

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

ANALYSE DES GRILLES DE PRÉCIPITATION À HAUTE RÉOLUTION ET DES
CRITÈRES DE CALAGE POUR LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AU QUÉBEC

PAR
Salam BAJAMGNIGNI GBAMBIE

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 9 NOVEMBRE 2016



Salam Bajamgnigni Gbambie, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Annie Poulin, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-Amélie Boucher, codirecteur de mémoire
Département des sciences appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi

M. François Brissette, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Fortin, membre du jury
Centre Météorologique Canadien, Environnement et Changement climatique Canada

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 AOÛT 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie ma directrice de recherche, Annie Poulin, qui m'a constamment guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer. Je te remercie de m'avoir initié à l'hydrologie. Tu m'as permis de continuer, m'as soutenu et m'as encouragé malgré mes erreurs. Tu m'as aidé à retrouver la confiance et à reprendre le chemin du succès.

Je remercie ma codirectrice de recherche, Marie-Amélie Boucher, pour les réflexions suscitées lors de nos échanges. Merci pour ta disponibilité, les analyses et suggestions pertinentes que tu as apportées lors des discussions sur Skype. Merci d'avoir lu et corrigé le texte de ce mémoire.

Je remercie Richard Arsenault pour m'avoir aidé à réaliser les calages du modèle hydrologique sur notre super calculateur du DRAME et pour toutes les discussions fructueuses que nous avons eues. Un merci particulier à Jie Chen, Gilles Essou et Landry Mballa pour les nombreux échanges et leur aide à la programmation Matlab.

Je tiens à remercier tous les étudiants du DRAME, Guillaume, Pierre-Luc, Jean-Luc, Ana, Émilie, Alex, Mélissa, Samaneh, Soudabeh, Martine, Salomon et Magali pour la bonne ambiance, le soutien et le partage au quotidien.

Je voudrais remercier Fadoua de l'UQAC pour les discussions intéressantes que nous avons eues en personne lors des séminaires et sur Skype. Je remercie aussi Qing-Xiao de l'UQAC pour m'avoir fourni et expliqué les informations qui ont servi à réaliser les simulations du modèle CEQUEAU sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean.

VIII

Je remercie ma famille, ma mère qui est venue du Cameroun pour me soutenir après la naissance de mon fils, mon père et mes frères et sœurs qui, à 10 000 km, ne cessent de m'encourager tous les jours.

Je ne saurais terminer sans exprimer ma reconnaissance à Tatiana, mon épouse. Tu n'as pas cessé de me pousser vers l'avant, insistant que je ne dois jamais abandonner. Tu as été à mes côtés pendant les moments difficiles. Merci pour ton soutien, ton amour et ta tendresse.

ANALYSE DES GRILLES DE PRÉCIPITATION À HAUTE RÉOLUTION ET DES CRITÈRES DE CALAGE POUR LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AU QUÉBEC

Salam BAJAMGNIGNI GBAMBIE

RÉSUMÉ

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire concerne l'analyse de trois bases de données de précipitation à haute résolution sur grilles régulières couvrant la province de Québec. Il s'agit de la grille de Ressources Naturelles Canada (NRCan), de la grille du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC), et de l'Analyse Canadienne de Précipitation (CaPA) produite par Environnement et Changements climatiques Canada. À ces trois grandes grilles s'ajoute la grille opérationnelle de Rio Tinto qui couvre la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Le travail de recherche vise à déterminer les différences spatiales et temporelles entre les bases de données de précipitation sur grilles et leurs implications pour la modélisation hydrologique, d'abord pour le Québec au complet et, ensuite, plus particulièrement sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean. Trois critères de calage, soient le Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), le Kling-Gupta Efficiency (KGE) et une combinaison de critères tels que le biais, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le NSE, sont évalués pour le calage du modèle hydrologique HSAMI sur les bassins versants du Québec.

Des indicateurs tels que les écarts relatifs, la corrélation, les rapports des variances, les précipitations cumulées, etc., sont utilisés pour déterminer les similitudes et les distinctions entre les grilles de précipitations. Le modèle global conceptuel HSAMI est utilisé pour réaliser les simulations sur 181 bassins versants au Québec, alors que le modèle conceptuel semi-distribué CEQUEAU est utilisé pour les simulations hydrologiques sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean. Des calages du modèle HSAMI sont effectués avec chacun des trois critères mentionnés ci-dessus sur les 181 bassins versants.

Les résultats indiquent de fortes similitudes entre les grilles de précipitation dans le sud et des disparités dans le centre et le nord de la province de Québec. L'analyse des simulations hydrologiques indique que CaPA offre les meilleurs résultats, en particulier pour les bassins versants situés dans le centre et le nord de la province. MDDELCC offre les meilleures performances dans les bassins versants situés sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et se présente globalement comme la deuxième meilleure option. L'analyse des simulations avec le modèle CEQUEAU sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean conduit aux mêmes conclusions. La comparaison des débits simulés pour les différents critères de calage révèle que le critère KGE permet d'obtenir des variances des débits simulés plus proches de celles des débits observées.

Mots-clés: Précipitation sur grilles; modélisation hydrologique; critères de calage, province de Québec.

INTERCOMPARISON OF HIGH RESOLUTION GRIDDED PRECIPITATION DATASETS AND CALIBRATION METRICS FOR HYDROLOGICAL MODELLING IN QUEBEC

Salam BAJAMGNIGNI GBAMBIE

ABSTRACT

The research presented in this master's degree thesis is centered on the analysis of three high-resolution gridded precipitation datasets that cover the entire province of Quebec. These gridded datasets are produced by Natural Resources Canada (NRCan), by Quebec's Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), and by Environment and Climate Change Canada (the Canadian Precipitation Analysis, CaPA). Operational precipitation gridded dataset from Rio Tinto that covers the Saguenay-Lac-Saint-Jean region is also considered. This study aims at determining the spatial and temporal differences in gridded precipitation datasets and their implications for hydrological modeling over the province of Quebec and over a specific region, here the Lac-Saint-Jean watershed. Three calibration criteria, namely the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), the Kling-Gupta Efficiency (KGE), as well as a combination of criteria such as bias, root mean square error (RMSE) and the NSE are evaluated for calibrating hydrological models on various watersheds in the province of Quebec.

Indicators such as the relative differences, correlation, ratio of variances, cumulative precipitation, etc., are used to determine the similarities and distinctions between precipitation datasets. The conceptual global model HSAMI is used to perform simulations on 181 watersheds in Quebec. The semi-distributed conceptual model CEQUEAU is also used for hydrological simulations, but only on the Lac-Saint-Jean watershed. Different calibrations of the HSAMI model are carried out with each of the three above-mentioned criteria on the 181 watersheds.

Results indicate strong similarities between gridded precipitation datasets in the southern portion of the province and disparities in the center and northern portions. The analysis of hydrological simulations performed with HSAMI indicates that the CaPA dataset provides the best results, especially for the watersheds located in the center and north of the province. The MDDELCC dataset shows the best performance in watersheds located on the South shore of the St. Lawrence River and comes out as the overall second best option. The analysis of the simulations with CEQUEAU on the Lac-St-Jean watershed leads to the same conclusion. Comparing the simulated streamflow series obtained after calibration of the HSAMI model using the different calibration criteria mentioned above reveals that calibrating the model according to the KGE criterion provides a better match between the variances of simulated and observed streamflows.

Keywords: Gridded precipitation; hydrological modeling; calibration criteria, Quebec province.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 L'interpolation des données météorologiques	5
1.2 Données météorologiques interpolées sur grille au Québec	7
1.3 La modélisation hydrologique	9
1.4 Problématique	10
CHAPITRE 2 ADDED VALUE OF ALTERNATIVE INFORMATION IN INTERPOLATED PRECIPITATION DATASETS FOR HYDROLOGY	13
2.1 Abstract	13
2.2 Introduction	14
2.3 Study area, gridded and observed datasets	19
2.3.1 Study area	19
2.3.2 Gridded and observed data	20
2.3.2.1 Gridded dataset from Natural Resources Canada	21
2.3.2.2 Gridded dataset from Environment and Climate Change Canada	21
2.3.2.3 Gridded dataset from the government of Quebec	24
2.3.3 Observed streamflow data	24
2.4 Methodology	25
2.4.1 Regridding for standardization of the three gridded datasets	25
2.4.2 General inter-comparison of gridded datasets	25
2.4.3 Hydrological modelling: input data and model calibration	26
2.5 Results	28
2.5.1 General inter-comparison of gridded datasets	28
2.5.2 Hydrological modelling	32
2.5.2.1 General inter-comparison of simulated flows	32
2.5.2.2 Analysis of performance improvements	36
2.5.2.3 Bias, correlation and relative variance of streamflows	38
2.5.2.4 Comparison of modelling performance for extreme low and high flows	40
2.6 Discussion and conclusions	41
2.7 Acknowledgements	45
CHAPITRE 3 INFLUENCE DES PRÉCIPITATIONS INTERPOLÉES SUR LA PERFORMANCE D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DISTRIBUÉ SUR UN GRAND BASSIN VERSANT	47
3.1 Contexte et présentation de la région d'étude	47
3.2 Méthodes et métriques d'évaluation des performances	50

3.2.1	Étude comparée des grilles de précipitation sur le bassin versant.....	50
3.2.2	Utilisation du modèle CEQUEAU pour les simulations hydrologiques...	52
3.2.2.1	Le modèle CEQUEAU	52
3.2.2.1	Simulations avec le modèle CEQUEAU	53
3.3	Résultats.....	54
3.3.1	Comparaison des grilles de précipitations	55
3.3.1.1	Précipitation cumulée.....	55
3.3.1.2	Cycle annuel moyen des précipitations.....	56
3.3.1.3	Diagramme de Taylor	57
3.3.1.4	Diagramme Quantile-Quantile ou diagramme Q-Q.....	58
3.3.2	Modélisation hydrologique	62
3.3.2.1	Analyse des simulations.....	62
3.3.2.2	Débits de crue et débits d'étéage	67
3.4	Discussion et conclusions	69
CHAPITRE 4	IMPACT DU CHOIX DE LA MÉTRIQUE SUR LES RÉSULTATS EN CALAGE ET LA PERFORMANCE DU MODÈLE HSAMI.....	73
4.1	Contexte	73
4.1.1	Le MAE et le RMSE.....	73
4.1.2	Le critère de Nash-Sutcliffe	74
4.1.3	Le Critère de Kling-Gupta	75
4.1.4	Combinaison de critères.....	77
4.2	Objectifs.....	77
4.3	Méthodologie	78
4.3.1	Le modèle HSAMI.....	78
4.3.2	Calage et validation du modèle.....	79
4.3.3	Indicateurs de performance	80
4.4	Résultats.....	81
4.4.1	Performances du modèle en validation	81
4.4.2	Influence des critères de calage sur le biais, la corrélation et le rapport des variances.....	82
4.4.3	Impact du choix du critère de calage sur les débits de crue et d'étéage	85
4.5	Discussion et conclusions	87
CONCLUSION.....		89
ANNEXE I PARAMÈTRES DES MODÈLES HYDOLOGIQUES		93
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Table 2.1	Major findings in selected previous studies involving interpolated gridded precipitation datasets18
Table 2.2	Descriptions of the gridded datasets used in this study22
Table 2.3	NSE values and total precipitation for the poor performing watersheds with at all the three gridded datasets37
Table 2.4	NSE values and total precipitation for the poor performing watersheds with at least one of the three gridded datasets. These watersheds show a significant improvement with respect to one of the three gridded datasets.....37
Tableau 3.1	Sous-bassins du bassin versant du LSJ Considérés48
Tableau 3.2	NSE, MAE10 et MAE90 calculés entre les séries de débits simulés et observés pour chaque grille de précipitation pour le bassin versant du LSJ64
Tableau-A I-1	Description des paramètres du modèle HSAMI93
Tableau-A I-2	Description des paramètres du modèle CEQUEAU94

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 2.1	Map of Canada, with the province of Quebec displayed in grey	19
Figure 2.2	Map showing stations locaiton used for each gridded datasets.	20
Figure 2.3	Mean annual cycle of precipitation (mm/month) for the 2002-2010 period from the NRCan, CaPA and MDDELCC datasets	29
Figure 2.4	Mean seasonal precipitation relative (%) bias for the period 2002-2010. Upper row: CaPA/NRCan, middle row: MDDELCC/NRCan, lower row: MDDELCC/CaPA. Vertical panels represent seasons: Winter (DJF), Spring (MAM), Summer (JJA) and Autumn (SON)	30
Figure 2.5	Seasonal relative variance between all precipitation time series of the period 2002-2010. Upper row: CaPA vs NRCan, middle row: MDDELCC vs NRCan, lower row: MDDELCC vs CaPA. Vertical panels represent seasons: Winter (DJF), Spring (MAM), Summer (JJA) and Autumn (SON)	31
Figure 2.6	Boxplots of differences in NSE between each pair of gridded datasets.	32
Figure 2.7	Maps representing the performance of each of the 181 watersheds in terms of the NSE for NRCan, CaPA and MDDELCC precipitation inputs	33
Figure 2.8	Map showing which gridded dataset provided the best performance in terms of NSE	35
Figure 2.9	Boxplots showing the distribution of the watershed area, the mean longitudes and the mean latitudes of the watersheds that show best performance in term of NSE for each gridded datasets.	36
Figure 2.10	Scatter plots of relative biases (RB), correlation coefficients (CC) and ratio of variance (RV) between simulated and observed streamflows for each of the three gridded datasets against the two others.	39
Figure 2.11	Scatter plots of mean absolute error between simulated and observed flows below the 10 th (MAE10) and above the 90 th (MAE90) percentile of the observed flows for each of the three gridded datasets against the two others	40

Figure 3.1	Carte de la région d'étude au Québec, Canada. À droite se trouve la carte agrandie du bassin versant du LSJ	48
Figure 3.2	Schéma de production du modèle CEQUEAU	53
Figure 3.3	Précipitations journalières cumulées (mm) des grilles de précipitation RT, NRCan, CaPA et MDDELCC pour la période 2002-2010	55
Figure 3.4	Cycles annuels des précipitations (mm) de la période (2002-2010) pour les grilles RT, NRCan, CaPA et MDDELCC	56
Figure 3.5	Diagramme Taylor comparant les séries chronologiques mensuelles des précipitations de NRCan (en rouge), CaPA (en bleu) et MDDELCC (en vert) à celle de RT (hiver = carré, printemps = triangle, été = cercle et automne = losange)	58
Figure 3.6	Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations de NRCan en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ	59
Figure 3.7	Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations de CaPA en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ	60
Figure 3.8	Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations du MDDELCC en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ	61
Figure 3.9	Comparaison des hydrogrammes annuels moyens simulés et observé pour le bassin du LSJ	63
Figure 3.10	Boîtes à moustaches présentant les valeurs de RMSE relatives sur les débits simulés par rapport aux débits observés pour le LSJ et ses sous-bassins considérés, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC	65
Figure 3.11	Boîtes à moustaches présentant les coefficients de Corrélation (CCs) entre les débits simulés les débits observés pour le LSJ et ses sous-bassins considérés, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC	65
Figure 3.12	Boîtes à moustaches présentant les écarts-types normalisés (STDs) des débits simulés par rapport aux débits observés pour les sous-bassins du LSJ, pour les grilles de précipitation RT, NRCan, CaPA et MDDELCC	66

Figure 3.13	Boîtes à moustaches présentant les valeurs de NSE entre les débits observés et les débits simulés pour les sous-bassins du LSJ, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC67
Figure 3.14	Boîtes à moustaches présentant les écarts moyens absolus (MAE10) entre les débits simulés et les débits observés (débits \leq au 10 ^{ième} percentile des débits observés) pour les sous-bassins du LSJ, par grilles de précipitations68
Figure 3.15	Boîtes à moustaches présentant les écarts moyens absolus (MAE90) entre les débits simulés et les débits observés (débits \geq 90 ^{ième} percentile des débits observés) pour les sous-bassins du LSJ, par grilles de précipitations68
Figure 4.1	Schéma du modèle HSAMI79
Figure 4.2	Boîtes à moustaches présentant les 3 critères de performance calculés en validation en fonction du critère de performance utilisé pour le calage du modèle HSAMI sur 181 bassins versants au Québec81
Figure 4.3	Diagramme de dispersion des biais relatifs (BR), des coefficients de corrélation (CC) et des rapports des variances (RV) entre débits simulés et observés, pour chacun des 3 critères de performance en fonction des 2 autres pour la période de validation83
Figure 4.4	Diagramme de dispersion des biais relatifs (BR), coefficients de corrélation (CC) et rapports des variances (RV) en fonction des trois critères de performance NSE, KGE et COMB84
Figure 4.5	Boîtes à moustaches des composantes (biais, coefficient de corrélation et rapport des variances) pour les critères de performances (NSE, KGE, COMB).85
Figure 4.6	Diagrammes de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE10 et MAE90) entre les débits simulés et observés inférieurs au 10 ^{ième} et supérieurs au 90 ^{ième} percentile des débits observés, pour chacun des 3 critères de performance en fonction des 2 autres86

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

(cQ) ²	Impact des Changements Climatiques sur l'Hydrologie (Q) au Québec
CaPA	Canadian Precipitation Analysis
CMAES	Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy
CMC	Canadian Meteorological Centre
COOP	Cooperative Observer Program
EB	East Boreal
ECCC	Environnement et Changements Climatiques Canada
ETA	East Tundra
ETU	East Taïga
GEM	Global Environmental Multiscale
GL	Great Lakes
HQ	Hydro-Québec
HSAMI	Service hydrométéorologique apports modulés intermédiaires
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
METAR	METeorological Aerodrome Report
NA	North Atlantic
NARR	North American Regional Reanalysis
NRCan	Natural Resources Canada
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PSC	Programme de Surveillance du Climat
RMQC	Réseau Météorologique Coopératif du Québec
RT	Rio Tinto

INTRODUCTION

L'hydrologie est la science qui traite des eaux terrestres, c'est-à-dire de leur circulation, de leur interaction avec l'atmosphère, de leurs propriétés chimiques et physiques. Au sens large, l'hydrologie s'intéresse aussi à la relation entre la circulation de l'eau et le vivant (Chow et al., 1988). La connaissance du comportement hydrologique des bassins versants est indispensable lorsque que l'on s'intéresse aux problématiques de gestion des ressources en eau, d'aménagement du territoire, ou de gestion des risques hydrologiques.

Les ingénieurs hydrologues œuvrent dans l'évaluation, la planification et la conception des installations pour une meilleure gestion des ressources en eau, y compris les événements hydrologiques extrêmes. Ils contrôlent la qualité de l'eau durant son traitement, analysent les eaux des rivières et des nappes souterraines et fournissent des informations utiles à la gestion aux différents acteurs impliqués dans l'utilisation des ressources hydriques tels que les municipalités, les agriculteurs, les industries, etc.

La province de Québec contient d'importantes réserves d'eau douce. Son territoire s'étend sur plus d'un million et demi de kilomètres carrés et compte des milliers de lacs et rivières. L'abondance de cette ressource confère au Québec un très grand potentiel hydroélectrique. D'ailleurs le Québec exploite ce potentiel à travers plus d'une soixantaine de centrales hydroélectriques implantées dans son territoire, ce qui lui permet de satisfaire la demande énergétique au Québec et de faire aussi de l'exportation vers les provinces voisines et la partie Nord-est des États-Unis (e.g. Boucher et Leconte, 2013; Gouvernement du Québec, 2004).

Que ce soit pour gérer efficacement les réservoirs d'eau des centrales hydroélectriques, dimensionner les ouvrages tels que les digues, les ponts et les barrages, prévoir les inondations et les étiages, gérer les barrages ou étudier l'impact des changements climatiques, les modèles hydrologiques sont des outils indispensables. Ces modèles sont alimentés avec des données météorologiques, qui incluent au minimum les précipitations et

la température moyenne. Les données météorologiques sont en général collectées par des stations de mesure au sol. Ces données présentent de nombreux défauts liés à la faible densité spatiale des stations dans certaines régions telles que le nord du Québec. Les stations météorologiques sont inégalement réparties sur le territoire canadien. Les zones densément peuplées sont favorisées. Les stations sont alors concentrées au sud du Canada. Dans de vastes régions au centre et au nord du Canada, les stations météorologiques sont presque inexistantes. De plus, certaines stations n'ont que des chroniques d'enregistrement très courtes ou comportant plusieurs données manquantes.

Pour pallier à ce problème, des bases de données ont été mises sur pied en interpolant des données recueillies aux stations météorologiques par diverses méthodes pour fournir de l'information spatialisée sur tout le territoire. Ces bases de données se présentent sous forme de grilles régulières de résolution fine (souvent 10 km par 10km pour les applications hydrologiques). Ces données sont intéressantes pour les utilisateurs parce qu'elles couvrent entièrement les régions d'intérêt et leurs séries temporelles sont plus complètes.

Toutefois, les utilisateurs confrontés au choix d'une base de données interpolée parmi celles existantes ne disposent que de peu d'information sur les différences et les similitudes qui existent entre les bases de données au Canada en général et au Québec en particulier. La question de savoir si les simulations hydrologiques produites en alimentant le modèle avec différentes grilles de précipitation sont équivalentes ou si certains produits sont plus performants, devient un enjeu important étant donné qu'une incertitude est associée aux données d'entrée du modèle hydrologique.

Le calage des paramètres du modèle hydrologique est une autre source d'incertitude. Le processus d'ajustement des paramètres du modèle, appelé communément calage, se fait au moyen d'un algorithme d'optimisation et d'un critère de calage ou fonction objectif, qui mesure le degré de concordance entre les simulations et les observations. Les données hydrométriques sont utilisées pour caler les modèles hydrologiques c'est-à-dire ajuster les paramètres du modèle hydrologique qui ne peuvent être mesurés directement. Plusieurs

critères de calage sont proposés dans la littérature. Ces critères ont des forces et des faiblesses et en fonction de l'hydrologie du bassin versant et des objectifs de la modélisation, le choix d'un critère plutôt qu'un autre peut s'avérer judicieux (Criss et Winston, 2008; Legates et McCabe, 1999; McCuen et al., 2006; Moriasi et al., 2007). Ce mémoire se consacre en partie à l'évaluation de quelques critères de calage sur les bassins versants du Québec.

L'objectif général de cette recherche est de comparer les bases de données de précipitation sur grilles et quelques critères de calage pour la modélisation hydrologique globale et distribuée sur des bassins versants du Québec. Cet objectif se subdivise en trois objectifs spécifiques qui sont :

- la comparaison des grilles de précipitation entre elles sur l'ensemble de la province de Québec;
- l'évaluation de l'influence du choix d'une grille de précipitation sur la qualité des simulations hydrologiques avec un modèle global sur les bassins versants du Québec;
- l'évaluation de l'influence du choix d'une grille de précipitation parmi NRCan, MDDELCC, celle de Rio-Tinto et CaPA sur la qualité des simulations hydrologiques avec un modèle distribué sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean;
- l'évaluation de l'influence du choix du critère de calage pour la modélisation hydrologique sur les bassins versants du Québec.

La suite de ce mémoire est structurée comme suit : le chapitre 1 présente la revue de la littérature. Le chapitre 2 est consacré à l'étude comparée de 3 bases de données de précipitation sur grilles au Québec, soient NRCan, CaPA et MDDELCC et leur influence en modélisation hydrologique sur les bassins versants du Québec. Au chapitre 3, quatre bases de données sur grilles couvrant la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean sont analysées et

comparées et leur influence sur les simulations hydrologiques est étudiée avec un modèle distribué. Le chapitre 4 est dédié à l'étude de la sensibilité et des performances du modèle hydrologique HSAMI à quelques critères de calage sur les bassins versants du Québec.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 L'interpolation des données météorologiques

Les données météorologiques peuvent provenir de plusieurs sources. Elles peuvent être obtenues à partir de stations météorologiques manuelles ou automatiques ou par télédétection. Les utilisateurs de données météorologiques sont nombreux. Les prévisionnistes utilisent les données météorologiques pour élaborer des prévisions utiles pour le grand public, l'aviation, la navigation maritime, les domaines militaires, etc. Les données météorologiques sont aussi utiles pour les études climatologiques et hydroclimatiques.

En hydrologie, les données météorologiques sont utiles pour la surveillance de la neige au sol, des pluies et la prévision des écoulements en rivière. Pour cette dernière application, la précipitation et la température sont les variables les plus importantes. Elles représentent les données d'entrée minimales requises pour exécuter les modèles hydrologiques.

D'une région à l'autre à travers le Canada, la densité du réseau de stations météorologiques varie et peut être assez faible. La densité est relativement élevée dans la partie sud du Canada, mais devient très faible dans le nord (Hutchinson et al., 2009). Au Québec, la densité du réseau de stations météorologiques diminue aussi du sud vers le nord. Il y a un dysfonctionnement fréquent d'un certain nombre d'appareils de mesure dû en partie à la difficulté d'effectuer leur maintenance en hiver. Le nombre de stations fournissant des données est donc souvent inférieur au nombre total de stations disponibles sur le territoire (Baillargeon et al., 2004). Il faut aussi noter que les stations avec observateurs fournissent les données seulement une partie de l'année.

Pour avoir de l'information continue dans le temps et dans l'espace, à une échelle appropriée, pour les modèles hydrologiques, des bases de données sur grilles régulières sont construites par interpolation, à partir des données d'observation existantes (Daly, 2006). On trouve dans

la littérature plusieurs méthodes d'interpolation pour les données climatiques. Ces méthodes sont généralement classées en deux principaux groupes : les méthodes déterministes et les méthodes géostatistiques (Ly et al., 2013).

La plus simple des méthodes déterministes est la moyenne arithmétique des valeurs aux stations. Cette méthode peut donner des résultats acceptables lorsque la région d'étude est plate, lorsque l'on cherche uniquement à estimer la valeur moyenne des précipitations et lorsqu'un réseau très dense de stations météorologiques est disponible (Ly et al., 2013). La méthode des polygones de Thiessen (Thiessen, 1911) est couramment utilisée pour interpoler les données de précipitation à partir des valeurs enregistrées aux stations. Elle affecte à chaque station une zone d'influence dont l'aire, exprimée en fraction de l'aire totale du territoire à l'étude, par exemple le bassin versant, représente le facteur de pondération de la valeur de l'enregistrement. La méthode de la pondération par l'inverse de la distance (Lu et Wong, 2008; Shepard, 1968) est basée sur une fonction de l'inverse des distances entre les stations et le point où l'on veut estimer la valeur. Les poids diminuent à mesure que les distances augmentent. Parmi les méthodes déterministes, on peut aussi citer la méthode polynomiale (Tabios et Salas, 1985) basée sur une fonction polynomiale algébrique ou trigonométrique et la méthode des splines (Ruelland et al., 2008). Une spline est une famille de fonctions régulières de courbure minimale. L'interpolation par les splines ne se fait pas point par point comme c'est le cas pour les méthodes énumérées précédemment. Il s'agit plutôt d'ajuster une surface de façon à ce qu'elle passe par les points de mesure ou tout près de ces derniers (Cressie, 1993). Les splines du type plaque mince sont largement utilisées dans la littérature pour l'interpolation des variables climatiques (Hutchinson, 1995; Hutchinson et al., 2009). Le terme plaque mince vient du fait que les surfaces produites par ces splines simulent plus ou moins le comportement des fines plaques de métal flexible contraintes à passer par les points de mesure.

Les méthodes géostatistiques mettent en commun les mathématiques et les sciences de la Terre. Le krigeage constitue un sous-groupe des méthodes géostatistiques. Il est basé sur un modèle statistique qui utilise l'autocorrélation entre les points de mesures, l'idée

fondamentale étant que la nature n'est pas entièrement « imprévisible ». En moyenne, des observations rapprochées devraient se ressembler davantage que des observations éloignées. La valeur estimée en un point donné est obtenue en calculant la somme pondérée des valeurs des points de mesure. Les points sont calculés de manière à ce que l'interpolation soit non biaisée et que la variance soit minimisée. Des variables explicatives, par exemple la topographie, peuvent intégrer le schéma d'interpolation pour améliorer les valeurs estimées (Goovaerts, 2000; Grimes et Pardo-Igúzquiza, 2010; Haberlandt, 2007; Tapsoba et al., 2005). Le krigeage simple, le krigeage ordinaire, le krigeage universel, le krigeage avec dérive externe sont quelques formes de krigeage.

1.2 Données météorologiques interpolées sur grille au Québec

Quelques bases de données sur grille couvrant le Québec en partie ou en totalité, ont été développées par des agences gouvernementales et des compagnies, notamment Ressources Naturelles Canada (NRCan), Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC), le Gouvernement du Québec à travers son ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) et l'entreprise Rio Tinto (RT). Ces données comprennent la précipitation et la température.

NRCan a appliqué l'algorithme ANUSPLIN développé par (Hutchinson, 1995), basé sur la méthode des splines de type *plaque mince* pour interpoler la précipitation et la température à travers le Canada. Dans un premier temps, Hutchinson et al. (2009) ont interpolé les données journalières de températures minimale et maximale et de précipitations sur la période 1961-2003 pour le Canada au complet sur une grille de résolution 10 km. Ces données journalières ont été mises à jour par Hopkinson et al. (2011). Ces derniers ont étendu les données jusqu'à 2011 et ont réduit les résidus provoqués par l'existence de différents jours climatologiques. Cette version mise à jour a pris en compte 7514 stations d'observation d'Environnement Canada couvrant 62 années à partir de 1950.

Afin de réduire l'incertitude sur les précipitations qui découle de la faible densité de stations météorologiques dans la partie nord du Canada, ECCC a développé une analyse de

précipitation qui combine les données provenant de stations météorologiques avec des observations radar, les données satellitaires et les prévisions à court-terme du modèle Global Environmental Multiscale (GEM). Ce produit fournit des estimations objectives des précipitations aux six heures sur une grille à haute résolution (0.1 degré, soit environ 11 km pour le Québec), couvrant l'ensemble de l'Amérique du Nord (Lespinas et al., 2015). Cette base de données est connue sous le nom CaPA (Canadian Precipitation Analysis). L'algorithme de CaPA est basé sur une technique d'interpolation statistique appelée *interpolation optimale*. Il s'agit en fait d'une forme de krigeage : le krigeage résiduel (Baillargeon, 2005). Les prévisions de précipitation à court-terme de GEM sont utilisées comme champ d'essai. Le procédé effectue l'analyse sur les innovations, c'est-à-dire la différence entre une observation et la valeur correspondante du champ d'essai. Les innovations sont ensuite pondérées en fonction de leurs statistiques d'erreur pour fournir les estimations des précipitations (Fortin et Roy 2011b; Mahfouf et al. , 2007). Il convient de noter que la version de CaPA utilisée pour les travaux présentés dans ce mémoire ne comprend pas les données radar et satellite. Seuls les produits récents comprennent ces données (à partir de novembre 2014).

Les données de précipitation et de température produites sur grille par le MDDELCC couvrent la province de Québec au complet, avec une résolution spatiale de 0.1 degré. Les données sont interpolées à partir de 329 stations météorologiques du Programme de Surveillance du Climat du Québec (PSC) et 41 stations d'ECCC situés au-delà du 49e parallèle nord, pour assurer une couverture spatiale de la partie nord de la province de Québec. L'interpolation est effectuée par krigeage ordinaire avec un variogramme journalier. Les données couvrent la période allant de 1961 à aujourd'hui (Bergeron, 2015).

La grille opérationnelle de Rio Tinto (RT) couvre essentiellement la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean au Québec. Il s'agit des précipitations et des températures moyennes journalières. Ces dernières sont obtenues à partir des températures minimales et maximales enregistrées aux stations. L'interpolation est faite à partir des 3 stations les plus proches du point de grille considéré (Morin et Paquet, 2007). La méthode utilisée est la pondération par

l'inverse de la distance . La résolution est de 0.1 degré. RT utilise cette grille dans le cadre opérationnel pour la prévision des écoulements en rivière.

1.3 La modélisation hydrologique

Pour la gestion des ressources en eau, il y a un besoin de fournir des estimations chiffrées de ruissellements mensuels, saisonniers et annuels permettant des estimations de la disponibilité en eau. Beven (2012) fait état des limitations spatiotemporelles des mesures existantes et des besoins de connaissance des systèmes hydrologiques par l'affirmation suivante :

« We are not able to measure everything we would like to know about hydrological systems. We have, in fact, only a limited range of measurement techniques and a limited range of measurements in space and time. We therefore need a means of extrapolating from those available measurements in both space and time, particularly to ungauged catchments (where measurements are not available) and into the future (where measurements are not possible) to assess the likely impact of future hydrological change».

Il existe plusieurs moyens de fournir des estimations sur la quantité et la qualité de l'eau disponible en rivière. La modélisation hydrologique est la technique la plus utilisée. Les applications des modèles hydrologiques sont variées, dépendant du problème à résoudre. Singh et Woolhiser (2002) ont résumé les différents objectifs de la modélisation hydrologique en 3 points: (1) l'extrapolation de mesures ponctuelles dans l'espace et dans le temps; (2) l'amélioration de la compréhension fondamentale des systèmes hydrologiques existants et l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau; (3) le développement de nouveaux modèles ou de l'amélioration des modèles existants pour les décisions de gestion sur l'hydrologie du bassin actuel et du futur.

En recherche, les modèles hydrologiques sont utilisés pour comprendre les processus hydrologiques. Ils sont utilisés pour étudier l'impact des impacts des changements climatiques et le développement urbain sur les ressources en eau. Ils sont aussi utilisés pour projeter les gammes d'incidences potentielles de scénarios de changement futur (e.g. Frevert

et Singh, 2003; Moradkhani et Sorooshian, 2008; Pechlivanidis et al., 2011; Singh et Woolhiser, 2002).

Les modèles hydrologiques sont caractérisés par leur grande diversité et leur variété. Dans la littérature, il existe plusieurs classifications de modèles hydrologiques. Ils sont classés en fonction de leur complexité, de leur conception ainsi que de la logique et la nature des expressions mathématiques qui traduisent les relations entre les différentes composantes du modèle. Sur l'aspect mathématique du modèle, on les regroupe en modèles déterministes et stochastiques. Selon la représentation spatiale, on distingue les modèles globaux, les modèles semi-distribués et les modèles distribués. On distingue aussi les modèles dynamiques et les modèles statiques selon la prise en compte ou non du temps. Les modèles peuvent aussi être classés en modèles événementiels ou continus. Une autre classification très courante dans la littérature distingue les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles à bases physiques (Moradkhani et Sorooshian, 2008; Pechlivanidis et al., 2011).

Afin de rendre cohérentes et faire correspondre les simulations du modèle aux observations, les paramètres du modèle doivent généralement être ajustés par calage. Le calage peut s'effectuer manuellement ou s'automatiser à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Dans les deux cas, un critère statistique, souvent appelé fonction objectif ou métrique de calage, est utilisé pour mesurer le degré de correspondance entre les séries temporelles de valeurs simulées et observées sur une période donnée (le plus souvent des débits en rivière), à chaque modification des paramètres. (Moradkhani et Sorooshian, 2008; Pechlivanidis et al., 2011; Singh et Woolhiser, 2002). Quelques critères de calage sont étudiés au chapitre 4.

1.4 Problématique

Aux sections précédentes, quelques méthodes utilisées pour interpoler les données de précipitation et de température ont été présentées allant des méthodes simples comme l'inverse de la distance aux méthodes plus complexes comme le krigeage. Trois bases de données interpolées sur grilles couvrant le Québec au complet ou une région plus petite ont

été présentées. Une brève revue de littérature sur la modélisation hydrologique a également été présentée. Cette section souligne quelques points essentiels entourant les différentes bases de données de précipitation sur grilles et leur utilisation pour la modélisation hydrologique.

Les données sur grilles sont de plus en plus intéressantes pour les agences gouvernementales, les municipalités, les compagnies et les chercheurs qui œuvrent dans la gestion des ressources en eau, notamment pour conduire des études d'impact, en prévision hydrologique, en changements climatiques, ou toutes autres applications. Au Québec, il n'existe pas d'étude qui mette en relief les distinctions et les similitudes que présentent les grilles entre elles ou encore les avantages et les désavantages qu'une grille peut présenter par rapport à une autre, pour une région donnée, dans la perspective d'une application à la modélisation hydrologique.

En effet, plusieurs travaux se sont penchés sur l'analyse des grilles précipitation dans plusieurs régions à travers le monde. Eum et al. (2014) ont mené une inter-comparaison de 3 bases de données sur grilles sur le bassin versant de la rivière Athabasca, Canada. Ce sont la réanalyse NARR (Nord American Regional Reanalysis), l'analyse canadienne des précipitations (CaPA) et la base de données NRCan. Ils ont trouvé des différences systématiques entre les bases de données et des différences significatives dans les simulations des modèles hydrologiques alimentés par ces données. Tozer et al. (2012) ont analysé des bases de données sur grilles à travers l'Australie. Ils ont trouvé des différences entre elles, ainsi que des différences marquées entre les observations aux stations et les points de grilles correspondants. Ils ont également constaté des différences nettes entre les écoulements en rivière simulés à l'aide de chaque jeu de données sur grilles. Ensor et Robeson (2008) ont analysé des bases de données de précipitations sur grilles dans le Midwest américain et ont constaté une augmentation significative de la fréquence des faibles précipitations et une forte réduction de la fréquence des fortes précipitations dans ces bases de données par rapport aux observations des stations météorologiques. Ils ont attribué ces différences aux procédés d'interpolation. Les mêmes écarts sont également décrits par Silva et al. (2007) sur le Brésil. Mizukami et Smith (2012) ont analysé les incohérences temporelles qui se produisent dans

les séries chronologiques de précipitations sur grilles en Californie, en raison de divers facteurs tels que la relocalisation des pluviomètres et les changements dans les méthodes de traitement des données. Ils ont aussi analysé leur impact sur la modélisation hydrologique. Ils ont proposé une approche pour détecter et corriger les incohérences et ont constaté que les simulations d'écoulement en rivière en utilisant la base des données corrigées en entrée du modèle sont plus cohérentes et précises que celles fondées sur les données non corrigées.

Pour le Québec, Il est donc question d'analyser les grilles de précipitation et les simulations des modèles hydrologiques alimentés par ces précipitations et discuter des résultats en fonction des observations que nous avons relevées dans cette revue de littérature. Cette question sera traitée dans les chapitres 2 et 3.

Les critères de calage présentent tous des forces et des faiblesses. Le critère de calage influence la performance des modèles hydrologiques. Le régime hydrologique peut aussi influencer le choix du critère de calage. Le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) est un critère largement utilisé et a fait l'objet de discussion dans plusieurs travaux dans la littérature (Criss et Winston, 2008; Jain et Sudheer, 2008; Legates et McCabe, 1999; McCue et al., 2006; Moriasi et al., 2007; Schaeffli et Gupta, 2007). Le Québec présente un régime hydrologique varié, que ce soit pour les précipitations ou pour les écoulements en rivières. Il devient important d'évaluer la sensibilité des modèles hydrologiques aux critères de calage sur les bassins versants à travers le Québec. Cette dernière problématique est traitée au chapitre 4.

CHAPITRE 2

ADDED VALUE OF ALTERNATIVE INFORMATION IN INTERPOLATED PRECIPITATION DATASETS FOR HYDROLOGY

Abdas Salam Bajamgnigni Gbambie ^a, Annie Poulin ^a, Marie-Amélie Boucher ^b,
Richard Arsenault^c,

^a Département du Génie de la Construction, École de Technologie Supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b Département des Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi,
555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada G7H 2B1

^c Rio Tinto - Québec Power Operations,
1954 Davis St., Jonquière, Québec, Canada, G7S 3B6

Cet article a été soumis pour publication
à *Journal of Hydrometeorology*

2.1 Abstract

Gridded climate datasets are produced in many parts of the world by applying various interpolation methods to weather observations, to which are sometimes added secondary information (in addition to geographic location) such as topography, radar or atmospheric model outputs. For a region of interest, the choice of a dataset for a given study can be a significant challenge given the lack of information on the similarities and differences that exist between datasets, or about the benefits that one dataset may present relative to another. This study aims to provide information on the spatial and temporal differences between gridded precipitation datasets and their implication for hydrological modelling. Three gridded datasets for the province of Quebec are considered: the Natural Resources Canada (NRCan) dataset, the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) dataset, and the dataset from the *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec* (MDDELCC). Using statistical metrics and diagrams, these precipitation datasets are compared with each other. Hydrological responses of 181 Quebec watersheds with respect to each gridded precipitation dataset are also analyzed using the hydrological model HSAMI. The results indicate strong similarities in the southern and

disparities in the center and northern parts of the province of Quebec. Analysis of hydrological simulations indicates that the CaPA dataset offers the best results, particularly for watersheds located in the center and northern parts of the province. MDDELCC shows the best performance in watersheds located on the South shore of the St. Lawrence River and comes out as the overall second best option.

2.2 Introduction

Gridded precipitation datasets are popular in hydrology and climatology because of the low spatial and temporal density of weather stations in many parts of the world. They are also convenient for watershed modeling because they provide continuous values for input data, uniformly distributed in space and time. Precipitation is one of the key inputs to hydrological models and, along with temperature, constitutes the bare minimum in terms of inputs to run hydrological models. The various hydrological processes are often simulated by such models using sub-daily to daily time steps. Therefore, the model needs precipitation data at the same frequency. The spatial interpolation of daily precipitation grids from a limited number of ground observations presents a major challenge, in part because the spatial density of ground station might not be high enough to fully grasp the spatial structure of the real underlying precipitation field. For instance, in kriging, the spatial structure of data is represented by a variogram. The optimal equation for this semi-variogram is dependant on regional weather and geography, but also on the time step of interest (e.g. New et al., 2001; Grimes and Pardo-Igúzquiza, 2010). As stressed by Grimes and Pardo-Igúzquiza (2010), a daily variogram for precipitation accumulation is most influenced by local weather while a monthly variogram should also account for large-scale patterns of storms and more general climate patterns. It is well established that spatial and temporal variability in precipitation affects several aspects of hydrological modelling such as the watershed response, the timing of peak runoff, the estimation of model parameters and the hydrological model outputs, as reviewed by Ly et al. (2013).

There are many methods to obtain gridded precipitation datasets from weather stations, ranging from simple techniques, e.g. arithmetic mean, Thiessen polygons (Thiessen, 1911) and inverse distance weighting (Shepard, 1968), to more sophisticated techniques, like kriging (Goovaerts, 2000) and thin plate splines (Hutchinson and Bischof, 1983). The last two interpolation techniques can incorporate additional information such as elevation (Goovaerts, 2000; Hutchinson et al., 2009; Tapsoba et al., 2005) and radar (Haberlandt, 2007). Choosing the most appropriate gridded precipitation dataset for a given hydro-climatic study in a given region may prove crucial, and is limited by the available information regarding the similarities and distinctions between different types of gridded datasets and the advantages of one type of dataset relative to another. Therefore, comparative analyses of different precipitation gridded datasets for regions of interest are necessary to analyze their respective benefits.

Analyses of gridded precipitation datasets for regions such as the Athabasca watershed in Canada (Eum et al., 2014), the Midwestern states in the USA (Ensor and Robeson, 2008), the Sierra Nevada Mountains of California in USA (Mizukami and Smith, 2012), the continental USA (Essou et al., 2016), Australia (Tozer et al., 2012) and Brazil (Silva et al., 2007) can be found in the literature. Eum et al. (2014) conducted an inter-comparison of three gridded datasets: The North American Regional Reanalysis (NARR), the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) and the thin-plate smoothing splines (named NRCAN in this study). They found systematic differences between the gridded datasets and significant differences in hydrologic model simulations made with input data from the three datasets. Differences between gridded datasets were also found across Australia by Tozer et al. (2012), as well as marked differences between the gauged precipitation and the precipitation grid cell within which the corresponding gauge sits. They also reported markedly different runoff responses associated with each gridded dataset. Ensor and Robeson (2008), in their study of gridded precipitation datasets for Midwestern states in the USA, found a significant increase of the frequency of low precipitation and a great reduction of the frequency of heavy precipitation in gridded datasets compared to observations from weather stations. They attributed those differences to the interpolation processes. The same discrepancies are also described by Silva

et al. (2007). Mizukami and Smith (2012) analyzed the temporal inconsistencies that occur in gridded precipitation time series for the Sierra Nevada Mountains, due to various factors such as gauge relocation and changes in data processing methods and their impact on hydrologic model output. They proposed an approach to uncover and correct the inconsistencies and found that river flow simulations based on the corrected input data were more consistent and precise than those based on the inconsistent gridded data. Essou et al. (2016) compared temperature and precipitation of three gridded datasets over the continental USA in order to evaluate their differences and their impact on lumped hydrological modelling. They found significant differences between the datasets but their performances regarding the hydrological modelling were overall similar. A summary of the studies mentioned in this paragraph along with their main findings is given in Table 2.1. To the author's knowledge, a specific intercomparison of CaPA with other popular interpolated precipitation grids with a focus on hydrological applications for the easternmost portion of Canada has not yet been reported in the literature. The province of Quebec is especially appropriate to carry such a study because of the importance of hydrological modelling for this part of the world. In fact Quebec is the most important hydropower producer in Canada, which is among the top world hydro-power producers.

This study presents an inter-comparison of three different gridded precipitation datasets over the province of Quebec, Canada. The precipitation gridded datasets are compared with each other and the comparison is carried out for the entire study area. Then, to go one step further, the datasets are also used for the calibration of a lumped conceptual hydrological model on 181 watersheds with different physical and hydro-climatic characteristics. This allows for further comparisons between the gridded datasets in terms of their hydrologic response for a variety of watersheds. The three gridded precipitation datasets available for this research were produced by various interpolation methods in order to provide spatialized information in Canada, even in areas where there are very few weather stations. The first two datasets were interpolated from those weather stations. Details regarding the available stations, the interpolation methods and the spatial coverage of the datasets are given in section 2.3.2 The

third gridded precipitation dataset combines information from weather stations with the outputs of an atmospheric model.

Table 2.1 Major findings in selected previous studies involving interpolated gridded precipitation datasets

Citation for study	Watershed and/or region	Datasets evaluated	Metrics evaluated and/or methods of evaluation	Major findings
Eum et al. (2014)	Athabasca watershed, Canada	<ul style="list-style-type: none"> - North American Regional Reanalysis (NARR) - ANUSPLIN (NRCan) - Canadian Precipitation analysis (CaPA) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cumulative monthly precipitation - Differences in mean annual and seasonal precipitation - Bias - Root mean square error - Quantile–quantile plots - Run-off coefficients. Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Systematic differences between the gridded datasets - Significant differences in hydrologic model simulations
Ensor and Robeson (2008)	Midwestern states, USA	<ul style="list-style-type: none"> - Five Midwestern grid points from the Climate Prediction Center’s Unified Rain Gauge Dataset (URD) 	<ul style="list-style-type: none"> - Annual total - Annual maxima, precipitation frequency for low medium, and high values of precipitation - Return-period analysis. Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Significant increase of the frequency of low precipitation - Great reduction of the frequency of heavy precipitation in gridded
Mizukami and Smith (2012)	Sierra Nevada Mountains of California, USA	<ul style="list-style-type: none"> - Distributed Model Intercomparison Project (DMIP-2) Quantitative Precipitation Estimates (QPE) data - Parameter-Elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM) data 	<ul style="list-style-type: none"> - Time series of cumulative error - Cumulative difference - Standard Normal Homogeneity Test. Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - proposition of an approach to uncover and correct the inconsistencies - more consistency and precision for river flow simulations based on the corrected input data
Essou et al. (2016)	Continental USA	<ul style="list-style-type: none"> - Santa Clara - Daymet - CPC - Mopex Database 	<ul style="list-style-type: none"> - Root Mean Squared Error - Bias - Correlation coefficient - Nash-Sutcliffe Efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> - Significant differences between gridded datasets - Similar performances for lumped hydrological modelling
Tozer et al. (2012)	Australia	<ul style="list-style-type: none"> - Bureau of Meteorology (BOM) - Australian Water Availability Project (AWAP) - SILO dataset 	<ul style="list-style-type: none"> - Differences in annual averages - Differences in annual totals - Root mean square error - Nash-Sutcliffe Efficiency - number of months with less than 1mm - Number of months that are greater than the gauged 99th percentile rainfall. Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Differences between gridded datasets - Marked differences between the gauged and grid cells precipitation - Markedly different runoff responses
Silva et al. (2007)	Brazil	CPC (NOAA’s Climate Prediction Center) gridded precipitation analyses	<ul style="list-style-type: none"> - Grid mean daily - Mean bias - RMS difference - Correlation - Scatter plot. Etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fewer dry days, greater number of low precipitation days, and fewer extreme precipitation events in the gridded analyses

The paper is organized as follows. The study area, the gridded datasets and the observed data are presented and described in section 2.3. In section 2.4, the various metrics and diagrams used to conduct the inter-comparison are detailed as is the hydrological model calibration technique. The results regarding the comparisons between the different gridded precipitation datasets are presented in section 2.5 along with the model simulations results. A discussion and concluding remarks are given in section 2.6.

2.3 Study area, gridded and observed datasets

2.3.1 Study area

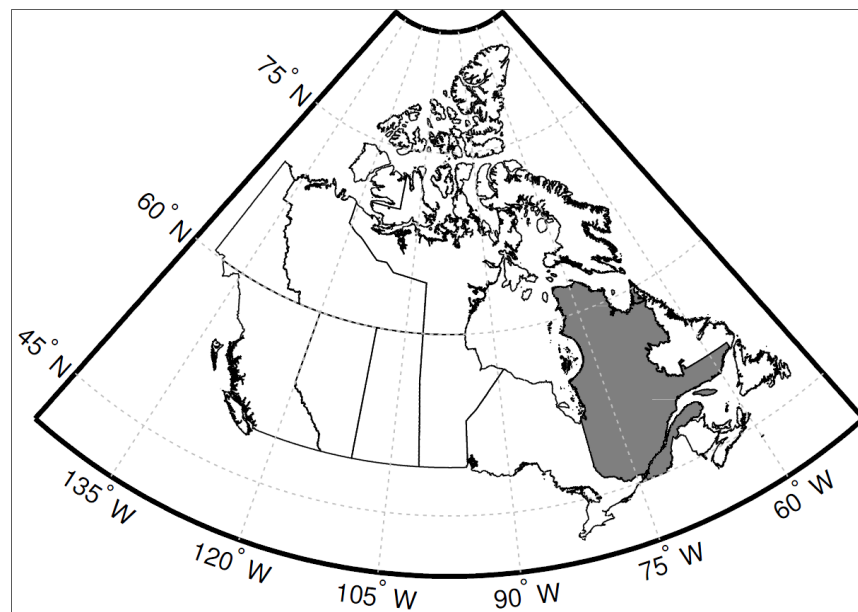


Figure 2.1 Map of Canada, with the province of Quebec displayed in grey

The province of Quebec is located in the eastern part of Canada and covers a surface of over 1.6 million km² (Figure 2.1). The climate is characterized by significant temperature and precipitation variations from region to region, depending on latitude, topography and maritime influence. The province of Quebec comprises 430 major watersheds, 100 of which drain an area larger than 4000 km² (Québec water policy, 2002). Of these 430 watersheds, 181 were selected for the study presented here. The selection was based on the availability of

discharge data for the period of interest (2002-2010). More details are given in the methodology section (section 2.4).

2.3.2 Gridded and observed data

Three different gridded datasets are used for this study, with information accumulated on a daily basis. Those datasets are produced by different institutions with different interpolation methods (see Table 2.2 for a summary of some of the datasets characteristics and Figure 2.2 for the geographical location of stations used by each gridded dataset). The 2002-2010 time period, which is common to all three datasets, is considered in this study.

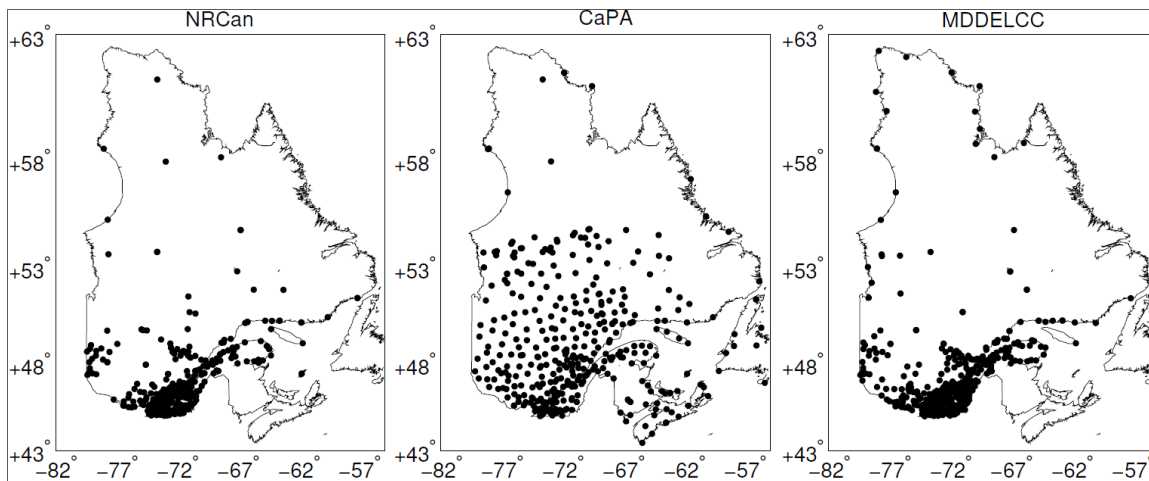


Figure 2.2 Map showing stations location used for each gridded datasets.

The MDDECC grids are based on an exact interpolation method, namely ordinary kriging, while NRCan and CaPA are based on inexact interpolation methods, respectively splines and optimum interpolation (OI, Table 2.2). Exact interpolation methods ensure that the predicted values at points for which measurements are available will be exactly equal to those values. This is clearly an advantage for datasets where the measurements are very reliable and associated to low uncertainty. On the contrary, with inexact interpolation methods, predicted values at points for which measurements are available will not necessarily be equal to measured value. For precipitation, especially when the measurement network is sparse, this

characteristic of inexact interpolation methods is an advantage over exact interpolation methods. For example, precipitation measurements at ground stations do not necessarily correspond to the true precipitation at this location for a number of reasons. In particular, there is the well-known phenomenon of precipitation under-catch (e.g. Pollock, 2012). In addition, some inexact interpolation methods allow for the fusion of two or more sources of information regarding the variable of interest, which is the case here for CaPA. In the case of gridded precipitation products, the location expressed by geographic coordinates represents the grid-cell-centres. The precipitation value is given for the grid-cell area defined by the product resolution, and not a single location as it is the case for the ground station measurements.

2.3.2.1 Gridded dataset from Natural Resources Canada

Natural Resources Canada (NRCan) used the ANUSPLIN algorithm developed by Hutchinson (1995) to apply the thin plate smoothing splines interpolation method to Canadian weather observations. Initially, Hutchinson et al. (2009) interpolated daily minimum and maximum temperature and daily precipitation from 1961 to 2003 for all of Canada on a high-resolution grid (10-km). These daily data were updated by Hopkinson et al. (2011). They extended the data up to 2011 and reduced the residuals caused by the existence of different climatological days. This updated version took into account 7514 observation stations from Environment and Climate Change Canada for 62 years starting from 1950. This dataset is called NRCan throughout this paper (Table 2.2).

2.3.2.2 Gridded dataset from Environment and Climate Change Canada

In order to further reduce the uncertainty that arises from the low density of weather stations in the northern part of Canada, Environment Canada and Climate Change Canada (ECCC) developed an innovative precipitation analysis (CaPA) that combines the data available from weather stations with additional (or secondary) information from short-range precipitation forecasts produced by the Global Environmental Multiscale (GEM) model. Since 2014,

CaPA also assimilates radar observations and satellite data, but this is not the case for the 2002-2010 period on which this study focuses.

Table 2.2 Descriptions of the gridded datasets used in this study

Dataset	Time window	Horizontal resolution	Interpolation Method	Reference
NRCan	1960 - 2011	10 km	Thin plate splines	(Hopkinson et al., 2011)
CaPA	2002 - present	15 km before Oct. 2012, 11 km after	Optimal interpolation	(Mahfouf et al., 2007)
MDDELCC	1961 - present	0.1° (~ 11 km)	Ordinary kriging	(Bergeron, 2015)

More precisely, the CaPA algorithm is based on optimum interpolation (OI; Table 2.2), which is similar to residual kriging (e.g. Baillargeon, 2005). OI involves a spatial covariance function, while kriging involves a variogram. Precipitation quantities can be influenced by explanatory variables such as altitude, latitude or others. Both OI and residual kriging can account for additional information from such explanatory variables during the interpolation. OI produces an analyzed precipitation field, which is a weighted combination of background field and observation field. For CaPA under the 2002-2010 period, the background field is the precipitation forecast from GEM. At ground station locations, those stations are given high credibility (a weight of one or close to one) while at location far away from ground stations the background (GEM) is given more credibility (high weight). The values of the weights in OI are obtained by minimizing the variance of the analysis, under the assumption that background, and observations are uncorrelated and that each is unbiased.

Similarly, in residual kriging, a regression is first performed between precipitation and an external variable. The external variable may well be the background field from a model. In any case, the external variable should have a higher spatial density than the ground stations network. At points where the true value of precipitation is known, the error (or residual) of the aforementioned regression can be computed and kriged to obtain a map of corrections.

The precipitation at any point in space can then be obtained by adding the correction from this map to the result of the regression between precipitation and the external variable.

Brasnett (1999) used OI at the Canadian Meteorological Centre (CMC) to generate screen-level analyses of several meteorological variables. The short-range precipitation forecasts are used as background values. The method performs the analysis on innovations, i.e. the difference between an observation and the corresponding background value. The innovations are then weighted according to their error statistics to provide the precipitation estimates (Fortin et Roy, 2011a; Mahfouf et al., 2007). It should be noted that the version of CaPA used for this study does not include radar and satellite data as only recent CaPA products include those data (2014-present).

The observation database used by CaPA consists of 6h surface precipitation accumulations available in real time at the Meteorological Service of Canada (MSC). These archives include North American data from four networks: the surface synoptic observations (SYNOP), the METeorological Aerodrome Report (METAR), the Cooperative Observer Program (COOP), and the *Réseau Météorologique Coopératif du Québec* (RMCQ). The SYNOP network contains about 300 manual stations and 750 automated weather stations maintained by ECCC and partner organizations. The METAR network contains more than 1300 stations generally located at airports. The COOP is a cooperative network of more than 11,000 volunteers in the U.S. who collect observations in U.S. territory. The RMCQ Network is a cooperative network of private companies and provincial agencies in Quebec comprising about 400 stations (Haghnegahdar et al., 2014).

Finally, note that the spatial resolution of CaPA changes with time. It follows the improvement of the numerical weather prediction model (GEM) on which it is based. On May 18th 2004, the horizontal resolution of the GEM regional deterministic model went from 0.22 degree (approximately 24 km) to 0.1375 degree (approximately 15 km). Further successive refinements of the horizontal resolution were also performed after 2010. The 2002-2010 period therefore includes two different horizontal resolutions. For this study,

CaPA grids were retrieved through an interactive data portal that allows the user to choose from different predefined horizontal resolutions (here 0.1°). Data retrieved in this fashion is not really interpolated in the strict sense but rather downscaled using the nearest neighbour method.

2.3.2.3 Gridded dataset from the government of Quebec

Gridded climate data is also produced by the *Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques* (MDDELCC) *du Québec*. The grid covers the province of Quebec with a spatial resolution of 0.1 degree (approximately 11 km; Table 2.2). The data are interpolated from 329 weather stations of the *Programme de Surveillance du Climat du Québec* (PSC), and 41 ECCC stations located north of the 49th parallel to ensure spatial coverage of the northern part of the province of Quebec. The interpolation is performed by ordinary kriging using a daily spherical variogram. The maximal distance of separation between points for the construction of this variogram is limited to 200 km because it is inferior to the synoptic scale and provides the best results in terms of agreement with ground station measurements (Bergeron, 2015). The data covers the period from 1961 to the present. This dataset is hereafter referred to as MDDELCC.

2.3.3 Observed streamflow data

The river discharge data are extracted from the (cQ)2 hydro-climatic database (Impacts des Changements Climatiques sur l'hydrologie (Q) au Québec, Arsenault et Brissette, 2014) and are used for hydrological modelling (see section 2.4.3). These data are daily average streamflows valid at 00:00 LST.

2.4 Methodology

2.4.1 Regridding for standardization of the three gridded datasets

Several evaluation metrics require a grid-cell-by-grid-cell comparison of datasets. Therefore, a regridding of NRCan to the same grid as MDDELCC was necessary to allow for comparisons. The regridding of CaPA was performed during data retrieval as mentioned in section 2.3.2.2. The following methodology was used for regridding of NRCan: either one or two NRCan grid points (cell centers) fit into one CaPA/MDDELCC grid cell. When only one NRCan cell fit into the CaPA/MDDELCC cell area the value of the NRCan cell was simply assigned to the standardized NRCan grid cell. When there were two NRCan grid points within a CaPA/MDDELCC grid cell area, the two values were averaged to form the standardized grid cell.

2.4.2 General inter-comparison of gridded datasets

This inter-comparison of the gridded precipitation datasets is conducted using daily accumulated precipitation. Special care was taken regarding the time of validity of each gridded dataset. The NRCan grids are based on daily station data from ECCC, which are valid at either at 6:00 UTC (automatic and synoptic stations) or at 13:00 UTC (for manned climatic stations). All stations are pooled together before interpolation and it is considered that the grid is valid at 13:00 UTC. The 6h CaPA product that was used in this study was cumulated on 24h00 periods ending at 12:00 UTC. Similarly, for the MDDELCC grids, hourly precipitation data are collected from ground stations and cumulated. The MDDELCC grids are valid at 13:00 UTC (see Table 2.2).

The first comparison between grids involves the analysis of annual, seasonal (winter: DJF, spring: MAM, summer: JJA, autumn: SON) and monthly metrics computed with, or between, the different datasets. The results are either presented as maps for the entire provincial territory, or as curves as a function of time. The following metrics are used:

Precipitation annual cycle: annual cycle of precipitation provides relevant information about the distribution of the precipitation throughout the year (variation, peaks, etc.). The mean total amounts of precipitation are first computed for each month of the year in each grid cell (twelve values per grid cell) for the 2002-2010 period. The monthly values are then spatially averaged over the entire province, for each dataset (one curve per dataset).

Relative bias: the grid-cell-by-grid-cell cumulative relative differences (RD) are computed using the daily precipitation time series of two datasets. Seasonal time series are considered (one map per season for every combination of two datasets).

Ratio of variances: the grid-cell-by-grid-cell ratio of variances (RV) are computed between the daily precipitation time series of two datasets. Seasonal time series are considered (one map per season for every combination of two datasets).

2.4.3 Hydrological modelling: input data and model calibration

When comparing different gridded precipitation datasets, it might be difficult to obtain data from ground stations that are completely independent from the gridded products. In fact, when designing a new gridded precipitation product, one typically wishes to use all the available information so very few ground stations, if any at all, are left out. To avoid this problem and allow for an independent evaluation of each gridded dataset for hydrological purposes, here watersheds are considered as large independent “gauges” capable of measuring a transformation of precipitation (e.g. Oudin et al., 2006). Consequently, a hydrological model can be fed by gridded precipitation dataset *A* or by gridded dataset *B*. Corresponding simulated streamflow series can each be compared to observed series. If series simulated from *A* match the observed streamflow series better than simulated series from *B*, then gridded dataset *A* is of superior quality compared to gridded dataset *B*. Of course this framework for comparison rests on a series of assumptions: the hydrological model must be an adequate representation of the watershed, ground-water and surface water exchanges are almost time-invariant or very well represented by the model and all measurements (for instance streamflow) are error-free.

Here the lumped conceptual HSAMI hydrological model (Fortin, 2000) was chosen to simulate daily discharges, using daily precipitation from each of the three gridded datasets in turn. HSAMI is a reservoir-based model that simulates the main hydrological processes: snowmelt, evapotranspiration, infiltration and runoff, using simple water balance principles and empirical equations for snow processes and potential evapotranspiration. HSAMI is utilised to simulate natural inflows on 181 watersheds with surface areas ranging from 301 km² to 69191 km². As mentioned above, the streamflows are valid at 00:00 LST and the precipitation from all gridded datasets are valid at 07:00 or 8:00 LST (12:00 or 13:00 UTC). To avoid the non-causal response in small watersheds where the streamflow will respond before the rain starts, the watersheds with an area of 300 km² or less were removed.

Since it is a lumped model, precipitation and temperature inputs must be spatially averaged over each watershed before being fed into the model. The Thiessen's polygons method (Thiessen, 1911) was used to calculate the average data (precipitation and temperature) on watersheds for each dataset. It should be recalled that the aim is to evaluate the similarities and discrepancies in the streamflow simulations from different precipitation inputs. The CaPA dataset only provides precipitation, while MDDELCC and NRCAN provide both precipitation and temperature. The temperature from the NRCAN datasets was used with all three precipitation datasets, as NRCAN is the one most widely used in the literature (e.g. in Chen et al. 2011, Shrestha et al. 2012, Troin et al. 2015).

HSAMI has been used in an operational framework for short-term flow forecasting by Hydro-Quebec for over 30 years. It has also been used in climate change impact studies (Chen et al., 2012; Minville et al., 2009; Poulin et al., 2011). HSAMI comprises a total of 23 free parameters that need to be calibrated. Model calibration is conducted automatically using the covariance matrix adaptation evolution strategy (CMAES) algorithm (Hansen et Ostermeier, 1996; 2001). Arsenault et al. (2013) tested ten stochastic optimisation methods and found that the CMAES algorithm was an optimal choice for calibrating the HSAMI model. The Nash-Sutcliffe efficiency criterion (NSE, Nash et Sutcliffe, 1970) is used to

evaluate the performance of the model simulations during calibration. First the even years are used for calibration while the odd years are used for the validation. The calibration is then performed using the odd years while validation is performed on the even years. For each precipitation dataset and for each watershed, five parameter sets are obtained using the even/odd approach and five parameter sets are obtained using the odd/even approach, for a total of 10 different parameter sets. The overall best parameter set according to NSE in the validation period is selected. The following metrics are used to compare simulated and observed streamflows:

- Differences in NSE criterion between series of simulated streamflow based on different gridded precipitation datasets for the validation period;
- Maps showing performance in terms of NSE for watersheds and for each gridded precipitation dataset;
- Relative bias (RB), correlation coefficient (CC) and ratio of variance (RV) between simulated and observed streamflow time series;

Mean absolute error between simulated and observed streamflows below the 10th (MAE10) and above the 90th (MAE90) percentile of the observed flows for each precipitation gridded datasets.

2.5 Results

2.5.1 General inter-comparison of gridded datasets

To examine the differences between the three gridded precipitation datasets, the results from the metrics introduced in section 2.4.2 are first presented. Figure 2.3 shows the spatially averaged annual precipitation cycles (mm/month) from the three datasets. The difference between NRCan and the two other datasets is visible. However, here CaPA and NRCan appear to be more synchronous with each other than with MDDELCC, mostly in the winter months (January, February), and in the months of May through October.

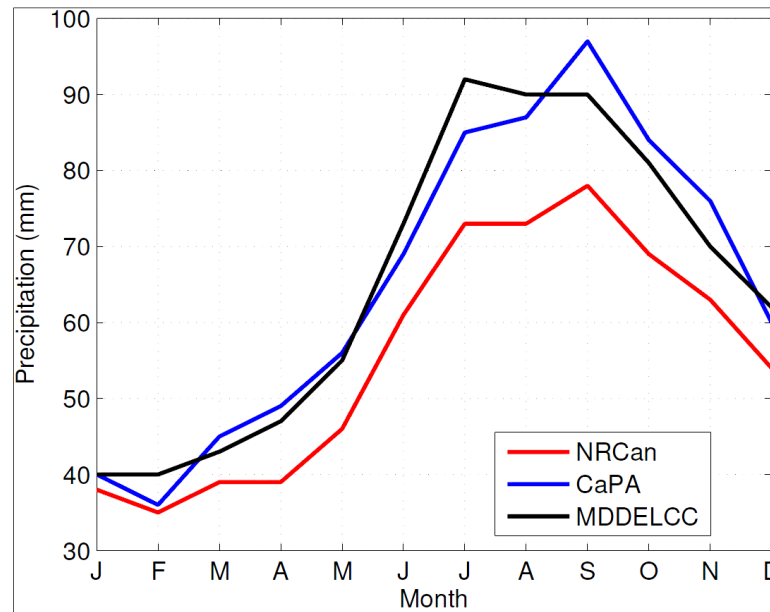


Figure 2.3 Mean annual cycle of precipitation (mm/month) for the 2002-2010 period from the NRCan, CaPA and MDDELCC datasets

Figure 2.4 provides an overview of the spatial distribution of the 9-year mean seasonal relative biases (%) between the three precipitation datasets. Generally, CaPA and MDDELCC present a wet bias with respect to NRCan, mostly in the center and north of the province for all seasons (rows 1 and 2 in Figure 2.4), except for CaPA in the wintertime showing a dry bias with respect to the NRCan dataset. This dry bias can also be seen by the more pronounced wet wintertime bias of MDDELCC with respect to CaPA (3rd row in Figure 2.4). Wet biases of more than 50% are obtained for CaPA and MDDELCC compared to NRCan in the central part of Quebec, more precisely, over the Saguenay-Lac-Saint-Jean watersheds for all seasons (dark blue spot in rows 1 and 2 in Figure 2.4). NRCan strongly underestimates the precipitation in this region compared to the other datasets (this particular aspect is addressed in the discussion section).

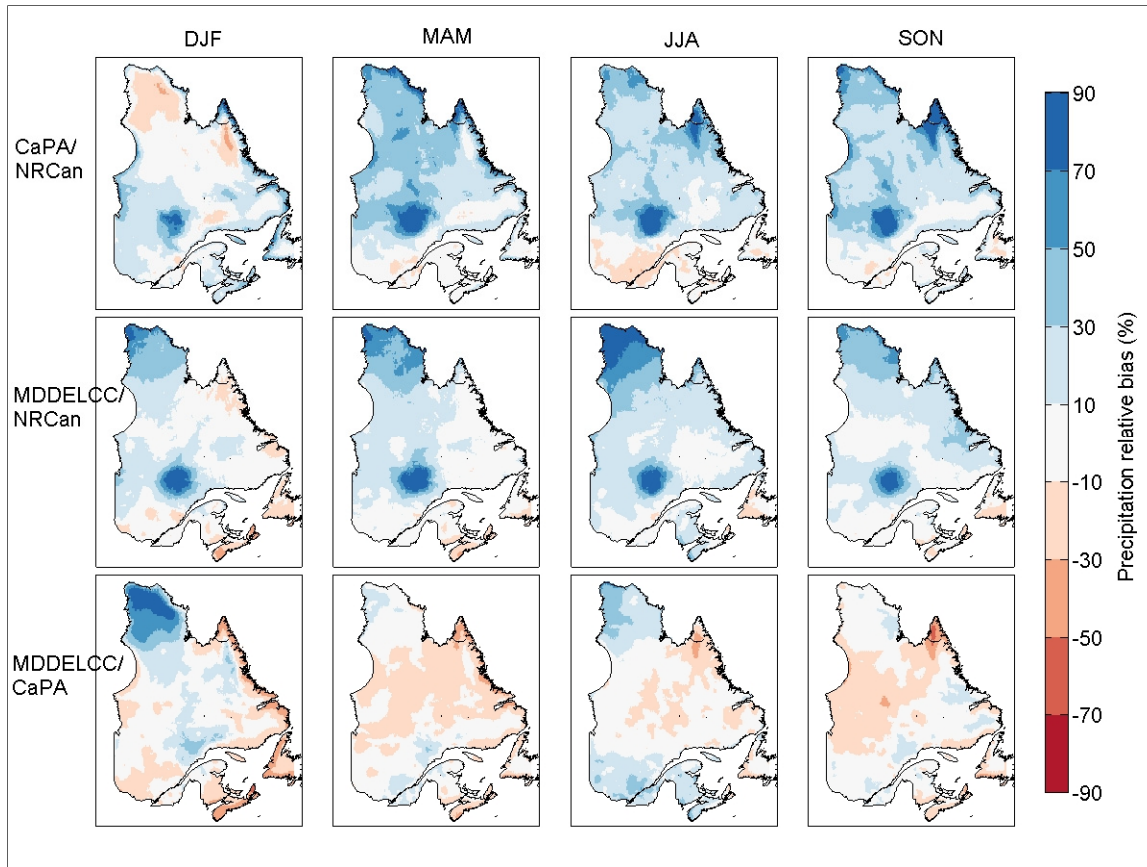


Figure 2.4 Mean seasonal precipitation relative (%) bias for the period 2002-2010. Upper row: CaPA/NRCan, middle row: MDDELCC/NRCan, lower row: MDDELCC/CaPA. Vertical panels represent seasons: Winter (DJF), Spring (MAM), Summer (JJA) and Autumn (SON)

In contrast, precipitation amounts over parts of southern Quebec are quite similar for all datasets in almost all seasons, the only difference occurring in the summertime with a dry bias for CaPA compared to NRCan, and a wet summertime bias for MDDELCC compared to CaPA. Given that there is a high density of weather stations in southern Quebec, it is expected that the biases here would be the lowest, whatever the season. A possible reason for the different behaviors found in the summertime is, that summer rainfall exhibits particularly high spatiotemporal variability and the interpolation methods used to produce each dataset capture these structures differently. In addition, the weather stations used are not always the same for the three gridded datasets (as exposed in section 2.3.2).

For every season and for each pair of gridded datasets, the ratio of variances of time series was also calculated. The results are shown in Figure 2.5. Globally, in the southern part of Quebec, the ratio of variances is around unity. This is again an expected result, given the high spatial coverage of this part of Quebec by weather stations. Moving northward, differences arise in the temporal variability of precipitation. For CaPA and NRCan, the ratio of variances greatly exceeds unity (above 1.5) in much of northern Quebec, except in the winter season where the ratio of variances is below unity in the far north of Quebec. Thus, it appears that NRCan underestimates the temporal variability of precipitations compared to CaPA, except in winter when it seems to slightly overestimate the variability.

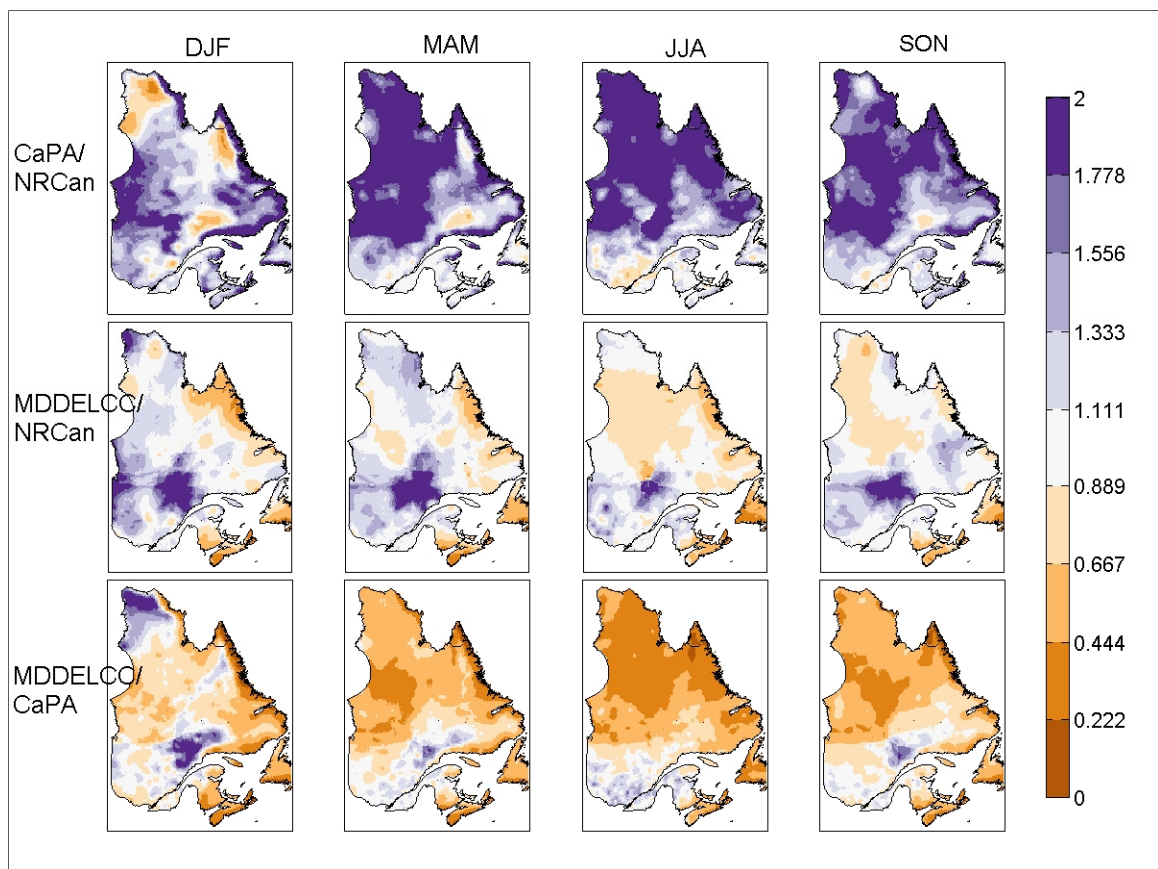


Figure 2.5 Seasonal relative variance between all precipitation time series of the period 2002-2010. Upper row: CaPA vs NRCan, middle row: MDDELCC vs NRCan, lower row: MDDELCC vs CaPA. Vertical panels represent seasons: Winter (DJF), Spring (MAM), Summer (JJA) and Autumn (SON)

Meanwhile, the variability is quite similar between MDDELCC and NRCan, again except around the Saguenay-Lac-Saint-Jean region where NRCan strongly underestimates it. MDDELCC also seems to underestimate the variability compared to CaPA in the center and northern parts of Quebec.

Whether for the map of relative biases, or the map of ratio of variances, the most considerable discrepancies between the three datasets are found in central and northern Quebec and over the Saguenay-Lac-Saint-Jean region.

2.5.2 Hydrological modelling

2.5.2.1 General inter-comparison of simulated flows

Figure 2.6 shows the distributions of the differences in NSE scores for the 181 watersheds between each pair of precipitation gridded datasets used as input to the HSAMI model. The performances are generally comparable as the median, the first and the third quartiles are quite similar. The differences in performance are mostly associated with the outliers.

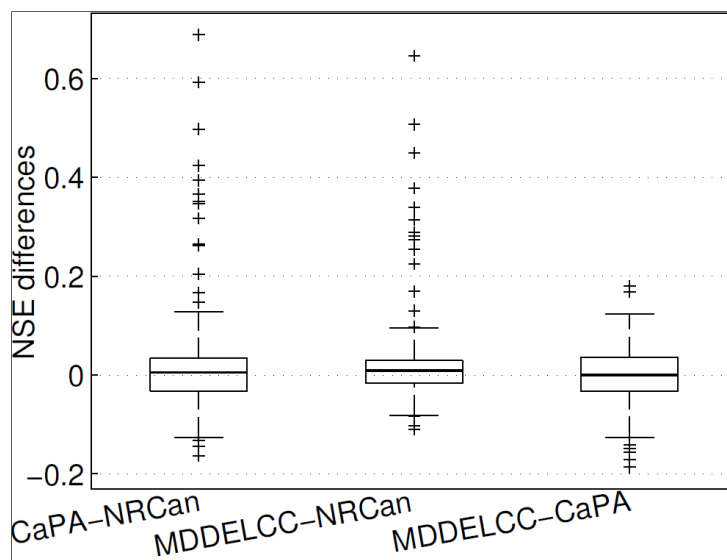


Figure 2.6 Boxplots of differences in NSE between each pair of gridded datasets.

There are many positive outliers when NRCan is involved in the differences of NSE, revealing a decrease in performance when NRCan grids are used as input for HSAMI compared to CaPA and MDDELCC. The differences of NSE between CaPA and MDDELCC are small as the values lie between -0.2 and 0.2.

To better visualize the differences from the watersheds' perspectives, performance maps were made with a color code displaying the ranges of the NSE values, shown in Figure 2.7. The watersheds that perform well are common to all three data sets (for example, the large watersheds of central and northern Quebec with NSE values greater than 0.8). The poorer performance noted in Figure 2.7 for NRCan is mainly attributable to watersheds located over the Saguenay-Lac-Saint-Jean region (red area in the leftmost panel of Figure 2.7). Here, the NSE is less than 0.5 for most of the watersheds when NRCan precipitation is used as input to the HSAMI model, which is not the case for CaPA and MDDELCC (center and right panels in Figure 2.7, respectively); instead they have NSE values that exceed 0.7 for the same watersheds. This could be related to the large differences that were observed in section 2.5.1 between the NRCan grids and the two others for the relative bias and temporal variability.

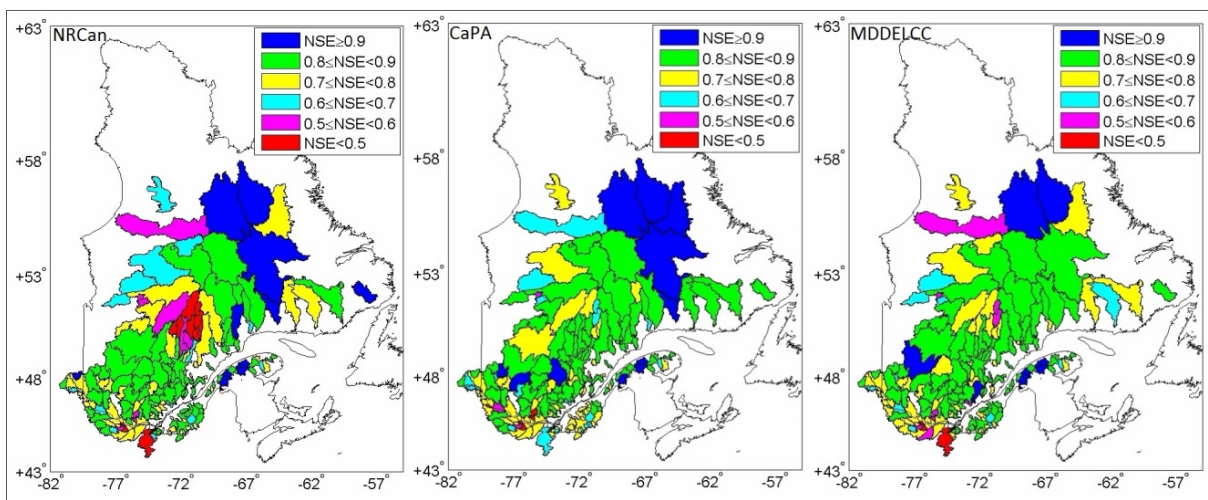


Figure 2.7 Maps representing the performance of each of the 181 watersheds in terms of the NSE for NRCan, CaPA and MDDELCC precipitation inputs

Figure 2.8 identifies the gridded datasets that provide the best performance in term of NSE for each watershed. Watersheds shown in red are those for which NRCan precipitation grids lead to best performance in terms of simulated-observed streamflow comparison. Similarly, watersheds in blue are those for which CaPA grids offer superior performances and watersheds in green are those for which MDDELCC grid are superior. Note that for some watersheds, the difference between one gridded dataset or another in terms of NSE is very small. This is the case for instance for the Caniapiscau and À la Baleine watersheds for which high NSE values are achieved using any of the gridded datasets (see the two dark blue watersheds in all three panels of Figure 2.7, at 56 degree north of latitude). However, the dominance of CaPA is not statistically significant for the 181 watersheds. Indeed, the Kruskal-Wallis test was conducted on three groups of NSE. The p-value obtained is 0.2458, indicating that the Kruskal-Wallis test does not reject the null hypothesis that all three groups of NSE come from the same distribution at a 5% significance level.

The predominance of CaPA is obvious, particularly for large watersheds and those located in the central and northern part of Quebec. NRCan shows best performance for 44 watersheds representing 11% of the total watersheds area, CaPA for 70 watersheds representing 64% of the total watersheds area and MDDELCC for 67 watersheds that represents 25% of the total watersheds area. NRCan shows worst performance for 69 watersheds representing 40% of the total watersheds area, CaPA for 65 watersheds representing 24% of the total watersheds area, and MDDELCC for 47 watersheds representing 35% of the total watersheds area. CaPA shows worst performance particularly for small watersheds located in the southern part of Quebec, while MDDELCC shows the best performances in the watersheds located on the south shore of the St. Lawrence River.

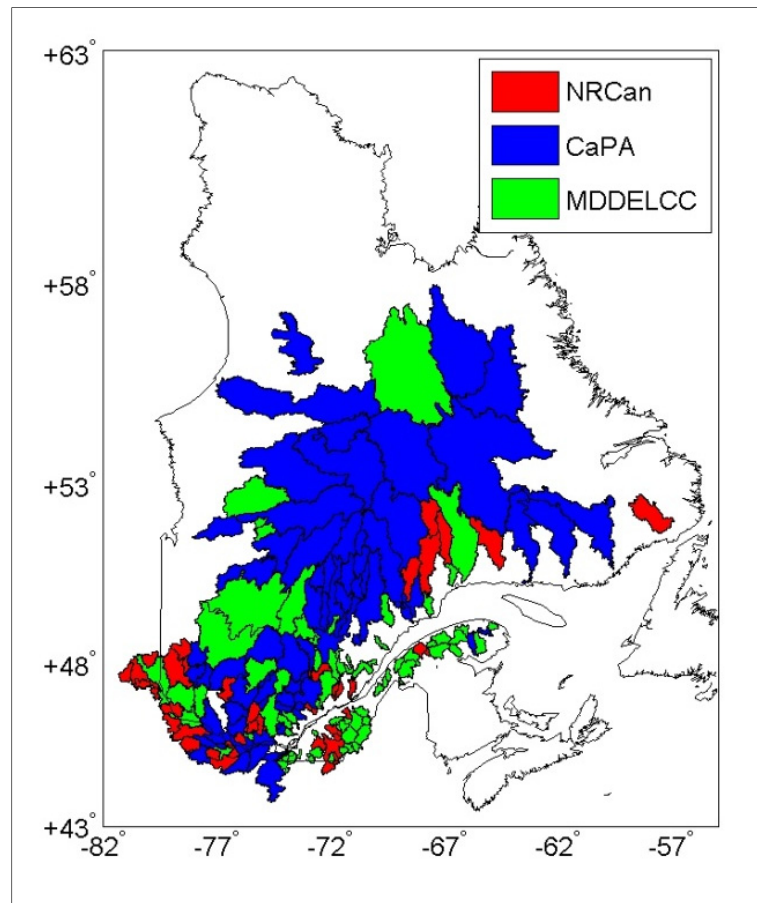


Figure 2.8 Map showing which gridded dataset provided the best performance in terms of NSE.

Figure 2.9 links geographical attributes of the watersheds with modelling performances. The distribution of area, mean longitudes and latitudes of the watersheds that show the best performance in term of NSE for each gridded datasets is shown. From this figure it can be concluded that the watersheds for which NRCan outperforms the other gridded datasets are mainly small size watersheds located in the southern part of the province of Quebec. For CaPA, the best performances are obtained with large watersheds located in the central and northern parts of the province. Watersheds that show best performance with MDDELCC have various sizes with a majority of small watersheds, mainly located in the south-eastern part of the province, as also shown in Figure 2.8. For instance, on the South shore of the St. Lawrence River, MDDELCC shows best performance in 75% of the watersheds in this area.

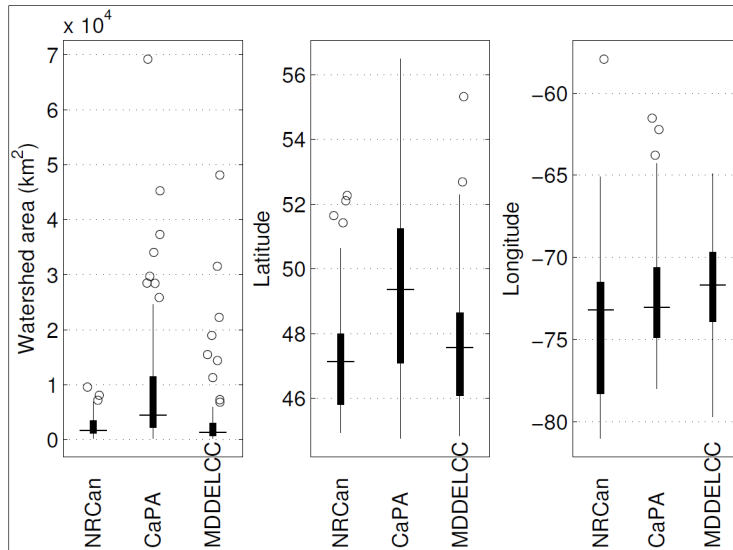


Figure 2.9 Boxplots showing the distribution of the watershed area, the mean longitudes and the mean latitudes of the watersheds that show best performance in term of NSE for each gridded datasets.

2.5.2.2 Analysis of performance improvements

All watersheds for which the NSE is below 0.6 were inventoried and reported in Table 2.3 and Table 2.4, including their areas and mean annual precipitation as well as their relative bias. The watersheds are identified by the number of their hydrometric station. NSE values of less than 0.6 obtained with CaPA or MDDELCC are also systematically less than 0.6 with NRCan.

Table 2.3 presents the watersheds that show poor performance with all three gridded datasets. Table 2.4 presents the watersheds for which NSE values obtained with NRCan improved significantly with CaPA and MDDELCC. For these watersheds, the values of NSE increased from 0.40 with NRCan to 0.81 with CaPA, to 0.76 with MDDELCC, on average. Moreover, it can be noted that for these watersheds, NRCan shows a dry bias of at least 30% of the total precipitation compared to CaPA and MDDELCC. The poor performance of these watersheds with NRCan could be linked to NRCan's severe underestimation of precipitation compared to other gridded data.

Table 2.3 NSE values and total precipitation for the poor performing watersheds with at all the three gridded datasets

Gauge No.	Area (km ²)	NSE			Mean annual precipitation (mm)			Relative bias (%)	
		NRCan	CaPA	MDDELCC	NRCan	CaPA	MDDELCC	$\frac{NRCan}{CaPA} - 1$	$\frac{NRCan}{MDDELCC} - 1$
093801	34057	0.59	0.66	0.52	690	855	754	-19.25	-8.42
947681	9871	0.50	0.61	0.47	1032	1096	1086	-5.80	-4.93
948474	1230	0.53	0.56	0.60	918	843	926	8.89	-0.84
953977	1374	0.19	0.11	0.19	912	896	954	1.79	-4.45
953984	1232	0.55	0.49	0.51	1047	944	987	10.87	6.08
953985	645	0.51	0.35	0.53	1038	975	1013	6.45	2.49
954043	1977	0.59	0.63	0.63	718	982	868	-26.91	-17.29
954044	891	0.56	0.53	0.56	712	954	850	-25.32	-16.17

Table 2.4 NSE values and total precipitation for the poor performing watersheds with at least one of the three gridded datasets. These watersheds show a significant improvement with respect to one of the three gridded datasets

Gauge No.	Area (km ²)	NSE			Mean annual precipitation (mm)			Relative bias (%)	
		NRCan	CaPA	MDDELCC	NRCan	CaPA	MDDELCC	$\frac{NRCan}{CaPA} - 1$	$\frac{NRCan}{MDDELCC} - 1$
062114	8667	0.55	0.90	0.83	609	996	987	-38.84	-38.27
062201	4849	0.02	0.62	0.53	499	1001	1027	-50.17	-51.41
062208	11518	0.44	0.80	0.75	526	1007	969	-47.74	-45.69
062209	3684	0.47	0.73	0.72	541	987	1037	-45.18	-47.84
400006	1889	0.39	0.89	0.84	515	1003	1006	-48.62	-48.75
400007	7641	0.08	0.76	0.72	538	1016	957	-47.06	-43.76
400008	2588	0.43	0.82	0.77	612	987	986	-37.99	-37.95
400009	3183	0.50	0.85	0.78	557	1001	989	-44.33	-43.61
953959	1698	0.44	0.86	0.82	534	983	1049	-45.67	-49.06
954003	3134	0.58	0.89	0.85	618	999	993	-38.12	-37.71
954046	18252	0.53	0.80	0.76	636	1011	944	-37.12	-32.65

In effect, the results in section 2.5.1 not only report the severe precipitation underestimation by NRCan, but also the temporal variability relative to CaPA and MDDELCC in the areas where most of these poor performance watersheds are found. For some watersheds presented in Table 2.3 and Table 2.4 it would be necessary to question the quality of the river flow records, as the poor performance could be caused by the use of erroneous or low quality streamflow data for calibration. For instance, this is the case for instance for the Manouane River (gauge number 062209 in Table 2.4). The streamflows recorded for this river are known to be of poor quality because they are reconstituted from a water balance equation and subject to random fluctuations attributable to wind on the reservoir where the level is measured.

2.5.2.3 Bias, correlation and relative variance of streamflows

Figure 2.10 shows the scatterplots that indicate the correspondence between indicators for different simulated streamflows such as relative bias (RB), correlation coefficients (CC) and ration of variances (RV). These indicators are calculated between simulated and observed streamflows for the validation period. Regarding the RB, the scatterplots show a tendency of the values to be shifted on the side of NRCan when comparing NRCan with CaPA and MDDELCC, and on the side of MDDELCC when comparing MDDELCC with CaPA (Figure 2.10, 1st row). This implies that for the majority of watersheds, the bias for simulated streamflows is more important for NRCan than for CaPA and MDDELCC. The RB is also more important for MDDELCC than for CaPA. Regarding the CC (Figure 2.10, 2nd row), scatterplots show a tendency of the values to be shifted on the sides of CaPA and MDDELCC. This indicates that the streamflows simulated from CaPA and MDDELCC precipitation are more correlated to the observed streamflows than the ones simulated from NRCan for most of the watersheds. For the RV (Figure 2.10, 3rd row), the scatterplots show a tendency of the values to be dispersed symmetrically around the diagonal. This means that RVs are not systematically influenced by a given precipitation input datasets.

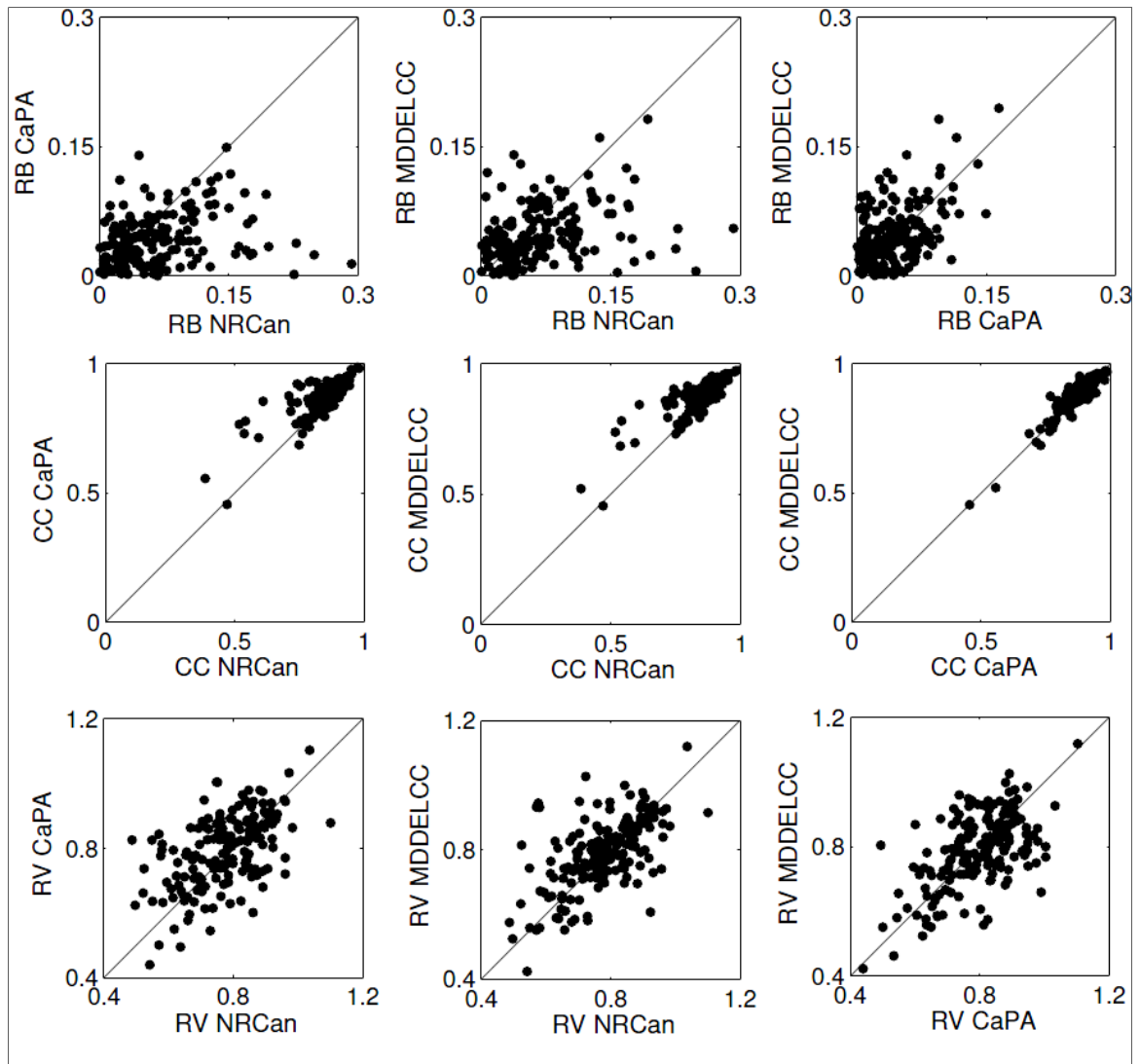


Figure 2.10 Scatter plots of relative biases (RB), correlation coefficients (CC) and ratio of variance (RV) between simulated and observed streamflows for each of the three gridded datasets against the two others.

In short, this analysis reveals that the simulated streamflows from CaPA and MDDELCC input datasets show the lower bias and are more correlated to the observed streamflows than the input precipitation from NRCAN. CaPA show the lowest bias for simulated streamflows.

2.5.2.4 Comparison of modelling performance for extreme low and high flows

The mean absolute simulation errors in hydrological simulation based on each gridded dataset are calculated for streamflow values below the 10th percentile (MAE10) and above the 90th percentile (MAE90) of the observed streamflow series (all watersheds). The results are presented in the scatterplots of Figure 2.11. For the MAE10, all values are close to the diagonal. This implies that all gridded precipitation datasets are comparable in terms of quality for dry periods. For the MAE90, the scatterplots show a slight tendency of the values to be shifted on the side of NRCan when comparing NRCan with CaPA. They are also shifted on the side of MDDELCC when comparing MDDELCC both with CaPA and with NRCan. This implies that CaPA always leads the lowest (best) MAE90 values.

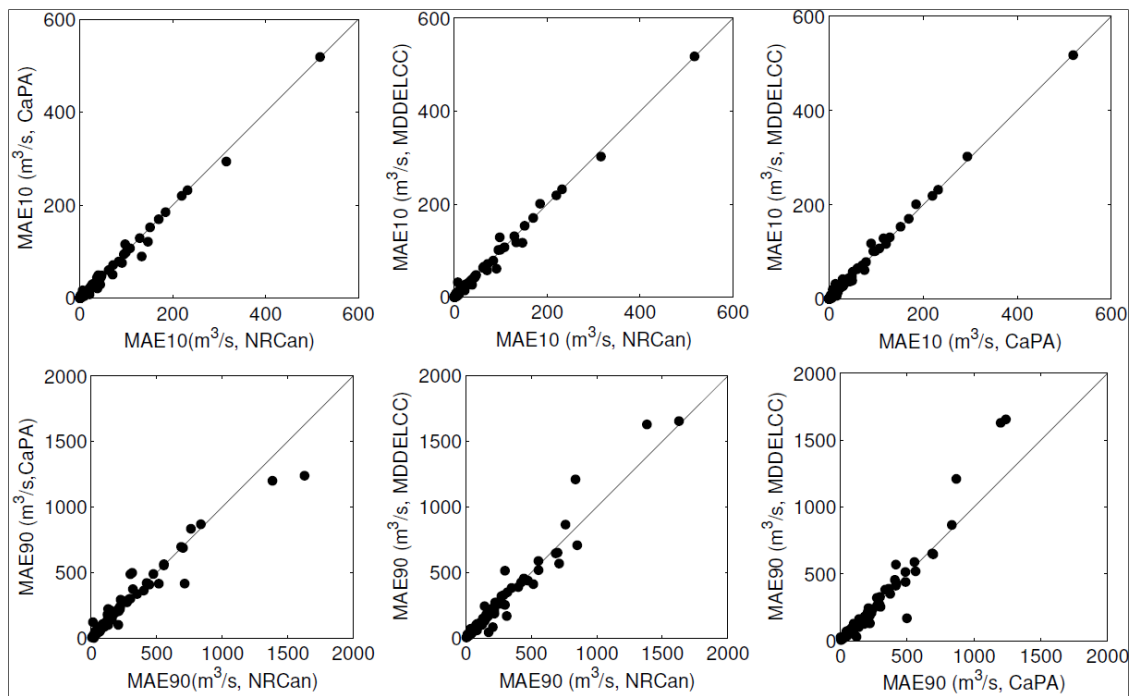


Figure 2.11 Scatter plots of mean absolute error between simulated and observed flows below the 10th (MAE10) and above the 90th (MAE90) percentile of the observed flows for each of the three gridded datasets against the two others.

Since adequate simulation of high streamflow values by hydrological models are of great interest for many practical application (flood forecasting, for instance), this is clearly an

important advantage of CaPA over the two other gridded datasets. Probably because of this combination of model background with ground station observations, CaPA is better able to capture all precipitation events over entire watersheds and allow for a more accurate representation of high flows by HSAMI.

2.6 Discussion and conclusions

High-resolution gridded precipitation datasets have been developed by agencies throughout the world to facilitate hydrological modelling in areas where ground-based observations are scarce. These grids can be obtained from the interpolation of available ground station observations using a variety of methods (kriging, splines and others). It is also possible to combine ground observations with alternative information, such as radar precipitation measurements or atmospheric model outputs to refine the description of the precipitation field.

Still, the choice of the most appropriate gridded dataset for a specific application can be a significant challenge, especially in areas where the spatial and temporal density of observations is low, such as in remote areas like the northern parts of Canada. This study focuses on analyzing the quality of three gridded precipitation datasets, NRCan, CaPA and MDDELCC, for hydrological modelling purposes. Two of those datasets are obtained solely from spatial interpolation using weather stations, while the third combines information from weather stations and the GEM atmospheric model. The study area covers the entire province of Quebec, Canada. Gridded datasets were first compared with one another.

Spatial and temporal variabilities show significant differences in the northern part of Quebec. Regarding the differences in spatial variability among datasets, the results show that NRCan strongly underestimates precipitation in the central and northern parts of Quebec compared to CaPA and MDDELCC. Important differences between the three gridded datasets in the northern part of Quebec were exposed (Figures Figure 2.4 and Figure 2.5). More specifically, the results show that the NRCan grids are of poor quality over the Saguenay-Lac-Saint-Jean

area (blue area in the center of the province, second line of Figure 2.4) compared to the two other gridded datasets. NRCan grids are obtained using only ECCC weather stations, MDDELCC uses a few more stations, while CaPA incorporates a larger number of stations including stations in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region (see section 2.3.2). It was also found that NRCan and MDDELCC grids underestimate the temporal and spatial variabilities of precipitations relative to the CaPA dataset for all seasons but winter. The difference in terms of temporal variability between CaPA and the other two datasets (Figure 2.5) is especially striking. CaPA displays high variance compared to NRCan while the MDDELCC has a lower variance compared to CaPA during winter and autumn months along the eastern coast. It was already concluded from Figure 2.3 that the precipitation computed from CaPA and MDDELCC are probably the better estimates of the truth.

During a second phase of the study, the three gridded precipitation datasets were used to calibrate and validate the hydrological model HSAMI on 181 watersheds displaying various physical characteristics and hydro-climatic conditions. This step made it possible to evaluate and compare the model's response using each gridded dataset and allow for an objective comparison of interpolated precipitation datasets when no independent ground stations are available.

The assumption regarding a more detailed representation of the precipitation field in CaPA than in the other two gridded datasets (as mentioned above) was verified indirectly through hydrological modelling. Results show that the use of NRCan grids as precipitation inputs for the model leads to lower performances in terms of the NSE and for bias. This is most likely due to the underestimation of precipitation. In addition, Figures Figure 2.6 and Figure 2.8 show that the use of CaPA leads to the best performances for most watersheds, mainly located in the center and north of the province of Quebec. Some important advantages were also found for CaPA as the lowest bias with respect to the observations were obtained for the simulation of the streamflows in general and for the simulation of high flows in particular using CaPA as the precipitation field.

Ultimately, the results of this study illustrate how the combination of atmospheric model outputs and observations from weather stations can benefit hydrological modelling. The resulting grids are indeed able to better capture the spatial and temporal variability of the precipitation field, especially for areas where weather stations are scarce. Although CaPA is a Canadian product, the concept of combining ground-based observations with model outputs is quite generalizable. Similar datasets can be produced for almost any area around the globe. It is therefore expected that similar results could be obtained for other areas of the world with low weather station density.

In the light of those results, if one was to select a single precipitation dataset, the general recommendation out of the analysis performed in this study is that gridded precipitation from CaPA should be prioritized for hydrological studies over the province of Quebec. MDDELCC comes out as the second best overall option, but the MDDELCC product does outperform CaPA on the south shore of the St. Lawrence River. This is not surprising, since the station density is clearly higher in this region in the MDDELCC product than in the CaPA product (see Figure 2.2). Hence in this region it is recommended to use the MDDELCC product. However, CaPA is still an evolving product. Since November 2014, CaPA has included the assimilation of radar data in its interpolation scheme. According to (Fortin et al., 2015), this led to further improvements in the accuracy of the resulting precipitation grids in area covered by Doppler radar, such as most of the south shore of the St. Lawrence River. This continuous improvement of CaPA is both a blessing and a curse for hydrology, since the modifications in the assimilation scheme are not retrospectively applied to previous years: consistent datasets based on the exact same sources and interpolation scheme can only cover relatively short timespans. For instance, at the time of writing this paper, there are less than 2 years of available data which incorporate radar information. This short period limits further verifications for hydrological purposes, at least for the moment, but it does not invalidate the above recommendation.

The density of the weather stations networks used by NRCan and MDDELCC are quite similar for the time period under study (2002-2010). Both precipitation datasets show strong

similarities in the southern part of Quebec and differences appear gradually as the density of weather stations decreases, that is to say when moving from south to the North. Several hypotheses could justify the differences between these two precipitation databases in central and northern parts of the province of Quebec.

It should be recalled that NRCan employs thin plate smoothing splines (ANUSPLIN) while MDDELCC uses ordinary kriging with daily variogram for interpolation. Whatever the interpolation method used, the estimation of precipitation field is very unreliable when measuring stations network density is low (Mizukami et Smith, 2012). Differences may well occur in the processing of information available in different interpolation schemes. While NRCan and MDDELCC draw from similar station networks, NRCan incorporates elevation in its interpolation scheme, which is not the case for MDDELCC, and this can lead to different results. In particular, differences are reported in this study for the Saguenay-Lac-St-Jean region. It could be hypothesized that the strong variation in the topography between the plain of Lac-Saint-Jean and the surrounding regions are in the cause. Indeed, the plain of Lac-Saint-Jean has an altitude of around 200 m above the sea level, and is surrounded by highlands or the massifs which can reach an altitude greater than 1000 m above sea level.

The application of gridded datasets for hydrological modelling has been conducted in this study using only lumped model. For large watersheds, it would be interesting to use a distributed model to further assess the influence of the three gridded precipitation datasets in the spatial representation of the hydrological cycle. In addition, following the growing body of literature advocating for ensemble rather than deterministic hydrological modeling frameworks (e.g. Krzysztofowicz, 2001), multiple gridded precipitation datasets could be used jointly as successive inputs to one (or more) hydrological model(s). Each precipitation product contains useful information and combining several datasets can lead to improved streamflow simulations as shown for instance by Arsenault et al. (2016). Further studies should concentrate on these issues.

2.7 Acknowledgements

We would like to acknowledge the Data Access Integration (DAI) team for providing the data and technical support regarding CaPA. The DAI Portal is maintained through collaboration between the Canadian Center for Modelling and Analysis (CCCma), the Research Division in Numerical weather prediction (RDN) and the Adaptation and Climate Monitoring unit of the Meteorological Service of Canada, as part of the Atmospheric Sciences and Environmental issues unit. We also thank the *Programme de Surveillance du Climat* of MDDELCC for graciously providing the data and guidance. Funding for this research was provided by NSERC's Collaborative Research and Development Grants program in conjunction with Hydro-Québec, Ontario Power Generation, and Rio Tinto. The authors would like to thank three anonymous reviewers for their insightful comments which helped shape the paper in its current form.

CHAPITRE 3

INFLUENCE DES PRÉCIPITATIONS INTERPOLÉES SUR LA PERFORMANCE D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DISTRIBUÉ SUR UN GRAND BASSIN VERSANT

3.1 Contexte et présentation de la région d'étude

Les précipitations sont des intrants des modèles hydrologiques considérés comme ayant un grand impact sur la simulation du débit. Ainsi, une amélioration de la qualité des intrants de précipitation est susceptible d'améliorer grandement la prévision hydrologique (Carpenter et Georgakakos, 2006). Moradkhani et Sorooshian (2008) affirment d'ailleurs que la clé de l'amélioration de la modélisation pluie-débit réside dans une véritable caractérisation de l'incertitude sur les précipitations. Cette incertitude est généralement considérée comme majeure dans le processus de prévision des crues. Ainsi, l'incertitude reliée aux variabilités spatiale et temporelle des précipitations peut diminuer la précision des sorties des modèles hydrologiques, surtout pour les grands bassins ou les régions montagneuses.

La

Figure 3.1 présente le bassin versant du Lac-Saint-Jean (LSJ) et ses sous-bassins (à gauche) et leur position géographique sur le Québec (à droite). Ce bassin versant est situé dans le centre sud de la province de Québec au Canada. Son débit moyen annuel à l'exutoire est de 850 m³/s. D'une superficie 45432 km², ce bassin versant représente environ 60% d'un système hydrographique plus vaste, le bassin versant du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Le Tableau 3.1 indique les sous-bassins qui seront considérés dans ce travail. Rio Tinto (RT) exploite quatre usines d'aluminium dans cette région. Pour répondre à la forte demande en énergie pour la production d'aluminium, RT gère également six centrales hydroélectriques, ainsi que de nombreux barrages et ouvrages hydrauliques. Dès lors, l'intérêt d'estimer convenablement les précipitations sur le bassin versant, donc d'améliorer la précision dans la simulation des débits en rivières devient évident.

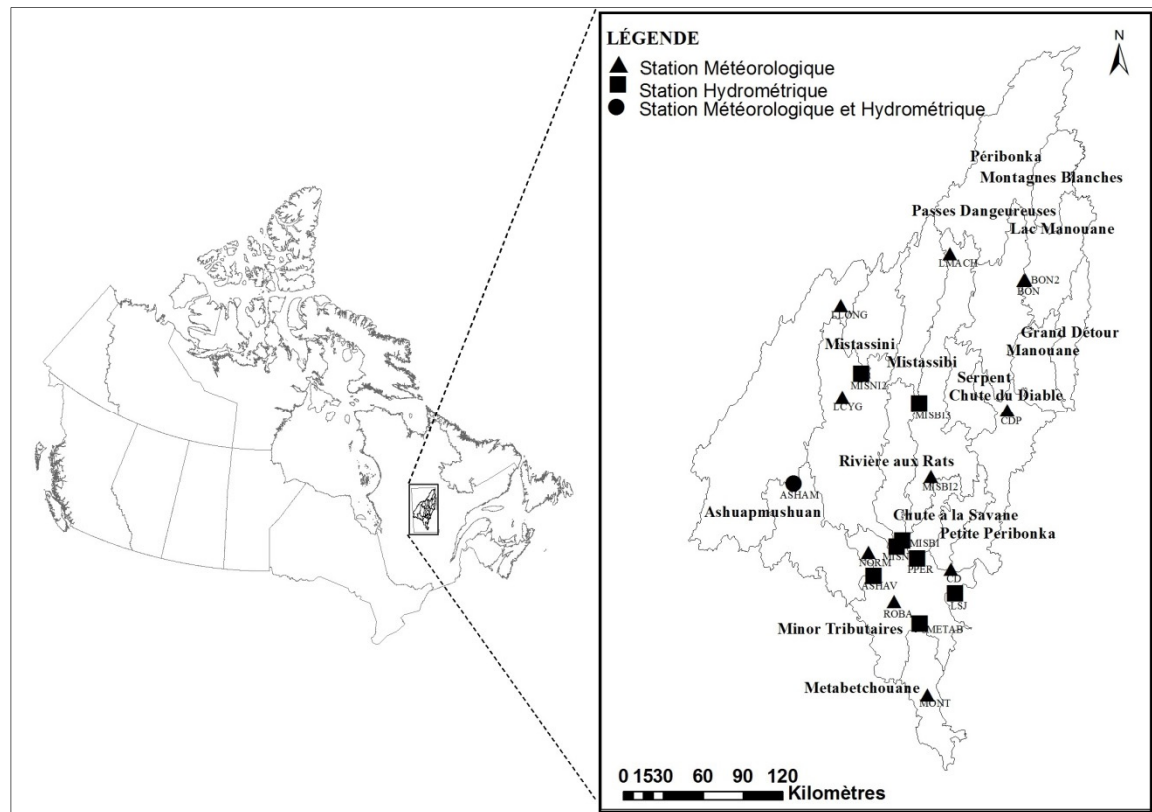


Figure 3.1 Carte de la région d'étude au Québec, Canada. À droite se trouve la carte agrandie du bassin versant du LSJ

Tableau 3.1 Sous-bassins du bassin versant du LSJ Considérés

Bassin	Aire (km ²)
Ashuapmushuan	15300
Métabetchouan	2280
Mistassibi	9320
Mistassibi 3	3183
Mistassini	9870
Mistassini 2	2588
Petite Péribonka	1090

Au chapitre 2, les informations sur les différences spatiales et temporelles entre 3 bases de données de précipitation observées sur grilles, soient NRCan, CaPA et MDDELCC ont été mises en évidence. À l'aide du modèle hydrologique global conceptuel HSAMI, les simulations hydrologiques à partir de chaque grille de précipitation sur 181 bassins versants au Québec ont été analysées et comparées, y compris pour le bassin versant du LSJ. Les résultats ont indiqué de fortes similitudes entre les simulations produites à partir des différents types de grilles dans le sud de la province et des disparités au sein des résultats pour le centre et le nord. La base de données CaPA est celle qui a capté le mieux les événements de précipitation extrêmes. Conséquemment, l'analyse des simulations hydrologiques a montré que CaPA offrait les meilleurs résultats, en particulier pour les bassins versants situés dans le centre et le nord de la province.

Pour le bassin LSJ, RT génère elle-même ses propres grilles de données météorologiques (précipitations et températures) en interpolant les données de 15 stations météorologiques réparties sur le bassin versant. L'interpolation se fait sur les données des 3 stations les plus proches du point à estimer avec la méthode de la pondération par l'inverse de la distance (voir chapitre 1). RT utilise le modèle hydrologique conceptuel semi-distribué CEQUEAU pour ses prévisions hydrologiques. Plusieurs travaux existent dans la littérature dans le but d'améliorer les simulations ou les prévisions de débits sur le bassin versant du LSJ. Brisson et al. (2015) utilisent l'approche de la spatialisation de la calibration du modèle hydrologique CEQUEAU sur deux sous bassins du LSJ et démontrent qu'il est possible d'améliorer les simulations du modèle en intégrant les débits des cours d'eau élémentaires situés en amont au processus de calibration au lieu d'utiliser simplement l'exutoire. Arsenault et al. (2013) ont comparé dix algorithmes d'optimisation sur plusieurs bassins versants incluant le bassin versant du LSJ et plusieurs modèles hydrologiques dont le modèle CEQUEAU. Ils ont déterminé que l'algorithme d'optimisation Dynamically Dimensioned Search (DDS, Tolson et Shoemaker, 2007) était le plus performant pour la calibration du modèle CEQUEAU sur le bassin versant du LSJ. D'autres travaux de recherche sur ce bassin versant impliquant le modèle CEQUEAU s'intéressent aux méthodes de mise à l'échelle des données météorologiques (Chen et al., 2015; Dibike et Coulibaly, 2007).

L'intérêt de la recherche présentée dans ce chapitre est d'établir s'il existe un gain pour RT à utiliser des observations de précipitations sur grilles intégrant plus d'informations dans leur schéma d'interpolation comparativement aux grilles actuelles utilisées opérationnellement. Pour ce faire, les 3 types de grilles de précipitations étudiées au chapitre 2 sont comparés aux grilles RT. Les simulations hydrologiques basées sur chacun des types de grilles de précipitation comme intrants pour CEQUEAU seront également comparées entre elles.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit. La section 3.2 présente la méthode et les métriques utilisées pour conduire cette étude. La section 3.3 est consacrée aux résultats obtenus. La discussion et la conclusion font l'objet de la section 3.4.

3.2 Méthodes et métriques d'évaluation des performances

3.2.1 Étude comparée des grilles de précipitation sur le bassin versant

Les grilles de précipitation qui sont comparées ici sont : la grille NRCan, la grille CaPA et la grille MDDELCC. La grille RT est utilisée comme base de comparaison commune étant donné qu'elle est déjà utilisée par l'entreprise pour les simulations et les prévisions de débits en rivière. Les indicateurs qui seront définis dans le paragraphe suivant se rapporteront à cette dernière grille. Cela permet de mettre en relief les différences et les avantages ou les inconvénients qui existent entre les grilles et par rapport à la grille RT. Les indicateurs suivants sont utilisés pour conduire l'inter-comparaison des grilles de précipitation.

Précipitation cumulée

Les données quotidiennes des précipitations sont moyennées spatialement sur le bassin versant. La précipitation cumulée est ensuite calculée de 2002 à 2010 et représentée graphiquement. Chaque courbe provient alors d'un type grille de précipitation.

Cycle annuel moyen des précipitations

Le cycle annuel moyen des précipitations fournit des informations pertinentes sur la répartition des précipitations tout au long de l'année (variations, pics, etc.). Les valeurs

mensuelles de cumul de précipitations sont calculées à partir de la série journalière de précipitation moyennée sur le bassin versant, toujours pour chaque type de grille. Les moyennes mensuelles climatologiques sont calculées pour la période 2002-2010. Chaque courbe représente un type de grille de précipitation.

Diagramme de Taylor

Le diagramme de Taylor (2000) permet de rassembler différentes informations sur un même graphique, et donne le degré de correspondance entre deux séries de données. Pour chaque point du diagramme, la distance par rapport à l'origine est égale à l'écart-type normalisé, sa position azimutale indique la valeur du coefficient de corrélation et la distance par rapport au point de référence représente l'écart quadratique moyen entre deux séries. Les valeurs mensuelles de précipitation sont utilisées. La comparaison est effectuée par saison et toujours par rapport aux grilles de précipitation utilisées opérationnellement chez RT. Chaque point du diagramme représente un type de grille de précipitation (NRCan, CaPA, MDDELCC) pour une saison donnée. Les saisons sont définies de la même manière qu'au chapitre 2.

Diagramme Quantiles-Quantiles (Q-Q)

Le diagramme Q-Q est une technique graphique pour déterminer si deux séries de données proviennent de la même population (Frank et Todeschini, 1994, p. 264; Goldfarb et Pardoux, 2005). Un diagramme Q-Q est une représentation graphique des quantiles de la première série en fonction des quantiles de la deuxième série de données. Par un quantile, on entend la fraction (ou pourcentage) des points en dessous d'une valeur donnée. Autrement dit, le quantile 0,25 (ou 25%) est ici la valeur de précipitation en dessous de laquelle se trouvent 25% des données et au-dessus de laquelle se trouvent 75% des données. Si les séries de données proviennent de la même population (même distribution), même si une des distributions est décalée et rajustée par rapport à l'autre, le tracé sera linéaire. Une ligne de référence passant par les premier et troisième quartiles est utile pour juger si les points sont linéaires.

Les valeurs mensuelles de précipitation sont utilisées pour construire les diagrammes Q-Q. Les quantiles de précipitations mensuelles des différentes grilles (NRCan, CaPA, MDDELCC) sont représentés contre les quantiles de précipitations mensuelles des grilles RT. Les diagrammes sont construits saison par saison.

3.2.2 Utilisation du modèle CEQUEAU pour les simulations hydrologiques

3.2.2.1 Le modèle CEQUEAU

Développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement (INRS-ÉITÉ, auparavant Centre Québécois des sciences de l'Eau (CEQUEAU)), le modèle hydrologique CEQUEAU (Morin et Paquet, 2007) est un modèle conceptuel qui permet de simuler les débits et cinq paramètres de qualité de l'eau. C'est un modèle semi-distribué (bassin versant divisé en éléments carrés). Les caractéristiques physiques et les données météorologiques peuvent ainsi varier d'un carré à un autre. Toutefois certains paramètres restent fixes sur l'ensemble du bassin versant. Les carreaux sont subdivisés en carreaux partiels grâce aux lignes de partage des eaux des sous-bassins. Cela permet de représenter l'écoulement de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Les processus d'écoulement de l'eau sont représentés par un modèle de réservoirs (Figure 3.2). Le modèle CEQUEAU permet de suivre la formation et l'évolution des écoulements naturels dans le temps et dans l'espace. Il permet également de simuler le débit en tout point du réseau de drainage. On peut aussi introduire une modification artificielle de l'écoulement dans le cours d'eau (par exemple un barrage). La liste des paramètres du modèles CEQUEAU se trouvent à l'ANNEXE I.

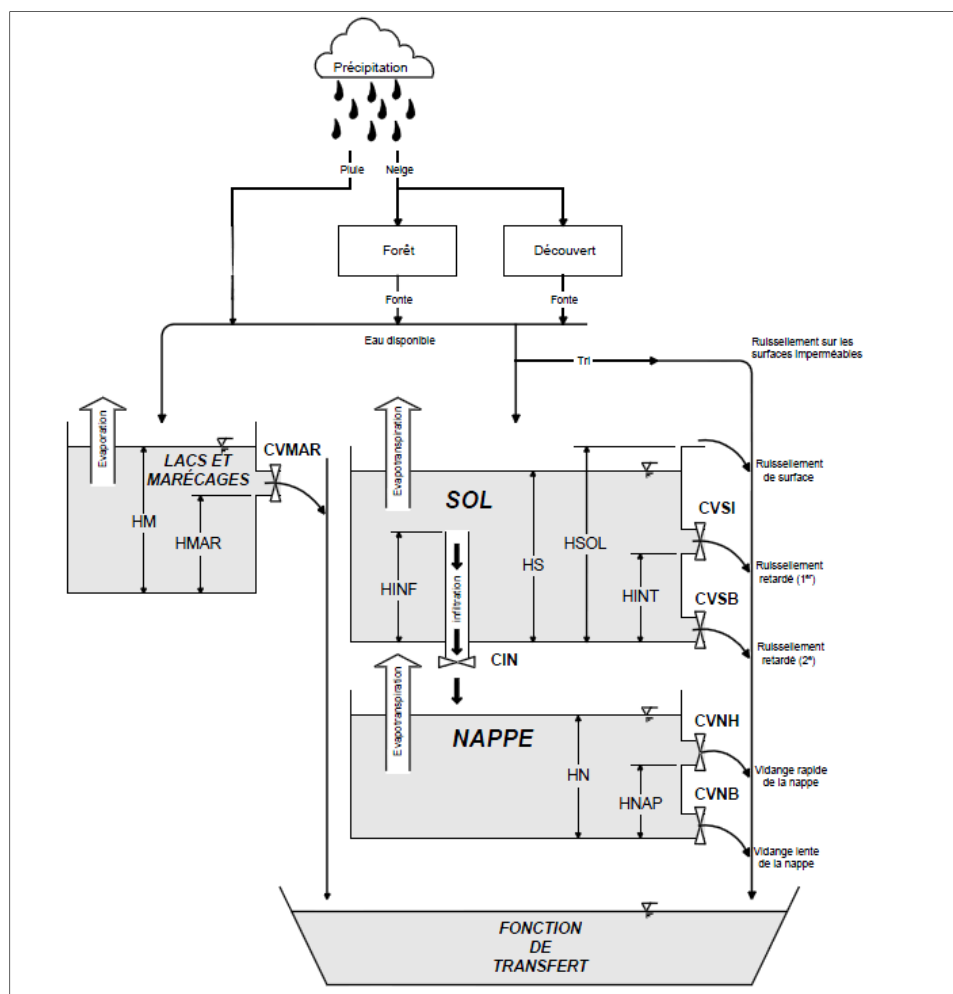


Figure 3.2 Schéma de production du modèle CEQUEAU
Tirée de Morin et Paquet (2007)

3.2.2.1 Simulations avec le modèle CEQUEAU

Les différentes grilles de précipitation (RT, NRCan, CaPA, MDDELCC) sont utilisées tour à tour comme intrants du modèle CEQUEAU. Dans tous les cas, la grille de température provient de la grille NRCan. Il faut noter que la comparaison s'intéresse aux grilles de précipitations et non aux températures. La calibration des paramètres du modèle a été fournie par RT et c'est celle qui est utilisée opérationnellement. Les indicateurs suivants sont utilisés pour analyser et comparer les débits simulés à partir des différentes grilles de précipitation :

Hydrogramme annuel moyen

L'hydrogramme annuel moyen permet de représenter le régime de la rivière. En général le débit en rivière varie considérablement en fonction du temps. L'hydrogramme annuel moyen est donc une ressource importante pour comprendre la nature et les réponses d'un bassin de drainage. L'hydrogramme annuel moyen est représenté pour chaque série de débits simulés (RT, NRCan, CaPA, MDDELCC), ainsi que pour celui de la série de débits observés.

Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)

Le NSE est calculé pour le grand bassin du lac Saint-Jean ainsi que pour ses sous-bassins (voir Tableau 3.1 pour les sous-bassins considérés). Les valeurs de NSE des sous-bassins sont alors représentées sur un diagramme à moustaches (ou boîte à moustaches).

Coefficients de corrélation (CC), Écarts-types normalisés (STD) et RMSE relatif

Les CCs, les STDs et les RMSEs sont calculés pour les sous-bassins du bassin LSJ. Les valeurs sont alors représentées sur un diagramme à moustaches (ou boîte à moustaches). Les écarts-types sont normalisés c'est-à-dire que les valeurs des écarts-types obtenues sont divisées par l'écart-type des observations. Les RMSEs relatifs sont obtenues en divisant les valeurs de RMSE calculées par la moyenne des observations.

Biais

Les biais sur les débits simulés inférieurs au 10^{ième} percentile et supérieures au 90^{ième} percentile des débits observés permettent de quantifier l'erreur sur l'estimation des débits de pics de crue et les débits d'étiage. Les biais sont calculés pour chaque série de débits simulés, basées respectivement sur les grilles (RT, NRCan, CaPA et MDDELCC).

3.3 Résultats

Cette section présente les résultats basés sur les métriques et indicateurs décrits à la section 3.2. Les indicateurs sont présentés pour la comparaison des grilles de précipitation entre elles et pour l'analyse des débits simulés par le modèle CEQUEAU à partir de chaque grille de précipitation.

3.3.1 Comparaison des grilles de précipitations

3.3.1.1 Précipitation cumulée

La Figure 3.3 présente les précipitations journalières cumulées sur le bassin versant du LSJ. Les grilles RT, CaPA et MDDELCC sont très similaires du point de vue de cet indicateur. Par contre, on observe un écart important entre NRCan et les trois autres ensembles de données pour les 9 années considérées. Ce résultat a été observé sur l'ensemble de la province du Québec (voir chapitre 2). Eum et al. (2014) rapportent également ce constat dans leur étude comparative sur le bassin versant Athabasca impliquant les grilles NRCan, CaPA et la réanalyse NARR.

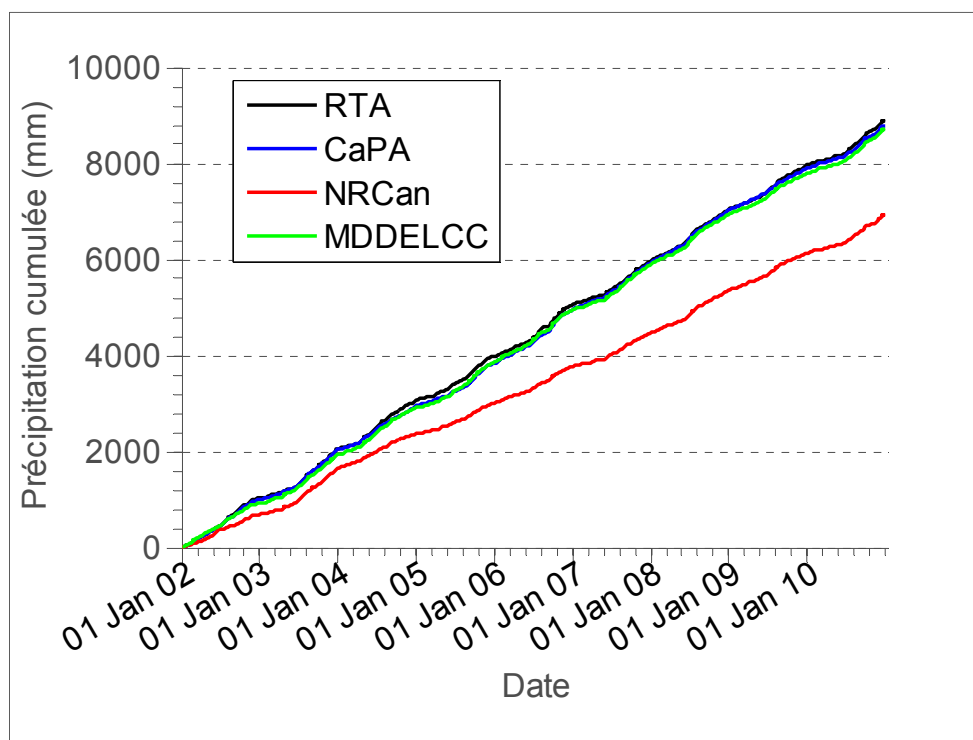


Figure 3.3 Précipitations journalières cumulées (mm) des grilles de précipitation RT, NRCan, CaPA et MDDELCC pour la période 2002-2010

3.3.1.2 Cycle annuel moyen des précipitations

Les cycles annuels moyens des précipitations (mm) représentés à la Figure 3.4 confirment aussi l'écart entre NRCan et les autres ensembles de données. Cependant, NRCan semble bien synchronisé à RT et à CaPA tandis que le cycle annuel moyen obtenu à partir des grilles du MDDELCC est décalé par rapport aux autres en hiver. De plus, bien que les précipitations sur grilles de RT et CaPA soient synchronisées pratiquement toute l'année, un écart important apparaît en hiver (DJF) et en été (JJA). En effet, CaPA présente plus de précipitation que RT en hiver et vice-versa en été.

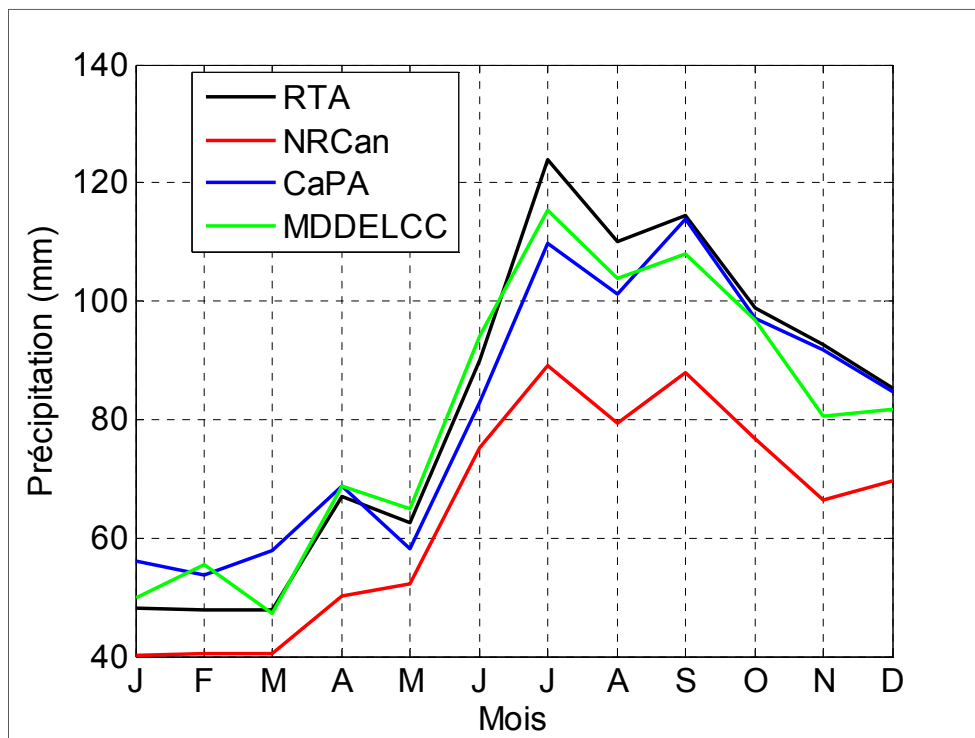


Figure 3.4 Cycles annuels des précipitations (mm) de la période (2002-2010) pour les grilles RT, NRCan, CaPA et MDDELCC

3.3.1.3 Diagramme de Taylor

Afin de préciser les différences observées sur les cumuls des précipitations journalières et les distributions temporelles moyennes des précipitations sur l'année, un diagramme de Taylor a été construit à partir des jeux de données de précipitation sur grilles (Figure 3.5). La comparaison se rapporte toujours aux grilles opérationnelles RT.

Dans l'ensemble, les valeurs du coefficient de corrélation entre les différentes grilles et la grille RT sont supérieures à 0,8 sauf pour NRCan en été où la valeur du CC plus faible. La valeur du CC la plus élevée est obtenue pour CaPA en automne. Ce résultat rejoint l'observation faite sur la synchronisation des cycles annuels moyens.

En ce qui concerne les STDs, la distance à l'origine est supérieure à 1 pour la majorité des points du diagramme. Ceci indique que tous les ensembles de données de précipitations présentent des valeurs de STD plus grandes que celle de RT, donc une plus grande variabilité temporelle, sauf pour la grille MDDELCC au printemps et en automne et la grille CaPA en automne. Les valeurs de STD les plus éloignées de 1 sont obtenues pour NRCan. Ce critère renforce une fois de plus la disparité observée entre NRCan et les trois autres jeux de données de précipitation.

D'après le diagramme de Taylor, les valeurs de RMSD les plus faibles sont obtenues pour CaPA en automne et pour MDDELCC au printemps, et les fortes valeurs pour NRCan en tout temps. Ce résultat concorde avec ceux observés aux paragraphes 3.3.1.1 et 3.3.1.2.

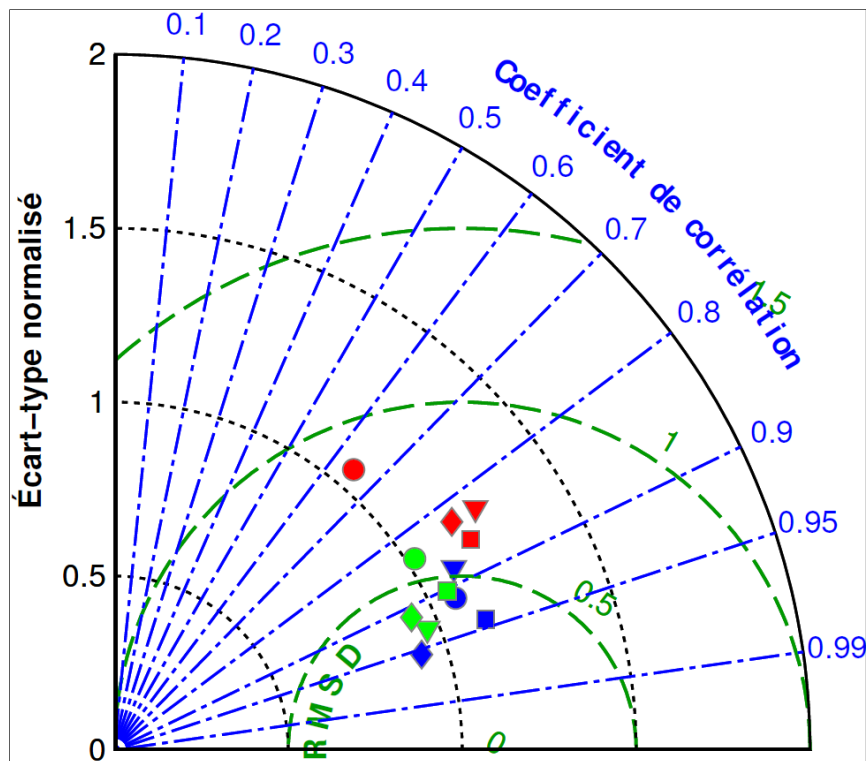


Figure 3.5 Diagramme Taylor comparant les séries chronologiques mensuelles des précipitations de NRCan (en rouge), CaPA (en bleu) et MDDELCC (en vert) à celle de RT (hiver = carré, printemps = triangle, été = cercle et automne = losange)

En effet, dans l'étude des grilles de précipitations sur l'ensemble de la province de Québec, les disparités entre NRCan et les deux autres jeux de données (CaPA et MDDELCC) sont les plus importantes dans la grande région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (voir chapitre 2, section 2.4.1). L'écart entre NRCan et les deux autres jeux de données est chiffré à plus de 1 m de précipitation pour les 9 années considérées pour l'ensemble du Québec (voir chapitre 2, section 2.6). Cet écart est estimé au double pour le bassin versant du LSJ. Comme relevé au chapitre 2, cette sous-représentation des précipitations par NRCan est le résultat du fait que NRCan ne prend pas en compte les stations météorologiques présentes dans cette région.

3.3.1.4 Diagramme Quantile-Quantile ou diagramme Q-Q

Les Figure 3.6, Figure 3.7 et Figure 3.8 présentent les diagrammes Q-Q pour les précipitations mensuelles des grilles NRCan, CaPA et MDDELCC respectivement, par

rapport aux précipitations mensuelles de la grille RT pour la période 2002-2010, par saison. Les lignes en couleur rouge passent par les premier et troisième quartiles et permettent de juger si les points sont linéaires.

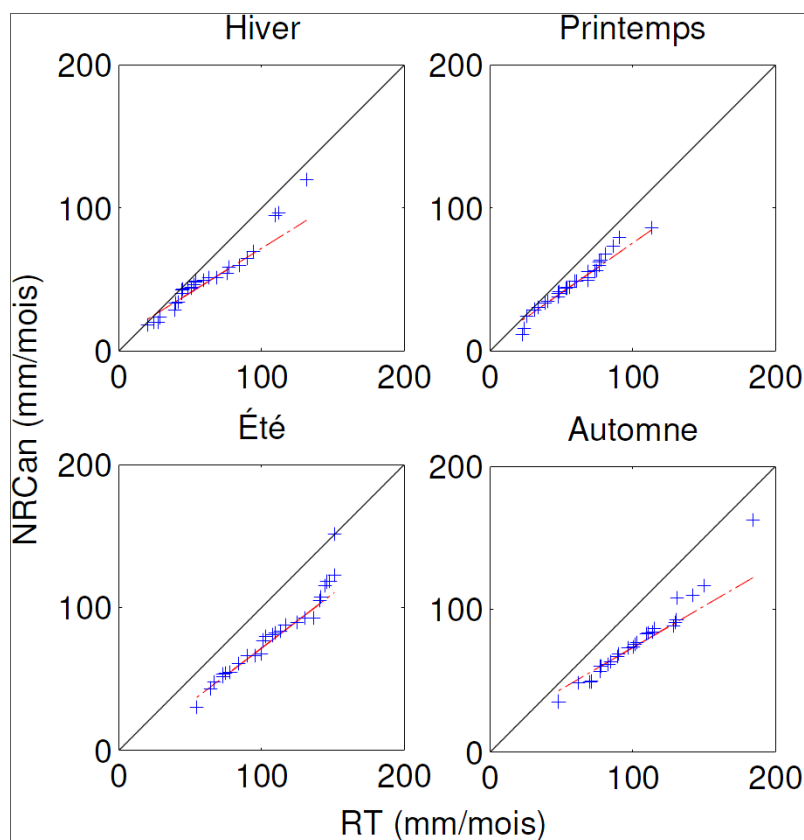


Figure 3.6 Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations de NRCan en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ

Pour NRCan, les points sont plus ou moins alignés ce qui révèle une certaine similarité entre les distributions des séries mensuelles de précipitation NRCan et RT. Toutefois, Il apparaît que NRCan sousestime systématiquement les quantiles de précipitation par rapport à RT, et ce pour toutes les saisons (Figure 3.6).

Les distributions de CaPA et RT sont beaucoup plus similaires que celle de NRCan. Cela est visible sur l'alignement des points de la Figure 3.7, sauf durant l'été où les points semblent

moins alignés sur la droite qui lie les premier et troisième quartiles (ligne rouge). Toutefois, les points sont plus proches de la diagonale, ce qui révèle les quantiles de précipitations mensuelles de CaPA sont très proches de ceux de RT. On remarque néanmoins que CaPA surestime légèrement les quantiles de précipitations en hiver et les sous-estime en été comparativement aux grilles RT. Les deux distributions semblent presque identiques au printemps et en automne.

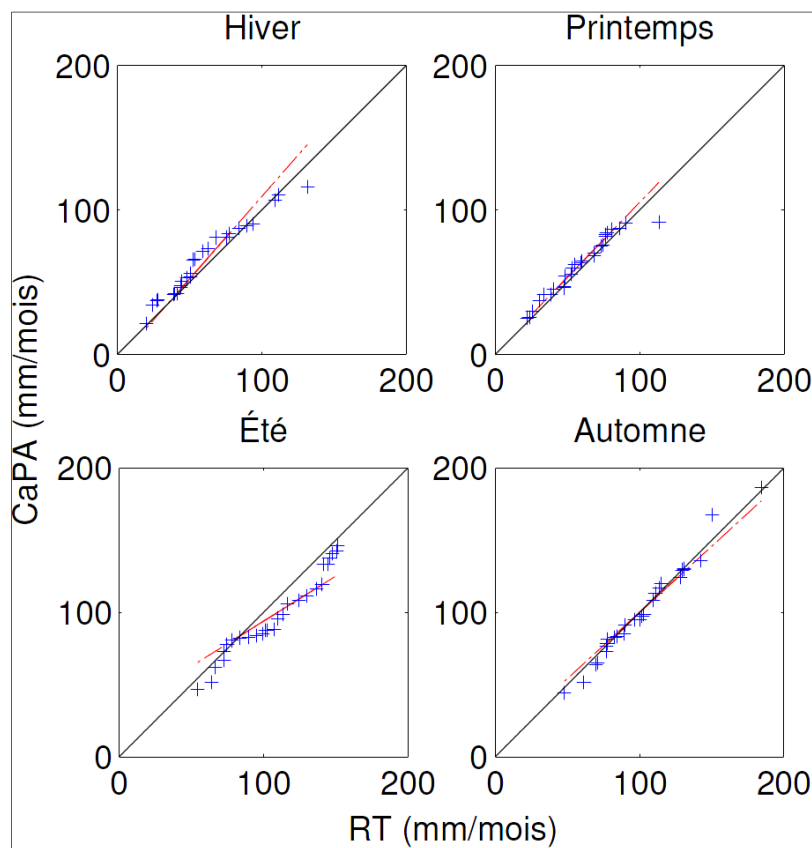


Figure 3.7 Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations de CaPA en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ

Les précipitations de la grille MDDELCC sont très similaires à celles de RT. Cela se traduit par l'alignement sur la diagonale qu'on observe pour les quantiles de précipitations. Toutefois, MDDELCC sous-estime légèrement les quantiles de précipitation en automne comparativement à RT (Figure 3.8).

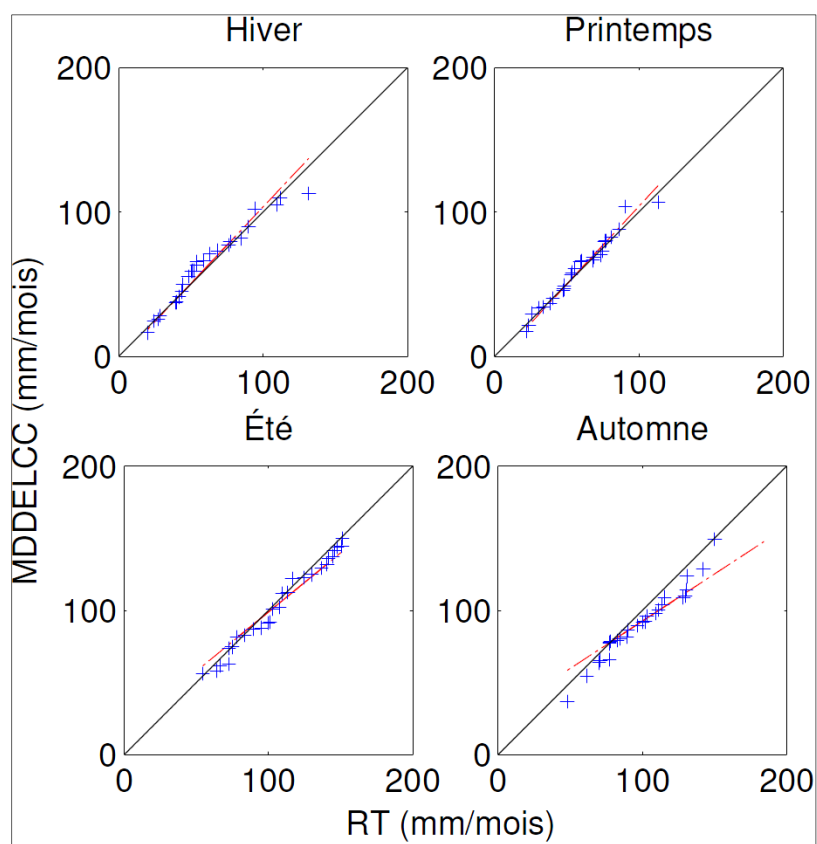


Figure 3.8 Diagrammes quantiles-quantiles saisonniers des précipitations du MDDELCC en fonction des précipitations RT sur le bassin versant du LSJ

3.3.2 Modélisation hydrologique

À la section 3.2.2 le modèle CEQUEAU est présenté ainsi que les indicateurs de performance qui vont permettre de comparer les différentes simulations du modèle. Cette section est consacrée à l'analyse des simulations du modèle et à l'étude comparée des débits de pics de crues et des débits d'étiages pour toutes les grilles de précipitations utilisées dans cette étude.

3.3.2.1 Analyse des simulations

La Figure 3.9 présente les hydrogrammes annuels moyens pour les débits simulés en alimentant le modèle avec les grilles de précipitation RT (en jaune), NRCan (en rouge), CaPA (en bleu) et MDDELCC (en vert). Les débits observés sont également présentés en noir. En général, les hydrogrammes sont synchrones. Il est à noter que NRCan sous-estime fortement les écoulements, et ce pratiquement toute l'année. Les autres hydrogrammes simulés sous-estiment légèrement le débit de pointe. L'utilisation des précipitations CaPA permet d'atteindre un débit de pointe plus élevé que les autres jeux de données. Par contre, cette pointe est atteinte un peu plus tard que celle de l'hydrogramme observé. Les débits d'étiage hivernal sont systématiquement sous-estimés par tous les hydrogrammes simulés, les valeurs les plus proches des observations étant celles issues des grilles de précipitation de RT. Ceci n'est pas surprenant étant donné que le modèle a été spécifiquement calibré avec les précipitations de RT.

Les valeurs de NSE consignées dans le Tableau 3.2 montrent que tous les jeux de données de précipitation sur grilles, soient RT, NRCan, CaPA et MDDELCC donnent de bonnes performances. La valeur la plus élevée du NSE obtenue avec la grille RT n'est pas surprenante, étant donné que l'entreprise a utilisé cette grille dans le processus de calibration du modèle CEQUEAU. Ainsi, les paramètres du modèle sont optimisés spécialement pour ces données.

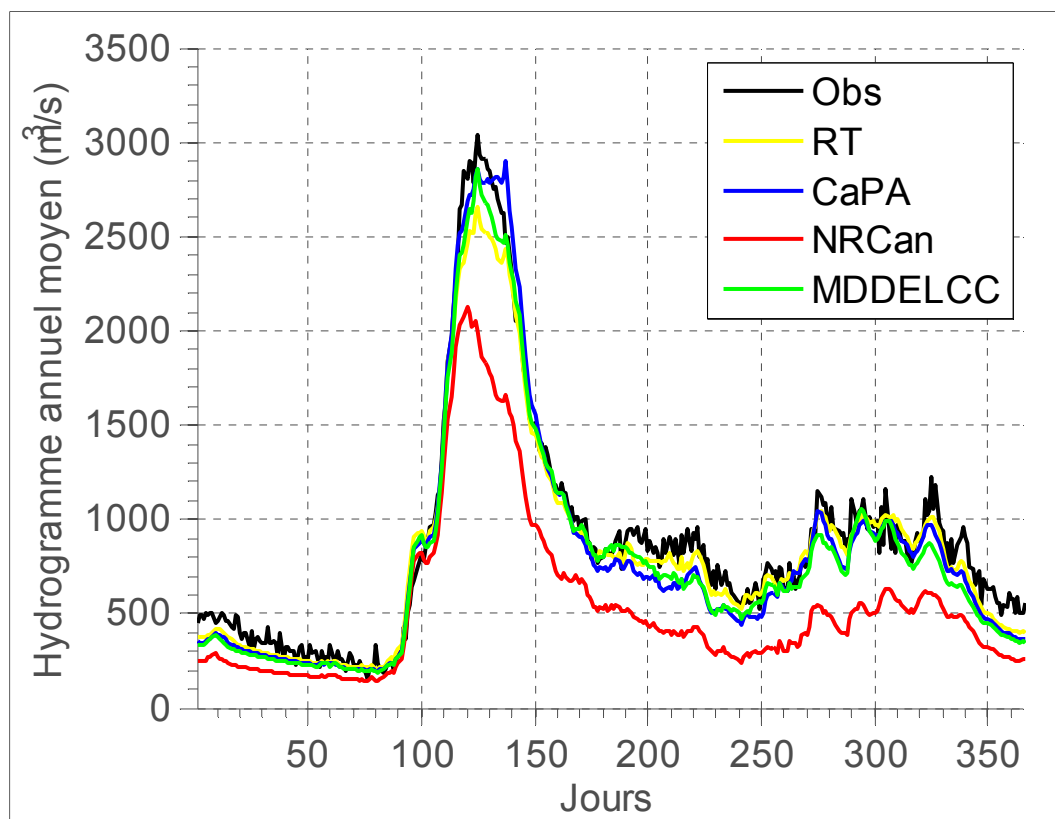


Figure 3.9 Comparaison des hydrogrammes annuels moyens simulés et observé pour le bassin du LSJ

Le Tableau 3.2 présente également les erreurs absolues moyennes calculées sur les débits inférieurs au 10^{ième} percentile des débits observés (246 m³/s, MAE10) et sur les débits supérieurs au 90^{ième} percentile des débits observés (1886 m³/s, MAE90). La valeur la plus grande du MAE10 est obtenue pour NRCan et la valeur la plus faible du MAE10 est obtenue pour MDDELCC. En moyenne, MDDELCC est la grille qui permet la meilleure estimation des débits d'étéage. La valeur de MAE90 est très grande pour NRCan, pratiquement le double des valeurs obtenues pour les autres grilles). Ce résultat est en accord avec l'observation faite sur les hydrogrammes annuels moyens. Les valeurs de MAE90 sont comparables pour RT, CaPA et MDDELCC, la valeur la plus faible étant obtenue pour MDDELCC.

Il faut rappeler que les séries de débits observés peuvent comporter des données manquantes, dues à des problèmes tels que les bris ou le dysfonctionnement des équipements, des travaux

à la station hydrométrique, etc. Dans ce cas, les valeurs manquantes de la série sont estimées. Pour le bassin versant du LSJ, les apports naturels ont été reconstruits par RT en utilisant des données opérationnelles à partir des réservoirs en amont (Chen et al., 2015). La qualité des débits reconstitués influence dès lors l'appréciation de la performance du modèle hydrologique. Dans la suite, les débits de quelques sous-bassins versants situés en amont (voir Figure 3.1) sont pris en compte pour évaluer la précision des séries de débits simulés en alimentant le modèle avec les différents ensembles de données de précipitation.

La Figure 3.10 présente les RMSEs entre les débits simulés et observés représentés sous la forme de boîtes à moustaches pour les sous-bassins du LSJ considérés. Chaque boîte à moustaches représente les RMSEs pour une grille de précipitation. L'écart observé sur les hydrogrammes annuels moyens pour NRCan se confirme pour l'ensemble des sous-bassins du LSJ. Pour les trois autres grilles de précipitation, les RMSEs sur les débits simulés sont similaires, les valeurs pour RT montrant une plus grande variabilité inter-bassin.

Tableau 3.2 NSE, MAE10 et MAE90 calculés entre les séries de débits simulés et observés pour chaque grille de précipitation pour le bassin versant du LSJ

Grille de précipitation	RT	NRCan	CaPA	MDDELCC
NSE	0,892	0,578	0,870	0,867
MAE10 (m^3/s) ($Q \leq 10^{\text{ième}}$ percentile)	57,2	62,6	52,3	48,7
MAE90 (m^3/s) ($Q \geq 90^{\text{ième}}$ Percentile)	424,6	762,2	403,4	390,0

La Figure 3.11 présente les CCs entre les débits simulés et observés représentés sous la forme de boîtes à moustaches pour les sous-bassins de LSJ considérés selon les mêmes principes que pour les RMSEs de la Figure 3.10. Les valeurs de CC les plus faibles sont obtenues pour NRCan tandis que les valeurs obtenues pour les 3 autres grilles restent comparables. Les valeurs de CC obtenues avec CaPA présentent la plus faible variabilité inter-bassin.

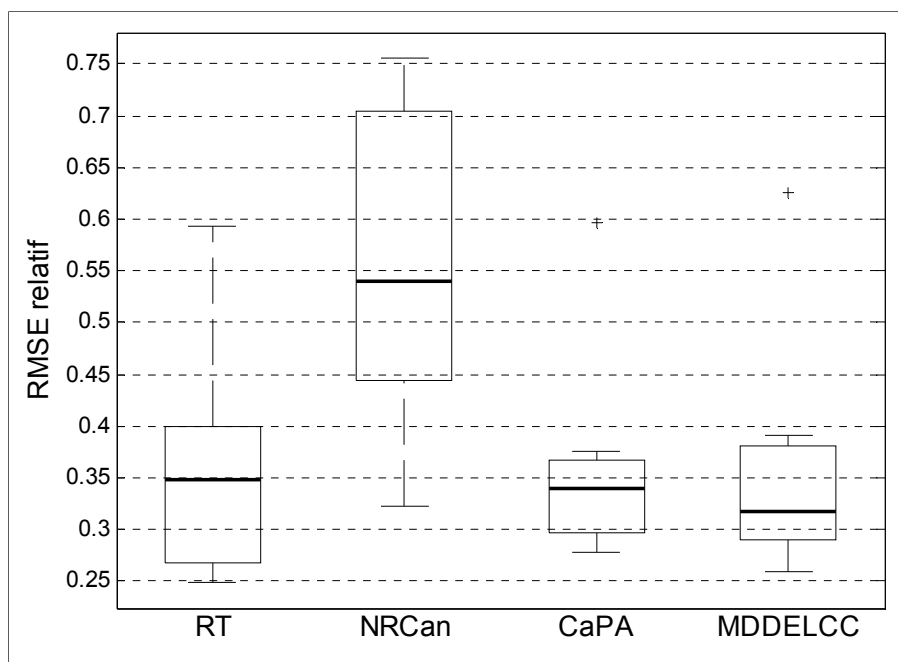


Figure 3.10 Boîtes à moustaches présentant les valeurs de RMSE relatives sur les débits simulés par rapport aux débits observés pour le LSJ et ses sous-bassins considérés, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC

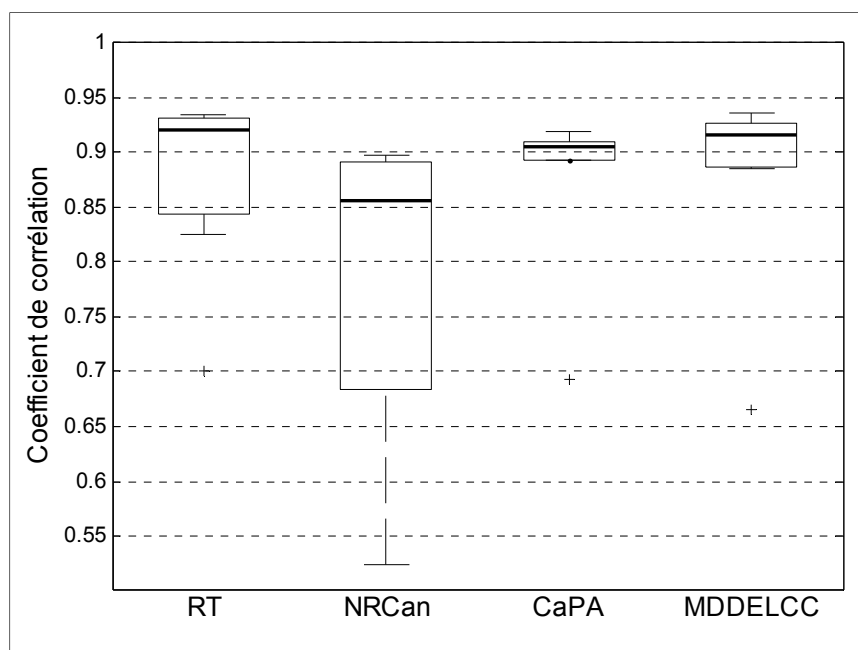


Figure 3.11 Boîtes à moustaches présentant les coefficients de Corrélation (CCs) entre les débits simulés les débits observés pour le LSJ et ses sous-bassins considérés, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC

Les valeurs de STD normalisées calculées sur les débits simulés par rapports aux débits observés pour les sous-bassins du LSJ, pour chacune des grilles de précipitations sont représentées sous la forme de boîtes à moustaches (Figure 3.12). Globalement, la variabilité des débits observés est sous-estimée par les débits simulés. Sans surprise, il ressort que NRCan mène à une plus grande sous-estimation de la variabilité des débits observés que les autres jeux de données. Pour RT, CaPA et MDDELCC, les médianes de la distribution sont comparables, avec des valeurs de STD un peu plus grandes pour CaPA (voir les intervalles interquartiles). Ainsi, on peut croire que CaPA représente le mieux la variabilité des débits observés pour les sous-bassins du LSJ.

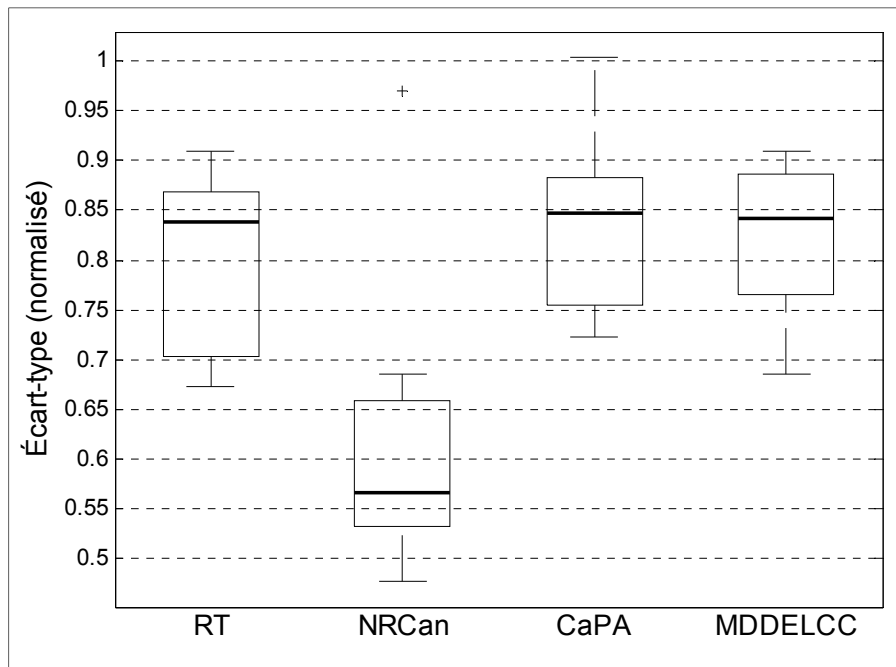


Figure 3.12 Boîtes à moustaches présentant les écarts-types normalisés (STDs) des débits simulés par rapport aux débits observés pour les sous-bassins du LSJ, pour les grilles de précipitation RT, NRCan, CaPA et MDDELCC

La Figure 3.13 montre les boîtes à moustaches représentant les valeurs de NSE calculées entre les débits observés et les débits simulés pour les sous-bassins du LSJ. Les faibles valeurs de NSE obtenues pour NRCan concordent avec les résultats obtenus avec le RMSE,

le CC et le STD. Ce résultat a été observé au chapitre 2 (section 2.5.2) avec le modèle global HSAMI. Les résultats pour RT, CaPA et MDDELCC sont aussi similaires ici. Les valeurs de NSE sont plus homogènes et moins dispersées pour CaPA que pour RT et MDDELCC. CaPA offre donc une performance supérieure à toutes les autres grilles de précipitation pour les sous-bassins du LSJ.

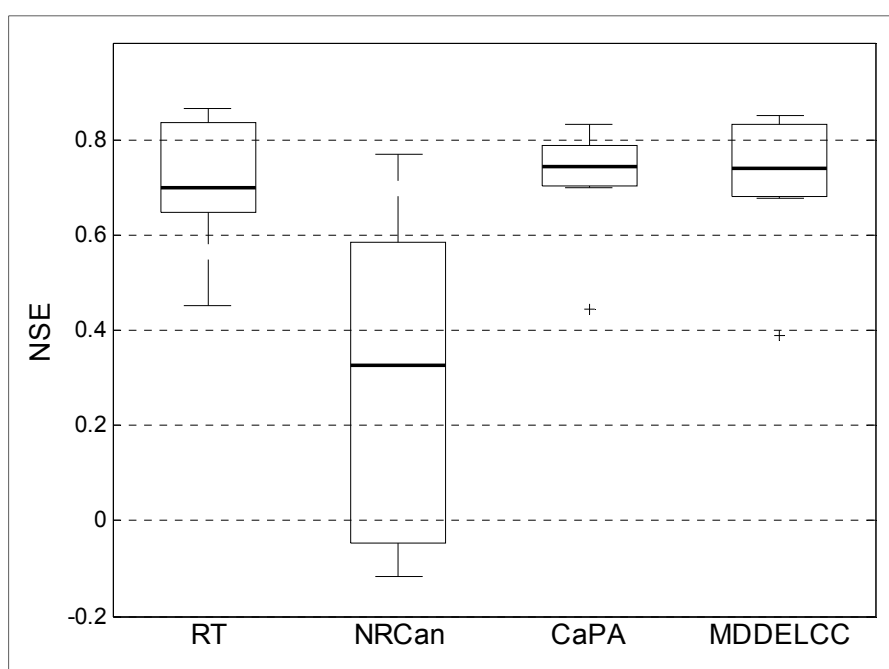


Figure 3.13 Boîtes à moustaches présentant les valeurs de NSE entre les débits observés et les débits simulés pour les sous-bassins du LSJ, pour les grilles de précipitations RT, NRCan, CaPA et MDDELCC

3.3.2.2 Débits de crue et débits d'étiage

Les Figure 3.14 et Figure 3.15 présentent respectivement les valeurs de MAE10 et MAE90 pour les sous-bassins du LSJ. Les valeurs les plus élevées de ces 2 indicateurs sont obtenues pour NRCan. Ce résultat rejoint celui obtenu pour le grand bassin versant du LSJ. Ces figures montrent aussi que les valeurs de MAE10 et MAE90 sont très similaires pour les 3 autres grilles. Toutefois MDDELCC présente une médiane plus faible pour les deux indicateurs.

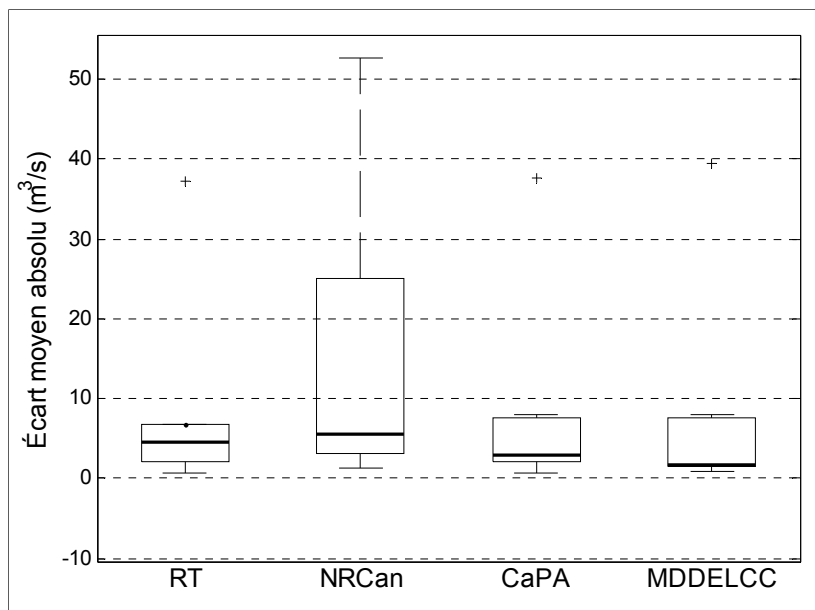


Figure 3.14 Boîtes à moustaches présentant les écarts moyens absolus (MAE10) entre les débits simulés et les débits observés (débits \leq au 10^{ième} percentile des débits observés) pour les sous-bassins du LSJ, par grilles de précipitations

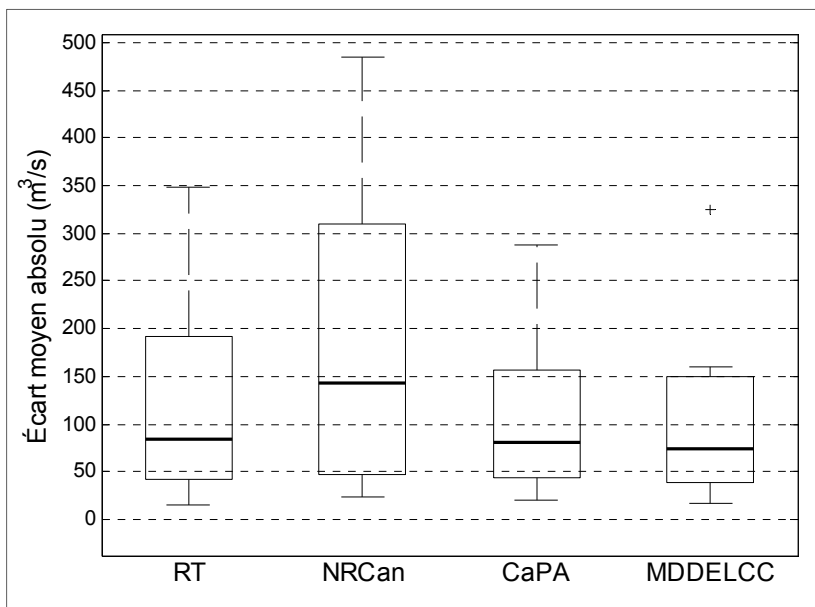


Figure 3.15 Boîtes à moustaches présentant les écarts moyens absolus (MAE90) entre les débits simulés et les débits observés (débits \geq 90^{ième} percentile des débits observés) pour les sous-bassins du LSJ, par grilles de précipitations

3.4 Discussion et conclusions

Le bassin versant du LSJ possède un réseau hydrographique riche et vaste. Les entreprises comme RT exploitent les cours d'eau du bassin à des fins de production d'énergie électrique. Dans un contexte de gestion intégrée des ressources en eau qui implique divers partenaires (municipalités, agriculteurs, industriels, etc.), la prévision des écoulements en rivière devient indispensable pour l'utilisation adéquate des ressources en eau et la gestion des risques hydrologiques.

RT produit des grilles de précipitation observée à partir des stations météorologiques et ces grilles permettent d'alimenter le modèle hydrologique CEQUEAU à des fins de simulation et de prévision des écoulements en rivière. Toutefois, les grilles produites peuvent présenter des faiblesses qui découlent de la qualité des données aux stations ou de la méthode d'interpolation utilisée pour générer ces grilles.

Plusieurs jeux de données de précipitation alternatifs sur grilles ont été produits par diverses organisations gouvernementales. Ces grilles couvrent le Canada tout entier (NRCan et CaPA), une province donnée (MDDELCC) ou un territoire donné (RT). L'étude présentée dans ce chapitre évalue l'avantage d'utiliser une grille de précipitation plutôt qu'une autre pour les simulations de débits en rivière. Le modèle conceptuel semi-distribué CEQUEAU a été utilisé pour produire les simulations des écoulements. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations sur le bassin versant.

La représentation des précipitations cumulées a permis de mettre en évidence la forte sous-estimation des précipitations par NRCan par rapport aux autres ensembles de données. En particulier, cet écart entre NRCan et les autres jeux de données ressort sur le cycle annuel moyen des précipitations sur le bassin versant du LSJ. Par contre, du point de vue temporel, il n'y a pas de différence marquée entre les jeux de données sur grilles. Les séries de précipitation moyennes correspondantes sont bien synchronisées les unes avec les autres, à l'exception des grilles du MDDELCC en hiver. Le diagramme de Taylor confirme cette synchronisation en affichant des valeurs au-dessus de 0,8 pour le CCs et des valeurs de

proches de l'unité pour les STDs normalisés. L'écart est toutefois visible pour NRCan sur le diagramme. Le diagramme Q-Q a permis de constater que les distributions des quantiles des séries mensuelles de précipitation CaPA et MDDELCC sont similaires à celle de RT. Celle de NRCan semble moins similaire à celle de RT. NRCan sous-estime systématiquement les quantiles de précipitation par rapport à RT. CaPA sous-estime les quantiles de précipitation en été et l'inverse se produit en hiver. Les quantiles de précipitation obtenus à partir des grilles du MDDELCC semblent très similaires à ceux de RT. Cette proximité entre MDDELCC et RT peut s'expliquer par le fait que les stations météorologiques utilisées par RT font partie du réseau météorologique coopératif du Québec, RMCQ, qui est utilisé par MDDELCC. Ce réseau est aussi utilisé par CaPA, mais l'utilisation du modèle atmosphérique GEM pourrait expliquer les écarts observés en hiver et en été entre CaPA et RT. Quant à NRCan, ces stations météorologiques ne sont pas prises en compte dans son schéma d'interpolation.

Pour les simulations hydrologiques, la représentation des hydrogrammes annuels moyens a permis de constater que NRCan sous-estime fortement les écoulements. CaPA se rapproche le plus du débit de pointe observé.

Les valeurs de NSE calculées sur les débits simulés à partir des précipitations fournies par les différents jeux de données sont toutes élevées. Parmi tous les résultats de simulation de débit, ceux qui reposent sur CaPA pour les intrants de précipitations sont les plus proches des débits observés. Ce dernier résultat est en accord avec ceux obtenus au chapitre 2 pour l'étude réalisée sur toute la province de Québec.

CHAPITRE 4

IMPACT DU CHOIX DE LA MÉTRIQUE SUR LES RÉSULTATS EN CALAGE ET LA PERFORMANCE DU MODÈLE HSAMI

4.1 Contexte

Les modèles hydrologiques sont utilisés pour plusieurs applications parmi lesquelles la simulation et la prévision des débits en rivière. Certains paramètres des modèles hydrologiques ne peuvent pas être mesurés directement. Ces paramètres sont alors déterminés par calibration ou calage du modèle hydrologique. C'est un processus qui consiste à ajuster les paramètres du modèle itérativement de manière à faire correspondre la simulation de ce modèle aux observations, dans le cas présent les débits à l'exutoire du bassin versant. Il s'agit donc d'un problème d'optimisation. En général, un critère d'optimisation est défini pour effectuer le calage du modèle. Ce critère est également appelé fonction objectif. Une grande variété de critères a été proposée et utilisée au fil des ans en modélisation hydrologique comme exposée par exemple dans les travaux de (Moriassi et al., 2007). Nous introduisons dans la suite quelques critères pouvant être utilisés pour l'évaluation des performances des modèles hydrologiques.

4.1.1 Le MAE et le RMSE

Des critères tels que l'erreur absolue moyenne (MAE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) permettent de mesurer l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs observées et s'expriment dans la même unité que la grandeur en question (e.g. Chai et Draxler, 2014). Le MAE mesure l'amplitude moyenne des erreurs dans une série de prévisions, sans tenir compte de leur direction. Il mesure la précision pour les variables continues. L'équation est donnée par l'expression suivante :

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - S_i| \quad (4.1)$$

O_i et S_i représentent respectivement les valeurs observées i et les valeurs simulées i des séries d'observations et de simulations comptant chacune N éléments. Le MAE est donc la moyenne des valeurs absolues des différences entre les simulations du modèle et les observations correspondantes. Le MAE est un score linéaire, ce qui signifie que toutes les différences individuelles sont pondérées de manière égale dans le calcul de la moyenne.

L'équation du RMSE est donnée par l'expression suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (4.2)$$

Étant donné que les erreurs sont élevées au carré avant d'être moyennées, le RMSE donne un poids relativement élevé à des écarts importants. Cela signifie que le RMSE est particulièrement utile lorsque des écarts importants sont particulièrement indésirables. Le MAE et le RMSE peuvent être utilisés ensemble pour diagnostiquer la variation des erreurs dans une série de simulations ou de de prévisions déterministes. Le RMSE sera toujours supérieur ou égal au MAE. Plus grande sera la différence entre eux, plus grande sera la variance des erreurs individuelles dans la série. En outre, Chai et Draxler (2014) soulignent que dans l'évaluation des sensibilités de l'erreur du modèle, les RMSEs sont préférés aux MAEs.

4.1.2 Le critère de Nash-Sutcliffe

Un critère largement utilisé en hydrologie est le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970). Le coefficient d'efficacité du Nash-Sutcliffe (NSE, équation 3) exprime la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et les valeurs observées par rapport à la variance expliquée des valeurs observées. La variance résiduelle doit donc être la plus petite possible pour que le rapport soit minimal. Le coefficient NSE varie entre $-\infty$ et 1. Un NSE de 1 indique que les données simulées correspondent exactement aux données observées. Un NSE de zéro indique que les données simulées sont aussi précises

que la moyenne des données observées, tandis qu'un NSE inférieur à zéro signifie que la valeur moyenne des données observées est un meilleur estimateur que les données simulées.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}, \quad -\infty \leq NSE \leq 1 \quad (4.3)$$

Toutefois, le est NSE très sensible aux valeurs extrêmes à cause du fait que les différences sont prises aux carrés (e.g. Legates et McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007) . Bien qu'étant parmi les critères les plus utilisés pour l'évaluation des performances des modèles hydrologiques, le NSE a fait l'objet de discussions dans plusieurs travaux (Criss et Winston, 2008; Jain et Sudheer, 2008; McCuen et al., 2006; Schaefli et Gupta, 2007). Des versions modifiées du NSE ont été proposées pour le rendre moins sensible aux valeurs élevées, même si elles ont été très peu utilisées dans la littérature (Moriasi et al., 2007). Il est rapporté entre autres que le NSE surestime les performances réelles des modèles pour les variables de forte saisonnalité, par exemple pour les bassins versants dont la dynamique est dominée par la fonte de la neige (Gupta et al., 2009).

4.1.3 Le Critère de Kling-Gupta

La décomposition du NSE (Gupta et al., 2009) implique trois composantes comme le montre l'équation (4.4) :

$$NSE = -\beta_n - \alpha^2 + 2r\alpha \quad (4.4)$$

α est le rapport des écarts-types des débits simulés σ_S et observés σ_O . Il mesure la variabilité relative des débits simulés et observés:

$$\alpha = \frac{\sigma_S}{\sigma_O}. \quad (4.5)$$

$$\beta_n = \frac{\mu_s - \mu_o}{\sigma_o}. \quad (4.6)$$

μ_o et μ_s sont respectivement les moyennes des valeurs observées et simulées. r est le coefficient de corrélation entre les débits observés et les débits simulés :

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - \mu_o)(S_i - \mu_s)}{\sigma_o \sigma_s}. \quad (4.7)$$

Gupta et al. (2009) ont pris séparément les trois composantes r , α et β et ont proposé un critère appelé Kling-Gupta Efficiency (KGE), défini en fonction de la distance euclidienne (ED) entre les composantes et l'unité, qui est leur valeur maximale. Le KGE s'exprime comme suit:

$$KGE = 1 - ED, \quad (4.8)$$

avec

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 - (\alpha - 1)^2 - (\beta - 1)^2}. \quad (4.9)$$

ici, β est le biais du modèle :

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}. \quad (4.10)$$

Ainsi, le critère permet de donner les mêmes poids aux trois composantes r , α et β . Gupta et al. (2009) estiment que le NSE ignore le poids relatif de chaque composante et que ce dernier dépend de la période de calage.

4.1.4 Combinaison de critères

Une combinaison des critères tels que le *NSE* le *RMSE* pondéré par la moyenne des observations (Coefficient de Variation de *RMSE*, *CVRMSE*) et le biais relatif (*BR*) est souvent utilisée lors de la calibration pour veiller à ce que les jeux de paramètres du modèle ne soient pas influencés par une quelconque tendance que peut présenter un des critères , par exemple, la tendance du *NSE* à cibler les valeurs élevées de débit. Dans ce cas un poids égal est affecté à chacun des critères pour la calibration. Cette combinaison peut prendre la forme suivante (Arsenault et al., 2015):

$$COMB = \frac{1}{3}(1 - NSE) + \frac{1}{3}(CVRMSE) + \frac{1}{3}(BR) \quad (4.11)$$

avec $CVRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2 / \mu_O}$ et $BR = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i) \right| / \mu_O$.

4.2 Objectifs

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que les critères de performance présentent tous des forces et des faiblesses. La performance des modèles est influencée par le choix du critère de calage. Il est à noter que le régime hydrologique des bassins versants peut déterminer le choix du critère de calage.

L'hydrologie du Québec est marquée par un régime de précipitation varié. Les valeurs annuelles moyennes se situent entre 527 mm et 1156 mm. L'année hydrologique du Québec est caractérisée par une crue printanière marquée due à la fonte des neiges, des crues estivales et automnales moins marquées et un étiage hivernal; des étiages estivaux sont souvent présents et d'amplitude variable. (Benyahya et al., 2009).

Dans ce travail de maîtrise, nous avons évalué la sensibilité des performances du modèle hydrologique HSAMI à trois critères de calages, soit le *NSE*, le *KGE* et le critère *COMB*, sur 181 bassins versants au Québec. Il s'agit d'établir s'il existe un gain à utiliser un critère

plutôt qu'un autre dans le calage et la validation du modèle HSAMI sur les bassins versants du Québec. La section 4.3 présente la méthodologie utilisée et la section 4.4 les résultats obtenus. La discussion et la conclusion font l'objet de la section 4.5.

4.3 Méthodologie

4.3.1 Le modèle HSAMI

Le modèle HSAMI (Service Hydrométéorologique Apports Modulés Intermédiaires) (Fortin, 2000), est un modèle hydrologique conceptuel global développé à Hydro Québec. HSAMI est un modèle basé sur des réservoirs et il simule les principaux processus hydrologiques : fonte de neige, évapotranspiration, infiltration et ruissellement. Le pas de temps du modèle est journalier. La Figure 4.1 présente de façon simplifiée l'ensemble des processus du modèle HSAMI. Les cases grises montrent les réservoirs dans lesquels l'eau peut être emmagasinée et les différentes flèches indiquent les trajectoires possibles que peut emprunter l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin. Le modèle HSAMI est alimentée en entrée par la moyenne spatiale des températures et des précipitations liquides et solides à chaque pas de temps. Il peut bien s'adapter à une grande variété de bassins versants grâce à ses 23 paramètres de calage. Toutefois, à cause du grand nombre de paramètres, des jeux de paramètres très différents pourront conduire à des performances équivalentes : c'est l'équifinalité. L'équifinalité traduit l'incertitude qui entoure la représentation des processus hydrologiques dans le modèle, les erreurs sur le forçage météorologique et sur les débits observés (Beven, 2006).

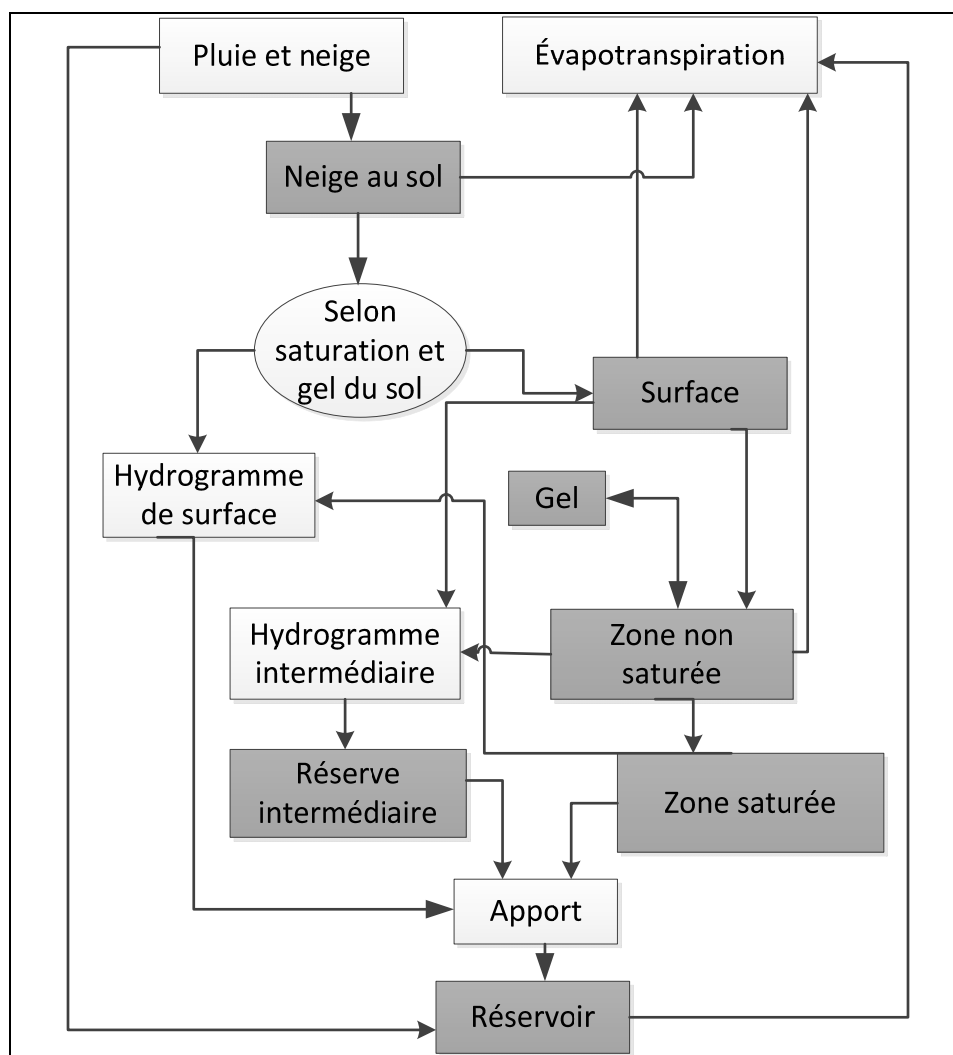


Figure 4.1 Schéma du modèle HSAMI
Adaptée de Fortin (2000)

4.3.2 Calage et validation du modèle

L'étude présentée dans ce chapitre est effectuée sur 181 bassins versants au Québec de superficies allant de 301 km² à 69191 km². Les précipitations et les températures utilisées comme intrants du modèle HSAMI sont moyennées spatialement sur chaque bassin versant. Les précipitations proviennent de la grille CaPA. Il a été démontré au chapitre 2 que CaPA capte mieux les fortes précipitations que les grilles NRCan et MDDELCC. De plus les simulations hydrologiques effectuées avec CaPA offrent de meilleurs résultats sur la majorité des bassins versants étudiés. Les données de température utilisées proviennent de la grille

NRCan. HSAMI a été calibré automatiquement à l'aide de l'algorithme d'optimisation CMAES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy; Hansen et Ostermeier, 1996; Hansen et Ostermeier, 2001). Au total 10 calages ont été réalisés pour chaque bassin versant (5 calages sur les années paires et 5 autres sur les années impaires). Pour chaque fonction objectif et pour chaque bassin versant, 10 jeux de paramètres sont obtenus.

4.3.3 Indicateurs de performance

Quelques indicateurs de performance sont utilisés pour évaluer la qualité des simulations de débit produites:

- 1) les critères NSE, KGE et COMB;
- 2) le biais relatif des débits simulés par rapport aux débits observés;
- 3) le rapport des variances des débits simulés et observés;
- 4) la corrélation entre les débits simulés et les débits observés;
- 5) le biais absolu calculé sur les débits inférieurs au 10^{ième} percentile des débits observés;
- 6) le biais absolu calculé sur les débits inférieurs au 90^{ième} percentile des débits observés.

Les indicateurs en 1) sont les mêmes utilisés que ceux pour le calage. Ces critères sont calculés sur chaque série de débits simulés en validation pour chaque critère de calage utilisé. Les indicateurs 2), 3) et 4) constituent les composantes du KGE détaillées à la section 4.1.3. L'influence de ces composantes sur les critères de performance du modèle sera ainsi analysée. Les indicateurs 5) et 6) permettent d'étudier l'impact du choix du critère de calage sur les débits d'étiage et de crue. Les résultats sont représentés sous la forme de boîtes à moustaches ou sous la forme d'un nuage de points, chaque point représentant un bassin versant pour un total de 181 bassins versants.

4.4 Résultats

4.4.1 Performances du modèle en validation

L'analyse des performances obtenues en fonction des critères de calage a été effectuée en calculant les 3 critères de performance en validation, en fonction de ceux utilisés en calage. Les résultats sont présentés sous la forme de boîtes à moustaches à la Figure 4.2.

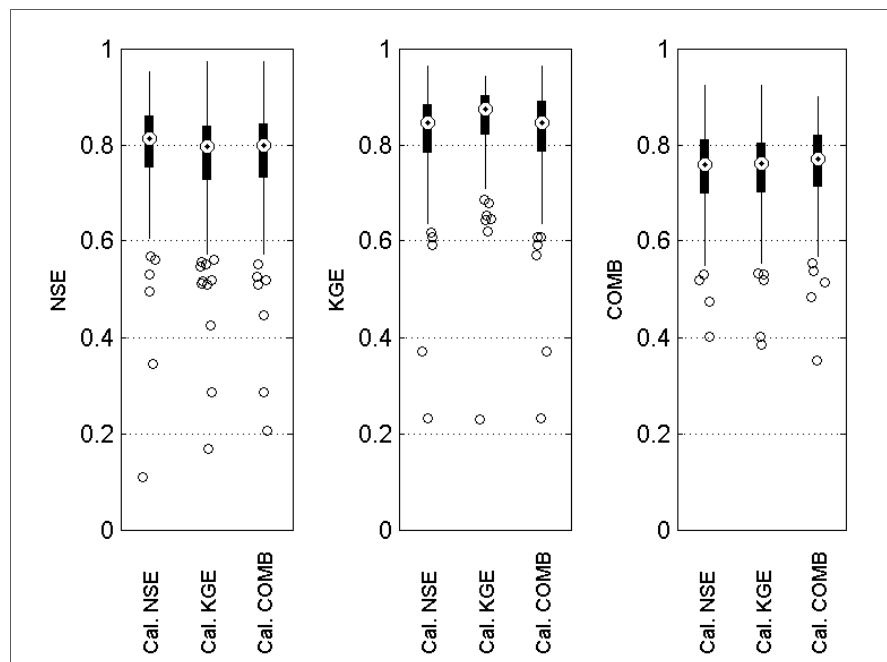


Figure 4.2 Boîtes à moustaches présentant les 3 critères de performance calculés en validation en fonction du critère de performance utilisé pour le calage du modèle HSAMI sur 181 bassins versants au Québec

Tel qu'attendu, lorsque le calage s'effectue en utilisant un certain critère comme métrique de calage, les paramètres du modèle sont ajustés de manière à donner une valeur maximale de ce critère. Ainsi, le NSE en validation est maximal pour les jeux de paramètres calibrés à l'aide du NSE. La même observation vaut pour le KGE et COMB.

4.4.2 Influence des critères de calage sur le biais, la corrélation et le rapport des variances

La Figure 4.3 présente les diagrammes de dispersion des biais relatifs, des coefficients de corrélation et des rapports des variances entre les débits simulés en validation et les débits observés à l'aide des différents critères de performance NSE, KGE et COMB. Chaque diagramme de dispersion confronte deux critères de performance. Pour le biais, on remarque une tendance symétrique de la répartition autour de la diagonale. On en déduit que le critère utilisé n'a pas d'influence absolue sur le biais. Les valeurs du biais semblent se rapprocher de la diagonale entre les critères COMB et NSE. Ces valeurs sont un peu dispersées entre les critères KGE et NSE, et COMB et KGE. Les valeurs de biais sont donc plus semblables pour les critères NSE et COMB.

La répartition des coefficients de corrélation est très entassée sur la diagonale, sans asymétrie notable. Parmi les 3 critères de performance utilisés, aucun n'a une influence systématique sur le coefficient de corrélation.

Concernant les rapports des variances, les points s'éloignent davantage de la diagonale entre les critères KGE et NSE d'une part et KGE et COMB d'autre part. La grande majorité des points se trouvent à chaque fois du côté du critère KGE. Les points ont tendance à se rapprocher de leur valeur optimale pour KGE et s'en éloignent pour NSE et COMB. Le critère KGE a donc plus d'influence sur la variabilité des débits simulés que les critères NSE et COMB. La sous-estimation de la variabilité générale par le critère NSE pourrait s'expliquer par le fait rapporté par Gupta et al. (2009) à l'effet que le NSE utilise la moyenne des débits observés comme référence. En plus de surestimer la performance réelle du modèle, cela a pour effet de surestimer la capacité du modèle par rapport aux variables de forte saisonnalité (par exemple les écoulements importants lors de la crue printanière pour les bassins versants du Québec).

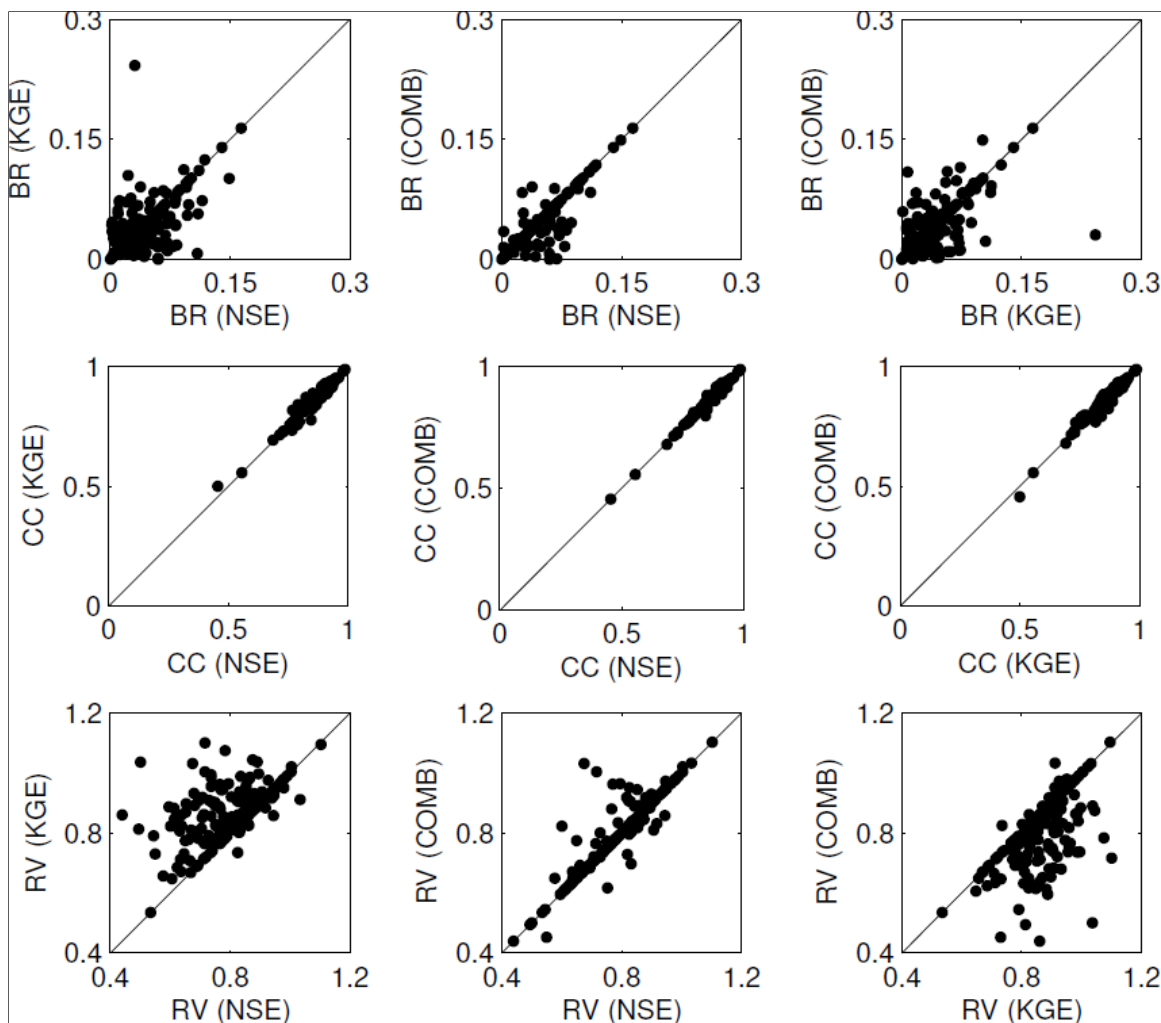


Figure 4.3 Diagramme de dispersion des biais relatifs (BR), des coefficients de corrélation (CC) et des rapports des variances (RV) entre débits simulés et observés, pour chacun des 3 critères de performance en fonction des 2 autres pour la période de validation

Afin d'analyser la relation entre les critères de calage (NSE, KGE, COMB) et les autres indicateurs de performance utilisés dans l'analyse (biais, coefficient de corrélation, rapport des variances), les diagrammes de dispersion ont été construits, mettant en relation les critères de performance en abscisse et les composantes en ordonnée (Figure 4.4).

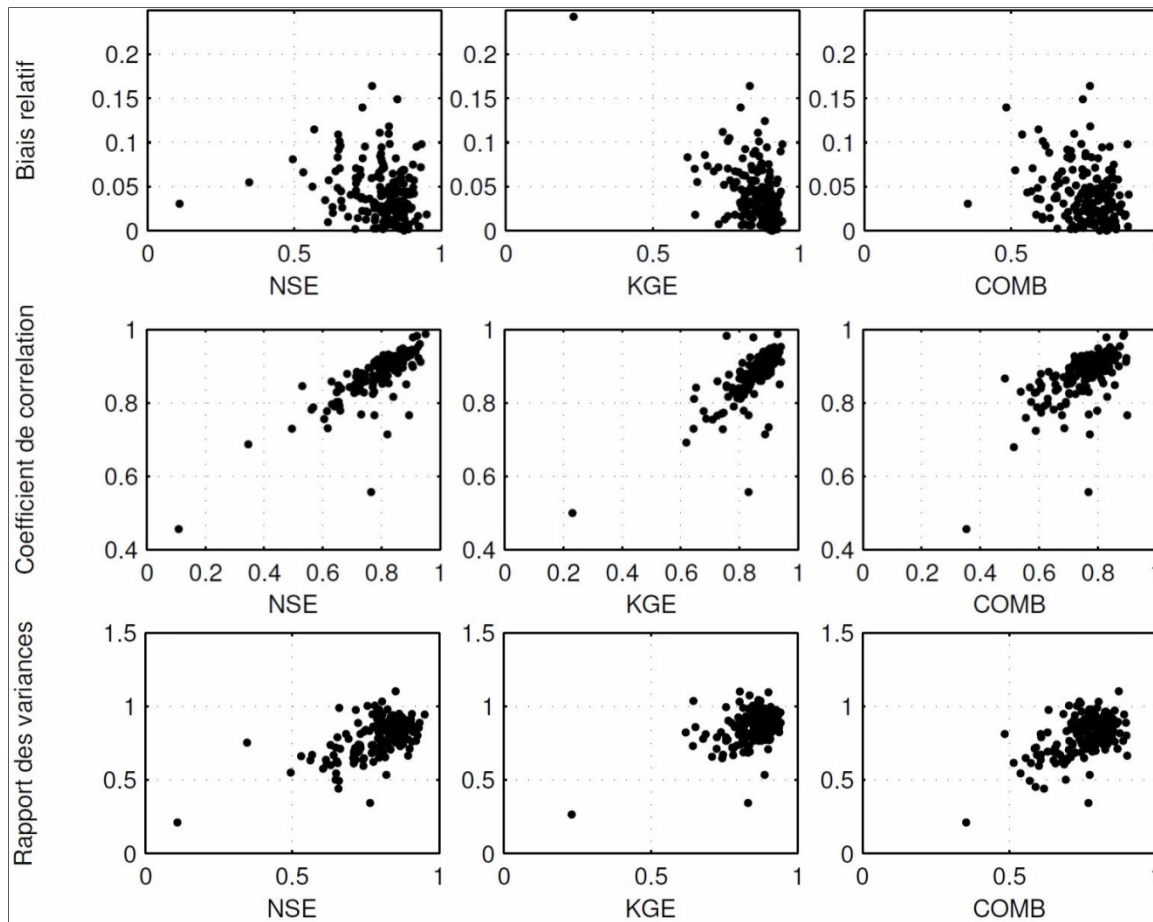


Figure 4.4 Diagramme de dispersion des biais relatifs (BR), coefficients de corrélation (CC) et rapports des variances (RV) en fonction des trois critères de performance NSE, KGE et COMB

En général, on remarque que, meilleures sont les valeurs des critères de calage, meilleures sont les valeurs des autres indicateurs de performance. En outre, pour les trois composantes, on remarque que les points du diagramme sont plus dispersés pour les critères NSE et COMB que pour le critère KGE. Les points du diagramme sont plus entassés près des valeurs optimales pour le critère KGE qu'ils ne le sont pour les critères NSE et COMB, sauf pour les coefficients de corrélation où les dispersions semblent comparables pour les 3 critères de performance.

La Figure 4.5 confirme cette similarité entre les coefficients de corrélation pour les 3 critères de performance (voir boîtes à moustaches du panneau du milieu). Les boîtes à moustaches

pour le rapport des variances (à droite) confirment les conclusions tirées de l'analyse de la Figure 4.3 pour les meilleures valeurs obtenues avec le critère KGE. Quant aux biais, ils restent similaires pour toutes les métriques de calages (voir boîtes à moustaches du panneau de gauche).

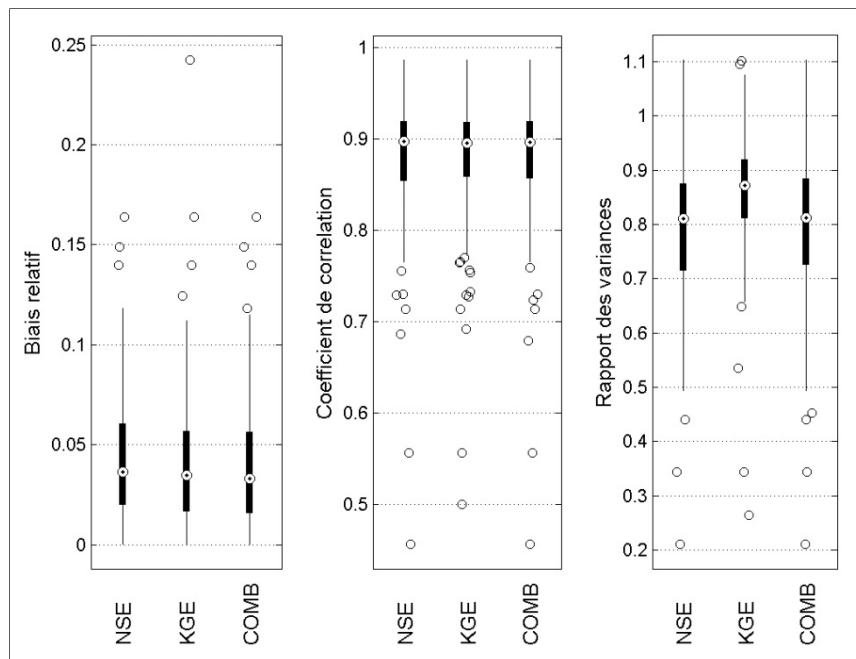


Figure 4.5 Boîtes à moustaches des composantes (biais, coefficient de corrélation et rapport des variances) pour les critères de performances (NSE, KGE, COMB).

4.4.3 Impact du choix du critère de calage sur les débits de crue et d'étiage

Pour analyser l'impact du choix de la métrique de calage sur les débits d'étiage et de crue, l'erreur moyenne absolue est calculée sur les débits inférieurs au 10^{ème} percentile des débits observés (MAE10) et sur les débits supérieurs au 90^{ème} percentile des débits observés (MAE). Les résultats en validation pour tous les bassins versants sont représentés sous la forme de diagrammes de dispersion confrontant les critères de performance deux à deux (Figure 4.6).

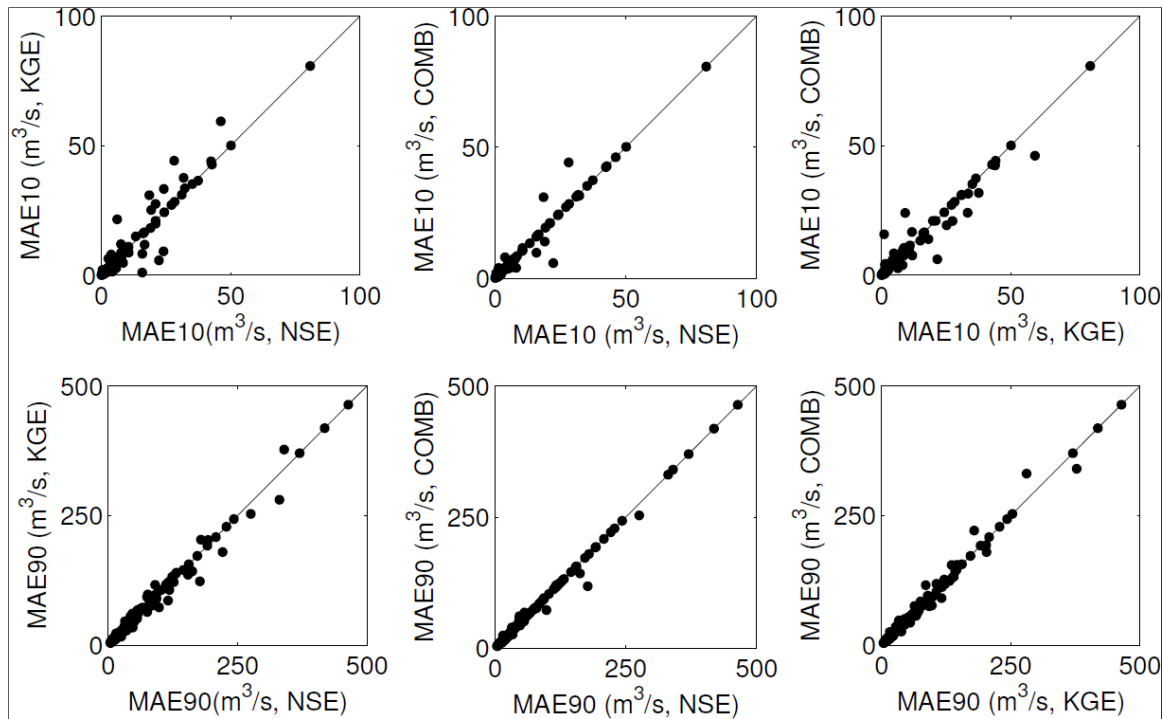


Figure 4.6 Diagrammes de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE10 et MAE90) entre les débits simulés et observés inférieurs au 10^{ème} et supérieurs au 90^{ème} percentile des débits observés, pour chacun des 3 critères de performance en fonction des 2 autres

On remarque que la majorité des points est alignée sur la diagonale pour le MAE10. Toutefois, on note une légère tendance vers le critère KGE, ce qui signifie que ce dernier est un peu plus sensible aux débits d'étiage que les critères NSE et COMB. Quant aux MAE90, les points sont tout aussi bien alignés sur la diagonale, avec une légère tendance vers le critère NSE, ce qui montre sa sensibilité aux débits de crue un peu plus prononcée par rapport aux critères KGE et COMB. La sensibilité du critère NSE aux valeurs élevées soulignée dans des études antérieures (Criss et Winston, 2008; Gupta et al., 2009; Jain et Sudheer, 2008; McCuen et al., 2006; Moriasi et al., 2007; Schaepli et Gupta, 2007) se confirme également ici.

4.5 Discussion et conclusions

Les modèles hydrologiques permettent de suivre les étapes de la transformation de pluies en débits et de ce fait, jouent un rôle important pour la gestion des ressources en eau et l'aménagement du territoire ainsi que pour la gestion des risques hydrologiques. Les critères de performance qui permettent de comparer les débits simulés des modèles aux débits observés ont fait l'objet de plusieurs études. Ces études fournissent de l'information pertinente sur les comparaisons des critères de performance. Toutefois, en fonction de l'hydrologie d'un bassin versant donné et des objectifs de l'étude, le choix du critère de performance pour le calage du modèle peut se faire soit en se basant sur les conclusions tirées de la littérature, soit en évaluant quelques critères de performance sélectionnés parmi les critères proposés dans la littérature.

L'étude présentée dans ce chapitre évalue l'impact du choix du critère de calage sur la performance du modèle hydrologique HSAMI, sur 181 bassins versants au Québec. Trois critères de calage sont évalués, soient le NSE, le KGE et une combinaison critères (COMB, voir section 4.1.4). Des indicateurs additionnels tels que le biais, le coefficient de corrélation et le rapport des variances sont utilisés pour quantifier l'influence des critères de calage sur les débits simulés.

Les résultats ont montré qu'aucun des critères de calage n'a d'influence systématique sur le biais et la corrélation. Cependant, les MAEs sur les débits d'étiage sont plus importants avec le KGE comme critère de calage, tandis qu'avec le NSE comme critère de calage les MAEs sur les débits de crue plus importants. Pour les débits d'étiage, le KGE semble donc plus sévère et pour les débits de crue c'est le NSE qui est le plus sévère. Ce dernier résultat est en accord avec les conclusions des études citées à la section 4.1. La combinaison de métriques a permis d'égaliser pratiquement les performances obtenues avec le NSE et de réduire légèrement le biais du modèle. Par ailleurs, le KGE a montré une influence absolue sur le rapport des variances par rapport aux autres critères, ce qui serait dû au fait qu'un poids égal est octroyé au rapport des variances, au coefficient de corrélation et au biais dans la définition du critère KGE, ce qui n'est pas le cas pour le NSE (Gupta et al., 2009).

L'utilisation du KGE comme critère de calage conduit donc à des paramètres du modèle hydrologique capables de mieux reproduire la variabilité des séries de débits observés. Pour les bassins versants présentant une grande variabilité temporelle du régime hydrologique au cours de l'année, le critère KGE serait donc préférable aux critères NSE et COMB.

CONCLUSION

La recherche présentée dans ce mémoire porte sur l'analyse de trois bases de données de précipitation sur grilles couvrant le Québec au complet, NRCan, CaPA et MDDELCC, et la grille opérationnelle de RT couvrant le bassin versant du LSJ, et leur utilisation pour la modélisation hydrologique. Les grilles NRCan, MDDELCC et RT sont obtenues par interpolation en utilisant uniquement les données enregistrées aux stations météorologiques, tandis que la grille CaPA combine les informations des stations météorologiques et du modèle atmosphérique GEM. Les bases de données sur grilles ont été comparées entre elles dans un premier temps. Ensuite, ces grilles de précipitation ont été utilisées pour alimenter le modèle hydrologique HSAMI sur 181 bassins versants du Québec et le modèle hydrologique CEQUEAU sur le bassin versant du LSJ. Cet exercice a permis d'évaluer et de comparer la réponse des modèles hydrologiques à l'utilisation de chaque base de données de précipitation. L'impact du choix de la métrique pour le calage du modèle HSAMI a également été étudié. Trois critères de performance sélectionnés, soient le NSE, le KGE et une combinaison de critères, ont également été évalués.

L'analyse des variabilités spatiale et temporelle a révélé des différences significatives au centre et au nord du Québec. Les résultats ont montré que NRCan sous-estime fortement des précipitations dans les régions du centre et du nord du Québec par rapport à CaPA et MDDELCC. Les résultats montrent que la grille NRCan se distance des autres grilles en ce qui concerne la corrélation des séries temporelles sur la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

L'analyse des précipitations cumulées de la période 2002-2010, présentée au chapitre 3 a montré une certaine similarité entre les grilles CaPA, MDDELCC et la grille RT pour le bassin versant de LSJ. Les précipitations cumulées calculées à partir des grilles CaPA, MDDELCC et RT sont significativement différentes de la précipitation cumulée calculée à partir de NRCan. La différence est évaluée à plus de 1 m pour les neuf années considérées. La sous-captation des précipitations, que CaPA parvient probablement à

combler, du moins partiellement, à l'aide du modèle atmosphérique GEM, pourrait expliquer en partie cette différence.

Par ailleurs, les densités des réseaux de stations de mesure de précipitation utilisées par NRCan et MDDELCC sont assez similaires pour la période d'étude considérée (2002-2010). Les deux ensembles de données présentent des fortes similarités dans la partie sud du Québec et les différences apparaissent au fur et à mesure que la densité des stations de mesure de précipitation diminue, c'est-à-dire lorsqu'on se déplace du sud vers le nord. Plusieurs hypothèses pourraient justifier les différences observées entre ces deux bases de données de précipitation sur grilles dans le centre et dans la partie nord du Québec.

Il faut rappeler que NRCan emploie les splines de lissage du type plaque mince (ANUSPLIN) tandis que MDDELCC utilise le krigeage ordinaire avec variogramme journalier. La première méthode permet d'ajuster une surface sur un champ d'observation, et la seconde est basée sur les corrélations entre les points d'observation. Dans tous les cas, l'estimation des précipitations sur grilles est très peu fiable lorsque la densité du réseau de stations de mesure est faible (Mizukami et Smith, 2012). Des divergences peuvent ainsi survenir lors du traitement de l'information disponible dans les différents schémas d'interpolation. En outre, NRCan incorpore l'élévation dans son schéma d'interpolation, ce qui n'est pas le cas pour MDDELCC. La région du LSJ est une vaste plaine dont l'altitude se situe autour 200 m au-dessus du niveau de la mer. Elle est entourée de hautes terres telles que les monts Valin ou encore le massif du lac Jacques-Cartier, dont l'altitude se situe autour de 1000 m au-dessus du niveau de la mer. La prise en compte de cette dépression topographique par NRCan constitue une hypothèse qui pourrait expliquer la différence observée entre les champs de précipitation de la grille NRCan et ceux des autres grilles de précipitation.

Il a également été constaté que NRCan et MDDELCC sous-estiment la variabilité temporelle des précipitations par rapport à CaPA durant toutes les saisons, sauf pendant l'hiver. Étant donné la faible densité spatiale des stations météorologiques dans la partie nord du Québec,

l'inclusion de sorties du modèle atmosphérique favorisant une représentation plus détaillée des champs de précipitation constitue un avantage pour CaPA.

Les résultats obtenus appuient l'hypothèse selon laquelle CaPA représente de manière plus détaillée les champs de précipitation par rapport autres jeux de données sur grilles. Cela a été vérifié indirectement en modélisation hydrologique. En effet, les résultats des simulations du modèle HSAMI sur 181 bassins versants au Québec ont montré que l'utilisation des grilles de précipitation de NRCan pour alimenter le modèle conduit très souvent à une diminution des performances. Ceci est probablement dû à la sous-estimation des précipitations rapportée précédemment. Ces résultats ont aussi montré une amélioration des performances avec l'utilisation de CaPA sur la majorité des bassins versants étudiés, principalement ceux qui sont situés au centre et au nord du Québec. Pour les bassins versants situés au sud du Québec, les performances du modèle hydrologique sont très similaires et sont très souvent meilleures pour NRCan et pour MDDELCC. NRCan a montré de meilleures performances sur des bassins versants de petite taille répartis au sud du Québec, tandis MDDELCC a montré de meilleures performances sur des bassins versants de tailles variées, dont la majorité est située sur la rive sud du fleuve St-Laurent.

La construction des hydrogrammes annuels moyens à partir des simulations hydrologiques du modèle CEQUEAU sur le bassin versant du LSJ a permis de constater que NRCan sous-estime fortement les débits en rivière. Les débits les plus proches des débits observés ont été obtenus avec CaPA.

Les résultats de cette étude montrent que la combinaison des produits de précipitations tels que les observations des stations météorologiques et les sorties de modèles atmosphériques peut représenter un atout pour la modélisation hydrologique. Les grilles résultantes pourraient être capables de mieux saisir les variabilités spatiale et temporelle des champs de précipitation, en particulier pour les zones où les stations météorologiques sont rares.

L'étude présentée au chapitre 4, évalue l'influence du choix de la métrique de calage parmi le NSE, le KGE et une combinaison critères, sur la performance du modèle hydrologique HSAMI. L'étude a été réalisée sur 181 bassins versants au Québec. Les résultats ont montré qu'aucun des critères de calage n'a d'influence systématique sur le biais et la corrélation. Toutefois, l'utilisation du KGE a permis de réduire les biais sur les débits simulés pour les étiages tandis qu'avec le NSE le biais a été réduit légèrement sur les débits simulés pour les crues. Avec la combinaison de métriques, les performances obtenues avec le NSE ont été égalées et le biais du modèle a été réduit. Le KGE s'avère être le critère de calage qui influence nettement la variance des débits simulés. Ce critère de calage serait alors préférable aux autres critères étudiés pour les bassins versants dont le régime hydrologique varie beaucoup au cours de l'année, ce qui est le cas des bassins versants au Québec.

Enfin, dans le but de prendre en compte les incertitudes liées aux intrants en modélisation hydrologique, il serait intéressant d'examiner l'approche d'ensemble. D'autres travaux de recherche sont donc nécessaires afin d'obtenir des éléments de réponse aux différentes problématiques soulevées.

ANNEXE I

PARAMÈTRES DES MODÈLES HYDOLOGIQUES

Tableau-A I-1 Description des paramètres du modèle HSAMI

Numéro	Numéro Description des paramètres
1	1 Efficacité de l'évapotranspiration l'été
2	2 Efficacité de l'évapotranspiration l'hiver
3	3 Taux de fonte de la neige le jour (cm/ $\Delta^{\circ}\text{C}$ /jour)
4	4 Taux de fonte de la neige la nuit (cm/ $\Delta^{\circ}\text{C}$ /jour)
5	5 Température de fonte de la neige le jour ($^{\circ}\text{C}$)
6	6 Température de fonte de la neige la nuit ($^{\circ}\text{C}$)
7	Température de référence pour calculer le flux de chaleur pluie - couvert nival ($^{\circ}\text{C}$)
8	8 Effet de redoux sur les aires enneigées
9	9 Effet de gel sur le ruissellement
10	10 Effet de sol sur le ruissellement (cm)
11	11 Seuil minimal du sol saturé sur le ruissellement (cm)
12	Épaisseur minimale du sol - quantité d'eau dans la zone vadose qui ne peut s'écouler par gravité (cm)
13	Épaisseur maximale du sol - quantité d'eau que peut contenir la zone vadose (cm)
14	14 Épaisseur maximale de la nappe (cm)
15	15 Portion de ruissellement de surface
16	16 Portion de ruissellement dans le sol maximale
17	17 Taux de vidange de la zone vadose vers la nappe (1/jour)
18	18 Taux de vidange de la nappe (1/jour)
19	19 Taux de vidange de la réserve intermédiaire (1/jour)
20	20 Mode de l'hydrogramme de surface (jour)
21	21 Forme de l'hydrogramme de surface
22	22 Mode de l'hydrogramme intermédiaire (jour)
23	23 Forme de l'hydrogramme intermédiaire

Tableau-A I-2 Description des paramètres du modèle CEQUEAU

Paramètres	Description
CIN (1)	coefficient d'infiltration du réservoir sol au réservoir
CVMAR	nappe coefficient de vidange du réservoir lacs et
CVNB (1)	marécages coefficient de vidange du réservoir nappe (vidange basse)
CVNH (1)	coefficient de vidange du réservoir nappe (vidange haute)
CVSB	coefficient de vidange du réservoir sol (vidange basse)
CVSI (1)	coefficient de vidange du réservoir sol (vidange intermédiaire)
HINF (1)	seuil d'infiltration vers le réservoir nappe
HINT (1)	seuil de vidange intermédiaire du réservoir sol
HMAR	seuil de vidange du réservoir lacs et marécages
HNAP (1)	seuil de vidange du réservoir nappe
HRIMP (1)	hauteur de précipitation pour qu'il y ait ruissellement sur des surfaces imperméables
HSOL (1)	hauteur du réservoir sol
paramètres régissant la fonte de neige	
STRNE	seuil de transformation pluie-neige
TFC	taux de fonte en forêt
TFD	taux de fonte en clairière
TSC	seuil de température de fonte en forêt
TSD	seuil de température de fonte en clairière
TTD	coefficient de déficit calorifique de la neige
TTS	seuil de mûrissement du stock de neige
paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration	
EVNAP	pourcentage d'évapotranspiration pris dans le réservoir nappe
HPOT (1)	seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel
XAA	exposant de la formule de Thornthwaite (1948)
XIT	valeur de l'index thermique de Thornthwaite (1948)
paramètre et constante du transfert	
EXXKT	paramètre d'ajustement du coefficient de transfert
ZN	temps de concentration du bassin
paramètres et constantes divers	
COET	coefficient de correction des températures avec l'altitude
COEP	coefficient de correction des précipitations avec l'altitude
FACT	facteur modifiant les précipitations moyennes sur un ensemble de carreaux
JOEVA	variables décalant la date d'insolation potentielle maximale respectivement
JONEI	l'évapotranspiration et pour la neige
XINFMA	infiltration maximale par jour
XLA	latitude moyenne du bassin versant
TRI (1)	pourcentage de surface imperméable

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arsenault, Richard , Gilles Essou et François Brissette. 2016. « Improving hydrological model simulations with combined multi-input and multi-model averaging frameworks ». *Journal of Hydrologic Engineering*, Ref.: Ms. No. HEENG-2854R2, p. accepted for publication on 23-09-2016.
- Arsenault, Richard, et François Brissette. 2014. « Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches ». *Water Resources Research*, vol. 50, n° 7, p. 6135-6153.
- Arsenault, Richard, Philippe Gatien, Benoit Renaud, François Brissette et Jean-Luc Martel. 2015. « A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation ». *Journal of Hydrology*, vol. 529, p. 754-767.
- Arsenault, Richard, Annie Poulin, Pascal Côté et François Brissette. 2013. « Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, n° 7, p. 1374-1384.
- Baillargeon, Sophie. 2005. « Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations ». Université Laval, 128 p.
- Baillargeon, Sophie, Jacynthe Pouliot, Louis-Paul Rivest, Vincent Fortin et Josée Fitzback. 2004. « Interpolation statistique multivariable de données de précipitations dans un cadre de modélisation hydrologique ». In *les actes du colloque national Géomatique 2004 de l'Association canadienne des sciences géomatiques*, Montréal, 27 et 28.
- Benyahya, Loubna, Anik Daigle, Daniel Caissie, Dan Beveridge et André St-Hilaire. 2009. *Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada*. INRS-ETE.
- Bergeron, Onil 2015. *Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2 – Guide d'utilisation*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement. ISBN 978-2-550-73568-7 (PDF), 33 p.

- Beven, Keith 2006. « A manifesto for the equifinality thesis ». *Journal of Hydrology*, vol. 320, n° 1, p. 18-36.
- Beven, Keith 2012. *Rainfall-runoff modelling : the primer*, 2nd. Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, xxix, 457 p. p.
- Boucher, Marie-Amélie, et Robert Leconte. 2013. « Changements climatiques et production hydroélectrique canadienne: où en sommes-nous? ». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 38, n° 3, p. 196-209.
- Brasnett, Bruce. 1999. « A global analysis of snow depth for numerical weather prediction ». *Journal of Applied Meteorology*, vol. 38, n° 6, p. 726-740.
- Brisson, Cathy, Marie-Amélie Boucher et Marco Latraverse. 2015. « Illustration of the added value of using a multi-site calibration and correction approach to reconstruct natural inflows and inter-catchment transfer flow: a case study ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 42, n° 5, p. 342-352.
- Carpenter, Theresa, et Konstantine Georgakakos. 2006. « Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales ». *Journal of Hydrology*, vol. 329, n° 1, p. 174-185.
- Chai, Tianfeng, et Roland Draxler. 2014. « Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature ». *Geoscientific Model Development*, vol. 7, n° 3, p. 1247-1250.
- Chen, Jie, François Brissette et Robert Leconte. 2012. « Downscaling of weather generator parameters to quantify hydrological impacts of climate change ». *Climate Research*, vol. 51, n° 3, p. 185.
- Chen, Jie, François Brissette et Xunchang Zhang. 2015. « Hydrological Modeling Using a Multisite Stochastic Weather Generator ». *Journal of Hydrologic Engineering*, p. 04015060.
- Chen, Jie, François Brissette et Robert Leconte. 2011. « Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology ». *Journal of Hydrology*, vol. 401, n° 3–4, p. 190-202.

- Chow, Te Ven, David Maidment et Larry Mays. 1988. *Applied hydrology*. Coll. « GB661.2.C43 1988 627 87-16860 ». New York: McGraw-Hill.
- Cressie, Noel. 1993. *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.
- Criss, Robert, et William Winston. 2008. « Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals ». *Hydrological Processes*, vol. 22, n° 14, p. 2723.
- Daly, Christopher. 2006. « Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets ». *International Journal of Climatology*, vol. 26, n° 6, p. 707-721.
- Dibike, Yonas, et Paulin Coulibaly. 2007. « Validation of hydrological models for climate scenario simulation: the case of Saguenay watershed in Quebec ». *Hydrological Processes*, vol. 21, n° 23, p. 3123-3135.
- Ensor, Leslie, et Scott Robeson. 2008. « Statistical characteristics of daily precipitation: comparisons of gridded and point datasets ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, n° 9, p. 2468-2476.
- Essou, Gilles, Richard Arsenault et François Brissette. 2016. « Comparison of climate datasets for lumped hydrological modeling over the continental United States ». *Journal of Hydrology*, vol. 537, p. 334-345.
- Eum, Hyung-Il, Yonas Dibike, Terry Prowse et Barrie Bonsal. 2014. « Inter-comparison of high-resolution gridded climate data sets and their implication on hydrological model simulation over the Athabasca Watershed, Canada ». *Hydrological Processes*, vol. 28, n° 14, p. 4250-4271.
- Fortin, Vincent, et Guy Roy. 2011a. *The Regional Deterministic Precipitation Analysis (RDPA). Technical note, Meteorological Service of Canada and Meteorological Research Division, Environment Canada*.
- Fortin, Vincent. 2000. « Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application ». *Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes*.
- Fortin, Vincent, et Guy Roy. 2011b. « L'analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP) ». *Environnement Canada*, vol. Document Technique, n° Version 1.0.

- Fortin, Vincent, Guy Roy, Norman Donaldson et Ahmed Mahidjiba. 2015. « Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) ». *Journal of Hydrology*, vol. 531, p. 296-307.
- Frank, Ildiko, et Roberto Todeschini. 1994, p. 264. *The data analysis handbook*, 14. Elsevier.
- Frevert, Donald, et Vijay Singh. 2003. « Watershed Modeling ». In *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. p. 1-37.
- Goldfarb, Bernard, et Catherine Pardoux. 2005. « Méthodes d'ajustements graphiques: Diagramme Quantile-Quantile ». *Excel'ense-Modulad*, n° 33.
- Goovaerts, Pierre. 2000. « Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall ». *Journal of Hydrology*, vol. 228, n° 1, p. 113-129.
- Gouvernement du Québec. 2004. *Le secteur énergétique au Québec, Contexte, enjeux et questionnements*. 2004-4003. MRFP, 69 p.
- Grimes, David, et Eulogio Pardo-Igúzquiza. 2010. « Geostatistical Analysis of Rainfall ». *Geographical Analysis*, vol. 42, n° 2, p. 136-160.
- Gupta, Hoshin, Harald Kling, Koray Yilmaz et Guillermo Martinez. 2009. « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling ». *Journal of Hydrology*, vol. 377, n° 1, p. 80-91.
- Haberlandt, Uwe. 2007. « Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event ». *Journal of Hydrology*, vol. 332, n° 1-2, p. 144-157.
- Haghnegahdar, Amin, Bryan Tolson, Bruce Davison, Frank Seglenieks, Erika Klyszejko, Eric D Soulis, Vincent Fortin et L Shawn Matott. 2014. « Calibrating Environment Canada's MESH Modelling System over the Great Lakes Basin ». *Atmosphere-Ocean*, vol. 52, n° 4, p. 281-293.
- Hansen, Nikolaus, et Andreas Ostermeier. 1996. « Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation ». In

Evolutionary Computation, 1996., *Proceedings of IEEE International Conference on*. p. 312-317. IEEE.

Hansen, Nikolaus, et Andreas Ostermeier. 2001. « Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies ». *Evolutionary computation*, vol. 9, n° 2, p. 159-195.

Hopkinson, Ron, Daniel McKenney, Ewa Milewska, Michael Hutchinson, Pia Papadopol et Lucie Vincent. 2011. « Impact of aligning climatological day on gridding daily maximum-minimum temperature and precipitation over Canada ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, n° 8, p. 1654-1665.

Hutchinson, Michael 1995. « Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines ». *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 9, n° 4, p. 385-403.

Hutchinson, Michael, et Robert Bischof. 1983. « A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Hunter Valley, New South Wales ». *Australian Meteorological Magazine*, vol. 31, n° 3, p. 179-184.

Hutchinson, Michael, Dan McKenney, Kevin Lawrence, John Pedlar, Ron Hopkinson, Ewa Milewska et Pia Papadopol. 2009. « Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003 ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, n° 4, p. 725-741.

Jain, Sharad, et KP Sudheer. 2008. « Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 13, n° 10, p. 981-986.

Krzysztofowicz, Roman. 2001. « The case for probabilistic forecasting in hydrology ». *Journal of hydrology*, vol. 249, n° 1, p. 2-9.

Legates, David, et Gregory McCabe. 1999. « Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation ». *Water Resources Research*, vol. 35, n° 1, p. 233-241.

Lespinas, Franck, Vincent Fortin, Guy Roy, Peter Rasmussen et Tricia Stadnyk. 2015. « Performance Evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA) ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 16, n° 5, p. 2045-2064.

- Lu, George, et David Wong. 2008. « An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique ». *Computers & Geosciences*, vol. 34, n° 9, p. 1044-1055.
- Ly, Sarann, Catherine Charles et Aurore Degré. 2013. « Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review ». *Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement*, vol. 17, n° 2, p. 392-406.
- Mahfouf, Jean-François, Bruce Brasnett et Stéphane Gagnon. 2007. « A Canadian precipitation analysis (CaPA) project: Description and preliminary results ». *Atmosphere-Ocean*, vol. 45, n° 1, p. 1-17.
- McCuen, Richard, Zachary Knight et Gillian Cutter. 2006. « Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 11, n° 6, p. 597-602.
- Minville, Marie, François Brissette et Robert Leconte. 2009. « Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River System (Canada) ». *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Mizukami, Naoki, et Michael Smith. 2012. « Analysis of inconsistencies in multi-year gridded quantitative precipitation estimate over complex terrain and its impact on hydrologic modeling ». *Journal of Hydrology*, vol. 428, p. 129-141.
- Moradkhani, Hamid, et Soroosh Sorooshian. 2008. « General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis ». In *Hydrological Modelling and the Water Cycle*. p. 1-24. Springer.
- Moriasi, Daniel, Jeffrey Arnold, Michael Van Liew, Ronald Bingner, Daren Harmel et Tamie Veith. 2007. « Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations ». *Transactions of the ASABE*, vol. 50, n° 3, p. 885-900.
- Morin, Guy, et Pierre Paquet. 2007. *Modèle hydrologique CEQUEAU*. rapport de recherche no R000926: Université du Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement, 458 p.
- Nash, Eamonn, et Jonh Sutcliffe. 1970. « River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles ». *Journal of Hydrology*, vol. 10, n° 3, p. 282-290.

- Oudin, Ludovic, Charles Perrin, Thibault Mathevet, Vazken Andréassian et Claude Michel. 2006. « Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models ». *Journal of Hydrology*, vol. 320, n° 1–2, p. 62-83.
- Pechlivanidis, Ilias, Bethanna Jackson, Neil McIntyre et Howard Wheeler. 2011. « Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications ». *Global NEST Journal*, vol. 13, n° 3, p. 193-214.
- Pollock, Michael 2012. « The extent and implications of inaccuracies caused by wind-induced undercatch on rain gauges in the Eden catchment. ». Newcastle University, 94 p.
- Poulin, Annie, François Brissette, Robert Leconte, Richard Arsenault et Jean-Stéphane Malo. 2011. « Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin ». *Journal of Hydrology*, vol. 409, n° 3, p. 626-636.
- Québec water policy. 2002. *Water. Our Life. Our Future*. Bibliothèque nationale du Québec. < <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/politique/policy.pdf> >.
- Ruelland, Denis, Sandra Ardoin-Bardin, Gilles Billen et Eric Servat. 2008. « Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa ». *Journal of Hydrology*, vol. 361, n° 1, p. 96-117.
- Schaefli, Bettina, et Hoshin Gupta. 2007. « Do Nash values have value? ». *Hydrological Processes*, vol. 21, n° 15, p. 2075-2080.
- Shepard, Donald. 1968. « A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data ». In *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. p. 517-524. ACM.
- Shrestha, Rajesh, Yonas Dibike et Terry Prowse. 2012. « Modelling of climate-induced hydrologic changes in the Lake Winnipeg watershed ». *Journal of Great Lakes Research*, vol. 38, Supplement 3, p. 83-94.

- Silva, Viviane, Vernon Kousky, Wei Shi et Wayne Higgins. 2007. « An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 4, p. 847-861.
- Singh, Vijay, et David Woolhiser. 2002. « Mathematical modeling of watershed hydrology ». *Journal of hydrologic engineering*, vol. 7, n° 4, p. 270-292.
- Tabios, Guillermo, et Jose Salas. 1985. « A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 21, n° 3, p. 365-380.
- Tapsoba, Dominique, Vincent Fortin, François Anctil et Mario Haché. 2005. « Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, n° 1, p. 289-297.
- Taylor, Karl 2000. *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*. Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California.
- Thiessen, Alfred 1911. « Precipitation averages for large areas ». *Monthly Weather Review*, vol. 39, n° 7, p. 1082-1089.
- Thornthwaite, Charles Warren. 1948. « An approach toward a rational classification of climate ». *Geographical review*, vol. 38, n° 1, p. 55-94.
- Tolson, Bryan, et Christine Shoemaker. 2007. « Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration ». *Water Resources Research*, vol. 43, n° 1.
- Tozer, Carly, Anthony Kiem et Danielle Verdon-Kidd. 2012. « On the uncertainties associated with using gridded rainfall data as a proxy for observed ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, n° 5, p. 1481-1499.
- Troin, Magali, Richard Arsenault et François Brissette. 2015. « Performance and Uncertainty Evaluation of Snow Models on Snowmelt Flow Simulations over a Nordic Catchment (Mistassibi, Canada) ». *Hydrology*, vol. 2, n° 4, p. 289-317.

