuster en fin de compte les estimations radar, ce qui a montré une amélioration des estimations des accumulations de neige en Ontario.

L'estimation du taux de précipitation pour les radars à double polarisation est un peu différente. Elle ne fait pas seulement appel à la réflectivité, mais aussi à d'autres paramètres mesurés. Ce sont la réflectivité différentielle, la phase différentielle de propagation, la phase différentielle spécifique, le coefficient de corrélation copolaire et l'atténuation horizontale spécifique. La phase différentielle spécifique montre la variation du déphasage différentiel. Ainsi, une réflectivité différentielle croissante indique une augmentation de la taille et de la concentration des précipitations (taux de précipitation) (Zrnica & Ryzhkov, 1996). En fait, la réflectivité différentielle a l'avantage d'être indépendant de la distribution de la taille des gouttes et d'être lié presque linéairement au taux de précipitation, de sorte que les algorithmes d'estimation de la pluie hybrides entre les algorithmes de réflectivité pour les petits taux de

précipitation et les algorithmes de phase différentielle pour les taux de précipitation plus élevés donnent de meilleurs résultats (Ryzhkov & Zrníc, 1995).

Une étude de Boodoo et al. (2015) a été réalisée pour développer et évaluer différents algorithmes basés sur le radar à double polarisation en bande C d'ECPC de King City (WKR) situé à 30 km au nord de Toronto, Ontario, Canada. La distribution qui a montré les résultats les plus prometteurs lorsqu'elle a été évaluée par rapport aux totaux de précipitations des jauges situées dans un rayon de 100 km du radar était les relations hybrides suivantes :

$$\text{Eq 1} \quad \text{Pluie} \begin{cases} R(Z) \text{ if } R(K_{DP}) \leq 10\text{mm/hr} \\ R(K_{DP}) \text{ if } R(K_{DP}) > 10\text{mm/hr} \end{cases}$$

$$\text{Eq 2} \quad \text{Neige} \begin{cases} S(Z, K_{DP}) \text{ if } Z > 20 \text{ and } K_{DP} > 0.01 \\ S(Z) \text{ otherwise} \end{cases}$$

Les équations utilisées ensuite pour les produits de pluie avec les radars polarimétriques (en mm/h) sont présentées dans les équations 3 (Marshall & Gunn, 1952) et 4 (Ryzhkov et al., 2005). Les relations entre la neige et le taux de précipitations (en cm/h) sont présentées dans les équations 5 (Sekhon & Srivastava, 1970) et 6 (A. Ryzhkov & D. Zrníc, 1998; A. V. Ryzhkov & D. S. Zrníc, 1998) pour la couche de fonte.

$$\text{Eq 3} \quad Z = 200R^{1.6}$$

$$\text{Eq 4} \quad R(K_{DP}) = 44K_{DP}^{0.822}$$

$$\text{Eq 5} \quad Z = 399S^{2.21}$$

$$\text{Eq 6} \quad S(K_{DP}, Z) = 1.53K_{DP}^{0.61}10^{-0.33Z}$$

Nous notons ici que l'équation 5 a été développée pour la neige humide au-dessus de la couche de fonte, ce qui tend à donner une forte sous-estimation de l'intensité des précipitations neigeuses.

Le produit qperad est le programme utilisé dans CaPA pour effectuer le post-traitement des données radar, l'assimilation et la création des masques associés à chaque

radar. Il existe une procédure de contrôle de qualité qui élimine les pixels sous le niveau de congélation. Cette étape de la procédure est contournée dans la version non opérationnelle qui assimile les données radar en hiver. Les données satellitaires du GOES sont utilisées pour créer des masques de nuages afin de nettoyer les données radar. Pour chaque pixel radar présentant des précipitations, si aucun nuage est observé au-dessus de la zone radar, le pixel est éliminé. S'il n'y a pas de données satellitaires, le champ est utilisé à partir du modèle de prédiction. Le biais est corrigé avec des observations provenant de stations de surface fiables dans la zone couverte par les radars. Cela peut entraîner des incertitudes supplémentaires puisque les observations au sol ne sont pas nécessairement les plus fiables et comportent déjà elles-mêmes des erreurs (Fortin et al., 2015).

Il a été démontré que les données radars ajustés fournissent des estimations de précipitations qui tendent à être plus réalistes que les données corrigées des jauges de précipitations (Fassnacht et al., 1999; Hassan et al., 2017). Les résultats encourageants de l'utilisation de CaPA dans le système d'indice météorologiques des incendies en Ontario montrent que les zones couvertes par le radar entraînent des améliorations de l'indice de danger d'incendie (Hanes et al., 2017). Malgré les imprécisions, l'assimilation des produits radars pour les précipitations solides pourrait également améliorer CaPA en hiver (Fortin et al, 2015). Avec le renouvellement du réseau, la confiance dans les données radar est accrue et elles et sont assez précises par rapport à une prévision météorologique. Le radar polarimétrique pourrait également améliorer l'utilisation des récupérations radar à longue portée (Fortin et al, 2018). Un autre aspect positif est qu'à plus longue distance, les cellules convectives peuvent être vues par le radar avec une précision comparable ou supérieure aux produits satellitaires (Fortin et al, 2015). Cela permet d'avoir un impact positif sur la qualité des produits. Cependant, des erreurs subsistent dans le DPQPE (ECCC, 2023) qui peuvent être diminuées avec différents ajustements basés sur la distribution du diamètre de la neige fondue. L'utilisation de ces méthodologies avancées pour quantifier les propriétés structurelles de la neige, combinées aux données des satellites d'observation de la Terre, pourrait aider à obtenir des estimations radar plus précises des précipitations solides (Lemmetyinen et al., 2016).

Avec la disponibilité accrue des radars polarimétriques et leurs progrès prometteurs dans l'estimation précise des taux de chute de neige, de nombreuses études ont été réalisées pour évaluer les produits et tenter de fournir des estimations similaires à celles utilisées par CaPA. Une étude européenne, la Nordic Snow Radar Experiment (NoSREx), a utilisé des données radar à double polarisation comparées à des mesures manuelles in situ de puits à neige sur un site finlandais pendant les hivers 2009-2013 (Lemmetyinen et al., 2016). Les résultats ont montré que la détermination de la microstructure de la neige est impérative pour comprendre les signatures micro-ondes. Plus particulièrement, les événements de fonte et de gel en début de saison contribuent à la plupart des variations entre les observations d'ESO et le signal de rétrodiffusion radar (Lin et al., 2016). Il est mentionné à plusieurs reprises dans la littérature que les variations des propriétés physiques des particules de glace sont l'une des principales causes d'erreur dans les produits radar pour les chutes de neige (Moisseev et al., 2009).

D'autres études utilisant des radars à double polarisation montrent des QPE prometteurs avec l'utilisation d'ajustements du facteur de ventilation par exemple (Kennedy & Rutledge, 2011). Une étude sur les tempêtes hivernales dans la péninsule coréenne avec un radar à double polarisation en bande X a utilisé une nouvelle méthodologie de profil quasi-vertical basée sur le balayage de l'indicateur de distance-hauteur pour considérer les processus microphysiques des particules de glace et les processus de croissance de la tempête/neige dans les formes spatiales et temporelles. Cela permet également de séparer les observations des agrégats et des particules de glace cerclées (Allabakash et al., 2019).

Une étude réalisée par (Cocks et al., 2019) a évalué un produit QPE dans l'est des montagnes Rocheuses. Ils estiment que leur nouveau produit fournit de meilleures estimations pour les événements de précipitations intenses et obtient de meilleurs résultats dans les régions de blocage partiel du faisceau que le QPE opérationnel à double polarisation. L'algorithme QPE à double polarisation considéré utilise le taux de précipitation en fonction de la réflectivité et de la réflectivité différentielle pour la pluie pure et en fonction de la phase différentielle spécifique pour la pluie mélangée à la grêle pour déterminer les estimations de précipitations.

En bref, l'assimilation des données radars pour la fraction liquide de précipitations améliore CaPA (Fortin et al., 2015) et les nouveaux radars à double polarisation permettent d'obtenir des estimés de précipitations fiables (Boodoo et al., 2018; Boodoo et al., 2015). Cependant, aucune étude n'a été menée sur l'assimilation des données radars pour la fraction solide dans un système d'analyse de données de précipitations tel que CaPA. Étant donné l'importance des précipitations pour les climats froids comme le Canada, il est nécessaire d'améliorer le produit de précipitations solides dans CaPA.

1.5. Objectifs et approche

Considérant que l'assimilation des données radar durant l'été améliore CaPA (Bousquet et al., 2006; Fortin et al., 2015), il est essentiel de tester leurs impacts lorsque les températures sont inférieures à 0°C. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'assimilation des composites radars à double polarisation dans CaPA pendant la saison hivernale. Pour ce faire, l'étude identifie les principales forces et faiblesses associées à l'assimilation des radars pour les précipitations solides. En évaluant si la valeur ajoutée des radars en hiver est positive, cela pourrait ouvrir la possibilité d'utiliser ce jeu de données important dans d'autres systèmes de précipitations similaires à CaPA.

L'hypothèse est que l'impact devrait s'avérer globalement positif, avec l'impact négatif pouvant être que les radars en hiver conduisent CaPA à sous-estimer d'avantage les accumulations de neige, cela étant le point faible des radars à double polarisation. Le Canada central contient des paysages diversifiés, tels que des prairies et des montagnes, ce qui en fait une région efficace pour évaluer cette étude afin de s'assurer que les résultats en vue d'améliorer le système seraient applicables à l'ensemble du domaine CaPA. Le domaine de cette étude s'étend de l'est de la Colombie-Britannique à l'ouest de l'Ontario, et des territoires du sud au nord des États-Unis (Evans, 2013).

L'approche proposée consiste à effectuer une évaluation de différentes configurations de CaPA à travers quatre expériences afin de quantifier la valeur ajoutée des données radar. La référence pour cette évaluation est définie à partir d'observations provenant d'un réseau

de stations manuelles. L'évaluation présentée concerne deux saisons hivernales, c'est-à-dire celles de 2021 et 2022, du 1^{er} décembre au 31 mars de chaque année.

Le mémoire est organisé comme suit; le chapitre 2 présente un article soumis au Journal of Hydrometeorology, suivi par le chapitre 3 où une conclusion discute des résultats principaux et des limitations de l'étude, pour finir avec deux annexes.

CHAPITRE 2

IMPACT DE L'ASSIMILATION DES DONNÉES RADAR SUR LES PRÉCIPITATIONS SOLIDES DANS LE SYSTÈME CANADIEN D'ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS

Ce chapitre, présenté sous la forme d'un article scientifique rédigé en anglais, a été soumis au *Journal of Hydrometeorology*. L'article porte sur l'impact de l'assimilation des données radars à double polarisation pour la précipitation solide dans le système d'analyse des précipitations canadien (CaPA).

La contribution des auteurs de l'article se répartit comme suit : Florence Beaudry a mené les expériences, fait l'analyse de données, produit les figures et écrit le manuscrit. Stéphane Bélair et Julie M. Thériault ont défini le projet de recherche. Dikra Khedhaouria et Franck Lespinas ont fourni du support avec CaPA. Daniel Michelson a fourni du support technique avec les données radar. Tous les auteurs ont relu et contribué à améliorer le manuscrit.

Impact of assimilating radar solid precipitation data in the Canadian Precipitation Analysis system

Florence Beaudry ^a, Stéphane Bélair ^b, Julie M. Thériault ^a, Dikra Khedhaouiria ^b, Franck Lespinas ^c, Daniel Michelson ^d, Pei-Ning Feng ^a and Catherine Aubry ^a

*^a Centre ESCR, Department of Earth and Atmospheric Sciences,
Université du Québec À Montréal (UQÀM), Montréal, Québec, Canada*

*^b Atmospheric Science and Technology, Environment and Climate
Change Canada (ECCC), Dorval, Québec, Canada*

*^c Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction, Environment and
Climate Change Canada (ECCC), Dorval, Quebec, Canada*

*^dAtmospheric Science and Technology, Environment and Climate Change Canada (ECCC),
Downsview, Ontario, Canada*

ABSTRACT

The Canadian Precipitation Analysis (CaPA) system provides near-real-time precipitation analyses over Canada by combining observations with short-term numerical weather prediction forecasts. CaPA's snowfall products are limited due to the lack of accurate precipitation measurements to correct the first guess estimate. Weather radars have the potential to add precipitation measurements to CaPA in all seasons. The main objective of this study is to assess the impact of adding the Canadian radar-based product for snowfall in the CaPA system to improve CaPA's precipitation estimates. Two approaches to the assimilation of radar observations in CaPA were tested. The first has a configuration similar to what is currently used at ECCC Operations for its high-resolution deterministic precipitation analysis. For the second, the quality control on the wind speed threshold is relaxed. The results showed that assimilating the radar-based snowfall product improves the precipitation amounts produced by CaPA. In particular, the increase of the probability of detection suggests an improvement of the precipitation spatial distribution and the decrease in false alarm ratio enhances precipitation estimation accuracy. Additionally, the results showed improvements for the general precipitation amount bias and the frequency bias for low precipitation amounts. For larger thresholds, the frequency bias is degraded. Results also indicate that the impact of radars remains equally positive for both CaPA configurations tested in this study.

1 Introduction

Knowledge of the amount, distribution and intensity of precipitation is crucial since it is one of the most relevant meteorological variables for society (Balica et al., 2013; Prein et al., 2016). Real-time quantitative precipitation estimates (QPEs) are essential for mitigating floods and droughts (AghaKouchak et al., 2015; Carles et al., 2020), monitoring snow coverage, water resources and hydropower supply (Carles et al., 2020; Prein et al., 2016; Zarenistanak et al., 2015). Estimating precipitation represents however a major challenge, especially in a vast country such as Canada with many remote and sparsely observed regions. To address the need for accurate and timely precipitation information, it is critical to improve the precipitation estimation systems across the country.

The Canadian Precipitation Analysis system (CaPA) was developed and is maintained by Environment and Climate Change Canada (ECCC) since 2011. The system produces near-real-time precipitation analyses over North America at fine spatial resolution. The CaPA products are mostly used for hydrological modeling (Abbasnezhadi, 2017; Deacu et al., 2012) and agricultural applications (NIDIS, 2015) but are also used to initialize ECCC's prediction models to verify numerical weather predictions, and to support climate services (Fortin et al., 2018). For example, CaPA provides information to the Canadian Land Data Assimilation System (CaLDAS) used for ECCC's operational production of soil moisture, terrestrial snow, and surface temperature analyses (Carrera et al., 2015).

CaPA provides gridded precipitation accumulation estimates over 6-hour and 24-hour periods at a grid spacing of 2.5 km and 10 km. The QPEs are produced by combining a first guess field issued from a Numerical Weather Prediction (NWP) system's short-range forecast with observations from weather stations (Mekis et al., 2018), radars, and satellite data during the warm season. Further details on CaPA's characteristics and improvements over the years are available in Lespinas et al. (2015), Mahfouf et al. (2007) and Fortin et al. (2018). For all these CaPA versions developed and updated over the years, one challenging aspect that remains is related to its estimations of solid precipitation.

In winter, CaPA's performance is limited by the lack of accurate precipitation measurements (Yilmaz et al., 2005) and by the fact that many surface observations do not pass its quality control when the measured 2-m temperature is less than 0°C and the wind speed is greater than 0.6 m s⁻¹. This rejection attempts to minimize the wind-induced snowfall undercatch errors by automatic gauges (Feng et al., 2023; Kochendorfer et al., 2022). A recent study by Feng et al (2023) has shown that CaPA's solid precipitation analyses could be improved by relaxing its quality control criteria in order to allow for the assimilation of a greater number of surface observations, and by adjusting these observations using a universal transfer function.

Radar observations are currently assimilated into CaPA, but only for rain. The eight radars in the Canadian prairies are recently equipped with dual-polarization technology, which allows them to identify the type of hydrometeor and create precipitation estimates for all phases of precipitation (Kumjian et al., 2022). There are several challenges with ground-based radars which might limit their usefulness and impact for wintertime precipitation analysis. The relationship between measured reflectivity and snowfall at the surface remains uncertain due to the intricate microphysics involved in these processes (Matrosov, 1997). Additionally, radar reflectivity is valid at a certain height above the surface, even for low pointing angles, necessitating corrections to the vertical reflectivity profile, which rely on certain assumptions (Koistinen & Pohjola, 2014). The correction of attenuation and ground clutter, which blocks the radar beam and causes additional uncertainties (Vivekanandan et al., 1999), are possible with radar-gauge adjustment methods, which have been proven useful to mitigate these errors (Boodoo et al., 2018; Fortin et al., 2015; Gjertsen et al., 2003; Goudenhoofdt & Delobbe, 2009; Hubbert et al., 2009).

Advances in polarimetric measurements and bias correction of radar QPE have been shown to improve the quality of snowfall estimates (Alexander et al., 2022; Fassnacht et al., 1999). Given the need to improve solid precipitation estimation in Canada, the available radar-based product should be tested in CaPA. The main objective of this study is thus to determine if the assimilation of QPEs from ground-based radars in CaPA could lead to improved solid precipitation estimates over central Canada and evaluate how sensitive this

radar impact is to CaPA's approach for the assimilation of surface observations. Based on the data availability, two winters were chosen for the experiment.

The paper is organized as follows. Section 2 provides information on the precipitation networks assimilated in CaPA and presents a brief overview of CaPA and of the procedure used to assimilate wintertime radar data. This section also describes the different experiments performed and the evaluation procedures. Section 3 contains the evaluation results, which are further discussed in section 4. Section 5 provides conclusions and future work recommendations.

2. Data and Methodology

The analysis domain focuses on the Canadian prairies and covers the provinces of Alberta, Saskatchewan, and Manitoba at 2.5-km grid spacing (Figure 1). This domain is smaller than what is used at ECCO for its operations, with a nation-wide domain for its high-resolution (2.5-km) deterministic and ensemble precipitation analyses (Fortin et al, 2018; Section 2.b., and Khedhaouria et al., 2020; see Figure 1). This smaller study domain allows to focus on central Canada, which covers a homogeneous domain where snowfall is heavily present. The study period is from December to March of 2020 to 2021 and 2021 to 2022.

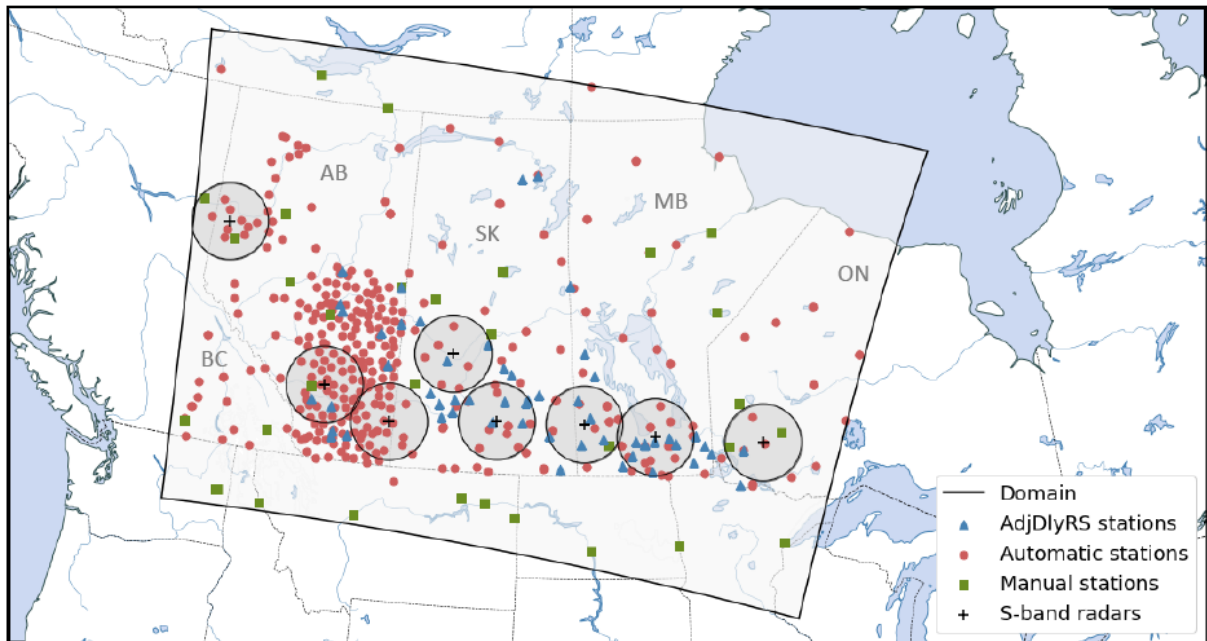


Figure 1 : Analysis domain (black contour) with the surface stations considered for assimilation in CaPA. The automatic stations are represented by red dots and the manual stations by green squares. The location of the radars is indicated by the “+” symbols, together with their range of 120-km in CaPA shown with a black contour. The AdjDlyRS stations used for evaluation are presented with blue triangles. Observations from these networks are for CaPA’s analysis valid at 00 UTC on March 20th, 2021.

2.1. The Canadian Precipitation Analysis (CaPA) system

The precipitation analyses from CaPA are obtained by combining a background (or first guess) field with observations. This combination is performed using a two-dimensional optimal statistical interpolation technique, specifically a simple kriging of innovations (also know as simple residual kriging or optimal interpolation (Creutin et al., 1988; Evans, 2013), based on the difference between a first-guess value, which is the background from a short-range NWP model, and the corresponding observation. The interpolation procedure is further explained in Fortin et al. (2018), Lespinas et al. (2015), Mahfouf et al. (2007).

The observations errors from surface stations are assumed to be unbiased and independent, which relates to a diagonal covariance error matrix. For the ground-based radar data, an exponential and isotropic decline in error with increasing distance from each radar pixel's location is adopted, with a specific error variance and correlation length. A similar assumption is made for the first guess spatial error structure, with specific error variance and correlation length. Error parameters related to both the initial forecast and observations are derived from a variographic approach, independently.

In this study, the first guess comes from a 2.5-km high-resolution configuration of the Global Environmental Multiscale (GEM) model, used as ECCC's High-Resolution Deterministic Precipitation System (HRDPS; ECCC, Milbrandt et al. 2016). This version of CaPA assimilates observations from surface weather stations and ground-based radars only. Six-hourly precipitation accumulation in liquid water equivalent is the variable analyzed by CaPA. CaPA also produces 24-h precipitation accumulations, but this product is not evaluated in this study. It should be mentioned that IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement mission) satellite products are assimilated in the North American 10-km CaPA version, but not used here. The surface weather stations, and ground-based radar networks are presented in section 2.2.

Prior to the assimilation in CaPA, the ground-based radar product is adjusted in a single-site polar CQ optic to mitigate known issues linked with their retrievals. The four-step procedure followed to achieve this is described in detail in Fortin et al. (2015). First, evident artefacts blocking the radars' signal are removed using ground stations and dynamic masks for ground clutter removal. Second, a validation of the precipitation pixels reported by the radars is performed using a mask based on GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) imagery. This procedure removes radar pixels where there is no clouds reported by the satellites. Third, the radar's bias is mitigated by conducting a statistical adjustment using surface stations. A linear regression in log space between the radar QPEs and CaPA's ground stations is first applied to deal with systematic bias. The case-specific biases are however handled with a mean field bias applied to each radar individually. The mean field bias is a weighted average of the ratio of the sum of radar QPEs and the sum of observations from

synoptic surface stations categorized by precipitation intensity bins. This bias is updated at every analysis step of CaPA (6 h). The mean is applied uniformly to the radar QPEs by dividing the QPE by the mean field bias. This can lead to uncertainties since the ground observations are not necessarily the most reliable and already have errors themselves (Fortin et al., 2015). Finally, a final check removes radar pixels largely differing from the background field.

The radar data post-processing is as described in Fortin et al. (2015), except for the spatial aggregation of radar pixels (Fortin et al, 2015; section 2.3) which is performed here on the HRDPS 2.5-km grid (Figure 1). Also, only radar estimates within a 120-km range are assimilated in CaPA. Their assimilation is performed in a similar way to the weather station observations' assimilation, with the main difference being the consideration of horizontal correlations in the radar data, detailed in Fortin et al. 2015 (section 2.4).

2.2. Surface precipitation networks

Observations from various ground-based networks are either assimilated in CaPA or used to objectively evaluate its precipitation analyses. These include observations from networks of stations and from radars, as described below.

2.2.1. Surface station networks

The surface observations assimilated in CaPA are from multiple weather networks described in Lespinas et al. (2015). They are a collection of manual and automatic stations in Canada and the United States, from networks such as ECCC's weather stations, the Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry (OMNRF), British Columbia Wildfire Service (BC Forest) and the American Meteorological Terminal Aviation Routine (METAR) networks. More information is found in Feng et al. (2023), Lespinas et al. (2015), Mekis et al. (2018).

2.2.2. Canadian radar network

Dual Polarization Quantitative Precipitation Estimate (DPQPE) is a radar-based product developed by ECCC and is the product assimilated in CaPA. This dataset includes observations from the eight dual-polarization radars in the Canadian prairies domain (Figure 1). These new S-band radars have been deployed operationally by the Canadian Weather Radar Replacement Program since 2017. The C-band single-polarization radars of the legacy Canadian network are expected to be all replaced by the end of 2023. The new S-band radars offer a Doppler coverage range of 240 km. The DPQPE product uses a hybrid algorithm according to Equations 1-6, based on radar reflectivity (Z) and specific differential phase (K_{DP}). Those variables provide information on the size and concentration of precipitation (Ryzhkov & Zrníc, 1995; Zrníc & Ryzhkov, 1996).

The rain and snow precipitation rates were developed based on the ECCC King City C-band dual-polarization radar (WKR) 30 km north of Toronto. The distribution that showed the most promising results when evaluated against rainfall totals from gauges within 100 km of the radar were hybrid relations (Boodoo et al., 2015):

$$\text{Eq 1} \quad \text{Rain} = \begin{cases} R(Z) & \text{if } R(K_{DP}) \leq 10 \text{ mm/h} \\ R(K_{DP}) & \text{if } R(K_{DP}) > 10 \text{ mm/h} \end{cases}$$

$$\text{Eq2} \quad \text{Snow} = \begin{cases} S(Z, K_{DP}) & \text{if } Z > 20 \text{ dB and } K_{DP} > 0.01 \text{ deg/km} \\ S(Z) & \text{otherwise} \end{cases}$$

The equations then used for rain products with polarimetric radars (in mm/h) are presented in Equations 3 (Marshall & Gunn, 1952) and 4 (Ryzhkov et al., 2005):

$$\text{Eq 3} \quad Z = 200R^{1.6}$$

$$\text{Eq 4} \quad R(K_{DP}) = 44K_{DP}^{0.822}$$

The snow relations to precipitation rate (in cm/h) are presented in Equations 5 (Sekhon & Srivastava, 1970) and 6 (Bukovčić et al., 2018; A. Ryzhkov & D. Zrníc, 1998; A. V. Ryzhkov & D. S. Zrníc, 1998) for the melting layer:

Eq 5
$$Z_e = 399S^{2.21}$$

Eq 6
$$S(Z, K_{DP}) = 1.53K_{DP}^{0.61}10^{-0.33Z}$$

It should be noted that Equation 6 has been developed for wet snow in the melting layer, which tends to give a strong underestimation of snow precipitation intensity.

2.2.3. Adjusted Daily Rainfall Snowfall (AdjDlyRS) dataset

The Adjusted Daily Rainfall and Snowfall (AdjDlyRS; Mekis & Vincent, 2011; Wang et al., 2017) dataset is used in our study for a case study evaluation of CaPA. This dataset includes adjusted daily precipitation amounts for both rain and snow measurements. Snow depth measurements are performed manually using a ruler and are then converted to liquid water equivalent based on a snow-water conversion map. More details are found in Mekis & Brown (2010). The rain measurements are from rain gauges, which are corrected for several factors (i.e. wind and wetting loss). Further information on the correction of the data is provided in Wang et al. (2017). The daily precipitation values are valid at 1200 UTC.

2.3. Evaluation procedures

The quality of CaPA's precipitation analyses is assessed both subjectively and objectively, by examining case studies and by using the metrics detailed below.

2.3.1. Case studies

Case studies are used to conduct a first evaluation to gain a preliminary and qualitative understanding of the impact of the DPQPE radar-based product for solid precipitation on CaPA's analyses. Maps are created to compare the precipitation product with and without the radars against an independent set of surface observations (AdjDlyRS). The 6-h accumulated precipitation from CaPA are aggregated over 24-h periods, ending at 1200 UTC. The AdjDlyRS stations with an altitude over 1000 m are not considered in the evaluation. A bilinear spatial interpolation is performed to obtain CaPA's precipitation amounts at the AdjDlyRS stations' locations.

2.3.2. Objective evaluation

A leave-one-out cross validation (LOOCV) approach is used to gain objective knowledge on the impact of including solid precipitation from radars in CaPA (Feng et al., 2023; Fortin et al., 2015; Friesen et al., 2017). Performing an objective evaluation of precipitation analyses represents a challenge since most of the precipitation observations available are already being assimilated into the system. The general idea is to compute the evaluation metrics (described below) with the left-out sample. In CaPA, this is done by performing a local analysis at the location of each manual observation from the Canadian synoptic network, excluding the observation at that location. The LOOCV analysis is then compared to the actual observation, which allows an evaluation of CaPA's ability to accurately estimate precipitation.

Verification of the CaPA product is carried out using the following metrics defined in Table 1. The Frequency Bias Index (FBI) is a measure of the bias, with a perfect score of 1. In this study, values of FBI-1 are shown. Positive values indicate that CaPA overestimates precipitation for that specific category, and the reverse for negative values of FBI-1. The Probability Of Detection (POD) shows the hit rate, with a range from 0 (no detection) to 1 (perfect detection). This metric is sensitive to missed events and can be improved by over-forecasting. The False Alarm Ratio (FAR) provides information on the false alarms, with a range from 0 (no false alarms) to 1 (all false alarms); this metric can be improved by under-forecasting. To increase detection (POD) and decrease false alarms (FAR) simultaneously is difficult to achieve and should be viewed as an indication of a strong improvement. The Equitable Threat Score (ETS) combines information from both POD and FAR and provides a measure of the accuracy of CaPA's precipitation estimates. It ranges from -1/3 (worse score) to 1 (perfect score) and is also sensitive to the climatological frequency of events. In general, the interpretation of these metrics is key information for the evaluation as they can all have biases and are only useful as indicators (Pérez Hortal & Michelson, 2023).

Skill score	Definition	Reference
-------------	------------	-----------

Frequency Bias Index (FBI)	Ratio of the occurrence of CaPA's reported precipitation to the frequency of observed precipitation	Donaldson et al. (1975)
Probability Of Detection (POD)	Proportion of CaPA's reported precipitation relative to the observation	Donaldson et al. (1975)
False Alarm Ratio (FAR)	Proportion of CaPA's reported precipitation that did not occur relative to the observation	Donaldson et al. (1975)
Equitable Threat Score (ETS)	Proportion of CaPA's reported precipitation accuracy relative to the observation with consideration to the sample size	Mason (2003)

Table 1 : Skill scores (based on contingency tables) with their definition and references

These four metrics are presented in two manners in this study. First, the metrics are categorized based on the 6-h accumulated precipitation thresholds over the analysis domain for entire winter seasons to determine the analyses quality as a function of precipitation intensity. With this approach, a nonparametric bootstrap method is performed to statistically identify significant differences between metrics' values of two experiments, using a 90% confidence interval. Second, to assess the quality of CaPA's analyses over time, the four metrics are divided into categories of precipitation intensity and displayed in weekly increments through the study period.

Finally, partial means (PM) of precipitation are used to inform on CaPA's ability to estimate precipitation accumulation at different intensities, based on:

$$\text{Eq 7} \quad \bar{x}(\tau) = \langle x | x < \tau \rangle$$

where x is the observed or analysis (LOOCV) precipitation value and τ is the precipitation threshold (in mm). The observations and analysis values are then compared graphically for

multiple thresholds, providing the total precipitation mass as the asymptote for large thresholds.

2.4. Experimental setup

A series of four experiments was performed for this project, as presented in Table 2. These experiments include the addition of radar-based QPE for solid precipitation conditions tested in two different CaPA configurations. The evaluation presented in this paper is for two winter seasons, i.e., for 2021 and 2022, from 1 December to 31 March each year. This test period is limited to these two years because the new radar-based products for snow are only available since 2020.

The first set of experiments (named “Control” and “Radar”) is conducted to evaluate the addition of radars for snowfall in CaPA. The configuration for Control is similar to what is currently used operationally at ECCC for its High-Resolution Deterministic Precipitation Analysis (Khedhaouiria et al., 2020), with the domain being the main difference. In Control, CaPA assimilates observations from weather radars only for air temperatures over 0°C , which is the current technique used operationally at ECCC. Results from this configuration are compared with the Radar experiment in which radar estimates for both rainfall and snowfall, hence, at all air temperatures. It should be mentioned that a wind speed threshold of 0.6 m s^{-1} is used in both configurations to limit the assimilation of inaccurate precipitation measurements from surface stations. This is because the observations from automatic precipitation gauges suffer from uncertainties associated with undercatch of snowfall in windy conditions (Milewska et al., 2019; Rasmussen et al., 2012). To account for this, CaPA’s operational version only assimilates surface observations from automatic stations when the 2-m wind is less than 0.6 m s^{-1} if near-surface air temperature is less than -2°C .

Test name	Radars assimilated when temperature $< 0^{\circ}\text{C}$	Wind threshold for automatic surface stations	Universal transfer function to the automatic surface stations
-----------	---	---	---

Control	No	0.6 m s ⁻¹	No
Radar	Yes	0.6 m s ⁻¹	No
Control-TF	No	3 m s⁻¹	Yes
Radar-TF	Yes	3 m s⁻¹	Yes

Table 2: Description of experiments.

The second set of experiments (Control-TF and Radar-TF) aims to assess the impact of radars in which a larger number of surface observations are assimilated. In these experiments, the wind threshold is increased to 3 m s⁻¹ and the universal transfer function (UTF; Kochendorfer et al., 2017) is applied. The larger wind speed threshold allow for the increase by more than 50% the number of observations assimilated in CaPA (Feng et al., 2023). Including more surface observations in the analysis however lead to the assimilation of more underestimated precipitation amounts because of the precipitation gauge wind undercatch. The UTF is then used to adjust solid precipitation amounts,

$$\text{Eq 8} \quad CE = e^{-a(U)(1-\tan^{-1}(b(T_{air}))+c)}$$

where a , b , and c are coefficients defined in Kochendorfer et al. (2017), U is the wind speed at 2 m above the ground, and T_{air} is the air temperature at that same level.

Finally, the Control and the Control-TF experiments are similar to Feng et al. (2023) but performed during a different time period and they did not assimilate the radar-based product. Given the significant increase in the number of surface stations assimilated in CaPA and the impact this modification has on CaPA's precipitation analyses when increasing the wind speed threshold and adjusting for solid precipitation undercatch, these changes were also tested in this study.

3. Results

3.1. Case studies

The CaPA precipitation estimates are compared against the AdjDlyRS observations (Figure 2 and 3) for two case studies. The first event on 27 March 2020 (Figure 2) exhibits moderate precipitation originating from the west of Canada, while the second event that occurred on 18 January 2021 (Figure 3) displays higher precipitation amounts over the radar network coming from the northwest.

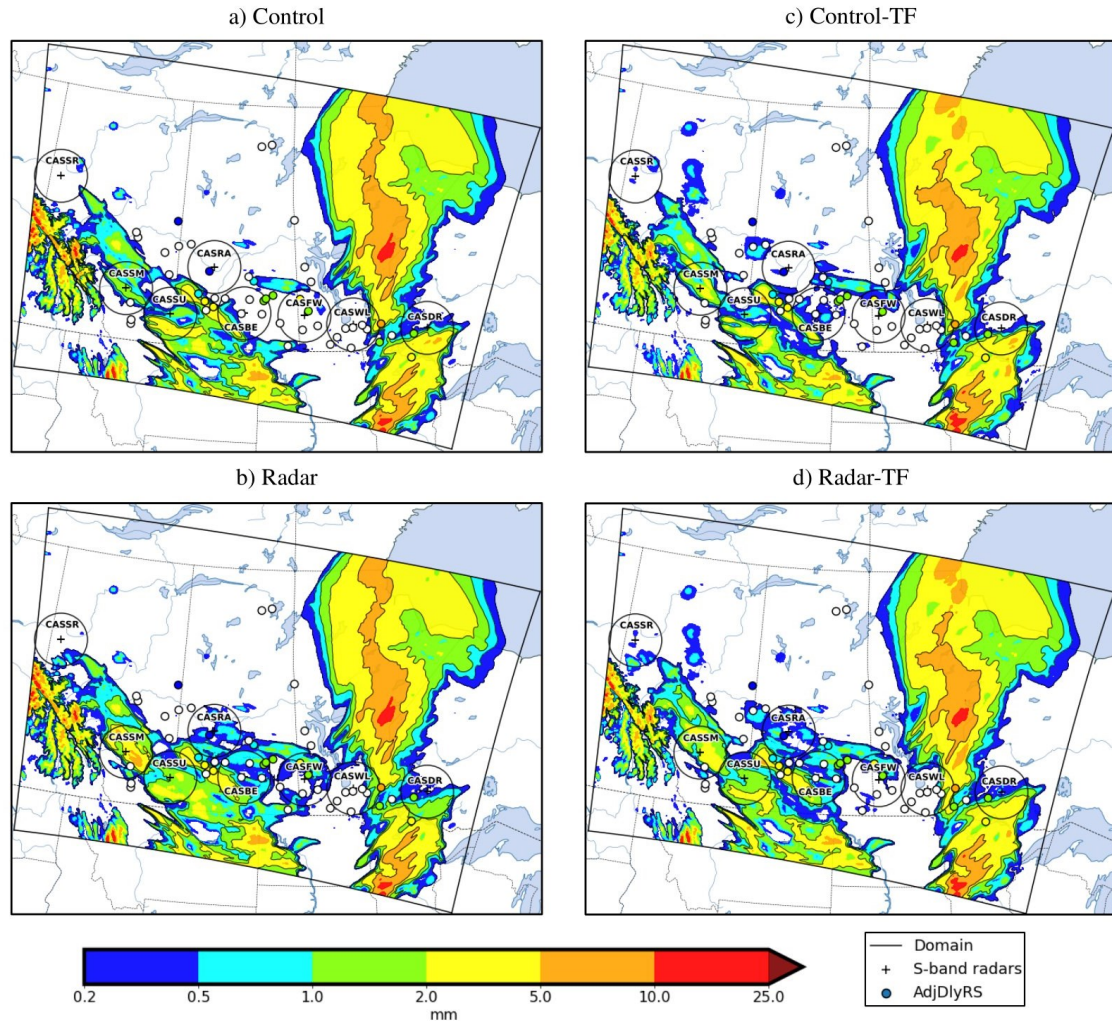


Figure 2 : Case study for an event occurring on 27 March 2021. Precipitation accumulations are presented for a 24-h period ending at 12 UTC on the reporting day with the analysis from the Control (a), Radar (b), Control-TF (c) and Radar-TF (d) experiments against the AdjDlyRS observations, represented by small circles. Radar range (120-km) and site identifiers are also presented in this figure. The radars' locations and ranges are only displayed to help their localisation in the analysis.

The radars have a small overall impact on the precipitation accumulations for both events. Their impact is however local and constrained to the horizontal range of each

individual radar. For instance, the radar experiments contribute to a broader distribution of precipitation in the analyses. Wider regions within the domain exhibit precipitation, which can be observed for both cases. Nevertheless, the regions already displaying precipitation in the control experiments do not show any increase. For the moderate first event, the local changes in accumulations are minimal. However, for the more intense second event, the Radar experiment displays a decrease in accumulated precipitation in regions with highest accumulations (> 2 mm), primarily under CASRA (Radisson, Saskatchewan) and CASBE (Bethune, Saskatchewan). A similar pattern is observed when comparing the Control-TF to the Radar-TF, although with generally higher accumulated water shown on the map.

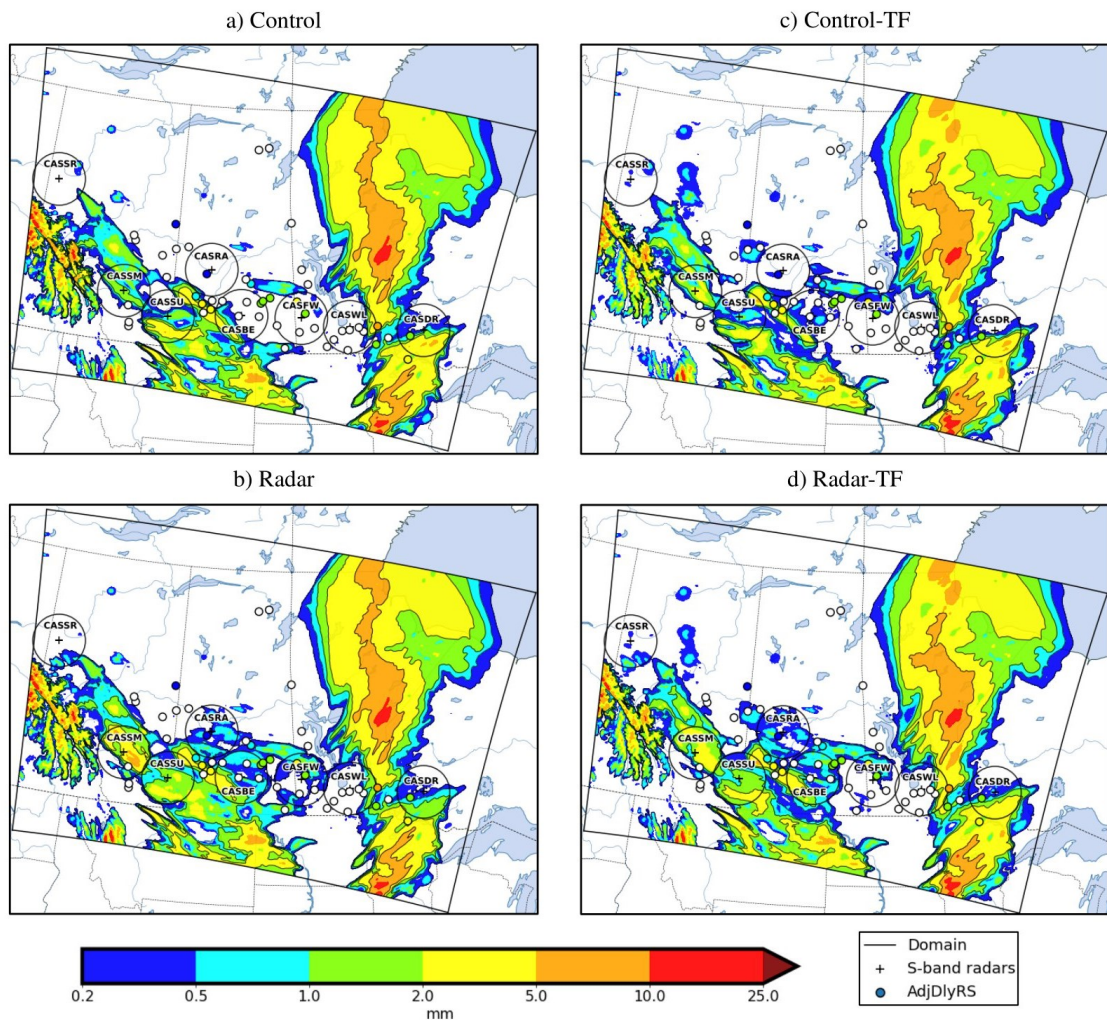


Figure 3 : As in Figure 2 but for an event occurring on 18 January 2021.

The spatial distribution of precipitation is improved using the radars. The radar experiments (Control-TF and Radar-TF) more accurately represent areas where the AdjDlyRS stations recorded precipitation compared to the control experiments. For example, under the CASFW (Foxwarren, Manitoba) radar in Figure 2b and d exhibit precipitation accumulations closer to the observations, whereas no precipitation is seen for the experiments without the radars (Figure 2a and c), which led to a precipitation underestimation. A similar pattern is produced at CASRA and in the northern region of CASFW for the second event (Figure 3).

In contrast, the radar experiments somewhat produce a precipitation overestimation in areas where no precipitation was measured by AdjDlyRS. This is notable under CASSM (Strathmore, Alberta) for the first event, where the control experiment and AdjDlyRS stations indicate no accumulations, but the radar experiments introduce precipitation, resulting in overestimation for small accumulations. A positive notable is that regions where CaPA accurately produced precipitation in the control experiments maintained this accuracy in the radar experiments, such as under CASDR (Dryden, Ontario) for the first event and CASRA for the second event. The radars thus mostly modified precipitation accumulations in areas with already low accuracy.

In summary, the radar experiments indicate an improvement of the localization of precipitation in areas with precipitation (over 0.2 mm). The representation of areas without precipitation seems however to pose challenges for the radar experiments, potentially resulting in overestimation based on these two events. This initial analysis of the results provides an insight into the behavior of CaPA's analyses when integrating radar data and shows promising outcomes. A comprehensive objective comparison of all experiments is however necessary to draw stronger conclusions.

3.2. Objective evaluation of the impact of DPQPE in winter

This section presents results from the objective evaluation of the experiments mentioned in section 3.2. They are presented with a comparison of two sets of experiments

(one with the radars and one without) in order to analyse the impact of the radars. The following results are discussed below: Control vs Radar (section 3.2.1), Control-TF vs Radar-TF (section 3.2.2) and Control vs Radar-TF (section 3.2.3).

3.2.1. Impact of radars for solid QPE

The comparison of the two experiments (Control and Radar) in the objective evaluation is shown Figures 4 to 6. The overall impact as well as the timeseries are shown.

Figure 4 shows how the different metrics are impacted by the inclusion of radars in CaPA, Control vs Radar, for both winters combined. Higher probability of detection for statistically significant bins, which are under 1 mm thresholds, is obtained. A largely lowered FAR over all thresholds is also obtained and when combined with the higher POD, this result is substantial. Finally, the ETS of the radar experiment is larger than the control experiment, indicating a better agreement between CaPA's analyses and surface observations when the

DPQPE radar-based product is assimilated.

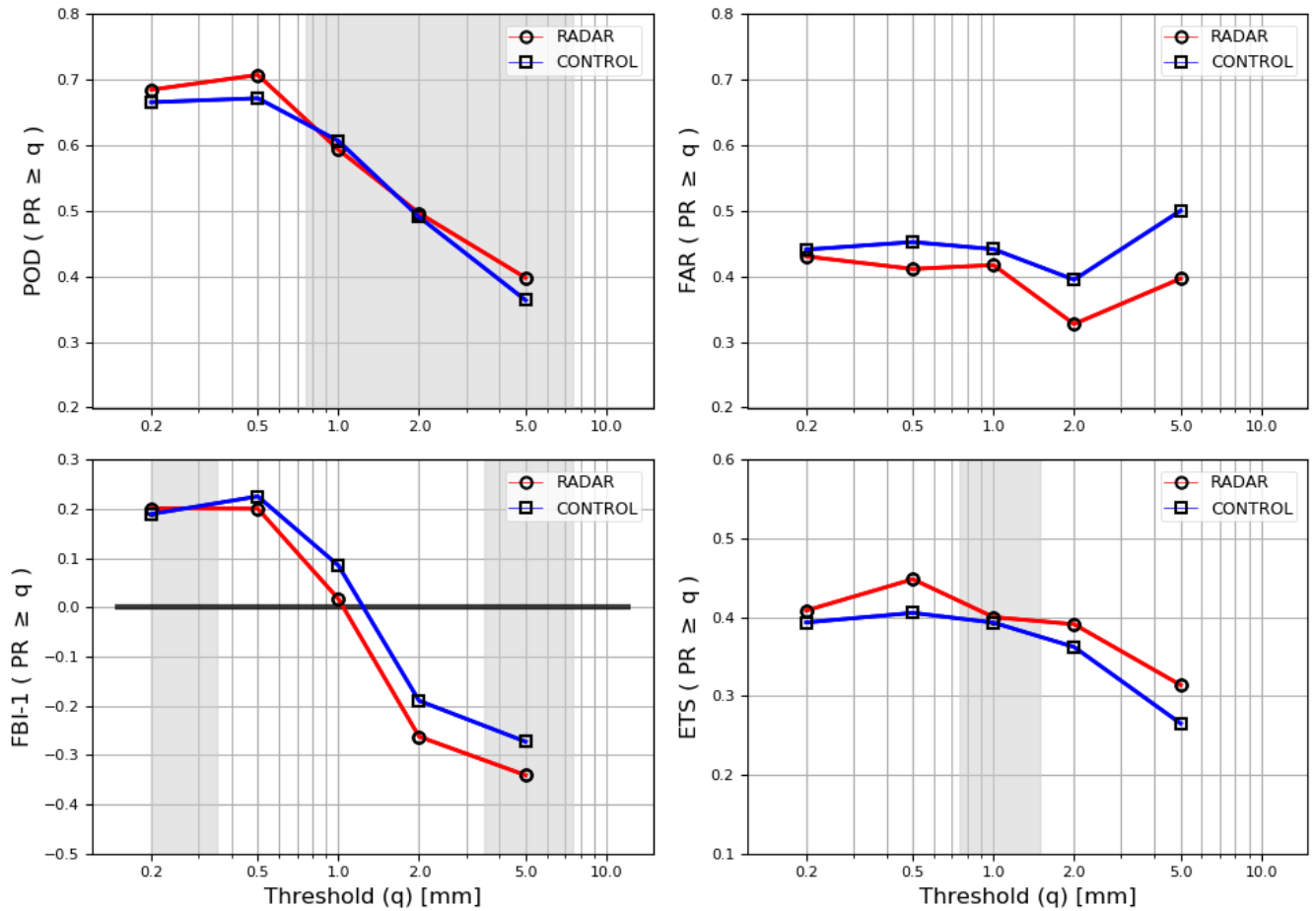


Figure 4 : Impact of the assimilation of DPQPE for precipitation events in cold conditions (Radar; red lines with rounds) compared to the DPQPE only assimilated for liquid precipitation events (Control; blue lines with squares) on the POD (top left panel), FAR (top right panel), FBI-1 (bottom left panel), and ETS (bottom right panel). The impact is for 6-h precipitation thresholds. The white background is present when the difference between the analyses and the observations are statistically significant (95%) and the grey background indicates a difference that is not statistically significant. The statistical significance is determined from a stationary block bootstrap approach. The evaluation is performed over periods from 1 December 2020 to 1 April 2021 and from 1 December 2021 to 1 April 2022.

In contrast, the frequency bias shows that radar have a positive bias for precipitation thresholds under 1 mm and a negative bias for precipitation thresholds larger than 1 mm. In addition, the radar experiment’s frequency bias is lower than the control experiment for all statistically significant intensities. This translates to an improvement of the bias at small thresholds (reduced overestimation) and a deterioration of the bias at large thresholds (heightened under-estimation) by the addition of radars in CaPA.

The partial sums (Figure 5) indicate closer to observations total precipitation mass with the radar experiment compared to the control experiment, where the radars’ impact seems to be positively lowering the total precipitations, which is consistent with the FBI-1 results. This improvement in partial sums could be partly attributed to the under-estimation of the larger intensity events with the over-estimation of the smaller intensity events. These biases balance out and improve a total precipitation amount compared to observations. These remarks of lowered precipitation at high intensity aligns with the results from the case studies (section 3.1). It is noted that the intensity of precipitation is generally lower with radars, which can render to a lower frequency bias and lower precipitation amount.

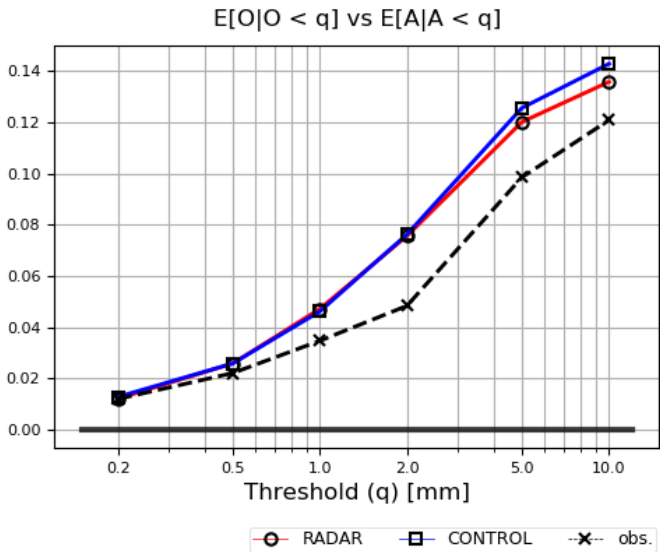


Figure 5 : Impact of assimilating DPQPE on the partial sums of precipitation for Radar (red line with rounds) and Control (blue line with squares) experiments. Partial sums of precipitation for observations are indicated using black dashed line with crosses.

Figure 6 illustrates the time evolution of the four metrics through the two winters examined in this study. First, a general look at the evolution of the metrics through the winters gives a perspective on the variation of CaPA’s performance and the impact of the radars. For instance, the metrics tend to show deterioration (lower POD, higher FAR, higher frequency bias and lowered ETS) for the colder winter months (mid-January to mid-March), especially for the higher precipitation thresholds in both years, but notably for the first winter. This diminution is, however, found for both Control and Radar. Accordingly, the overall impact of the radars seems to be relatively independent of the period of the year because the differences between Radar and Control seem constant through the winters. This is shown by the minimal temporal variability of the difference between the experiments. The impact of assimilating radars is systematic and the differences between the two experiments are more sensitive to the thresholds.

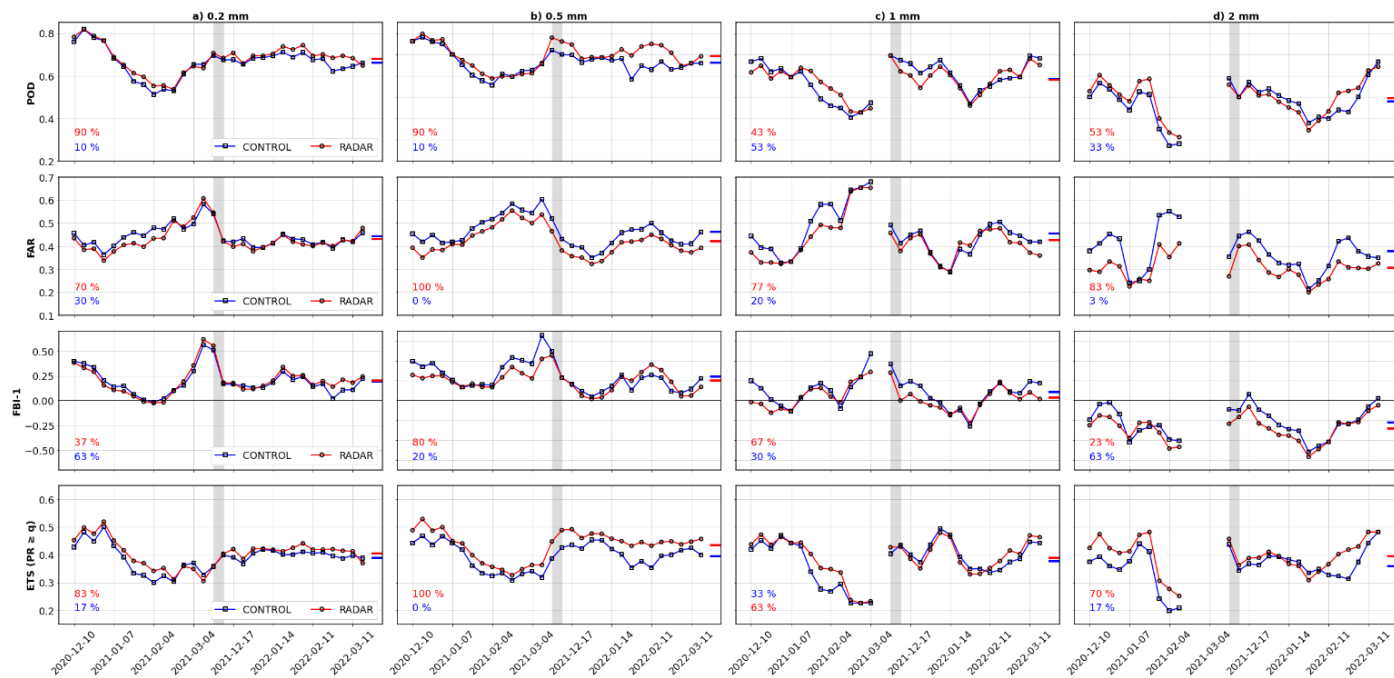


Figure 6 : As in Figure 3, but for the temporal evolution in weekly increments (x-axis), where the grey vertical line indicates the separation of both winters (2020-2021 and 2021-2022). The POD; first row, the FAR; second row, FBI-1; third row and ETS; second row are subdivided in four 6-hourly precipitation thresholds (0.2 mm, first column; 0.5 mm, second

column; 1 mm, third column and 2 mm; fourth column). The red percentage present in every panel shows the percentage of points where the Radar experiment performs better than the Control experiment according to the definition of the four metrics (displayed at the bottom left of the panels in red; in blue is when Control is better than Radar). Each metric's average through the two winters is displayed by the small lines at the furthest right of every panel.

To identify how often radars impact CaPA positively, the percentages of points where the Radar score is closer to the perfect score (as per the definition in section 2.3.2) than Control are investigated (Figure 6). We can first see that the b) panel (0.5 mm) shows the best improvement (92.5 % on average for all metrics) is for the precipitation threshold of 0.5 mm and the lowest one is the 2 mm precipitation threshold (57.3 % on average). This indicates that the assimilation of radars in CaPA faces more challenges for large thresholds, but that their contribution remains positive.

Finally, the average of each metric for the two winter periods is presented in Figure 6. Results indicate that the differences between Control and Radar are relatively small for the lowest 6-hourly precipitation threshold (Figure 6a), in contrast to greater differences for more intense precipitation events (Figure 6b and 6d). This indicates that including radar data leads to more accurate analyses for the precipitation envelope, or the areas with precipitation, since 0.2 mm is considered here as the limit threshold for precipitation detection. This is consistent with what was observed in the case studies (section 3.1), where detection of actual precipitation seemed more positively impacted by the experiments assimilating radars.

3.2.2. Impact of radars in a configuration with more surface observations

Unbiasing of radar measurements in CaPA relies on surface observations. It is possible that changes to these surface observations could have an impact on the assimilation of radars in CaPA. In this section, an additional configuration to the assimilation of radars is tested, in which around 200 more surface adjusted (with UTF) observations are assimilated. The temporal evaluation of metrics for this configuration shows similar results to what was already observed in section 3.2.1; so it is not shown and only evaluation as a function of precipitation threshold is discussed below.

It should be first pointed out that the Control-TF experiment displays more positive metrics than the Control experiment. The blue line (Control-TF) in Figure 7 has higher POD, generally lower FAR, higher ETS and closer to zero FBI-1 than in Figure 4. This also aligns with the conclusions by Feng et al, 2023 with similar experiments, in which more surface adjusted gauge observations contributed to improve CaPA.

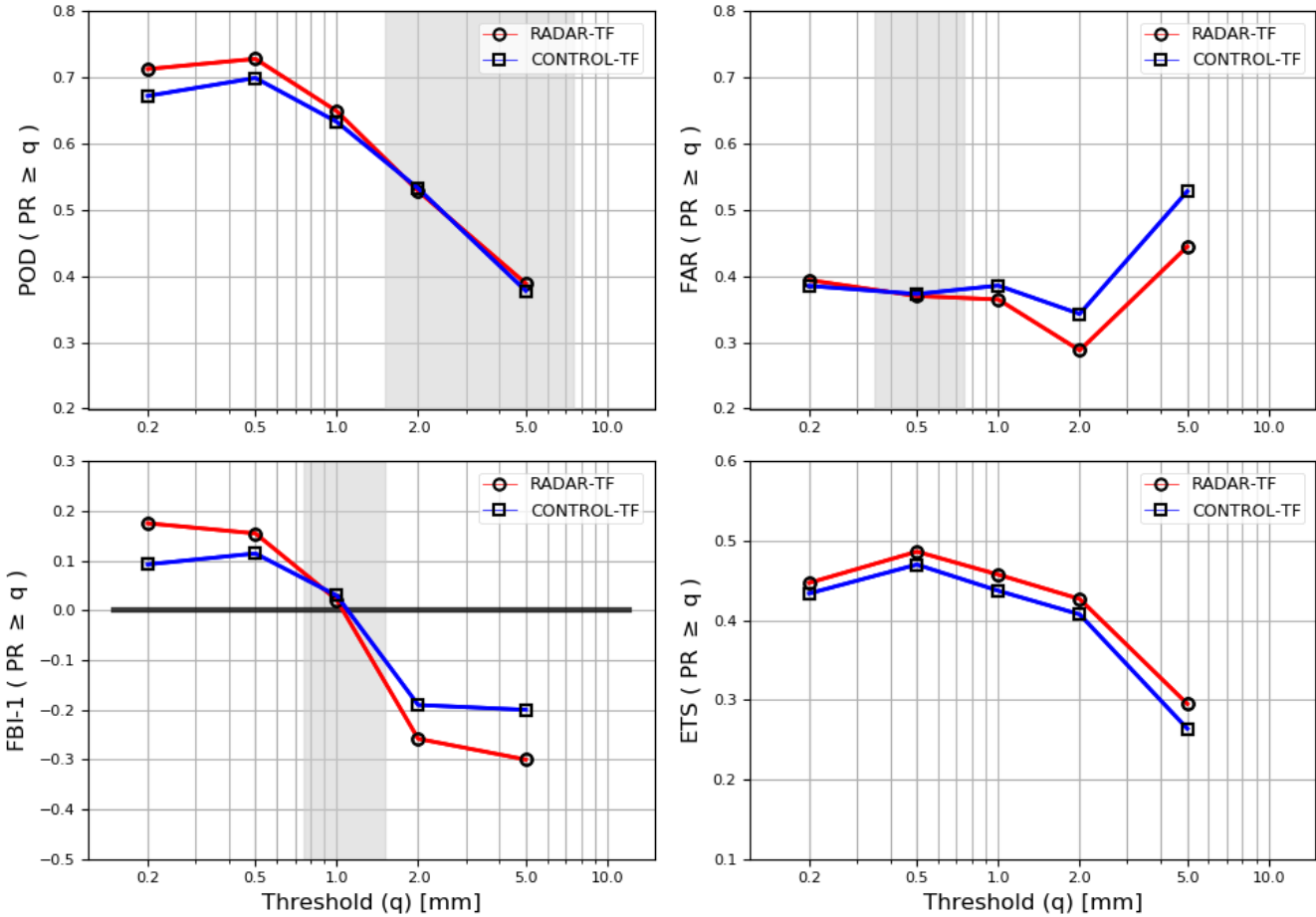


Figure 7 : As in Figure 4, but for the comparison between Control-TF and Radar-TF.

A comparison between Control-TF and Radar-TF (Figure 7) reveals a predominantly positive influence if radar assimilation, even when considering an enhanced CaPA configuration (Control-TF). The evaluation metrics exhibit similar trends to those presented in section 3.2.1, but with lower impact. The main difference with results previously described (see Fig. 4) is for FBI-1. With Radar-TF, the bias is increased (worsened) for weak thresholds

while it is still deteriorated for larger thresholds. The partial sums (Figure 8) also shows a degradation of Radar-TF compared with Control-TF, but the difference is relatively small. In general, however, Figure 7 still shows substantial improvements for POD (for small threshold), FAR (for larger thresholds), and ETS (for all thresholds) achieved with Radar-TF and indicate a positive impact of radars in an enhanced CaPA configuration.

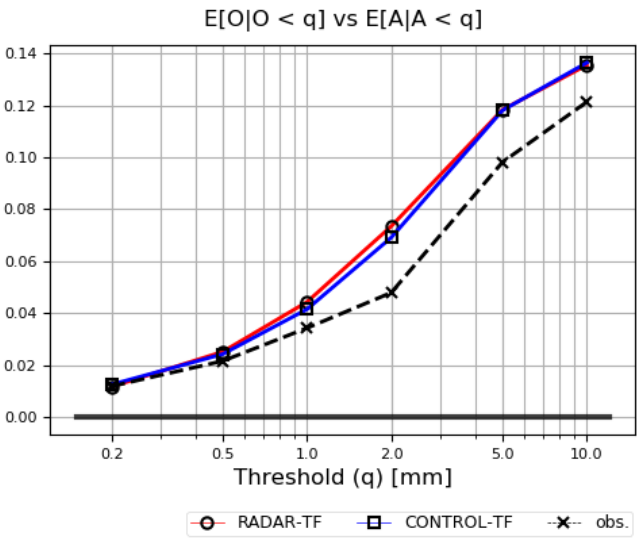


Figure 8 : As in Figure 5, but for the comparison between Control-TF and Radar-TF.

3.2.3 Impact of all modifications (surface observations, UTF, and radars)

To assess the total impact of the elements tested in this study, Figure 9 shows Control compared to Radar-TF. A substantially higher POD, lower FAR and higher ETS over all thresholds of precipitation is obtained. The FBI-1 displays a lowered bias with Radar-TF in comparison to Control for thresholds under 1 mm and an increased negative bias for thresholds larger than 1 mm. Globally, a substantial improvement in CaPA’s metrics by the additions to the Control experiment is observed.

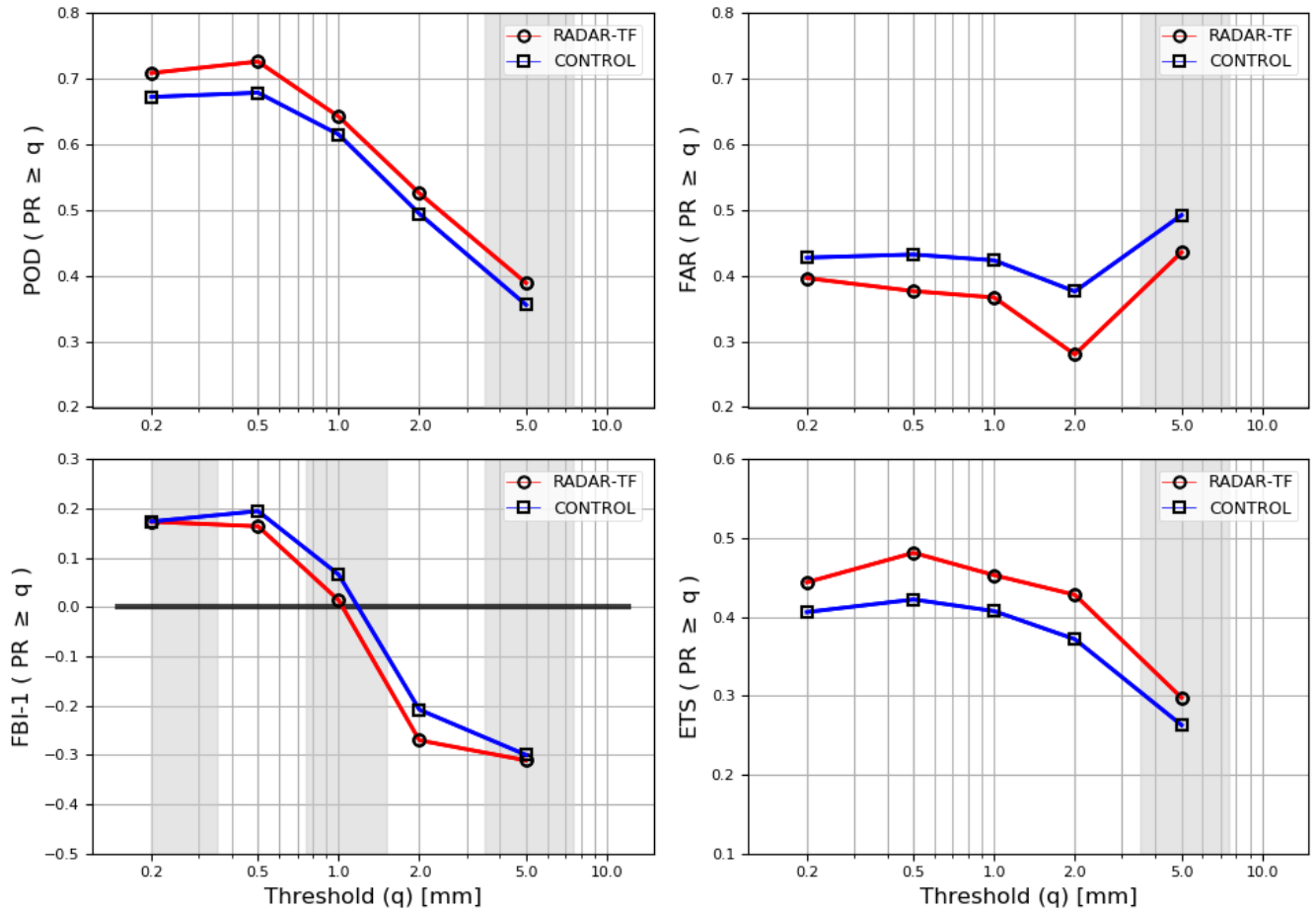


Figure 9 : As in Figure 9, but for the comparison between Control and Radar-TF.

Lastly, Figure 10 shows the partial sums of these configurations, where Radar-TF display closer to observations total precipitation mass than Control. With the consideration of all elements, a large improvement in CaPA’s ability to reproduce precipitation estimates from manual synoptic stations can be noted with Radar-TF in comparison to Control.

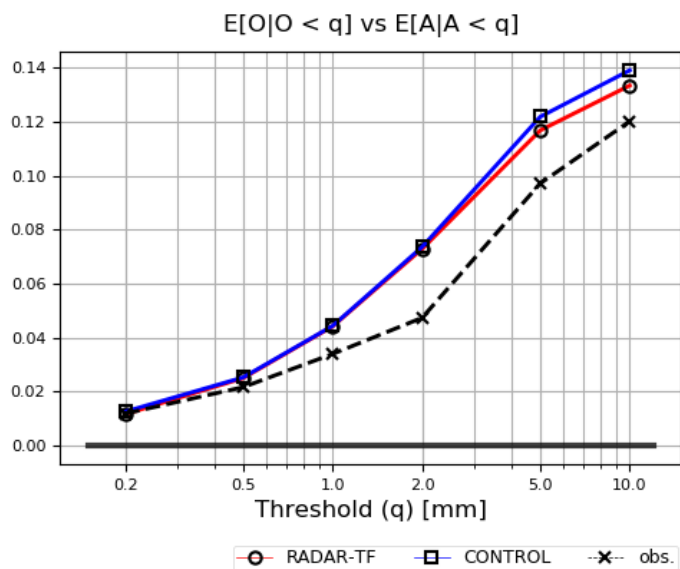


Figure 10 : As in Figure 5, but for the comparison between Control and Radar-TF.

4. Discussion

The radar data affects CaPA by adding QPEs to correct the background field during the winter when few observations are available. The impact coming from this addition is largely positive on CaPA’s skill, with the only mitigated impact being a slight bias increase on CaPA’s wintertime product. Even with the known issues linked with radar composites for solid precipitation, radar data represents a valuable addition to CaPA during the wintertime in the Canadian prairies. CaPA’s increased bias caused by the radars represents an opportunity to improve the configuration further, where a slight tendency for overestimation is present at small precipitation thresholds (<1 mm), and a stronger tendency for underestimation at larger precipitation thresholds are noted.

4.1. Bias evaluation

To further understand the increased frequency bias uncovered in this study, an additional study on the mean-field unbiasing procedure of the radars in CaPA was performed. First, the possibility of the bias being impacted by the range from the radars is investigated, and second, the bias in function of the intensity of precipitation is explored.

Studies have shown an attenuation correction of radar QPEs tends to help with the mitigation of underestimation (Borga et al., 2002; Handoyo et al., 2021; Hiley et al., 2011). To examine the effect of range on the bias of the radars and evaluate the potential benefit of implementing a range-based correction of the radar composites, a study was conducted on the bias grouped based on the distance from the radars. The random behavior of the bias suggests that the distance from the radars does not seem to impact the bias in a manner that could be easily corrected (not shown). It could be possible that the radars' conservative range used in CaPA, 120 km, might not exhibit the range effect of bias, where it is masked by the already existing intensity bias observed previously, and noted in section 2.1.2. In the CaPA's configurations used in this study, a correction of radar composites based on the range would most probably not affect CaPA analyses. Extending the range of the radars accepted in CaPA (e.g. to 240 km), to then perform a bias evaluation in terms of range could lead to more significant results.

Another approach to bias correction of radar QPEs is as a function of precipitation intensity. It was shown in section 3.2 that radars impact on CaPA's bias depends on precipitation intensity. This motivated the investigation of the bias binned in terms of intensity of precipitation (6-h accumulations) for the two radar experiments. Separating the experiments for this evaluation only shows the impact of the change in surface stations' assimilation parameters (the control experiments), as the raw radar data remains the same. This does not provide any more insight into the bias present with the radar composites, so it is not discussed here (only an average).

The radars' biases displayed in function of precipitation intensity are shown in Figure 11. It can be observed that the bias is well over 1 at the smallest precipitation intensity (0 to 1 mm), which demonstrates the radar-based product overestimates this precipitation threshold compared to the ground observations. We assess that the larger precipitation intensities show a gradually increasing under-estimation (bias under 1). This diagnostic helps understand the impact of radars on the frequency bias in section 3.2, where we could observe through CaPA's analyses that the radars mostly increased the system's underestimation of

larger precipitation accumulations. This result is consistent with that the impact of the radars have on CaPA’s case studies and frequency bias (Figures 3, 5 and 7).

This suggests that a more sophisticated approach to correct the radars QPE biases could lead to further improvement in CaPA’s wintertime analyses. The mean-field bias lower than the bias associated with precipitation amounts between 0.2 mm and 1 mm and higher for precipitation amounts in greater than 1 mm (Figure 11). An unbiasing technique more adequate to this observed behavior, such as unbiasing radar data in function of intensity, could help provide more accurate precipitation estimates from radars in winter, and potentially from CaPA.

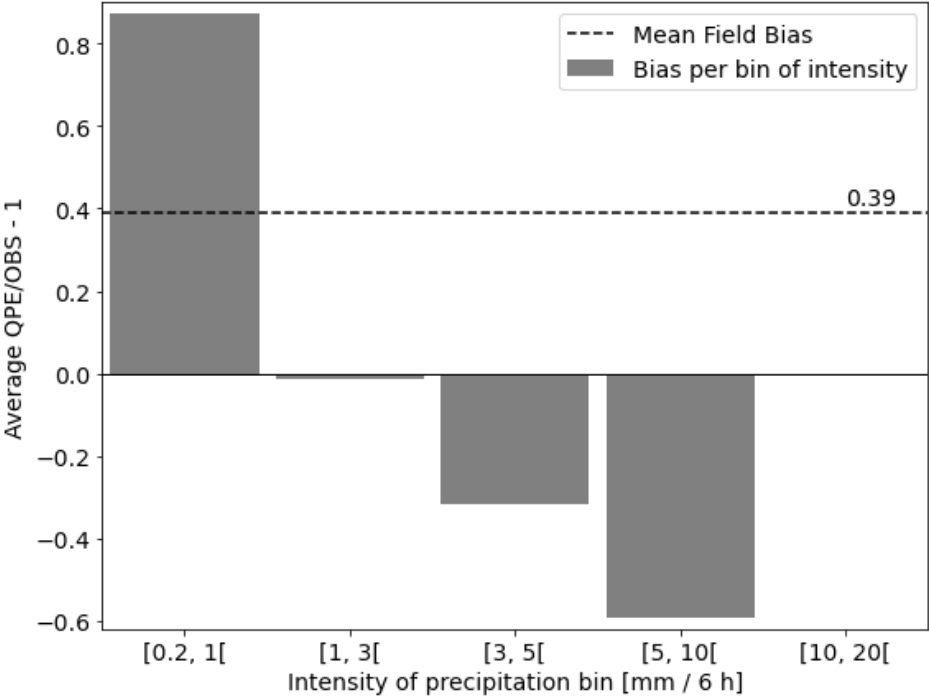


Figure 11 : Bias (radar QPE/observations) -1 as function of precipitation intensity for Radar and Radar-TF, for the two winters combined. The mean field bias, calculated as the weighted mean of the bias in function of intensity in relation to the number of cases per bin, is displayed by the dashed line, and is 0.39. The average number of cases per bin per 6h period is equal to 34.58, 20.80, 4.67 and 5.39 for the displayed bins that show statistical significance respectively.

4.2. Evaluation limitations

The evaluation presented in this study is done for only two winter seasons. Multiple winters would have been needed to better assess the impact of radars on CaPA. The two winters are, however, different climatologically; the winter of 2020-2021 was dryer and warmer, and the winter of 2021-2022 was wetter and colder with a higher proportion of solid events compared to the first winter. Even if they are different, the impact of the radars is consistent throughout the two seasons (section 3.2.1). This supports the analysis conducted in this study, indicating that similar impacts can be expected in other winters. It also highlights the potential for expanding the usage of radar for solid precipitation in CaPA, with positive implications.

Another limitation concerns the way the LOOCV evaluation is performed. It uses the same stations to do the evaluation as the ones used to do the unbiasing of the radars. However, we have concluded in section 3.2.2 that the unbiasing performed with surface stations on the radars does not substantially impact CaPA's analyses, which leads to think that the impact on the evaluation procedure of the utilization of stations to unbias the radars is minimal.

Finally, this study was only performed on a fraction of CaPA's operational domain. Nevertheless, it is a good representation of the snowy area of Canada. The improvement of CaPA observed in this study would still need to be evaluated for the whole domain, especially for the mountain west and eastern Canada. Considering the radars are not present in the Northern Canadian region, the impact there should be minimal.

5. Conclusions

In conclusion, the addition of radar composites for solid precipitation contributes to significantly improving the skill of CaPA's analyses for small precipitation events (<1 mm/h), without much regard to the number of surface stations assimilated or their correction by the UTF. The inclusion of radars for solid precipitation have more mitigated effects on CaPA's quality for larger precipitation events (>1 mm/h), for which the radars contribute to their underestimation, again with neutral added impact of surface stations and transfer

function. Globally, the significant increase in ETS and the simultaneous increase in POD and decrease in FAR suggest that solid radar QPEs are a valuable addition to precipitation estimates systems, like CaPA.

Further correction of the radar composites in the winter based on ground observations could improve the positive contribution further. The current mean field bias correction performed in CaPA remains largely supported and one of the most used snowfall bias-adjustment techniques in radar QPEs (Chumchean et al., 2006; Holleman, 2007; Wilson, 1970). Studies have assessed other promising techniques to using gauge information to correct radar fields for rainfall, with Kalman filtering or copula-based approaches for instance (Anagnostou et al., 1998; Chumchean et al., 2006; Goudenhoofdt & Delobbe, 2009; Vogl et al., 2012). Additionally, further studies on other methods to improve CaPA's winter analyses are being undertaken. Tests to correct automatic stations with various transfer functions and the assimilation of satellite data to the system, from the Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG; GPM; Asong et al., 2017; Pradhan et al., 2022) will provide more insight on what impacts CaPA's performance in the winter, and possibly leading to a better estimation of solid precipitation amounts.

CHAPITRE 3

CONCLUSION

Le système d'analyse de précipitations Canadien (CaPA) a été mis en place par Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC) afin de fournir des estimés de précipitations en temps quasi-réel à haute résolution en Amérique du Nord. Le système est utile pour la gestion des ressources hydrologiques, l'émission d'alertes météorologiques et l'initialisation d'autres systèmes météorologiques tels que le Canadian Land Data Assimilation System. La qualité et la fiabilité de ces estimés est donc primordiale. Cependant, lors de la saison froide, la qualité des analyses produites par le système est limitée en raison du faible nombre d'observations de précipitations fiables assimilées dans le système. CaPA utilise des données de précipitations pour les assimiler dans un champ de fond (premier essai), provenant du High Resolution Deterministic Prediction System (HRDPS). La principale source d'observations assimilée par CaPA en hiver provient des jauges de précipitations qui, lorsque les précipitations sont sous forme solide, présentent une sous-captation des précipitations. Cette dernière est induite par la turbulence générée par le vent en bordure des jauges. Pour ne pas assimiler de quantités de précipitation erronées, CaPA rejette toutes les observations provenant de stations automatiques où le vent à 2 m est supérieur à 0.3 m/s (où la température est sous -2°C). Cette procédure de contrôle qualité rejette la majorité des observations en hiver au Canada, limitant ainsi la qualité des estimations de CaPA.

Une façon de pallier cette faiblesse du système consiste à introduire davantage d'observations de précipitations dans CaPA en hiver. En été, l'assimilation des données issues de radars météorologiques a déjà été testée avec succès et est présentement opérationnelle, mais n'a pas encore été testée en hiver. Cette étude vise à évaluer l'assimilation de données radar pour la neige dans le système CaPA, en utilisant les nouveaux radars à double polarisation récemment installés au Canada. Précédemment, le réseau de radars canadien comportait majoritairement des radars à simple polarisation, qui n'étaient pas adéquats pour produire des estimés de précipitations pour la neige. Le renouvellement

du réseau de radars créé une opportunité de faire leur assimilation dans un système d'analyse de précipitations lors de la saison froide, ce qui n'a jamais été fait. Ces radars à double polarisation ont la capacité de produire des estimés de taux de précipitations pour les précipitations solides, potentiellement plus fiables que les données de jauges, s'ils sont corrigés. Cette évaluation permettra de déterminer si l'ajout de ces données radar peut améliorer les analyses de CaPA en hiver.

L'étude a pris part sur les prairies canadiennes durant les mois d'hiver, de décembre à mars inclusivement, pour les années 2020-2021 et 2021-2022. Différentes expériences ont été menées sur le système, en comparant notamment l'assimilation des composites radars pour des températures inférieures à 0°C avec des expériences sans cette assimilation. Tout d'abord, les résultats de ces deux expériences ont été comparés sous la forme d'études de cas, en évaluant les accumulations de précipitations aux accumulations issues d'une base de données indépendante de ce qui est assimilé dans CaPA, soit la base de données Adjusted Daily Rainfall and Snowfall (AdjDlyRS). Les résultats indiquent un petit impact issu des radars, principalement sous leur zone de couverture. En revanche, cet impact demeure substantiel. Les analyses avec les composites radars ont tendance à mieux localiser les régions où il y a des accumulations de précipitations que les expériences sans les radars. D'autre part, les analyses avec les composites radars montrent plus de difficulté à localiser les régions avec aucune précipitation.

Une seconde évaluation où CaPA a été confronté à des données manuelles a permis la création de métriques basés sur des tables de contingences pour différents taux de précipitations. Ceci représente une évaluation objective de l'impact des radars sur le système. Les quatre métriques étudiées sont la probabilité de détection (POD), les fausses alarmes (FAR), le score de menace équitable (ETS) et l'indice de fréquence de biais (FBI). L'étude comparative des métriques pour les expériences avec et sans les radars pour la neige indique une probabilité de détection plus grande et moins de fausses alarmes lorsque les radars sont assimilés. L'amélioration combinée de ces deux métriques est très difficile à atteindre, car elle représente une détection d'événement plus sophistiquée. De plus, l'ETS s'avère supérieur avec l'assimilation des composites radars pour toutes les intensités de

précipitations, ce qui représente également une amélioration. Cependant, le biais est le seul point plus mitigé de l'assimilation des radars. En effet, CaPA en hiver a tendance à montrer un biais positif (surestimation) pour les petites accumulations de précipitations ($< 1\text{mm}$) et un biais négatif (sous-estimation) pour les intensités de précipitations plus grandes. L'assimilation des radars en hiver vient augmenter ce biais déjà présent, en particulier pour les grandes quantités de précipitations, où les expériences avec les radars sous-estiment d'avantage les accumulations. Globalement, l'impact des radars sur CaPA en hiver contribuent à améliorer le système, bien que le biais pour les événements à forte intensité de précipitation est à surveiller. En outre, l'évaluation de l'évolution des scores au fil des deux hivers à l'étude (limitation de l'étude) a confirmé que l'impact des radars est constant temporellement, ce qui indique que l'impact devrait similairement améliorer CaPA sur des hivers futurs.

Une évaluation de l'impact de l'ajout de stations de surface assimilés dans CaPA ainsi que de l'effet de la correction de la sous-captation induite par le vent sur l'assimilation et le débiaisage des radars dans CaPA a été menée. L'évaluation des métriques de cette expérience supplémentaire indique un impact similaire à celui présenté dans le paragraphe précédent. Lorsque les radars sont assimilés pour les précipitations solides, on observe une amélioration de la probabilité de détection, une réduction des fausses alarmes et un meilleur score de menace équitable. Une amélioration générale du score de base (i.e. les expériences sans l'ajout des radars en hiver) est aussi notée. Cette amélioration est principalement due à l'augmentation du nombre d'observations issues stations de surface assimilées et à la correction de ces observations. Les radars induisent une amélioration du système, mais pas assez important pour être attribué au débiaisage par ces ajouts. Le biais précédemment observé est toujours présent, mais moindre comparativement à l'expérience radar initiale.

Afin d'approfondir notre étude sur le biais, qui représente le point négatif de l'assimilation des radars dans CaPA en hiver, le rapport entre les estimations des taux de précipitations issus des radars (avant leur assimilation) et les observations colocalisées sous la région de couverture des radars a été étudié. Cette analyse a permis de conclure que le biais présent dans les données radars, qui est très positif pour les intensités de précipitations

inférieures à 1 mm/6 h et progressivement plus négatif pour les intensités de précipitations supérieures à 1 mm/6 h, affecte directement le biais dans CaPA. Ce dernier présente un comportement similaire en fonction de l'intensité de précipitation observé avec les analyses CaPA. Une étude du biais des radars en fonction de la distance aux radars s'est avérée peu concluante, ce qui montre que la portée conservatrice de 120 km des radars limite efficacement le biais des radars dû à l'atténuation. En somme, notre étude du biais présent dans les composites radars en hiver avant leur assimilation dans CaPA indique qu'une correction du biais des radars en fonction de l'intensité de précipitation avant leur assimilation pourrait permettre d'atténuer le biais qu'ils induisent dans CaPA.

Une limitation dans l'étude est en ce qui concerne l'évaluation objective. La procédure de type leave-one-out permet de calculer les tables de contingence en comparant les estimations de précipitations produites par CaPA aux observations, qui ont été assimilés dans CaPA. Cela implique de retirer chaque observation du processus d'assimilation et de la comparer à CaPA. Cependant, ces observations ne sont pas retirées du processus de débiaisement des composites radars, car cela aurait été trop lourd numériquement. Bien que l'impact de cette procédure est probablement minime, pour s'assurer de la validité de nos résultats, une deuxième évaluation objective est effectuée en utilisant une base de données indépendante (AdjDlyRS), en utilisant les scores de contingence. Les résultats de cette analyse sont très similaires à ceux obtenus précédemment: une amélioration générale de la détection, une diminution des fausses alarmes, une augmentation du score de menace équitable et une augmentation du biais pour les expériences avec les radars par rapport à la version opérationnelle de CaPA (sans les radars). Cela supporte les résultats et conclusions de l'étude malgré la limitation méthodologique identifiée.

Dans l'ensemble, cette étude constitue la première tentative d'assimilation de composites radars pour les précipitations solides dans un système d'estimation de précipitations tel que CaPA et l'assimilation de ces données a amélioré le produit de précipitations. L'utilisation de radars dans CaPA améliore la détection des événements neigeux, quelle que soit leur ampleur, et conduit à une analyse plus précise avec un ETS plus proche de la valeur idéale. Toutefois, l'assimilation des données radars a également un effet

mitigé, soit qu'elle aggrave le biais à grande intensité déjà présent dans le système en hiver. En outre, l'ajout de stations de surface et leur correction ne semble pas avoir un impact significatif sur l'assimilation des données radars via le débiaisement.

Des travaux futurs pourraient se pencher sur la possibilité de corriger le biais des radars en fonction de l'intensité des précipitations afin de mitiger le biais de CaPA qui est aggravé par les radars. D'autres travaux sur l'ajout d'observations dans le système CaPA, tel qu'avec des données satellitaires, pourraient permettre une amélioration des analyses. Enfin, une correction accrue de la sous captation des observations issues de stations de surface automatiques avec différentes fonctions de transfert adaptées à la climatologie locale pourrait représenter une potentielle amélioration au système.

Globalement, l'assimilation de composites radars dans les prairies canadiennes améliore CaPA en hiver. Cette amélioration pourrait signifier un impact similaire sur l'ensemble du domaine de CaPA et même dans d'autres systèmes d'analyse de précipitations.

ANNEXE A

EVALUATION OBJECTIVE CONTRE LA BASE DE DONNÉES ADJUSTED DAILY RAINFALL SNOWFALL (AdjDlyRS)

La difficulté d'effectuer une évaluation objective des systèmes d'assimilation de données réside dans le fait que la plupart des données disponibles pour cette évaluation sont déjà assimilées dans le système. Dans cette étude, l'évaluation principale de CaPA est réalisée en utilisant la méthode leave-one-out afin de contourner ce problème. Cependant, une certaine limitation se présente, car l'observation retirée de l'analyse n'est pas retirée du processus complet d'assimilation. Cela soulève la nécessité d'étudier les résultats par rapport à une base de données supplémentaire. Par conséquent, une évaluation basée sur des métriques, similaire à celle effectuée avec la méthode leave-one-out dans cette étude, mais utilisant une base de données externe à CaPA, constitue un outil permettant de valider l'évaluation de CaPA réalisée dans cette étude.

Dans cette optique, la base de données AdjDlyRS (Mekis & Vincent, 2011; Wang et al., 2017), qui avait été utilisée pour des études de cas, est exploitée à nouveau. En utilisant une interpolation linéaire des analyses CaPA aux stations AdjDlyRS, la création de tables de contingence est faite pour effectuer des analyses des résultats de la même manière que décrit dans la section 3.2.3 du Chapitre II. Les résultats de la comparaison entre Control et Radar-TF, similaires à la Figure 9 du Chapitre II, sont présentés dans la Figure A.1. Dans la plupart des seuils de précipitations, les éléments testés représentent une amélioration. Comme observé dans la Figure 9 du Chapitre II, une diminution du FAR, une augmentation du ETS et une diminution du FBI-1 au seuil de 0.2 mm représentent des améliorations apportées au système par Radar-TF par rapport à Control. La détérioration du FBI-1 pour des accumulations plus importantes, présentée dans la Figure A.1, est également observée dans la Figure 9 du Chapitre II. La seule différence notable entre les évaluations des analyses Control et Radar-TF réside dans le POD, où l'on observe une légère détérioration du score au seuil de 2 mm dans la Figure A.1, contrairement à l'amélioration du score à tous les seuils dans la Figure 9 du Chapitre II.

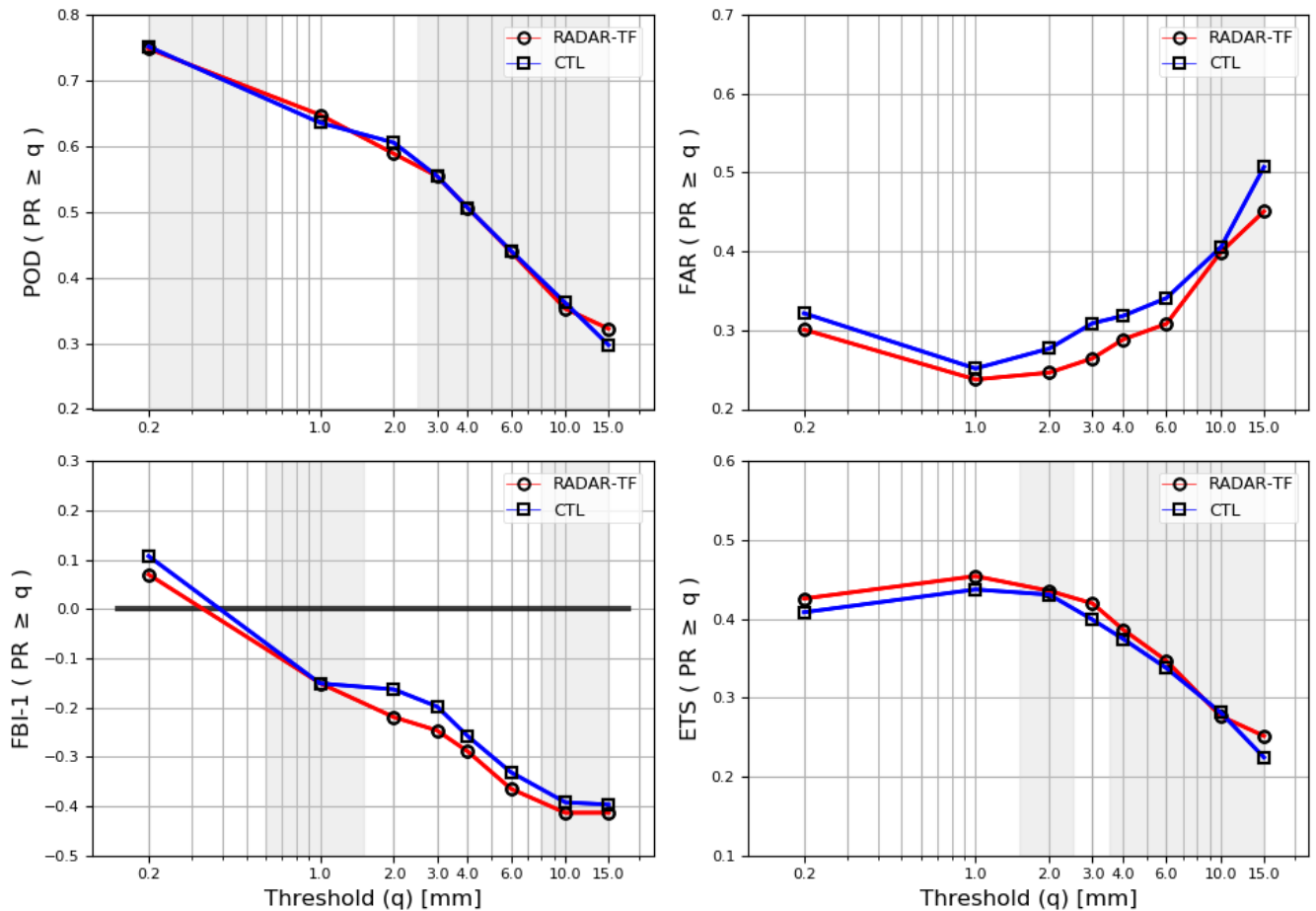


Figure A 1 : Impact de l'assimilation du DPQPE pour des événements de précipitations en conditions froides avec la relaxation du critère de vent maximum pour l'assimilation des stations de surface automatiques et l'ajustement de ces dernières avec la fonction de transfert universelle (Radar-TF; lignes rouges avec ronds) par rapport au DPQPE uniquement assimilé pour les événements de précipitations liquides (CTL; lignes bleues avec carrés) sur le POD (panneau supérieur gauche), FAR (panneau supérieur droit), FBI-1 (panneau inférieur gauche), et le ETS (panneau inférieur droit). L'impact concerne les seuils de précipitations de 6 heures. Le fond blanc est présent lorsque la différence entre les analyses et les observations est statistiquement significative (95%) et le fond gris indique une différence qui n'est pas statistiquement significative. La signification significative est déterminée à partir d'une approche bootstrap par blocs stationnaires. L'évaluation est réalisée sur des périodes

allant du 1^{er} décembre 2020 au 1^{er} avril 2021 et du 1^{er} décembre 2021 au 1^{er} avril 2022. Les observations utilisées pour l'évaluation sont issues de la base de données AdjDlyRS.

La Figure A.1 représente l'équivalent de la Figure 10 du Chapitre II, où les sommes partielles pour les mêmes expériences sont présentées. Une différence considérable entre les deux figures est à noter. En effet, dans la Figure 10 du Chapitre II, où les sommes partielles sont évaluées par rapport aux observations assimilées dans CaPA, le système surestime les précipitations à tous les seuils. L'expérience Radar-TF contribue à réduire la fraction de masse, ce qui correspond à un comportement plus proche des observations. En revanche, la Figure A.2 indique que par rapport aux observations provenant du AdjDlyRS, le système CaPA surestime les petites sommes, mais sous-estime les seuils plus élevés. Le comportement du système avec Radar-TF comparativement à Control, est cohérent, avec une diminution de la masse totale de précipitations observée (comme dans la Figure 10 du Chapitre II). Cependant, cette diminution représente un comportement plus éloigné des observations AdjDlyRS. Même si ce comportement n'était pas présent à la Figure 10 du Chapitre II, il est en harmonie avec la sous-estimation des estimés de CaPA soulevée à quelques reprises dans cette étude, notamment en regardant les biais. Il est important de garder à l'esprit cette sous-estimation des estimations de précipitations par CaPA, exacerbée par l'assimilation des données radar.

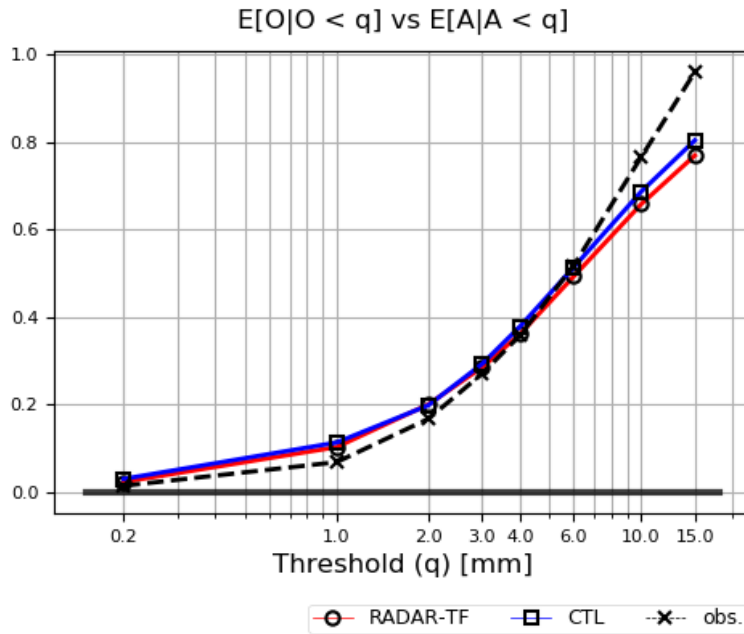


Figure A 2 : Impact de l'assimilation du DPQPE sur les sommes partielles de précipitations pour les expériences Radar-TF (ligne rouge avec ronds) et CTL (ligne bleue avec carrés). Les sommes partielles des précipitations pour les observations issues de la base de données AdjDlyRS sont indiquées par une ligne noire en pointillés avec des croix.

En prenant en compte tous les éléments mentionnés, une concordance positive entre les résultats présentés à la Figure A.1 et la Figure 9 du Chapitre II, et entre la Figure A.2 et les conclusions du Chapitre II permettent de valider, avec des données externes aux bases de données assimilés dans CaPA, que les éléments testés dans cette étude ont globalement un impact qui améliore le système de CaPA pour les mois d'hiver.

ANNEXE B

ÉVALUATION DU BIAS DES RADARS EN FONCTION DE LA DISTANCE DES RADARS

Des études ont montré qu'une correction de l'atténuation des QPE radar tend à contribuer à l'atténuation de la sous-estimation. Afin d'examiner l'effet de la distance sur le biais des radars et d'évaluer les avantages potentiels de la mise en œuvre d'une correction des composites radar basée sur la distance, une étude a été menée sur le biais groupé en fonction de la distance des radars.

Les résultats à la Figure B.1 montrent que la distance des radars ne semble pas avoir d'impact sur le biais d'une manière qui pourrait être facilement corrigée (comportement aléatoire). En effet, le biais est généralement plus marqué lorsque la distance aux radars est élevée. Jusqu'à 60 km, on remarque une augmentation positive du biais, indiquant une surestimation par les radars. Par contre, une diminution marquée du biais après rend l'identification d'une tendance difficile.

Il est possible que la portée conservatrice du radar utilisée dans le CaPA, 120 km, ne présente pas l'effet de distance du biais, où il est masqué par le biais d'intensité déjà existant observée précédemment, et noté dans la section 2.1.2. Dans les configurations de CaPA étudiées, une correction des composites radar basée sur la portée n'affecterait probablement pas l'analyse CaPA. L'extension de la portée des radars acceptés dans CaPA (par exemple à 240 km), afin d'effectuer une évaluation du biais en termes de portée, pourrait conduire à des résultats plus significatifs.

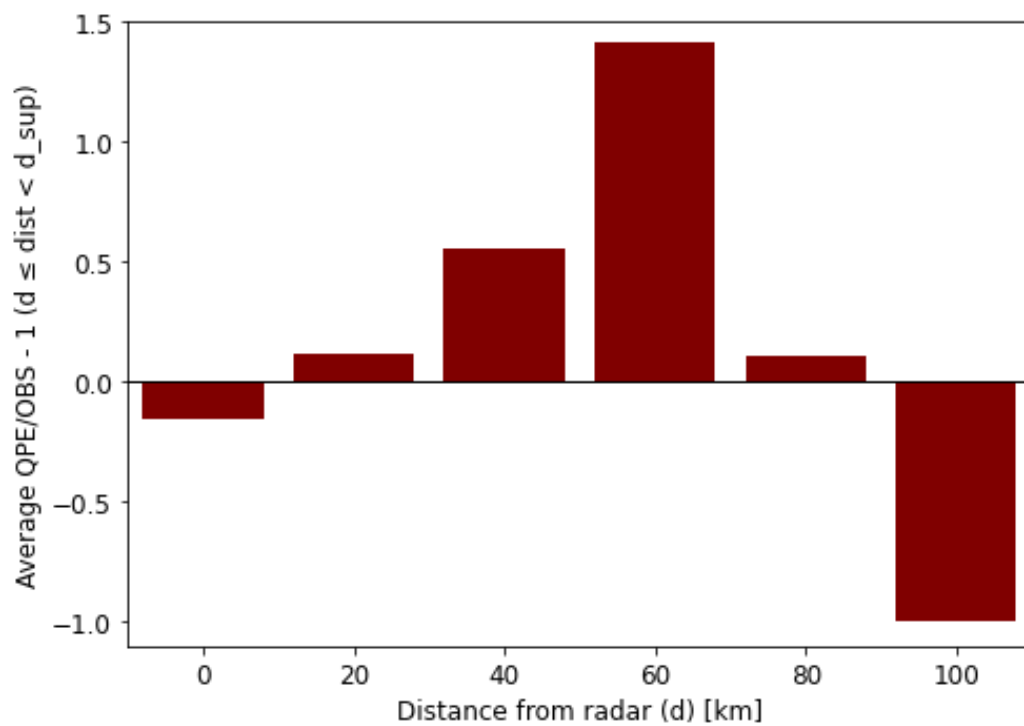


Figure B 1 : Biais (QPE radar/observations) -1 en fonction de la distance des radars pour Radar et Radar-TF, pour les deux hivers combinés. Le biais est moyenné pour les huit radars du domaine.

ANNEXE C

ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DE L'ASSIMILATION DES RADARS POUR DONNER SUITE AUX ÉTUDES DE CAS

Comme présenté aux Figures 2 et 3 du Chapitre 2, l'impact des radars sur les cartes des accumulations journalières de CaPA est significatif et globalement bénéfique par rapport aux observations du AdjDlyRS. Cependant, un élément important qui n'a pas encore été discuté est la forme des précipitations à la suite de l'ajout des radars. Ce point est remarquable dans la Figure 3 du Chapitre 2, notamment au panneau b sous le radar CASSU. On peut observer que la forme des précipitations change nettement d'une façon qui semble peu naturelle entre le panneau a (Control) et le b (Radar) (précipitations formant un arc de cercle défini).

En réalité, les précipitations semblent être contraintes sous l'enceinte du radar pour ce dernier cas, alors que ce n'était pas le cas avant l'assimilation des radars. Cette particularité disparaît dans le panneau d avec l'expérience Radar-TF. Il est possible que ce contour de précipitation très marqué soit dû à une confiance accrue envers les radars et à la faible présence d'observations supplémentaires pour corriger les accumulations de manière réaliste. Un outil permettant d'approfondir cette analyse est le score de confiance CFIA, qui est un produit de CaPA décrit au Chapitre 1.2.

La Figure C.1 présente le même cas que dans la Figure 3 du Chapitre 2, mais ici, le CFIA est le produit analysé (sans les observations AdjDlyRS). On peut constater qu'une grande confiance est accordée aux données radars (panneaux b et d), où pour la plupart d'entre-deux, il est maximal (moyenne de 1 sur l'événement). C'est le cas pour le radar CASSU avec l'expérience Radar et cela pourrait expliquer le comportement à la Figure 3 du Chapitre 2 au panneau b.

De plus, moins d'observations provenant des stations de surface, qui sont identifiables par les régions plus localisées de CFIA élevé (petits points), sont présentes avec les expériences Control et Radar (panneaux a et b), contrairement aux expériences Control-TF

et Radar-TF (panneaux c et d) où le contrôle de qualité pour les stations de surface est relâché. Cela est cohérent avec les conclusions précédentes quant à ces expériences (Feng et al., 2023). L'impact sur l'assimilation des radars est assez intéressant, car on peut constater que le radar CASSU a une confiance relativement faible accordé à l'expérience Radar-TF, indiquant qu'il n'a probablement pas été assimilé suite au contrôle de qualité opéré avec les observations de surface (comparativement à l'expérience Radar). Ceci indique que l'assimilation de davantage de stations de surface permet une meilleure correction des radars en, dans ce cas-ci, permettant de retirer de la confiance en le radar CASSU, ce qui en résulte en des accumulations de précipitations plus réalistes.

Il s'agit ici d'une analyse sur un seul cas, mais cela souligne l'importance d'approfondir les travaux concernant la manière dont les radars sont assimilés et la confiance qui leur est accordée. Cet exemple valide également les ajouts apportés à l'expérience Radar-TF.

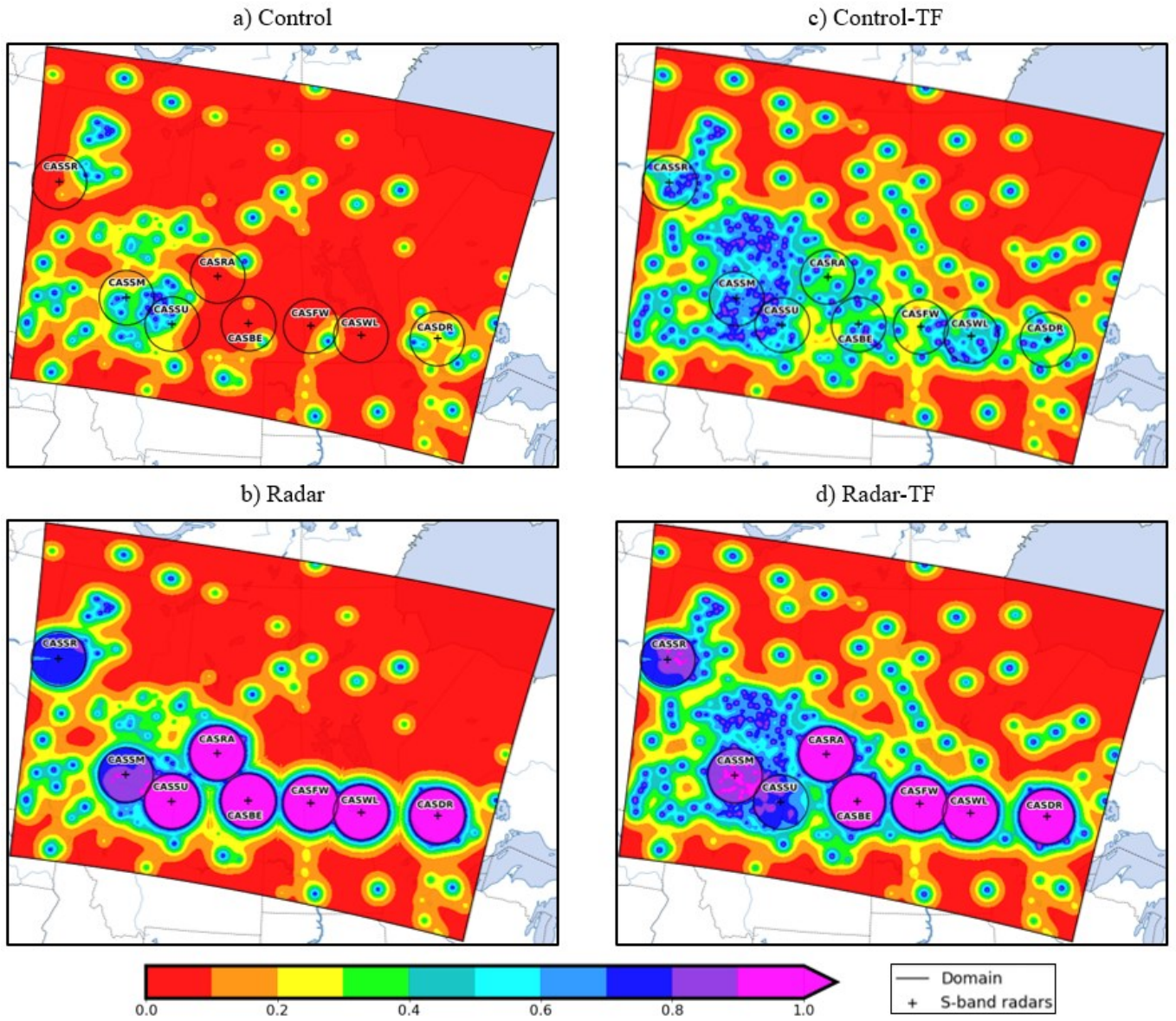


Figure C 1 : Étude de cas pour un événement survenu le 18 janvier 2021. Les intervalles de confiance (CFIA) sont présentés sous forme de moyenne pour une période de 24 heures se terminant à 12 UTC le jour du rapport avec l'analyse des expériences Control (a), Radar (b), Control-TF (c) et Radar-TF (d). La portée des radars (120 km) et leurs noms sont également présentés sur cette figure. Les emplacements et les portées des radars ne sont affichés que pour faciliter leur localisation dans l'analyse.

RÉFÉRENCES

- Abbasnezhadi, K. (2017). Influence of Meteorological Network Density on Hydrological Modeling Using Input from the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) University of Manitoba]. Winnipeg.
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Alexander, R., Pengfei, Z., Petar, B., Jian, Z., & Stephen, C. (2022). Polarimetric Radar Quantitative Precipitation Estimation. 14(1695), 1695.
- Allabakash, S., Lim, S., Chandrasekar, V., Min, K. H., Choi, J., & Jang, B. (2019). X-Band Dual-Polarization Radar Observations of Snow Growth Processes of a Severe Winter Storm: Case of 12 December 2013 in South Korea. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, 36(7), 1217-1235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0076.1>
- Anagnostou, E. N., Krajewski, W. F., Seo, D.-J., & Johnson, E. R. (1998). Mean-Field Rainfall Bias Studies for WSR-88D. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(3), 149-159.
- Asong, Z. E., Razavi, S., Wheeler, H. S., & Wong, J. S. (2017). Evaluation of Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG) over Southern Canada against Ground Precipitation Observations A Preliminary Assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4), 1033-1050.
- Balica, S. F., Popescu, I., Beever, L., & Wright, N. G. (2013). Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. *Environmental Modelling and Software*, 41, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.002>

Bélaire, S., Méthot, A., Mailhot, J., Bilodeau, B., Patoine, A., Pellerin, G., & Côté, J. (2000). Operational Implementation of the Fritsch–Chappell Convective Scheme in the 24-km Canadian Regional Model. *Weather and Forecasting*, 15(3), 257-274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015<0257:OIOTFC>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0257:OIOTFC>2.0.CO;2)

Boodoo, S., Hudak, D., Donaldson, N., Reid, J., Michelson, D., Rodriguez, P., Couture, M., & Stojanovic, V. (2018). The Development of a Canadian Operational Dual-Polarization Rainfall Estimation Algorithm 10th European Conference on Radar in Meteorology & Hydrology,

Boodoo, S., Hudak, D., Donaldson, N., Sills, D., Reid, J., Ryzhkov, A., & Zhang, P. (2015). Quantitative precipitation estimation from a C-band dual-polarized radar for the 8 July 2013 flood in Toronto, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, 16(5), 2027-2044. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0003.1>

Borga, M., Tonelli, F., Moore, R. J., & Andrieu, H. (2002). Long-term assessment of bias adjustment in radar rainfall estimation. *Water Resources Research*, 38(11), 8-1. <https://doi.org/10.1029/2001WR000555>

Bousquet, O., Lin, C. A., & Zawadzki, I. (2006). Analysis of scale dependence of quantitative precipitation forecast verification: A case-study over the Mackenzie river basin. *QUARTERLY JOURNAL- ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY*, 132(620), 2107-2126.

Boyuan, D., Gang, L., Kunpeng, W., & Meiya, D. (2021). Unambiguous range extension for pulse-Doppler radar via Poisson disk sampling. 15(1), 9-20.

Bukovčić, P., Ryzhkov, A., Zrnić, D., & Zhang, G. (2018). Polarimetric Radar Relations for Quantification of Snow Based on Disdrometer Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(1), 103-120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0090.1>

Carles, B., José Ángel, A., Gerardo, B., & Félix, F. (2020). New Approach to Estimate Extreme Flooding Using Continuous Synthetic Simulation Supported by Regional Precipitation and Non-Systematic Flood Data. *12(3174)*, 3174.

Carrera, M. L., Bélair, S., & Bilodeau, B. (2015). The Canadian Land Data Assimilation System (CaLDAS): Description and Synthetic Evaluation Study. *Journal of Hydrometeorology*, *16(3)*, 1293-1314. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-14-0089.1>

Chumchean, S., Sharma, A., & Seed, A. (2006). An Integrated Approach to Error Correction for Real-Time Radar-Rainfall Estimation. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, *23(1)*, 67-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JTECH1832.1>

Cocks, S. B., Tang, L., Zhang, P., Ryzhkov, A., Kaney, B., Elmore, K. L., Wang, Y., Zhang, J., & Howard, K. (2019). A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part II: Performance verification and case study analysis. *Journal of Hydrometeorology*, *20(5)*, 999-1014. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0070.1>

Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., & Staniforth, A. (1998). The Operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part I: Design Considerations and Formulation. *Monthly Weather Review*, *126(6)*, 1373-1395. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1373:TOCMGE>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1373:TOCMGE>2.0.CO;2)

Creutin, J. D., Delrieu, G., & Lebel, T. (1988). Rain Measurement by Rainage-Radar Combination: A Geostatistical Approach. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, *5(1)*, 102-115. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1988\)005<0102:RMBRRC>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426(1988)005<0102:RMBRRC>2.0.CO;2)

Deacu, D., Fortin, V., Klyszejko, E., Spence, C., & Blanken, P. D. (2012). Predicting the Net Basin Supply to the Great Lakes with a Hydrometeorological Model. *Journal of*

Hydrometeorology, 13(6), 1739-1759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0151.1>

Donaldson, R., Dyer, R. M., & Kraus, M. J. (1975). An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. Preprints, Ninth Conf. on Severe Local Storms, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc,

ECCC. (2021a). About Canadian weather radar. Retrieved december 30 from <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/weather-general-tools-resources/radar-overview/about-radar.html>

ECCC. (2021b). CaPA System User Manual.

ECCC. (2021c). L'assimilation des données radar dans CaPA.

ECCC. (2023). Radars météorologiques - EQPDP. <https://catalogue.ec.gc.ca/geonetwork/srv/api/records/6059da1d-e1da-4f2b-a420-b5c2a130eeaa>

Evans, A. (2013). Investigation of enhancements to two fundamental components of the statistical interpolation method used by the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) [University of Manitoba]. <http://hdl.handle.net/1993/22276>

Fassnacht, S. R., Soulis, E. D., & Kouwen, N. (1999). Algorithm application to improve weather radar snowfall estimates for winter hydrologic modelling. *Hydrological Processes*, 13(18), 3017-3039. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19991230\)13:18<3017::AID-HYP13>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19991230)13:18<3017::AID-HYP13>3.0.CO;2-K)

Feng, P.-N., Bélair, S., Khedhaouiria, D., Lespinas, F., Mekis, E., & Thériault, J. M. (2023). Impact of adjusted and non-adjusted surface observations on the cold season performance of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) system. *Journal of Hydrometeorology*.

Feng, X., Liu, C., Xie, F., Lu, J., Chiu, L. S., Tintera, G., & Chen, B. (2019). Precipitation characteristic changes due to global warming in a high-resolution (16 km) ECMWF simulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(718), 303-317. <https://doi.org/10.1002/qj.3432>

Fortin, V., Roy, G., Donaldson, N., & Mahidjiba, A. (2015). Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *JOURNAL OF HYDROLOGY -AMSTERDAM-*, 531(SUPP/2), 296-307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.003>

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/https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1474728>

Friesen, B., Boluwade, A., Rasmussen, P., & Fortin, V. (2017). Assimilation of Satellite-Based Rainfall Estimations in the Canadian Precipitation Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1934-5584.0001584](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1934-5584.0001584)

Fukao, S., Hamazu, K., & Doviak, R. J. (2013). Radar for meteorological and atmospheric observations. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54334-3>

Gjertsen, U., Salek, M., & Michelson, D. B. (2003). Gauge adjustment of radar-based precipitation estimates - a review. COST 717 Working Document.

Goudenhoofdt, E., & Delobbe, L. (2009). Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, 195-203.

Gunn, K. L. S., & Marshall, J. S. (1958). THE DISTRIBUTION WITH SIZE OF AGGREGATE SNOWFLAKES. *Journal of Meteorology*, 15(5), 452-461. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015<0452:TDWSOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015<0452:TDWSOA>2.0.CO;2)

Handoyo, M. F., Hadi, M. P., & Suprayogi, S. (2021). Application of Attenuation Correction to Quantitative Precipitation Estimation on C-Band Weather Radar in Bengkulu. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 893(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012054>

Hanes, C. C., Jain, P., Flannigan, M. D., Fortin, V., & Roy, G. (2017). Evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) to improve forest fire danger rating. International Journal of Wildland Fire, 26(6), 509. <https://doi.org/10.1071/WF16170>

Hassan, D., Taylor, P. A., & Isaac, G. A. (2017). Snowfall rate estimation using c-band polarimetric radars. METEOROLOGICAL APPLICATIONS, 24(1), 142-156. <https://doi.org/https://doi-org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/10.1002/met.1613>

Hiley, M. J., Kulie, M. S., & Bennartz, R. (2011). Uncertainty analysis for CloudSat snowfall retrievals. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50(2), 399-418. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2505.1>

Holleman, I. (2007). Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates. METEOROLOGICAL APPLICATIONS, 14(2), 195-203. <https://doi.org/10.1002/met.22>

Hubbert, J. C., Dixon, M., Ellis, S. M., & Meymaris, G. (2009). Weather radar ground clutter. Part I: Identification, modeling, and simulation. J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 1165-1180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1159.1>

Jameson, A. R., & Kostinski, A. B. (2001). Reconsideration of the physical and empirical origins of Z-R relations in radar meteorology. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 127(572), 517-538. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757214>

Kennedy, P. C., & Rutledge, S. A. (2011). S-Band Dual-Polarization Radar Observations of Winter Storms. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50(4), 844-858. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2010JAMC2558.1>

Khedhaouiria, D., Belair, S., Fortin, V., Roy, G., & Lespinas, F. (2020). High-resolution (2.5km) ensemble precipitation analysis across Canada. *Journal of Hydrometeorology*, 21(9), 2023-2039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0282.1>

Khedhaouiria, D., Bélair, S., Fortin, V., Roy, G., & Lespinas, F. (2022). Using a Hybrid Optimal Interpolation-Ensemble Kalman Filter for the Canadian Precipitation Analysis. *Nonlin. Processes Geophys. Discuss.*, 2022, 1-26. <https://doi.org/10.5194/npg-2022-10>

Kochendorfer, J., Earle, M., Rasmussen, R., Smith, C., Yang, D., Morin, S., Mekis, E., Buisan, S., Roulet, Y.-A., Landolt, S., Wolff, M., Hoover, J., Thériault, J. M., Lee, G., Baker, B., Nitu, R., Lanza, L., Colli, M., & Meyers, T. (2022). How Well Are We Measuring Snow Post-SPICE? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(2), E370-E388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0228.1>

Kochendorfer, J., Nitu, R., Wolff, M., Mekis, E., Rasmussen, R., Baker, B., Earle, M. E., Reverdin, A., Wong, K., Smith, C. D., Yang, D., Roulet, Y. A., Meyers, T., Buisan, S., Isaksen, K., Brækkan, R., Landolt, S., & Jachcik, A. (2018). Testing and development of transfer functions for weighing precipitation gauges in WMO-SPICE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1437-1452.

Kochendorfer, J., Rasmussen, P., Wolff, M., Baker, B., Hall, M. E., Meyers, T., Landolt, S., Jachcik, A., Isaksen, K., Brækkan, R., & Leeper, R. (2017). The quantification and correction of wind-induced precipitation measurement errors. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-21-1973-2017>

Koistinen, J., & Pohjola, H. (2014). Estimation of Ground-Level Reflectivity Factor in Operational Weather Radar Networks Using VPR-Based Correction Ensembles. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2394-2411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0343.1>

Kumjian, M. R., Prat, O. P., Reimel, K. J., van Lier-Walqui, M., & Morrison, H. C. (2022). Dual-Polarization Radar Fingerprints of Precipitation Physics: A Review. *Remote Sensing*, 14(15), 3706. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/15/3706>

Laramée, S., & Li, Q. (2019). Replacement of the Canadian Weather Radar Network SCMO, <https://bulletin.cmos.ca/canadian-weather-radar-network/>

Laws, J. O., & Parsons, D. A. (1943). The relation of raindrop-size to intensity. *Transactions, American Geophysical Union*, 24(2), 452. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>

Lemmetyinen, J., Kontu, A., Pulliainen, J., Vehvilainen, J., Rautiainen, K., Wiesmann, A., Matzler, C., Werner, C., Rott, H., Nagler, T., Schneebeli, M., Proksch, M., Schuttemeyer, D., Kern, M., & Davidson, M. W. J. (2016). Nordic Snow Radar Experiment. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(2), 403-415. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/gi-5-403-2016>

Lespinas, F., Fortin, V., Roy, G., Rasmussen, P., & Stadnyk, T. (2015). Performance Evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrometeorology*, 16(5), 2045-2064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0191.1>

Lin, C.-C., Rommen, B., Flourey, N., Schüttemeyer, D., Davidson, M. W. J., Kern, M., Kontu, A., Lemmetyinen, J., Pulliainen, J., Wiesmann, A., Werner, C. L., Mätzler, C., Schneebeli, M., Proksch, M., & Nagler, T. (2016). Active Microwave Scattering Signature of Snowpack—Continuous Multiyear SnowScat Observation Experiments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(8), 3849-3869. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2560168>

Mahfouf, J. F., Brasnett, B., & Gagnon, S. (2007). A Canadian Precipitation Analysis (CaPA) Project: Description and Preliminary Results. *ATMOSPHERE OCEAN*, 45(1), 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3137/ao.v450101>

Maki, M., Park, S.-G., & Bringi, V. N. (2005). Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 871-893. <https://doi.org/https://doi.org/10.2151/jmsj.83.871>

Marshall, J. S., & Gunn, K. L. S. (1952). Measurement of snow parameters by radar. *Journal of Meteorology*, 9.

Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. *Journal of Meteorology*, 5(4), 165-166. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)

Mason, I. B. (Ed.). (2003). *Binary events*. Wiley and Sons.

Matrosov, S. Y. (1997). Variability of Microphysical Parameters in High-Altitude Ice Clouds: Results of the Remote Sensing Method. *Journal of Applied Meteorology*, 36(6), 633-648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450-36.6.633>

McCoy, D. T., Hartmann, D. L., Zelinka, M. D., Ceppi, P., & Grosvenor, D. P. (2015). Mixed-phase cloud physics and Southern Ocean cloud feedback in climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9539-9554. <https://doi.org/10.1002/2015JD023603>

Mekis, E., Donaldson, N., Reid, J., Zucconi, A., Hoover, J., Li, Q., Nitu, R., & Melo, S. (2018). An Overview of Surface-Based Precipitation Observations at Environment and Climate Change Canada. *Atmosphere-Ocean*, 56(2), 71-95. <https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1433627>

Mekis, E. v., & Brown, R. (2010). Derivation of an Adjustment Factor Map for the Estimation of the Water Equivalent of Snowfall from Ruler Measurements in Canada. *Atmosphere-ocean.*, 48(4), 284.

- Mekis, E. v., & Vincent, L. A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), 163-177. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.583910>
- Milbrandt, J. A., Bélair, S., Faucher, M., Vallée, M., Carrera, M. L., & Glazer, A. (2016). The Pan-Canadian High Resolution (2.5 km) Deterministic Prediction System. *Weather and Forecasting*, 31(6), 1791-1816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0035.1>
- Milewska, E. J., Vincent, L. A., Hartwell, M. M., Charlesworth, K., & Mekis, E. (2019). Adjusting precipitation amounts from Geonor and Pluvio automated weighing gauges to preserve continuity of observations in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 44(2), 127-145. <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1530611>
- Moisseev, D. N., Saltikoff, E., & Leskinen, M. (2009). Dual-polarization weather radar observations of snow growth processes. 34th Conference on Radar Meteorology, Williamsburg, VA.
- NIDIS. (2015). U.S. Drought Portal. NOAA. Retrieved 23 december from <https://www.drought.gov/>
- Park, S. G., Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Maki, M., & Iwanami, K. (2005). Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 1621-1632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JTECH1803.1>
- Pérez Hortal, A. A., & Michelson, D. (2023). Using a Continental-Scale Data Quality Monitoring Framework to Evaluate a New Nonweather Filter for Radar Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(3), 411-425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0014.1>
- Perry, J., & Biss, A. (2007). Wind Farm Clutter Mitigation in Air Surveillance Radar. *IEEE AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS MAGAZINE*, 22(7), 35-40.

Pradhan, R. K., Markonis, Y., Vargas Godoy, M. R., Villalba-Pradas, A., Andreadis, K. M., Nikolopoulos, E. I., Papalexiou, S. M., Rahim, A., Tapiador, F. J., & Hanel, M. (2022). Review of GPM IMERG performance: A global perspective. *Remote Sensing of Environment*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112754>

Prein, A. F., Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., Fox Maule, C., van Meijgaard, E., Déqué, M., Nikulin, G., Vautard, R., Colette, A., Kjellström, E., & Jacob, D. (2016). Precipitation in the EURO-CORDEX. *Climate Dynamics : Observational, Theoretical and Computational Research on the Climate System*, 46(1-2), 383-412. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2589-y>

Rasmussen, R., Baker, B., Kochendorfer, J., Meyers, T., Landolt, S., Fischer, A. P., Black, J., Thériault, J. M., Kucera, P., Gochis, D., Smith, C., Nitu, R., Hall, M., Ikeda, K., & Gutmann, E. (2012). How Well Are We Measuring Snow: The NOAA/FAA/NCAR Winter Precipitation Test Bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(6), 811-829. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00052.1>

Ryzhkov, A., & Zrnica, D. (1998). Beamwidth Effects on the Differential Phase Measurements of Rain. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, 15(3), 624-634. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0624:BEOTDP>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0624:BEOTDP>2.0.CO;2)

Ryzhkov, A. V., Schuur, T. J., Burgess, D. W., Heinselman, P. L., Giangrande, S. E., & Zrnica, D. S. (2005). The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(6), 809-824. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-86-6-809>

Ryzhkov, A. V., & Zrnica, D. S. (1998). Discrimination between Rain and Snow with a Polarimetric Radar. *Journal of Applied Meteorology*, 37(10), 1228-1240. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1228:DBRASW>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1228:DBRASW>2.0.CO;2)

Ryzhkov, A. V., & Zrnić, D. S. (1995). Comparison of Dual-Polarization Radar Estimators of Rain. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, 12(2), 249-256. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1995\)012<0249:CODPRE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0249:CODPRE>2.0.CO;2)

Saltikoff, E., Friedrich, K., Soderholm, J., Lengfeld, K., Nelson, B., Becker, A., Hollmann, R., Urban, B., Heistermann, M., & Tassone, C. (2021). An overview of using weather radar for climatological studies: Successes, challenges, and potential. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(9), 1737-1738. https://doi.org/10.1175/BAMS_1009_1737-1738_REANALYSIS2

Sawyer, J. S. (1956). THE PHYSICAL AND DYNAMICAL PROBLEMS OF OROGRAPHIC RAIN. *Weather*, 11, 375-381.

Sekhon, R. S., & Srivastava, R. C. (1970). Snow Size Spectra and Radar Reflectivity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27(2), 299-307. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1970\)027<0299:SSSARR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1970)027<0299:SSSARR>2.0.CO;2)

Sivasubramaniam, K., Alfredsen, K., & Sharma, A. (2018). Estimating radar precipitation in cold climates: The role of air temperature within a non-parametric framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6533-6546. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6533-2018>

Smith, C. D., Ross, A., Kochendorfer, J., Earle, M. E., Wolff, M., Buisan, S., Roulet, Y. A., & Laine, T. (2020). Evaluation of the WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) transfer functions for adjusting the wind bias in solid precipitation measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(8), 4025-4043. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4025-2020>

Vivekanandan, J., Yates, D. N., & Brandes, E. A. (1999). The influence of terrain on rainfall estimates from radar reflectivity and specific propagation phase observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16, 837-845.

Vogl, S., Laux, P., Qiu, W., Mao, G., & Kunstmann, H. (2012). Copula-based assimilation of radar and gauge information to derive bias-corrected precipitation fields. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, 2311-2328.

Wan, H., Zhang, X., & Kirchmeier-Young, M. (2023). Representativeness of the Precipitation Observing Network for Monitoring Precipitation Change and Variability in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 61(2), 69-83. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2144111>

Wang, X. L., Xu, H., Qian, B., Feng, Y., & Mekis, E. (2017). Adjusted Daily Rainfall and Snowfall Data for Canada. *Atmosphere-Ocean*, 55(3), 155-168. <https://doi.org/10.1080/07055900.2017.1342163>

Wilson, J. W. (1970). Integration of Radar and Raingage Data for Improved Rainfall Measurement. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 9(3), 489-497.

Yilmaz, K. K., Hogue, T. S., Hsu, K.-l., Sorooshian, S., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2005). Intercomparison of Rain Gauge, Radar, and Satellite-Based Precipitation Estimates with Emphasis on Hydrologic Forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 497-517. <https://doi.org/10.1175/jhm431.1>

Zarenistanak, M., Dhorde, A. G., Kripalani, R. H., & Dhorde, A. A. (2015). Trends and projections of temperature, precipitation, and snow cover during snow cover-observed period over southwestern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3-4), 421-440. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1287-8>

Zrnic, D. S., & Ryzhkov, A. (1996). Advantages of Rain Measurements Using Specific Differential Phase. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, 13(2), 454-464.