

Évaluation hydrologique de jeu de données de précipitations et températures journalières issues du modèle régional de climat "CROQ"

par

Soudabeh AZARNIA

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

MONTREAL, LE 30 NOVEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Soudabeh Azarnia, 2017



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 :

M. François Brissette, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Sébastien Biner, codirecteur de mémoire
Groupe de Simulations et analyses climatiques, Ouranos Inc.

Mme. Danielle Monfet, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Richard Arsenault, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 21 NOVEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Après une période intensive de deux années, je conclus ce mémoire par cette note de remerciement. Ce fut une période enrichissante pour moi, tant aux niveaux scientifique, personnel que professionnel. J'aimerais adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont tant soutenue et aidé tout au long de cette période.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. François Brissette pour m'avoir donné cette opportunité de profiter de son expérience en recherche. Je considère toujours comme une grande chance le fait de vous avoir rencontré. Merci mille fois pour tout ce que vous m'avez offert : la confiance, le courage, vos conseils. Je vous suis reconnaissante d'avoir fourni l'environnement nécessaire pour mener mes travaux de recherche à bien. Je n'aurais pu réaliser ce mémoire sans votre généreux soutien.

J'aimerais aussi remercier mon codirecteur, M. Sébastien Biner qui avait un rôle important pour clarifier les points ambigus et simplifier la complexité de cette recherche par ses explications scientifiques. J'ai grandement apprécié le temps que vous m'avez consacré. Vos conseils et vos idées précieuses ont contribué grandement à la réussite de ce mémoire.

Je remercie le groupe « Simulation et analyse climatiques » chez Ouranos pour leur coopération dans la production et la transmission des données CROQ.

Je voudrais remercier mon époux. Merci mon amour, mon ami, mon Amir. Tu es toujours présent pour que je ne me sente pas seule dans le chemin de la vie. Ta présence est joyeuse et réconfortante. J'aimerais également remercier du plus profond du cœur mon père et ma mère pour leurs conseils prometteurs et leur écoute attentive. Vous êtes toujours là avec beaucoup de patience pour m'encourager et réduire mon stress. Merci à mon frère unique pour me donner espoir et énergie positive.

VI

Je tiens à remercier particulièrement Gilles Essou pour ses réponses à toutes mes questions et son partage de ses connaissances scientifiques et de ses données. Je remercie aussi Philippe Lucas-Picher pour ses analyses pratiques et ses réflexions pendant les réunions de discussion.

Finalement, j'aimerais remercier tous mes amis et mes collègues au DRAME, pour l'ambiance scientifique chaleureuse et amicale. Je remercie Jean-Luc pour être toujours prêt à m'aider et je remercie Samaneh pour tous ses conseils. Je remercie Richard, Salam, Émilie, Anna, Alex, Magali, Mélissa, Mariana, Martine, Cha, Pierre-Luc et Salim pour votre merveilleuse collaboration, gentillesse et amitié. Ce fut un grand plaisir pour moi d'étudier avec vous.

ÉVALUATION HYDROLOGIQUE DE JEU DE DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS ET TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES ISSUES DU MODÈLE RÉGIONAL DE CLIMAT "CROQ"

Soudabeh AZARNIA

RÉSUMÉ

La faible densité du réseau de stations météorologiques dans les régions éloignées et la nécessité d'avoir des données météorologiques fiables pour les études hydrologiques poussent les chercheurs à regarder des jeux de données alternatives pour compléter ou même remplacer les données traditionnelles provenant des stations.

L'objectif de la présente recherche est d'analyser la capacité du jeu de données du modèle régional de climat CROQ à reproduire l'hydrologie des différents bassins versants du Québec. Le jeu de données du modèle régional CROQ provient d'une simulation à haute résolution du modèle régional de climat Canadien piloté par la réanalyse atmosphérique ERA-Intérim.

En premier lieu, la qualité des données de températures et précipitations issues de CROQ est évaluée par rapport à celle de trois autres jeux de données : la base de données interpolées sur grille "NRCan", la réanalyse "ERA-Intérim", et celles provenant d'une autre simulation provenant du même modèle régional de climat "MRCC5", mais selon une configuration différente. Par la suite, la validation hydrologique du jeu de données CROQ est réalisée. Pour ce faire, les données météorologiques de chacun des jeux de données sont utilisées comme intrants à deux modèles hydrologiques conceptuels globaux de complexité différente (HSAMI et GR4J) afin de simuler les débits en rivières. Le potentiel des deux modèles à représenter les débits en rivières est ensuite comparé.

Afin de découvrir la diversité spatiale et temporelle entre les jeux de données, la validation climatique et hydrologique est effectuée en utilisant diverses métriques aux pas de temps annuel et saisonnier, et en comparant les simulations hydrologiques effectuées sur 117 bassins versants du Québec. Ces résultats ont ensuite été raffinés en comparant 20 bassins versants du sud et du nord du Québec.

En général, les résultats de la comparaison montrent que CROQ surestime systématiquement la précipitation, et que ses températures sont plus froides, et ce notamment durant le printemps sur l'ensemble de Québec. Au Sud du Québec, les données CROQ sont moins biaisées par rapport aux autres jeux de données et présentent une plus faible variabilité inter-bassin. Le jeu de données CROQ permet une bonne performance en modélisation hydrologique sur les bassins versants du sud, et ce pour les deux modèles hydrologiques. Les résultats en modélisation hydrologique sont comparables, quoique légèrement inférieurs à ceux des autres jeux de données.

VIII

Au nord du Québec par contre, les biais associés aux données CROQ donnent de moins bons résultats en modélisation hydrologique, et ce particulièrement avec le modèle GR4J. Ce modèle présente peu de paramètres ajustables lors de sa calibration et il est incapable de s'ajuster aux biais présents dans les données de précipitation et de température provenant de CROQ.

De manière générale, la réanalyse ERA-I, malgré sa résolution plus grossière, donne des résultats supérieurs (et en particulier au Nord) en modélisation hydrologique comparativement à CROQ et même en comparaison avec NRCan pourtant directement issu des données de stations météorologiques. Les données CROQ sont en général plus biaisées que celle de son pilote (ERA-I), indiquant que le modèle régional ajoute ses biais à ceux de son pilote. En modélisation hydrologique, la résolution accrue de CROQ ne semble pas compenser pour ces biais supplémentaires ainsi que pour la liberté accrue du modèle régional à l'intérieur de son domaine de calcul. Cette liberté accrue résulte en des trajectoires de systèmes météorologiques potentiellement légèrement différentes de celles observées ce qui résulte en une baisse de corrélation journalière des variables météorologiques observées et simulées, et une inévitable baisse de performance en modélisation hydrologique.

Mots-clés : Modèle régional de climat, réanalyse, modélisation hydrologique, bassin versant

HYDROLOGICAL ASSESSMENT OF DAILY PRECIPITATION AND TEMPERATURES DATASET FROM "CROQ" REGIONAL CLIMATE MODEL

Soudabeh AZARNIA

ABSTRACT

The low density of the meteorological station network in remote areas and the need of reliable meteorological data for hydrological studies push researchers to seek alternative datasets to complement or even replace traditional data from stations.

The objective of this research is to analyze the capability of CROQ regional climate model dataset to reproduce the hydrology of the different watersheds of Quebec. The CROQ regional model dataset comes from a high-resolution simulation of the Canadian regional climate model driven by the ERA-Interim reanalysis.

First, the quality of CROQ temperature and precipitation data is evaluated in relation to those of different datasets as "NRCan" interpolated database on the grid, "ERA-Interim" reanalysis and those derived from another simulation from the same regional climate model "MRCC5", but in a different configuration. Subsequently, the hydrological validation of CROQ datasets is performed. To do this, the meteorological data of each dataset are used as input data for two global conceptual hydrological models of different complexity (HSAMI and GR4J) in order to simulate river flows. The potential of the two models to represent river flows is then compared.

In order to discover the spatial and temporal diversity between the datasets, climatic and hydrological validation is carried out by various metrics with annual and seasonal time steps and by comparing the hydrological simulations carried out on 117 watersheds in Quebec. These results were then refined by comparing 20 watersheds in southern and northern Quebec.

In general, the results of the comparison show that CROQ systematically overestimates precipitation, and its temperatures are colder, especially in the spring months over whole Québec. In southern Quebec, CROQ data are less biased than other datasets and show a lower inter-basin variability. The CROQ dataset allows good performance in hydrological modeling on southern watersheds for both hydrological models. Hydrological modeling results are comparable, although slightly lower than for other datasets.

However, in Northern Quebec, the biases associated with the CROQ data give less successful result in hydrological modeling, particularly with the GR4J model. This model presents few adjustable parameters during its calibration and is unable to adjust to existing biases in the precipitation and temperature data from CROQ.

In general, ERA-I reanalysis, despite its coarser resolution, gives superior results (especially in the North) in hydrological modeling compared to CROQ. The CROQ data are generally

more biased than its driver (ERA-I), indicating that the regional model adds its biases to those of its driver. In hydrological modeling, the increased CROQ resolution does not seem to compensate for these additional biases as well as the increased freedom of the regional model within its computational domain. This increased freedom results in trajectories of meteorological systems potentially slightly different from those observed, which results in a daily correlation of observed and simulated meteorological variables and an inevitable decline in performance in hydrological modeling.

Keywords: Regional climate model, reanalysis, hydrological modeling, watershed

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Données météorologiques par interpolation spatiale	5
1.2 Données provenant de réanalyses atmosphériques	9
1.3 Utilisation d'un modèle régional de climat	12
1.4 Utilisation des modèles hydrologiques pour valider des données météorologiques	14
1.4.1 Modélisation hydrologique et réanalyses	14
1.4.2 Modélisation hydrologique et modèle régional de climat	16
1.5 Objectifs du présent travail	18
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	21
2.1 Les bassins versants étudiés	21
2.2 Données utilisées	22
2.2.1 Jeux de données météorologiques	22
2.2.2 Base de données hydrologiques	24
2.3 Comparaison climatique des jeux de données à grille	26
2.4 Modélisation hydrologique	28
2.4.1 Modèles hydrologiques utilisés : GR4J et HSAMI	29
2.4.2 Calibration des modèles hydrologique	31
2.4.2.1 Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe	31
2.4.2.2 Algorithme d'optimisation	32
2.5 Métriques utilisées pour comparer la performance des deux modèles hydrologiques	32
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	35
3.1 Comparaison générale des jeux de données : Température et Précipitation	35
3.1.1 Comparaison sur la province de Québec et sur 117 bassins versants de CQ2	35
3.1.1.1 Carte moyenne saisonnière de précipitation et température	35
3.1.1.2 Biais moyen saisonnier	40
3.1.1.3 Moyenne des cycles annuels	45
3.1.2 Comparaison sur 20 grands bassins versants du Nord et du Sud	46
3.1.2.1 Biais moyen saisonnier	46
3.1.2.2 Ratio des variances	48
3.1.2.3 Coefficient de corrélation	50
3.1.3 Comparaison sur deux grands bassins versants du Nord et du Sud	52
3.1.3.1 Moyenne des cycles annuels	53
3.1.3.2 Diagramme de Taylor	54
3.1.3.3 Diagramme Quantile-Quantile	57
3.2 Simulation hydrologique en validation	58
3.2.1 Performance des modèles HSAMI & GR4J sur 117 bassins	58

3.2.2	Analyse statistique et comparaison des modèles HSAMI et GR4J sur 20 grands bassins du Nord et du Sud du Québec.....	60
3.2.2.1	Critère de Nash-Sutcliffe	61
3.2.2.2	Biais normalisé moyen annuel sur les débits simulés.....	62
3.2.2.3	Coefficient de corrélation des débits journaliers	63
3.2.2.4	Ratio des Variances.....	64
3.2.2.5	RMSE normalisée, MAE10 & MAE90	65
3.2.3	Comparaison des simulations hydrologiques des deux modèles sur un bassin du Nord et un bassin du Sud	67
3.2.3.1	Hydrogramme Moyen annuel	67
3.2.3.2	Moyenne annuelle des Neiges simulées	69
CHAPITRE 4	DISCUSSION	71
4.1	Validation des données journalières de température et précipitation du jeu de données CROQ	71
4.1.1	Précipitation	72
4.1.2	Température	72
4.2	Évaluation hydrologique de jeu de données CROQ sur la province du Québec	73
4.3	Comparaison de la performance des deux modèles hydrologiques	75
CONCLUSION		77
RECOMMANDATIONS		79
ANNEXE I	LISTE DES FIGURES CONCERNANT LA COMPARAISON MÉTÉOROLOGIQUE DES JEUX DE DONNÉES ...	81
ANNEXE II	LISTE DES FIGURES CONCERNANT LA COMPARAISON DES DEUX MODÈLES HYDROLOGIQUES	87
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		91

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 La liste des principales réanalyses disponibles	10
Tableau 1.2 Résumé de la revue littérature.....	18
Tableau 2.1 Principales caractéristiques des jeux de données utilisées dans cette étude	24

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	La Carte des stations météorologiques quotidiennes d'Environnement Canada - 1686 stations ayant 30 ans d'observations Tirée de Martel et al. (2015)8
Figure 2.1	Localisation des 117 bassins versants de la base de données CQ2 et de deux groupes de 10 bassins versants du nord (contours bleus) et du sud (contours rouges).....21
Figure 2.2	Structure de la méthodologie.....26
Figure 3.1	Précipitation moyenne quotidienne par saison (mm/jour) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)36
Figure 3.2	Température maximale moyenne par saison (°C) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)38
Figure 3.3	Température minimale moyenne par saison (°C) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)39
Figure 3.4	Biais de précipitation moyenne quotidienne par saison (mm/jour) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010.....40
Figure 3.5	Biais de température max moyenne quotidienne par saison (°C) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010.....41
Figure 3.6	Biais de température min moyenne quotidienne par saison (°C) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010.....42
Figure 3.7	Diagramme en boîte à moustaches montrant le Biais (B) de la précipitation par saison (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur 117 bassins versants pour la période 1980-201043

Figure 3.8	Diagramme en boîte à moustaches montrant le Biais (B) de la température minimale par saison (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur 117 bassins versants la période 1980-2010.....	44
Figure 3.9	La carte de biais (B) de la température minimale moyenne quotidienne (°C) (CROQ(bba) / NRCan) de 117 bassins versants pour la période 1980-2010 et les mois de Avril et Mai	44
Figure 3.10	Moyen cycle annuel (a) de la précipitation, la température max et la température min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 et (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur province de Québec	45
Figure 3.11	Localisation des 20 grands bassins versants de la base de données CQ2 divisée en deux groupes de 10 bassins versants du nord et du sud de la province de Québec	46
Figure 3.12	Diagramme en boîte à moustaches montrant les biais (B) de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud	47
Figure 3.13	Diagramme en boîte à moustaches montrant les biais (B) de la température minimale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud.....	48
Figure 3.14	Diagramme en boîte à moustaches montrant les ratios des variances de la température minimale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud.....	49
Figure 3.15	Diagramme en boîte à moustaches montrant les ratios des variances de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud.....	50
Figure 3.16	Diagramme en boîte à moustaches montrant les coefficients de corrélation de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport	

	à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud.....	51
Figure 3.17	Diagramme en boîte à moustaches montrant les coefficients de corrélation de la température maximale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud.....	52
Figure 3.18	Moyen cycle annuel (a) de la précipitation, des températures max et min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur un bassin versant du nord du Québec	53
Figure 3.19	Moyen cycle annuel (a) de la précipitation, des températures max et min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur un bassin versant du sud du Québec.....	54
Figure 3.20	Diagramme de Taylor de la comparaison statistique entre la série chronologique quotidienne par saison de précipitation, température min et max de CROQ (bba) et RNCAN, (en vert), ERA et NRCan(en rouge) et MRCC5 et NRCan(en rose) sur un bassin versant du nord. Les séries temporelles sont prises par saison (hiver = cercle, printemps = losange, été = carré et automne = triangle).....	55
Figure 3.21	Diagramme de Taylor de la comparaison statistique entre la série chronologique quotidienne par saison de précipitation, température min et max de CROQ (bba) et NRCan (en vert), ERA et NRCan (en rouge) et MRCC5 et NRCan (en rose) sur un bassin versant du sud. Les séries temporelles sont prises par saison (hiver = cercle, printemps = losange, été = carré et automne = triangle).....	56
Figure 3.22	Diagramme quantiles-quantiles pour les précipitations et températures maximale et minimale annuelles pour le bassin sélectionné au nord	57
Figure 3.23	Diagramme en boîte à moustaches montrant les valeurs d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) de validation sur 117 bassins versants sur la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)	59
Figure 3.24	Les résultats de validation (NSE) du modèle hydrologique HSAMI (rangée supérieure) et GR4J (rangée inférieure) utilisant les différents	

	jeux de données (CROQ(bba), ERA et MRCC5) et combinaisons de données de température et de précipitation sur 117 bassins versants durant la période 1979-2010 (T = Température maximale, t = Température minimale, p = Précipitation, CR=CROQ, NR=NRCan , ER=ERA, MR=MRCC5).....	60
Figure 3.25	Diagramme en boîte à moustaches des valeurs d'efficacité de NSE en validation sur 20 grands bassins versants sur la période 1980-2010. Les résultats des modèles HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche en noir et à droite en rouge	61
Figure 3.26	Diagramme de dispersion des valeurs de NSE de validation pour chacun des jeux de données (CROQ(bba), NRCan, ERA et MRCC5) en fonction des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J pour la période 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord(gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite).....	62
Figure 3.27	Diagramme en boîte à moustaches du bias normalisé annuel moyen par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge).....	63
Figure 3.28	Diagramme de dispersion des valeurs des coefficients de corrélation des débits journaliers simulés par rapport aux débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins du nord(gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)	64
Figure 3.29	Diagramme en boîte à moustaches montrant les valeurs du ratio des variances des débits simulés par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)	65
Figure 3.30	Diagramme de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE10) entre les débits journaliers simulés et observés inférieurs au 10ième percentile des débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite).....	66
Figure 3.31	Diagramme de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE90) entre les débits journaliers simulés et observés supérieurs au 90ième percentile des débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite).....	66

Figure 3.32	Comparaison des hydrogrammes annuels moyens observés et simulés par HSAMI pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)	67
Figure 3.33	Comparaison des hydrogrammes annuels moyens observés et simulés par GR4J pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)	68
Figure 3.34	Comparaison des cycles moyens annuels de la neige de CROQ(bbq) et de la neige simulée par modèle HSAMI pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)	69
Figure 3.35	Comparaison des cycles moyens annuels de la neige de CROQ(bbq) et de la neige simulée par modèle GR4J pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)	70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

(cQ)2	Impact des Changements Climatiques sur l'Hydrologie (Q) au Québec
CaPA	Canadian Precipitation Analysis
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CROQ	Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-15	European Retrospective Analysis 15 years
ERA-40	European Retrospective Analysis 40 years
ERA-Interim	European Retrospective Analysis Interim
GR4J	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
HQ	Hydro-Québec
HSAMI	Service hydrométéorologique apports modulés intermédiaires
JMA	Japan Meteorological Agency
JRA-55	Japanese Retrospective Analysis 55 years
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MERRA	Modern Era Reanalysis for Research and Applications
MCG	Modèles du Climat Modèle du Climat Global
MRC	Modèle Régional de Climat
MRCC	Modèle Régional Canadien de Climat
MRCC5	Modèle Régional Canadien du Climat, 5ième Génération
MRCC15	Modèle Régional Canadien du Climat à résolution de 15 kilomètres
NARR	North American Regional Reanalysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NRCan	Natural Resource Canada
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
RMSE	Root Mean Squared Error
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution – University of Arizona
3D-VAR	Three Dimensional Variational scheme
4D-VAR	Four Dimensional Variational scheme

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle vitale pour la survie de la société humaine et les activités économiques. Pour éviter et combattre les sécheresses, la surexploitation ou les inondations, la gestion de l'eau est une nécessité afin d'optimiser son utilisation et prévoir les événements extrêmes pour ainsi réduire leurs impacts socio-économiques. L'hydrologie est la science de base appliquée pour la gestion des ressources en eau. La réponse hydrologique des bassins versants dépend des conditions météorologiques et climatiques. Pour pouvoir documenter ces conditions, il importe de mesurer les données météorologiques telles que la précipitation et la température. Ces données sont mesurées par des stations météorologiques et sont utilisées afin de simuler les écoulements en rivière. Par conséquent, la précision des études hydrologiques est influencée par la précision, la représentativité et la cohérence des mesures météorologiques provenant de ces stations. L'absence ou la rareté de stations météorologiques dans plusieurs régions du monde, et notamment dans les régions éloignées est un problème important pour ce genre d'étude.

Au Québec, l'abondance des ressources hydriques est une richesse qui doit être bien exploitée. Le nord du Québec a un grand potentiel économique qui dépasse largement celui de l'hydroélectricité. Le plan Nord du gouvernement du Québec vise à développer et mettre en valeur les vastes étendues du nord québécois. Toutefois, l'absence d'un réseau adéquat de stations météorologiques dans les régions nordiques complique la gestion des ressources hydriques.

Pour pallier à cette déficience, plusieurs options sont disponibles. Une de ces alternatives est d'interpoler les données météorologiques à partir des stations existantes. L'interpolation est toutefois fortement dépendante de la présence d'un nombre minimum adéquat de stations. Au sud du Québec, là où le réseau de stations météorologiques est relativement dense, les jeux de données interpolés sont considérés fiables. Cependant, au Nord du Québec, l'interpolation à partir de stations souvent distantes de plusieurs centaines de km mène à des jeux de données dont la qualité est douteuse. L'utilisation de réanalyses et de données issues

de modèles régionaux de climat sont alors une source alternative de données qui ne dépendent peu ou pas des stations existantes. Ces sources produisent des jeux de données spatialement et temporellement homogènes. Les réanalyses sont générées par une méthode similaire à celle de la prévision météorologique, en assimilant des données observées provenant de plusieurs sources. Une des limites importantes des réanalyses est leur faible résolution spatiale qui est souvent trop grossière pour les bassins versants de petite et moyenne taille. Afin de surmonter cette limitation, la descente d'échelle dynamique des réanalyses avec un modèle régional de climat à haute résolution peut être une alternative. Dans un tel cas, un modèle régional de climat est utilisé avec les conditions frontières prescrites par la réanalyse. Cette approche pourrait permettre de produire des jeux de données à haute résolution, tout en conservant la séquence historique des événements météorologiques prescrite par la réanalyse. La validité d'un tel jeu de données pour des études hydrologiques reste toutefois à établir.

À cause du coût de calcul élevé, un modèle régional de climat ne peut être utilisé que sur des régions dont la superficie est limitée. La plupart des études effectuées sur des sorties provenant d'un modèle régional de climat sont limitées aux sorties elles-mêmes, et non pas sur des produits dérivés, telle que la modélisation hydrologique. Les études hydrologiques peuvent procéder à une validation indirecte puisqu'elles intègrent non seulement les données météorologiques (e.g. précipitation et température) mais aussi l'impact de leur cohérence spatiale et temporelle. La modélisation hydrologique peut donc apporter un important complément d'information sur la qualité d'un jeu de données météorologiques.

En conséquence, l'objectif principal de ce mémoire consiste en l'évaluation du jeu de données CROQ sur le territoire du Québec. Ce jeu est produit en utilisant le Modèle Régional de Climat Canadien (MRCC v.5.0) piloté par la réanalyse ERA-Intérim sur un domaine restreint autour de la province de Québec. Cette évaluation sera basée sur l'analyse des données de température et de précipitation, mais aussi sur la capacité d'intégrer ces données au sein du processus de modélisation hydrologique, aux fins de produire des valeurs de débits en rivière qui pourront être comparées aux valeurs observées.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres qui sont suivis par une conclusion et des recommandations. Le premier chapitre présente une revue de la littérature qui couvre les principaux sujets de ce mémoire. Le deuxième chapitre décrit la région étudiée et les bassins versants choisis pour cette étude. Par la suite, le troisième chapitre présente les résultats de l'étude et la discussion s'ensuit au quatrième chapitre.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette revue de la littérature présente les travaux de recherche réalisés dans les domaines liés à la présente étude. Elle couvre entre autres l'évaluation générale de la performance des différents jeux de données telles que les données météorologiques interpolées, les réanalyses atmosphériques ainsi que les données provenant de Modèles Régionaux de Climat ainsi que l'application de ces jeux de données en modélisation hydrologique. Par la suite, la problématique et l'originalité de cette étude sont discutées en regard des objectifs et travaux antécédents.

1.1 Données météorologiques par interpolation spatiale

Les données météorologiques historiques jouent un rôle principal dans la réalisation des études climatiques ou hydrologiques. Leurs mesures permettent non seulement de définir la condition présente de la météo mais aussi de suivre le changement de climat dans le long terme. Ainsi, la précision de ces études se base sur la qualité et la durée des observations météorologiques. Cependant, la qualité des données météo mesurées aux stations n'est pas constante spatialement et temporellement. Les problèmes tels que les données manquantes, le biais de certains instruments, le déplacement des stations et les changements d'aménagement du territoire résultent en des séries chronologiques imparfaites. De plus, la faible densité spatiale des réseaux de stations dans les régions éloignées comme le Nord du Québec est un problème additionnel important dans la quête d'une information météorologique fiable à l'échelle régionale. La nécessité d'avoir des données chronologiques fiables sur une longue période force les chercheurs à développer et examiner des jeux de données alternatives, pour combler les limitations des données météorologiques traditionnelles. Les données sur grille améliorent la couverture spatiale des données de stations en faisant l'interpolation spatiale de variables mesurées aux stations et en fournissant de nouvelles données spatialement uniformes. Diverses méthodes d'interpolation sont possibles telles que l'inverse de la distance, interpolation basée sur l'élévation et l'interpolation basée sur d'autres données. La

méthode de la pondération par l'inverse de la distance est basée sur l'hypothèse que la valeur d'un point inconnu est mieux représentée par un autre point à proximité, plutôt que par un autre plus distant. Les poids sont assignés selon l'inverse des distances entre le point calculé et les stations (Lu et Wong 2008).

Les techniques du Krigeage (Delfiner et Delhomme 1975; Delhomme 1978) et de l'interpolation par des fonctions splines à plaque mince (Hutchinson 1995) font partie des méthodes d'interpolation basées sur l'élévation. Afin d'améliorer la variable interpolée, elles considèrent l'élévation en tant qu'information secondaire. En tenant compte de la dépendance entre les variables à interpoler et l'élévation, elles utilisent des algorithmes d'autocorrélation entre les points mesurés pour minimiser les erreurs de surface (Goovaerts 2000; Hutchinson 1995). D'autres méthodes d'interpolation peuvent être citées comme l'interpolation optimale basée sur des sorties d'un modèle numérique. Le system de CaPA est basé sur une technique d'interpolation optimale en combinant la prévision numérique à court terme avec les données d'observation provenant des stations météorologiques, des radars et des satellites (Lespinas et al. 2015). Quelques jeux de données interpolées sont disponibles sur le Québec : ceux de Ressources Naturelle Canada (NRCan; Hutchinson et al. 2009), du Ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDLECC; Bergeron 2015), ainsi que le Canadian Precipitation Analysis (CaPA; Mahfouf et al. 2007). Le jeu de données NRCan couvre le Canada en entier sur la période 1950-2013 et est basé sur l'interpolation par de fonctions splines à plaque mince (Hutchinson 1995) sur une grille de résolution de 10km. Le MDDLECC utilise le Krigeage et fournit des données pour la province de Québec de 1961 jusqu'à présent, sur une grille de 11km. CaPA est aussi disponible sur une grille de 11km mais seulement sur un période d'une quinzaine d'années.

Aujourd'hui, les jeux de données météorologiques sur grille à haute résolution sont couramment utilisés. Par contre, l'interpolation demeure contestable lorsque le réseau de stations est de faible densité ou lorsque les données manquantes sont nombreuses. Puisque le champ qui est estimé entre les deux points de grille est inconnu, il n'y a pas de méthode

simple pour estimer l'erreur des jeux de données spatiales. Pour les réseaux d'observations de faible densité, les méthodes d'interpolation géostatistique donnent de meilleurs résultats que les techniques qui ne prennent pas en compte la dépendance spatiale des précipitations (Creutin et Obled 1982; Goovaerts 2000). L'information secondaire corrélée, telle qu'un modèle d'élévation numérique, peut améliorer l'interpolation des données (Goovaerts 2000).

La densité du réseau de stations météorologiques au Canada est variable (Figure 1). Le réseau est relativement dense au sud près des régions habitées, mais il devient très éparé au nord. Les techniques d'interpolation s'appliquent automatiquement aux régions avec une densité de réseau irrégulière et d'altitude spatialement variable. Par contre, la fiabilité des données interpolées dépend aussi de la densité du réseau. La base de données NRCan est la seule base qui couvre le Canada au complet sur une longue période. Les validations de cette base de données indiquent qu'elle peut être utilisée avec confiance dans le sud du Canada (Hutchinson et al. 2009).

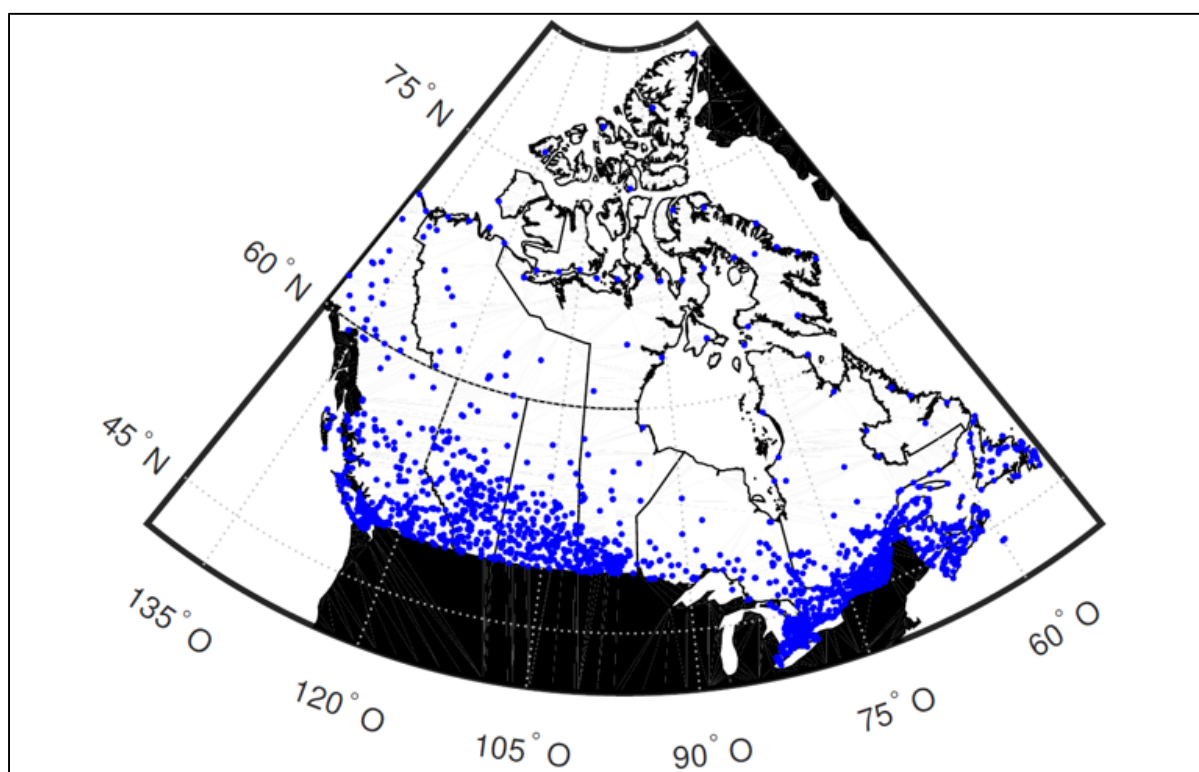


Figure 1.1 La Carte des stations météorologiques quotidiennes d'Environnement Canada -
1686 stations ayant 30 ans d'observations
Tirée de Martel et al. (2015)

Ruelland et al. (2008) ont fait l'évaluation comparative de différents jeux de données interpolées en deux étapes. Dans un premier temps, les jeux de données sont validés en les comparant aux observations. Par la suite, ils sont employés dans un modèle hydrologique

global et leur performance est examinée. Ce travail démontre clairement les limitations et les incertitudes liées aux méthodes d'interpolation. Ils montrent que les résultats varient en fonction de la méthode d'interpolation et de la densité du réseau de stations.

Bajamgnigni Gbambie et al. (2017) ont évalué la précipitation de trois bases de données sur grille à haute résolution (NRCan, MDDELCC et CaPA) sur le Québec. Ces données sont comparées entre elles et sont par la suite utilisées pour la modélisation hydrologique avec le modèle hydrologique HSAMI sur le Québec, ainsi que pour la modélisation hydrologique distribuée sur le bassin versant du Lac-Saint-Jean. L'étude constate que les précipitations des trois bases de données se ressemblent au sud et qu'elles diffèrent au nord et au centre de la province. La base de donnée CaPA saisit mieux les événements des précipitations extrêmes et semble performer un peu mieux en modélisation hydrologique notamment au nord et au centre du Québec.

Essou et al. (2016c) ont fait une comparaison de trois jeux de données interpolés sur grille, et de leur potentiel en modélisation hydrologique aux États-Unis. Les résultats de modélisation hydrologique indiquent que les trois bases de données sont statistiquement similaires et que l'utilisation de ces jeux de données en modélisation hydrologique fonctionne aussi bien que l'utilisation des données de stations météorologiques d'origine.

1.2 Données provenant de réanalyses atmosphériques

Les jeux de données de réanalyses reproduisent la condition de l'atmosphère en se servant de la portion 'analyse' d'un modèle de prévision météorologique. La phase de l'analyse est celle de l'assimilation des données observées visant à initialiser le modèle numérique de prévision. Chaque cycle de prévision génère dynamiquement un état initial de l'atmosphère physiquement raccordé avec les observations pour simuler le prochain cycle de prévision. Dans une réanalyse, on revisite l'historique passé sur une longue période au cours de laquelle le modèle méthodologique et la technique d'analyse sont temporellement invariables (Sabarly 2015).

Les sources d'observation utilisées sont diverses telle que les réseaux de stations, les satellites, les radiosondes ou les données provenant d'avions. Les réanalyses fournissent de nombreuses variables comme la précipitation, la température, l'évaporation, mais aussi de nombreuses autres variables atmosphérique et de surface (Wang et al. 2011). De manière générale, les données des stations météorologiques au sol ne sont pas les plus critiques au processus d'assimilation. De cette manière, la qualité des réanalyses ne devrait pas être trop affectée par la densité des stations météorologiques au sol. Le processus de réanalyse est extrêmement coûteux en temps de calcul informatique, et ne peut être effectué que sur une grille assez grossière ce qui limite potentiellement leur utilité. Le Tableau 1.1 présente une liste des principales réanalyses disponibles.

Tableau 1.1 La liste des principales réanalyses disponibles

Réanalyse	Organisation	Période	Assimilation	Résolution	Référence
JRA-55	JMA (Japan Meteorological Agency)	1958-présent	4D-VAR	55 km	(Onogi et al. 2007)
ERA-15	ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)	1979-1993	Analyse d'interpolation optimale (OI)	190 km	(Kalnay et al. 1996)
ERA-40	ECMWF	1957-2002	3D-VAR	125 km	(Uppala et al. 2005)
ERA-Interim	ECMWF	1979-présent	4D-VAR	83 km	(Dee et al. 2011)
MERRA	NASA (National Aeronautics and Space Administration)	1979-présent	3D VAR	74 x 56 km ²	(Rienecker et al. 2011)
CFSR	NCEP (National Centers for Environmental Prediction)	1979-présent	3D-VAR	33 x 33 km ²	(Saha et al. 2010)
NARR	NCEP	1979-présent	3D-VAR	32 x 32 km ²	(Mesinger et al. 2004)

La qualité des jeux de données des réanalyses est examinée sur différents aspects tels que l'adaptation de l'analyse aux données observations, la stabilité du bilan de masse global ainsi que la précision de la prévision à court terme. L'étude comparative des premières réanalyses telles que ERA-15 et des secondes créations telle que ERA-40 confirme l'amélioration de ces produits. Effectivement, certains facteurs qui ont apporté ce progrès sont l'utilisation de sources multiples des données observations, leur couverture spatiale et temporelle améliorée, de même que l'amélioration de la qualité de la résolution horizontale et verticale dans la couche limite entre la terre et l'atmosphère (Uppala et al. 2005).

Malgré la bonne performance des réanalyses récentes, une certaine incertitude dans ces données demeure en comparaison avec la réalité, étant donné que la qualité de certaines données assimilées varie dans le temps et l'espace. La précipitation des réanalyses est bien corrélée spatialement avec les observations, mais elle est moins variable temporellement que cette dernière. En plus de la qualité des observations et du modèle de simulation, la précipitation est aussi affectée par la circulation générale (Bosilovich et al. 2008). La troisième génération de réanalyse (e.g. ERA-Intérim) réduit ces faiblesses en considérant l'interaction plus adéquatement entre les océans, les terres et l'atmosphère, reproduisant ainsi le cycle hydrologique de manière satisfaisante tout en tenant compte d'une meilleure cohérence temporelle dans le processus d'assimilation (Dee et al. 2011).

L'étude de Essou et al. (2016b) sur trois réanalyses atmosphériques globales (ERA-Intérim, CFSR et MERRA) et une réanalyse régionale (NARR) sur les États-Unis démontre que la température issue des réanalyses est très semblable aux observations. Par contre, les précipitations sont généralement biaisées par rapport aux observations. Sabarly et al. (2016) a analysé le cycle de l'eau des réanalyses CFSR, MERRA, ERA-Intérim et NARR sur la province du Québec. L'étude a été effectuée sur les précipitations, l'évaporation, le ruissellement et le bilan hydrique à différentes échelles spatiales. Les résultats illustrent un défaut de fermeture du bilan hydrique des réanalyses, sauf pour MERRA. MERRA et ERA-Intérim fournissent la précipitation plus fiable sur la province du Québec.

1.3 Utilisation d'un modèle régional de climat

Tel que mentionné à la section 1.2, les réanalyses peuvent fournir des données utiles en hydrologie dans les régions où le réseau de stations météorologiques est déficient. La résolution de ces réanalyses est par contre faible. Il est alors possible de faire une descente d'échelle dynamique avec l'aide d'un modèle régional de climat.

Sur la base de l'échelle spatiale, les modèles climatiques sont classés en Modèles du Climat Global (MCG) et Modèle Régional de Climat (MRC). Les modèles climatiques utilisent les lois physiques et dynamiques pour représenter les cycles principaux de l'océan et l'atmosphère. Ces modèles respectent donc la cohérence entre les variables climatiques et respectent la fermeture des bilans de masse et d'énergie. L'assimilation des données observations n'est normalement pas appliquée dans le processus de simulation, et, en conséquence, les modèles climatiques peuvent être exécutés sur de longues périodes de temps. Les MCG traitent le globe entier à une échelle spatiale relativement grossière (de 100 à 250 km) ce qui les empêche de résoudre le contrôle régional sur certaines variables telles que la précipitation convective (Cholette 2013).

Les Modèles Régionaux de Climat opèrent sur une aire limitée du globe, ce qui permet de plus hautes résolutions spatiales. Les MRCs sont pilotés à leurs conditions frontières latérales par des réanalyses, un MCG ou un autre MRC à résolution plus grossière. Les principaux avantages des MRC par rapport aux réanalyses sont leur cohérence physique ainsi que la fermeture du bilan hydrique à long terme (Cardin-Ouellette 2013).

Bien que l'utilisation de simulations climatiques régionales à haute résolution soit avantageuse, elles demeurent dépendantes des conditions imposées à la frontière de leur domaine de calcul, et peuvent donc hériter des défauts des MCG ou des réanalyses qui sont utilisés (Minville 2008).

Le modèle régional canadien de climat (MRCC_4.2) (Music et Caya 2007) piloté le par Modèle Couplé du Climat du Globe Canadien (MCCG_3.1) (McFarlane et al. 2005; Scinocca et McFarlane 2004) a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Selon Bresson et Laprise (2011) pour faire l'étude des impacts du changement climatique, il est nécessaire de bien représenter le cycle hydrologique.

La simulation des MRCs est influencée par leur pilote (GCM ou réanalyse) aux frontières de leur domaine de calcul. A l'intérieur du domaine de calcul, les MRC peuvent s'éloigner de la circulation à grande échelle prescrite par leur pilote. Afin de limiter ce problème, Biner et al. (2000) ont appliqué un pilotage spectral sur l'ensemble du domaine de calcul, en plus du pilotage à la frontière. Le pilotage spectral vise à empêcher la simulation MRCC de dériver de sa donnée de pilotage (Riette et Caya 2002).

L'aptitude de modèle régional de climat ALADIN a été examinée sur l'Amérique du Nord par Lucas-Picher et al. (2013). L'étude était faite en utilisant le pilotage de deux différentes réanalyses (ERA-40 et ERA-Intérim) avec et sans pilotage spectral. Les résultats montrent une performance similaire à celle des autres MRC utilisés couramment sur l'Amérique du Nord. Les différences entre les deux simulations sont petites. Le pilotage spectral à grand échelle accroît la cohérence temporelle du cycle atmosphérique entre les réanalyses et les observations (Lucas-Picher et al. 2013).

Lucas-Picher et al. (2016) ont utilisé la cinquième version du Modèle régional de climat Canadien (MRCC5) avec une résolution horizontale plus fine pilotée par ERA-Intérim sur l'Amérique du Nord afin de mettre en lumière les avantages de l'utilisation de MRC à haute résolution. Dans ce but, l'évaluation a été faite sur cinq événements climatiques remarquables de l'Amérique du nord soient la précipitation orographique en hiver, la mousson, l'effet de lac sur les chutes de neige, la canalisation orographique du vent et la précipitation liée à la convergence de la brise marine. Cette comparaison montre certains avantages de la simulation régionale à haute résolution.

Biner (2016) a effectué une validation de certaines variables des premières simulations du MRCC (version 5) menées par Ouranos sur la province du Québec dans le cadre du projet CROQ (Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec). La précipitation ainsi que les températures minimum et maximum sont comparées avec les jeux de données sur grille CRU et aussi avec les simulations du MRCC (version 4) à l'échelle de temps saisonnière. L'étude confirme certains biais sur le Québec. Ces biais sont humides pour la précipitation, froids au nord et chauds au sud pour la température. Les biais sont dépendants de la résolution et du domaine pour les deux versions du MRCC.

1.4 Utilisation des modèles hydrologiques pour valider des données météorologiques

La validation des jeux de données se fait traditionnellement en comparant directement les variables de modèles avec les observations. Un des problèmes de cette approche est qu'aucun des jeux de données ne peut être considéré parfait puisqu'ils ont tous des erreurs. Ceci est notamment le cas pour les données sur grilles interpolées à partir des observations, produits à partir desquels les sorties de modèles sont normalement comparées.

L'utilisation de la modélisation hydrologique est une seconde approche qui permet une validation supplémentaire des sorties de modèles. Cette approche utilise les débits mesurés en tant que donnée de validation indépendante. Le modèle hydrologique transforme la précipitation et la température en débit et permet de tenir compte de l'interdépendance des deux champs principaux utilisés pour de multiples applications.

1.4.1 Modélisation hydrologique et réanalyses

Il existe peu d'études de modélisation hydrologique sur les jeux de données provenant de réanalyses. De plus, les quelques recherches sur la modélisation hydrologique à partir des données de réanalyses sont réalisées sur des petits domaines qui ne sont pas appropriés à des conclusions générales (Essou 2016).

Choi et al. (2009) ont élaboré une étude de modélisation hydrologique avec les données de la réanalyse régionale NARR sur trois bassins versants au Nord de Manitoba. Dans ce but, le modèle hydrologique SLURP a été calibré avec les observations et les réanalyses à partir des données de précipitation et température. Les résultats ont été similaires ouvrant la porte vers l'utilisation des réanalyses dans les régions pauvres en stations météorologiques.

Dans l'étude hydro-climatique de Hyung-Il et al. (2014), deux jeux de données interpolées sur grille (CaPA, NRCan) et un jeu de données d'une réanalyses (NARR) sont appliqués dans le modèle hydrologique VIC dans l'ouest du Canada. La différence spatiale et temporelle entre ces jeux de données et la qualité de leur réponse hydrologique sont estimées. Les performances des jeux de données sont variables selon les régions notamment dans les régions montagneuses. Les ruissellements produits par les jeux de données interpolées montrent un bon accord avec les observations dans les bassins de basse altitude tandis que les résultats de tous les jeux de données performant moins bien sur les bassins d'altitude élevée. Durant la période hivernale, les différences sont faibles entre les résultats de trois jeux de données, même si la précipitation de la réanalyse (NARR) est plus élevée que les autres. Le décalage est toutefois plus évident au cours de la fonte de neige.

La précision de la simulation de l'écoulement avec les données sur grille est réduite dans les régions où le réseau de stations météorologiques est plus éparé. La simulation hydrologique à partir des données de réanalyses est peu affectée par l'absence de stations météorologiques et dépend uniquement de la qualité de la réanalyse (Essou et al. 2016b).

Afin de mettre en évidence le potentiel des réanalyses pour la modélisation hydrologique, deux études ont été réalisées selon la même approche. La première a appliqué les données de 4 réanalyses (ERA-Intérim, CFSR, MERRA, NARR) pour la modélisation hydrologique dans une région à forte densité de stations météorologiques (USA) (Essou et al. 2016b), tandis que Sabarly et al. (2015) ont utilisé le même modèle hydrologique et les mêmes réanalyses dans une région avec un réseau météorologique moins dense (Québec). Les deux

études ont démontré le potentiel des réanalyses sur une grande partie de l'Amérique du Nord, à l'exception des régions continentales humides et subtropicales (Essou et al. 2016b).

Essou et al. (2016a) ont réalisé une étude de simulation hydrologique en comparant les résultats provenant de trois réanalyses globales (ERA-Intérim, CFSR et MERRA) à ceux d'une base de données interpolée sur grille (NRCan). La comparaison a été effectuée sur la base de la densité du réseau sous-jacent de stations météorologiques sur différentes régions climatiques de Canada. En général, les résultats montrent que sur les régions ayant une forte variabilité spatiale de précipitation (e.g. régions montagneuses) et sur celles ayant une faible densité spatiale de station météorologiques, la performance hydrologique provenant des réanalyses est supérieure à celle issue de la base de données interpolées.

1.4.2 Modélisation hydrologique et modèle régional de climat

Une dernière alternative aux données de stations météorologiques consiste à utiliser les données issues de MRC pilotés par des réanalyses. Le but visé est de faire une descente d'échelle des données de réanalyses pour obtenir un jeu de données à plus haute résolution spatiale et temporelle. Les études hydrologiques utilisant les données de MRC sont toutefois peu nombreuses.

Afin de compenser l'absence des données météorologiques de stations météorologiques dans la simulation hydrologique, Arsenault et Brissette (2014a) ont utilisé des stations météorologiques virtuelles en utilisant les données du Modèle Régional de Climat Canadien à 15 km de résolution (MRCC15) sur le bassin de la rivière Toulouste. Deux modèles hydrologiques globaux (HSAMI et HMETs) et un modèle distribué (Hydrotel) ont été examinés. Les résultats démontrent que si les stations sont stratégiquement coordonnées pour avoir une base des données appropriées, les modélisations hydrologiques peuvent être réussies avec peu de stations. Un plus grand nombre de stations est requis si le positionnement est aléatoire.

Manoj et al. (2004) a effectué une analyse de changement climatique sur le bassin du fleuve Mississippi, en employant les données d'un MRC dans le modèle hydrologique (SWAT), en les validant avec la base des données observation. La performance hydrologique des données provenant du MRC a été jugée acceptable. L'étude montre que la qualité de la précipitation saisie par MRC a été améliorée par rapport de celle de modèle global ce qui est un facteur important affectant la modélisation hydrologique.

Chen et al. (2013) ont piloté une étude comparative de la performance en modélisation hydrologique de quatre MRCs pilotés par réanalyses sur 10 bassins versants Nord-Américains. L'évaluation est réalisée sur les écoulements simulés par le modèle hydrologique (HSAMI) en utilisant les séries temporelles de précipitation provenant des MRCs. La faible cohérence de la séquence temporelle des précipitations a été constatée, ce qui a résulté en une simulation biaisée de l'écoulement. L'emplacement des bassins versants a aussi influencé la modélisation hydrologique. Ceci était notable loin de la frontière du domaine de calcul pour la précipitation.

Le Tableau1.2 présente un court résumé des principales conclusions tirées de cette revue de littérature.

Tableau 1.2 Résumé de la revue littérature

Jeux de données	Evaluation des données météorologiques	Application en modélisation hydrologique
Interpolation spatiale	Faiblesse: affectée par la densité et qualité des données des stations (Creutin et Obled 1982; Goovaerts 2000)	fonctionne aussi bien que l'utilisation des données de stations météorologiques (Essou et al. 2016c)
Réanalyse atmosphérique	Avantage: température très semblable aux obs. Faiblesse: faible résolution, précipitations généralement biaisées, défaut de fermeture du bilan hydrique. (Sabarly et al., 2016, Essou et al., 2016b, Bosilovich et al. 2008)	peu affectée par l'absence de stations & dépend uniquement de la qualité de la réanalyse. (Choi et al. 2009, Sabarly et al. 2015)
Modèle Régional de Climat	Avantage: haute résolution, cohérence physique & fermeture du bilan hydrique à long terme (Cardin-Ouellette 2013). Faiblesse: influencée par les défauts de leur pilote à la frontière (Minville 2008, Riette et Caya, 2002)	Influencé par l'emplacement des BV & la qualité de la précipitation notamment loin de la frontière. (Arsenault et Brissette, 2014a, Chen et al., 2013)

1.5 Objectifs du présent travail

La revue de littérature a considéré plusieurs jeux de données alternatives aux stations météorologiques ainsi que leur performance relative. La performance des différentes approches dépend de plusieurs facteurs dont l'emplacement géographique ainsi que de la densité du réseau de stations météorologiques.

Les jeux de données interpolés ont des déficiences là où il y a peu de stations. Peu importe la méthode d'interpolation, la qualité du jeu est liée à la présence de données de qualité, et l'utilisation d'information complémentaire (e.g. élévation) ne peut à elle seule pallier à des déficiences du réseau. Les réanalyses ont démontré un bon potentiel, en particulier là où le

réseau de stations est déficient, mais avec une résolution spatiale limitée ce qui peut impacter la performance en modélisation hydrologique sur les bassins versants ayant une petite superficie. La descente d'échelle d'une réanalyse avec un modèle régional de climat pourrait être une solution permettant d'augmenter la résolution spatiale des réanalyses. Le nouveau jeu de données CROQ (Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec) est un premier jeu de données en ce sens. Par contre, les qualités et les défauts de ce nouveau jeu de données et sa capacité en modélisation hydrologique sont encore peu connus et peu documentés.

En conséquence, l'objectif principal du projet consiste en l'évaluation de la qualité de jeu de données CROQ sur l'ensemble de la province de Québec.

Les objectifs spécifiques du projet sont:

1. Valider les séries de températures et de précipitation du jeu de données CROQ par rapport aux différents jeux de données existants;
2. Valider de manière indirecte le jeu de données CROQ via la modélisation hydrologique sur des bassins versants au Québec ;
3. Comparer la performance des deux modèles hydrologiques globaux par rapport à leur capacité à simuler l'hydrologie des bassins versants au Québec.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Les bassins versants étudiés

La région étudiée se compose de 117 bassins versants sur l'ensemble de la province du Québec et couvre une superficie totale de 1 153 511 km². La position des bassins versants dont les superficies varient entre 148 km² à 69 191 km² est présentée à la figure 2.1. Dans ce travail de recherche, afin de comparer le comportement des différentes régions climatiques et limiter l'impact de la faible résolution spatiale des certains jeux de données utilisés en modélisation hydrologique, 20 bassins versants de grande taille ont été sélectionnés pour une étude approfondie. La superficie de ces bassins versants varie entre 9 871 km² et 69 191 km². Les 20 bassins versants sont séparés en deux groupes de 10 : Le groupe Nord (contours bleus sur la carte) et le groupe Sud (contours rouges).

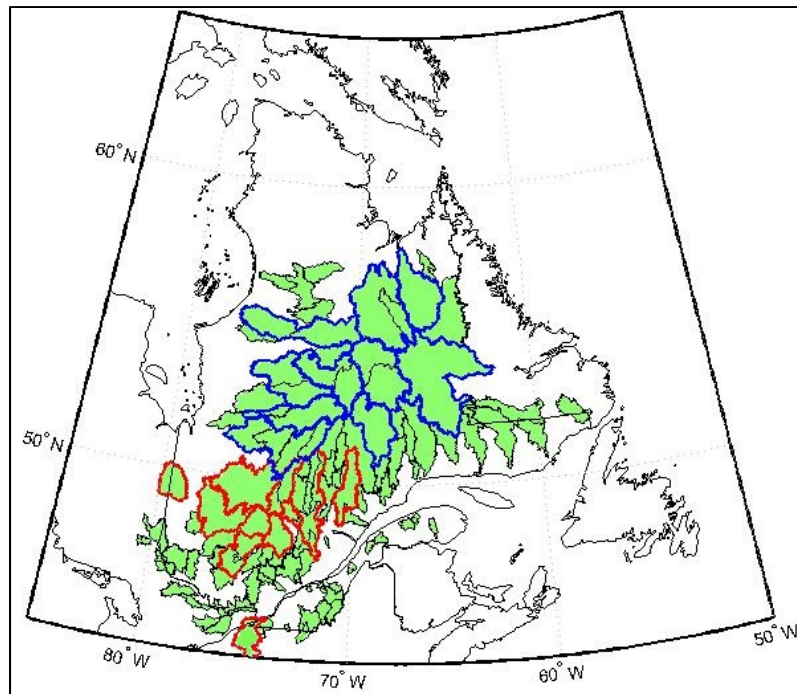


Figure 2.1 Localisation des 117 bassins versants de la base de données CQ2 et de deux groupes de 10 bassins versants du nord (contours bleus) et du sud (contours rouges)

2.2 Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude comprennent les données météorologiques journalières des différents jeux de données étudiés. Les données utilisées sont la précipitation journalière ainsi que les températures minimales et maximales journalières. Les séries temporelles journalières des débits observés en rivière sont utilisées pour la modélisation hydrologique. Toutes les données utilisées sont comparées sur un horizon temporel commun de 31 ans, soit de 1980 à 2010.

2.2.1 Jeux de données météorologiques

Les données de précipitations et températures journalières des jeux de données NRCan, ERA-Intérim, MRCC5 et CROQ sont comparés dans cette étude. Le Tableau 2.1 présente les principales caractéristiques des jeux de données utilisés. Les données NRCan sont des données météorologiques sur grille obtenues à partir de l'interpolation des valeurs mesurées aux stations d'Environnement Canada en utilisant la méthode d'interpolation ANUSPLIN. (Hutchinson et al. 2009). NRCan est le jeu de données qui a la plus grande résolution spatiale (10 km).

La réanalyse ERA-Intérim, produite par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), utilise la méthode d'assimilation variationnelle des données en quatre dimensions (4D-VAR). Pour générer la précipitation, le modèle de prévision météorologique est utilisé pendant que la température de surface est assimilée pour obtenir la température (Dee et al. 2011). ERA-Intérim (≈ 80 km) a la moins bonne résolution spatiale parmi les jeux de données utilisés dans cette étude.

Les jeux de données CROQ et MRCC5 sont très similaires. Ils sont tous deux issus de la cinquième génération du Modèle climatique régional canadien. Dans les deux cas, ERA-Intérim a piloté le Modèle régional sur les frontières atmosphériques latérales. Les champs contrôlés aux frontières sont la composante horizontale du vent, la température, l'humidité spécifique et la pression de surface. Ces deux jeux ont à peu près la même résolution

spatiale, mais diffèrent légèrement de par leur domaine de calcul et par la paramétrisation interne du modèle climatique. En particulier, CROQ utilise une représentation améliorée de la présence de tourbières ce qui devrait, en théorie, améliorer les simulations dans le Nord québécois.

La simulation appelée MRCC5 est une simulation expérimentale du modèle visant entre autres l'étude des inondations de 2011. Les variables sont disponibles au pas de temps de 6h. Cette simulation n'a aucun pilotage spectral à grande échelle (Lucas-Picher et al. 2016).

Les jeux de données CROQ (Martynov et al. 2013) (simulations bbq et bba) sont de nouveaux jeux de données à haute résolution provenant du consortium Ouranos. La simulation bbq de CROQ a été effectuée avec pilotage spectral tandis que la version bba n'a aucun pilotage spectral. Dans cette étude les variables de température et précipitation des versions bba et bbq ainsi que l'équivalent en eau de la neige de la version bbq ont été analysées (Biner 2016).

Tableau 2.1 Principales caractéristiques des jeux de données utilisées dans cette étude

Jeu de données	Produit par	Résolution horizontale	Domaine temporel	Référence
NRCan interpolation de données de stations météorologiques sur une grille	Natural Ressources Canada	10 km	1950 - 2011	(Hutchinson et al. 2009)
ERA-Intérim réanalyse atmosphérique	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	0.75 degrés (~ 80km)	1979-présent	(Dee et al. 2011)
MRCC5 (PLP) Modèle Régional Canadien du Climat, version 5	Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale (ESCER)	0.11 degrés (~ 12 km)	1979 - 2014	(Lucas-Picher et al. 2016)
CROQ (bba) Modèle Régional Canadien du Climat, version 5 (sans pilotage spectral)	Consortium Ouranos	0.11 degrés (~ 12 km)	1979 - 2014	(Biner 2016)
CROQ (bbq) Modèle Régional Canadien du Climat, version 5 (avec pilotage spectral)	Consortium Ouranos	0.11 degrés (~ 12 km)	1979 - 2014	(Biner 2016)

2.2.2 Base de données hydrologiques

Pour l'étude hydrologique, les séries temporelles des débits observés ont été fournies via la base de données (cQ)² - Impact des Changements Climatiques sur l'Hydrologie (Q) au Québec. La base de données (cQ)² contient les débits journaliers, la superficie des bassins versants ainsi que le centroïde et les coordonnées de contour de 306 bassins versants sur la province de Québec. Cette base de données hydro climatique a été mise sur pied par la collaboration d'Hydro-Québec, du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), de Rio Tinto Alcan et de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ).

Dans cette étude, une période commune de 31 années (1980 et 2010) a été retenue pour les données météorologiques et hydrologiques. Cette intersection a réduit le nombre de bassins versants de 306 à 117.

La figure 2.2 représente la structure de la méthodologie en deux étapes principales: la comparaison climatique des jeux de données et la modélisation hydrologique.

En première étape, les différents jeux de données sur grille ont été interpolés vers la résolution du jeu de données NRCan. La comparaison subséquente se fait sur différentes échelles de temps et selon différentes métriques.

En deuxième étape, chacun des jeux de données a été utilisé comme intrant au processus de modélisation hydrologique. La capacité de chaque jeu de données à simuler l'hydrologie des bassins versants est utilisée comme critère de comparaison. La calibration automatique de chacun des deux modèles hydrologiques utilisés est basée sur le critère de Nash-Sutcliffe.

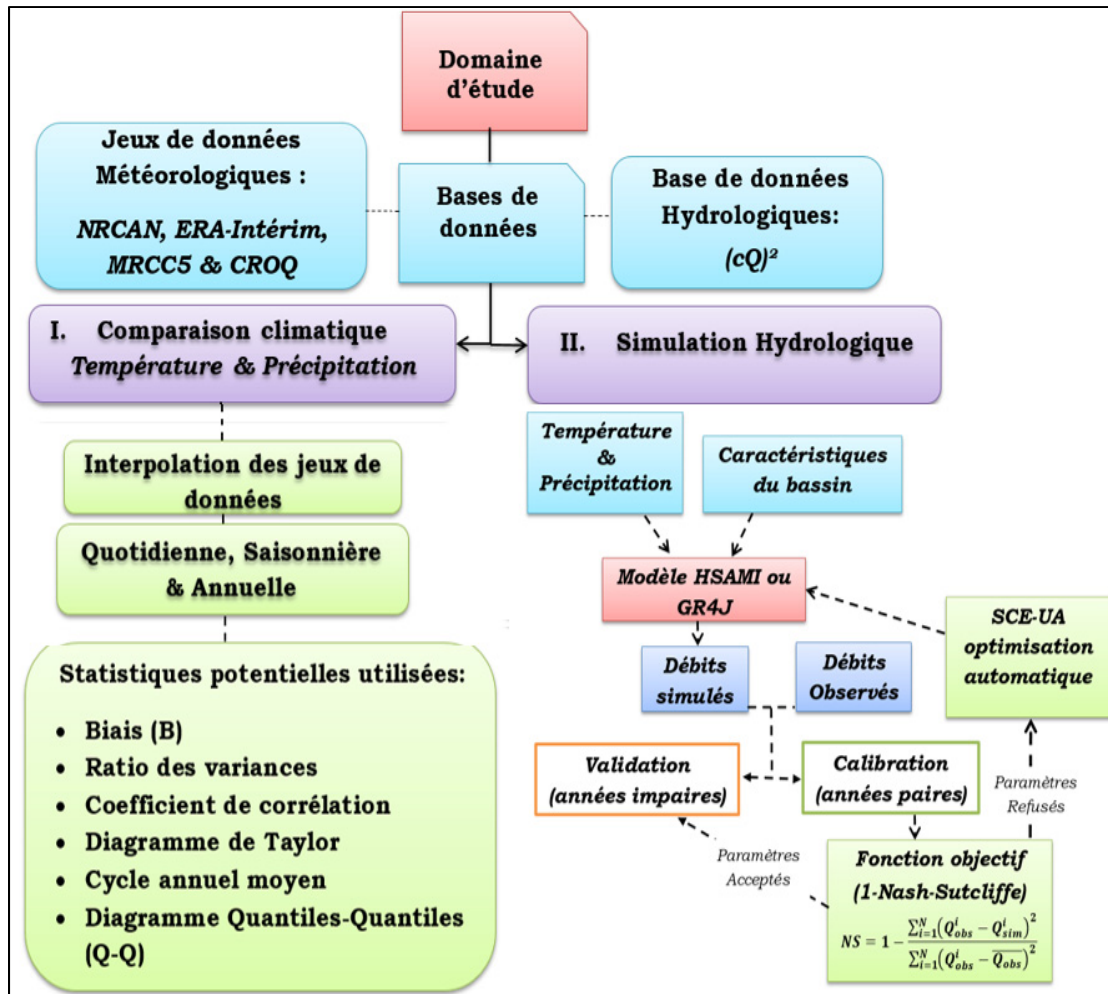


Figure 2.2 Structure de la méthodologie

2.3 Comparaison climatique des jeux de données à grille

Pour faire la comparaison de températures et précipitations des différents jeux de données, ayant chacun une résolution et projection cartographique différentes, il est préférable de ramener tous les jeux de données sur une même grille. Une telle interpolation n'est pas souhaitable pour l'étude de certaines variables (e.g. les valeurs extrêmes), mais permet de tracer facilement des cartes pour comparer les principales caractéristiques des divers jeux de données. Ainsi, la méthode interpolation de l'inverse de la distance est appliquée sur les jeux de données pour les ramener sur la grille la plus fine (NRCan). Dans cette méthode, il est supposé que les valeurs interpolées sont plus influencées par les valeurs des points voisins et

ils sont calculés en faisant une moyenne pondérée des valeurs aux points les plus près. Les poids des points dispersés sont attribués par rapport à leurs distances du point d'interpolation et ils diminuent en s'éloignant du point d'interpolation (Amidror 2002; Dirks et al. 1998).

Suite à l'obtention de la même résolution pour les jeux de données, la comparaison générale des jeux de données est effectuée aux échelles de temps quotidienne, saisonnière et annuelle pour les différentes métriques énumérées ici-bas.

Biais (B) :

Le biais de la température ou de la précipitation entre les jeux de données est estimé en considérant les séries journalières de chacun des jeux de données (X_i) par rapport à celles d'un jeu de référence (Y_i). Le biais (B) est défini comme suit:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{N} \quad (2.1)$$

ou N est le nombre de jours. Le biais est calculé sur les bases annuelle et saisonnière.

Cycle annuel moyen des variables :

Dans le but de vérifier la continuité, la cohérence et le changement des patrons de précipitation et de température, le cycle annuel moyen des variables de chaque jeu de données est calculé pour le même période de 30 ans. Le patron des variables suit le même ordre et se répète chaque année mais leur intensité est différente entre les années (une année à l'autre). Afin de faire cette évaluation, les valeurs des variables des jeux de données sont moyennées par bassin versant. Par la suite, pour chaque jour ou chaque mois, les moyennes de chaque variable sont calculées pour obtenir le cycle annuel.

Corrélation :

Le coefficient de corrélation linéaire est estimé sur la base des données journalières par saison. Chacun des jeux de données est comparé par rapport à un jeu de données de référence. Le jeu de référence choisi est la base de données NRCan, puisque c'est celle qui est la plus près des stations météorologiques.

Ratio des variances :

La variance est une mesure de la variabilité autour de la moyenne. La variance des séries temporelles journalières des jeux de données est estimée pour chaque saison. Le ratio des variances de chaque jeu de données est calculé par rapport à un jeu de référence (NRCan). Le ratio des variances (RV) s'exprime comme suit:

$$RV = \frac{Var(X_i)}{Var(Y_i)} \quad (2.2)$$

Diagramme de Taylor :

Le diagramme de Taylor rassemble trois différentes métriques en un seul diagramme, dans le but de représenter les différences entre différents jeux de données (Taylor 2001). Les données sont conjointement évaluées en fonction de trois métriques : le coefficient de corrélation, l'écart-type normalisé et l'erreur quadratique moyenne centrée (RMSE). À cet effet, les séries chronologiques journalières de précipitation ou de température de jeu de données sont comparées par rapport à celles du jeu de référence. L'évaluation est effectuée par saison.

Diagramme Quantiles-Quantiles (Q-Q) :

Le diagramme quantile-quantile (Q-Q) est utilisé pour l'évaluation de la similitude de la distribution de deux jeux de données. Lorsque deux séries ont une même distribution, les points des données des différents quantiles pour chaque jeu de données se retrouvent sur une ligne droite à 45 degrés.

2.4 Modélisation hydrologique

Un modèle hydrologique, dans sa forme la plus simple, utilise des intrants de précipitation et température pour simuler les débits en rivière. Le modèle hydrologique représente les divers

processus physiques qui agissent sur un bassin versant avec différents niveaux de complexité dépendant de la nature du modèle. Le processus de transformation pluie-débit est fortement non-linéaire et la modélisation hydrologique est donc une manière indirecte de tester la cohérence d'un jeu de données météorologique. Les débits simulés sont comparés avec les débits observés via différentes métriques. Pour que les débits simulés soient le plus près possible des débits observés, il faut ajuster les paramètres du modèle hydrologique via une calibration. Cette calibration est effectuée automatiquement via un processus d'optimisation, en utilisant une fonction-objectif basée sur un critère de ressemblance entre les deux séries de débits (observés et simulés). La figure 2.3 montre le processus général de la simulation hydrologique.

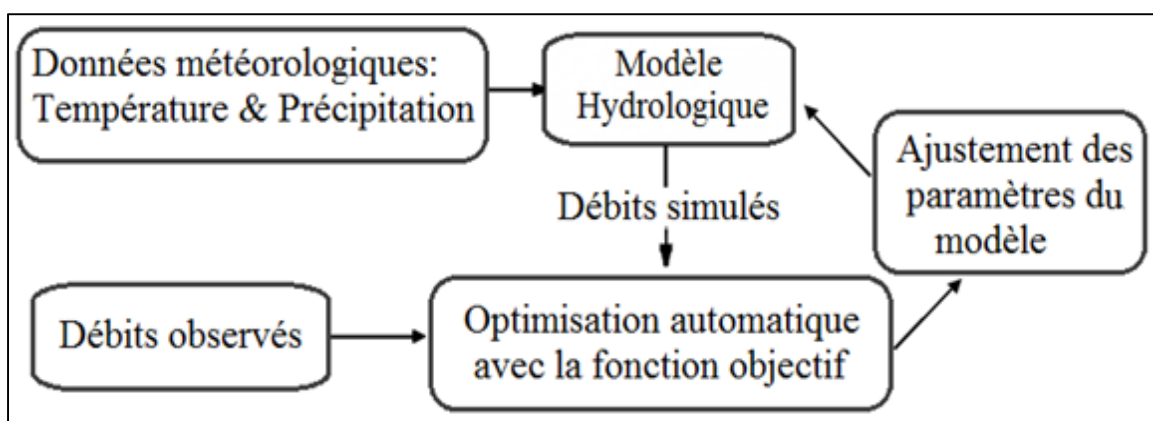


Figure 2.3 Schéma du processus général de Modélisation Hydrologique

2.4.1 Modèles hydrologiques utilisés : GR4J et HSAMI

Dans cette étude, deux modèles hydrologiques globaux sont utilisés. Un modèle global utilise des valeurs moyennées sur l'ensemble d'un bassin versant. Contrairement à un modèle distribué, un modèle global ne peut donc pas prendre en compte la variabilité physique présente sur un bassin versant. Bien que les modèles distribués aient certains avantages, ils ne sont pas supérieurs aux modèles globaux en ce qui a trait à la simulation des débits à l'exutoire des bassins versants (Bormann et al. 2009). Les modèles globaux sont plus simples à utiliser et sont rapides d'utilisation, ce qui justifie leur sélection dans le cas

d'études sur un grand nombre de bassins versants. Le premier modèle (GR4J) est un modèle simple avec 9 paramètres à calibrer, tandis que le deuxième modèle (HSAMI) est un modèle plus complexe avec 23 paramètres de calibration. L'utilisation de deux modèles d'hydrologie est importante pour s'assurer que les résultats ne dépendent pas d'une particularité spécifique à un seul modèle hydrologique. Des détails spécifiques aux deux modèles hydrologiques sont présentés par la suite.

Modèle GR4J :

Ce modèle global dispose de six paramètres fixes et de quatre paramètres libres à ajuster (Perrin et al. 2003). Au sein du modèle GR4J, les processus liés à l'accumulation et à la fonte de neige ne sont pas considérés. En conséquence, le module de neige (CemaNeige), conçu au sein du même groupe de recherche y est couplé (Valéry 2010). Ce modèle de neige se compose de trois paramètres fixes et de deux paramètres libres.

Poissant et al. (2017) ont proposé un ajustement au modèle couplé de GR4J-CemaNeige, en augmentant le nombre de paramètres libres de 6 à 15, soit en libérant chacun des paramètres fixes. Cette étude a permis de montrer qu'une version à 9 paramètres était optimale pour le Québec. Dans la présente étude, c'est cette version de GR4J-CemaNeige à 9 paramètres qui a été appliquée.

Modèle HSAMI :

Le modèle global conceptuel HSAMI est un modèle basé sur des réservoirs utilisé de manière opérationnelle par Hydro-Québec sur l'ensemble du Québec pour la prévision des débits, et l'impact du changement climatique (Fortin 2000). Le modèle HSAMI a 23 paramètres libres et possède donc une forte habileté d'adaptation durant le processus de calibration.

2.4.2 Calibration des modèles hydrologique

Pour que les variables d'état dérivées du modèle hydrologique, et en particulier les débits simulés, s'apparentent aux données mesurées sur les bassins versants, il est nécessaire que le modèle hydrologique traverse un processus de calage. Durant ce processus, les paramètres du modèle s'ajustent de façon à ce que les débits simulés s'accordent le plus possible avec les observations. Une fois le modèle calibré, le modèle est évalué une seconde fois sur une période de temps indépendante de la période de calage. L'étude présente est réalisée sur la période 1980-2010. Les années paires sont utilisées pour la calibration et les années impaires pour la validation de modèle.

2.4.2.1 Critère d'efficience de Nash-Sutcliffe

La calibration du modèle est faite en fonction de minimiser une métrique appelée fonction-objectif. La fonction-objectif évalue la similarité entre les débits simulés et observés. La métrique appliquée dans cette étude est le coefficient d'efficience de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash et Sutcliffe 1970). Cette métrique a été largement utilisée dans de nombreuses études et est normalement la métrique de choix pour ce genre d'étude. La formule du critère d'efficience de Nash-Sutcliffe (NS) est comme suit :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \overline{Qobs_i})^2}, \quad NS \leq 1 \quad (2.3)$$

où Qobs et Qsim sont respectivement la série journalière des débits observés et des débits simulés, et N le nombre de jours. Le critère NS représente l'erreur quadratique normalisée en fonction du débit moyen comme prédicteur de débit. Une valeur du critère égale à 1 indique une concordance parfaite entre les débits simulés et observés, alors qu'une valeur égale à zéro indique que les débits simulés ne sont pas un meilleur modèle prédictif que l'utilisation du débit moyen observé. Une valeur négative indique une performance pire que l'utilisation du débit moyen en tant que modèle hydrologique.

2.4.2.2 Algorithme d'optimisation

Plus le nombre de paramètres libres d'un modèle hydrologique est élevé, plus le temps nécessaire à sa calibration devient élevé et il devient difficile de calibrer le modèle manuellement, et ce même pour un hydrologue expérimenté. L'utilisation d'un optimisateur automatique permet alors une calibration rapide et optimale. L'algorithme optimisateur utilisé dans cette étude est le SCE-UA. SCE-UA a été développé spécifiquement pour les modèles hydrologiques et sa performance est bien établie (Arsenault et Brissette 2014b).

2.5 Métriques utilisées pour comparer la performance des deux modèles hydrologiques

Il existe plusieurs critères de comparaison pour évaluer la performance de simulations hydrologiques. Les critères utilisés dans cette étude sont présentés ici-bas.

Biais normalisé (Bnorm) :

Le biais normalisé est estimé par rapport au débit moyen des valeurs observées tel que montré à l'équation 2.4 où Q_{sim} et Q_{obs} représentent respectivement les débits simulés et observés.

$$Bnorm = \frac{1}{Q_{obs}} \times \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})}{N} \quad (2.4)$$

Les valeurs négatives et positives expriment respectivement une sous-estimation et une surestimation des débits.

RMSE normalisé (RMSEnorm) :

Il s'agit simplement de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) normalisée par rapport au débit observé moyen. Ceci permet de comparer des bassins de différentes tailles avec des valeurs de débits fortement différentes :

$$RMSE_{norm} = \frac{1}{\overline{Q_{obs}}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{N}} \quad (2.5)$$

Le RMSE est particulièrement sensible aux grandes erreurs et est donc sensible à la bonne représentation des crues.

MAE10 et MAE90 :

L'erreur absolue moyenne (MAE) est similaire au biais normalisé à l'exception de la valeur absolue de l'erreur:

$$MAE = \frac{1}{\overline{Q_{obs}}} \times \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{sim}|}{N} \quad (2.6)$$

Afin d'évaluer la performance des modèles sur les débits élevés et faibles, ce critère peut être utilisé sur certains quantiles de la distribution. Dans cette étude, les 10^{ième} et 90^{ième} quantiles sont retenus. Ainsi, MAE10 et MAE90 expriment respectivement le biais normalisé absolu pour la simulation des faibles bas et hauts débits.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats en deux étapes. En premier lieu, les champs de température et de précipitation sont évalués via diverses statistiques et en comparaison avec des jeux de données existants. Dans une deuxième étape, la modélisation hydrologique est utilisée pour une évaluation indirecte de la qualité des champs de précipitation et de température.

3.1 Comparaison générale des jeux de données : Température et Précipitation

Les champs de température et précipitation du jeu de données CROQ sont examinés via différentes métriques par rapport à d'autres jeux de données à différentes échelles spatiales. La comparaison est d'abord effectuée sur l'ensemble du Québec, puis sur 10 grands bassins versants du nord et du sud du Québec. Finalement, une comparaison plus détaillée est effectuée sur deux bassins versants, un au nord et un au sud du Québec.

3.1.1 Comparaison sur la province de Québec et sur 117 bassins versants de CQ2

Dépendamment du critère de comparaison, l'analyse comparative est soit présentée sur l'ensemble du Québec ou sur 117 bassins versants québécois de la base de données CQ2.

3.1.1.1 Carte moyenne saisonnière de précipitation et température

Les cartes de précipitation et température moyennes de CROQ et de NRCan pour chaque saison sont présentées aux figures 3.1, 3.2 et 3.3. Les cartes de précipitation présentent un patron similaire avec une diminution de précipitation du sud vers le nord. Pour toutes les saisons, on remarque généralement que CROQ est plus humide que NRCan partout au Québec. Cette différence est surtout évidente sur le sud en automne et en été. C'est aussi le cas au Nord-Est dans la chaîne de montagne des Torngats. On observe également la même chose en Gaspésie.

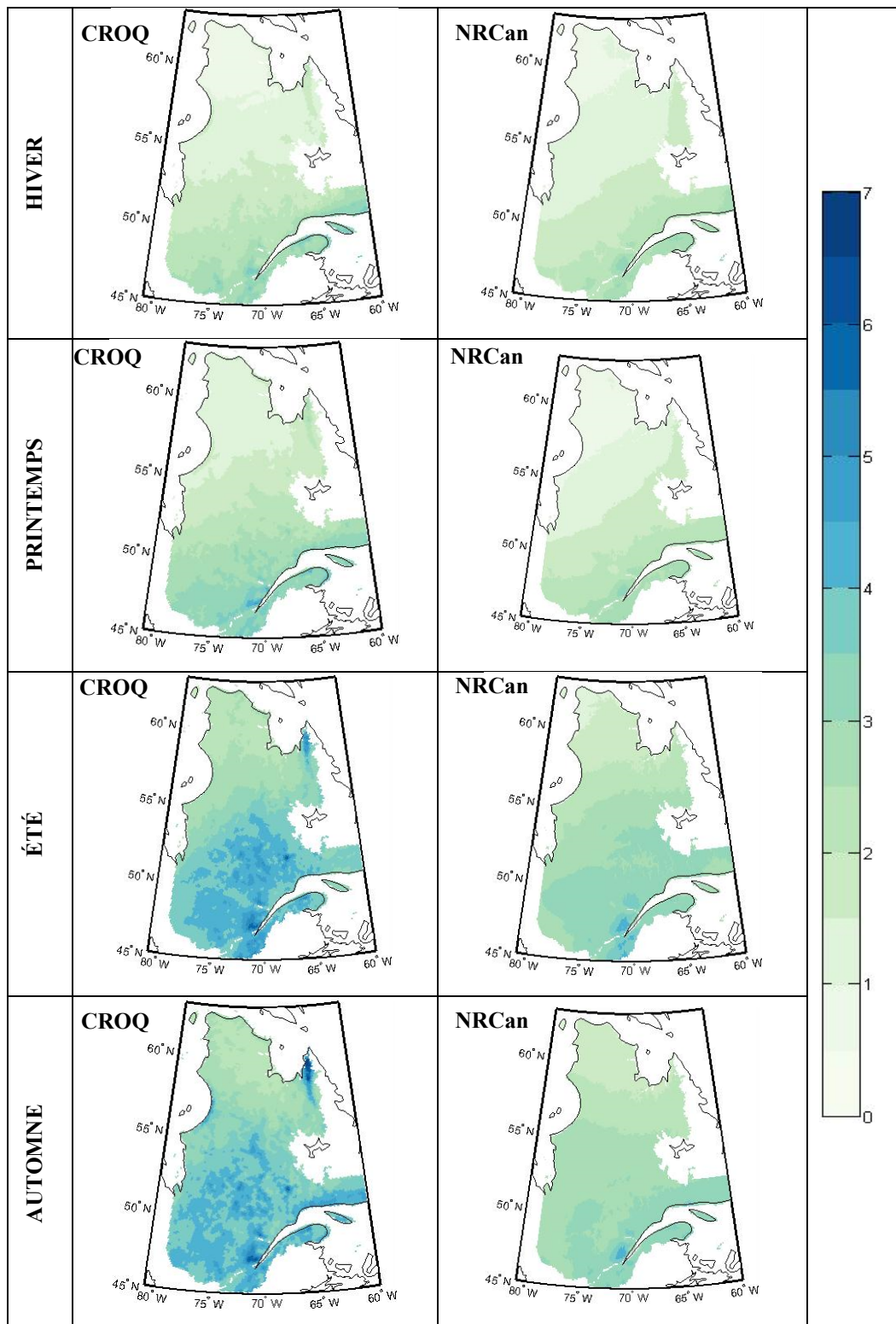


Figure 3.1 Précipitation moyenne quotidienne par saison (mm/jour) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)

Les patrons de température sont plus beaucoup plus similaires que ceux de la précipitation. La plus grande différence pour la température maximale est observée durant les saisons d'hiver et d'automne, alors que CROQ est plus froid au nord. Au printemps, CROQ est aussi plus froid sur le centre du Québec.

Pour les températures minimales, les patrons sont aussi très similaires. Les plus grandes différences sont observées en été alors que la température minimale de CROQ est plus chaude dans le sud et plus froide dans le Nord comparativement à NRCan. En automne, CROQ est un peu plus chaud dans le sud.

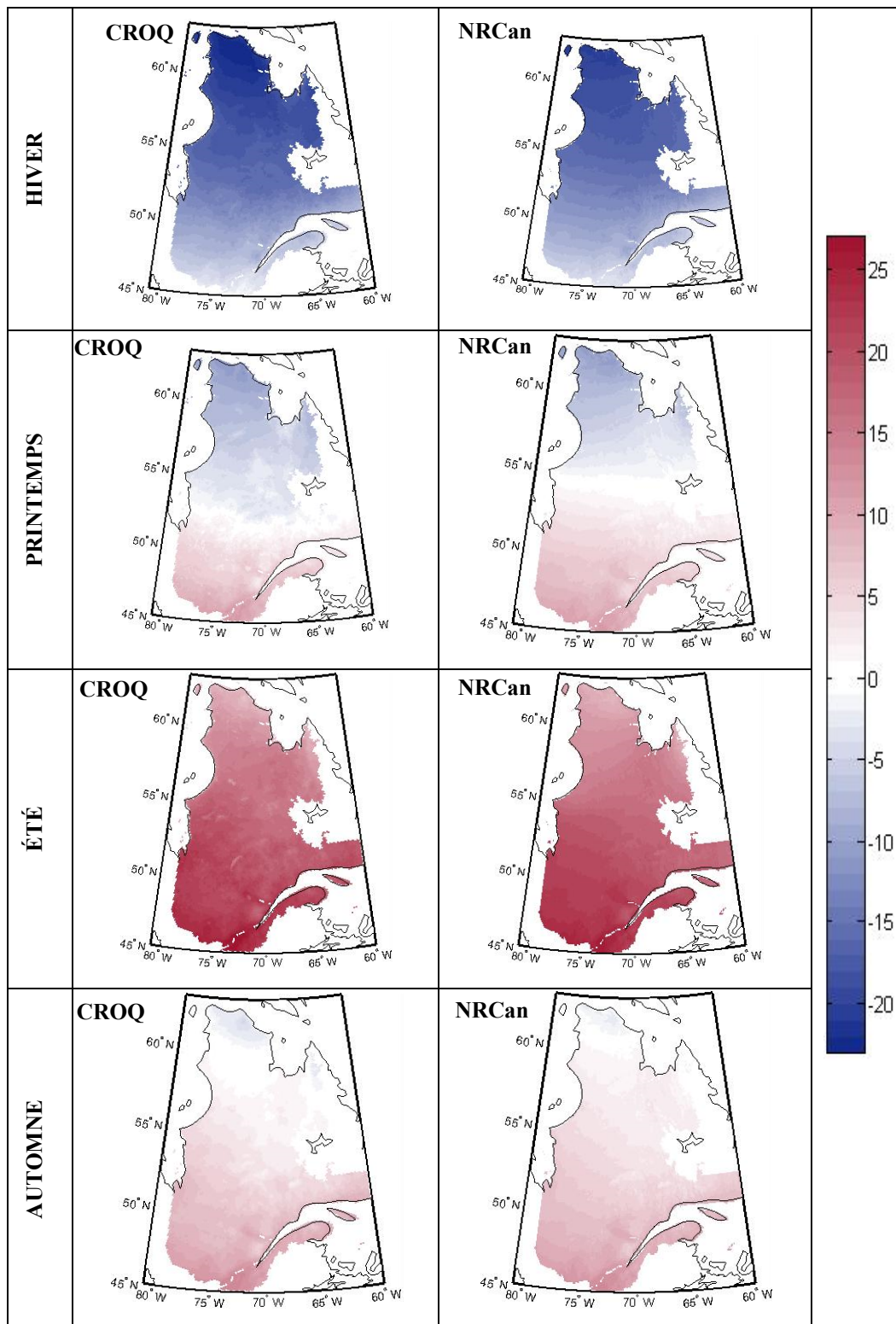


Figure 3.2 Température maximale moyenne par saison (°C) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)

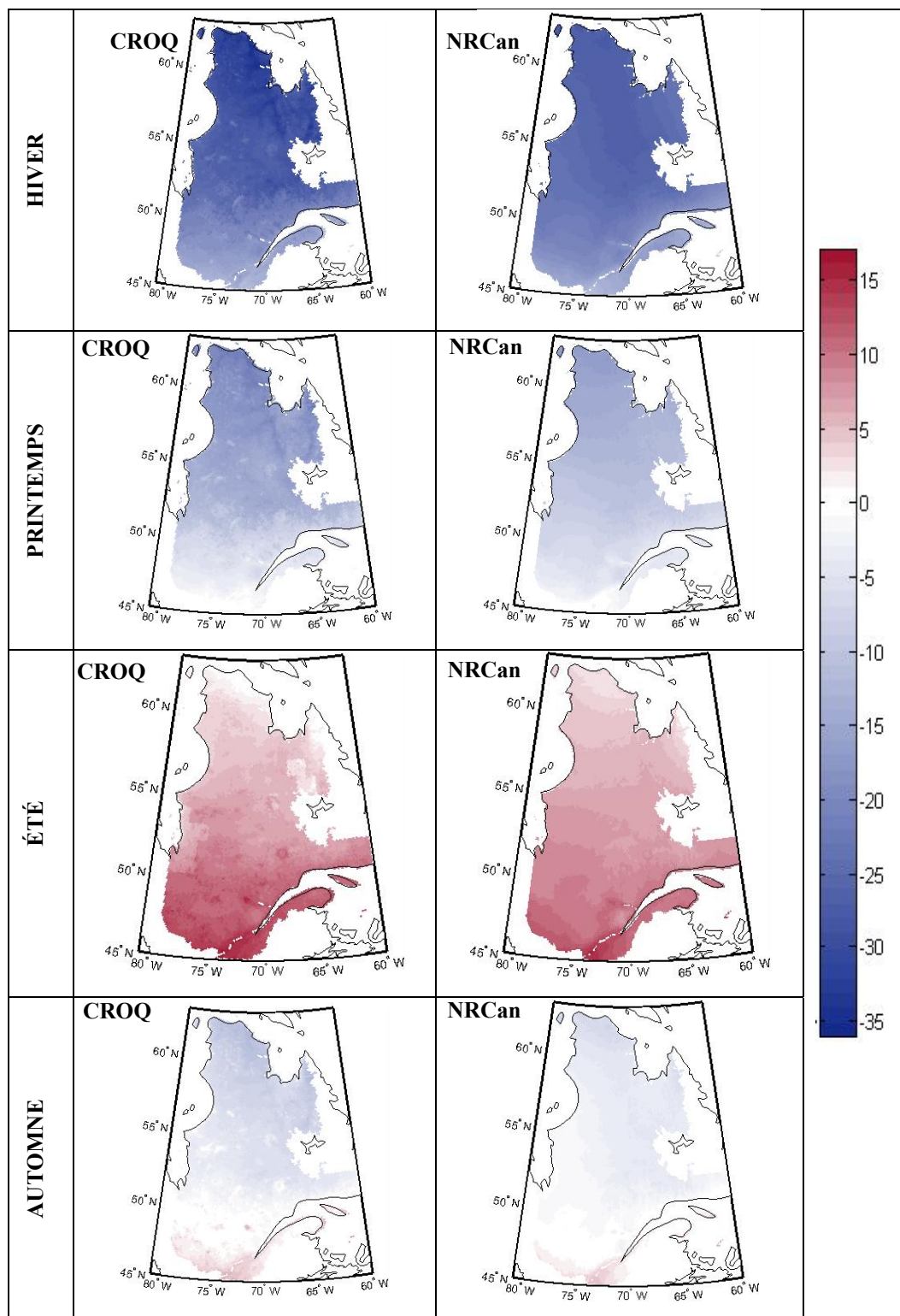


Figure 3.3 Température minimale moyenne par saison (°C) pour la période 1980-2010 pour les jeux de données de CROQ et NRCan. Les rangées horizontales représentent les saisons: Hiver (DJF), Printemps (MAM), Été (JJA) et Automne (SON)

3.1.1.2 Biais moyen saisonnier

Les cartes de biais de CROQ par rapport à NRCan sont présentées pour les différentes saisons aux figures 3.4, 3.5 et 3.6. Ces cartes confirment les observations de la section précédente. Comparativement à NRCAN, CROQ présente un biais hivernal négatif pour le nord du Québec et des biais humides pour les autres saisons. Ces biais humides sont particulièrement prononcés pour le sud et centre du Québec.

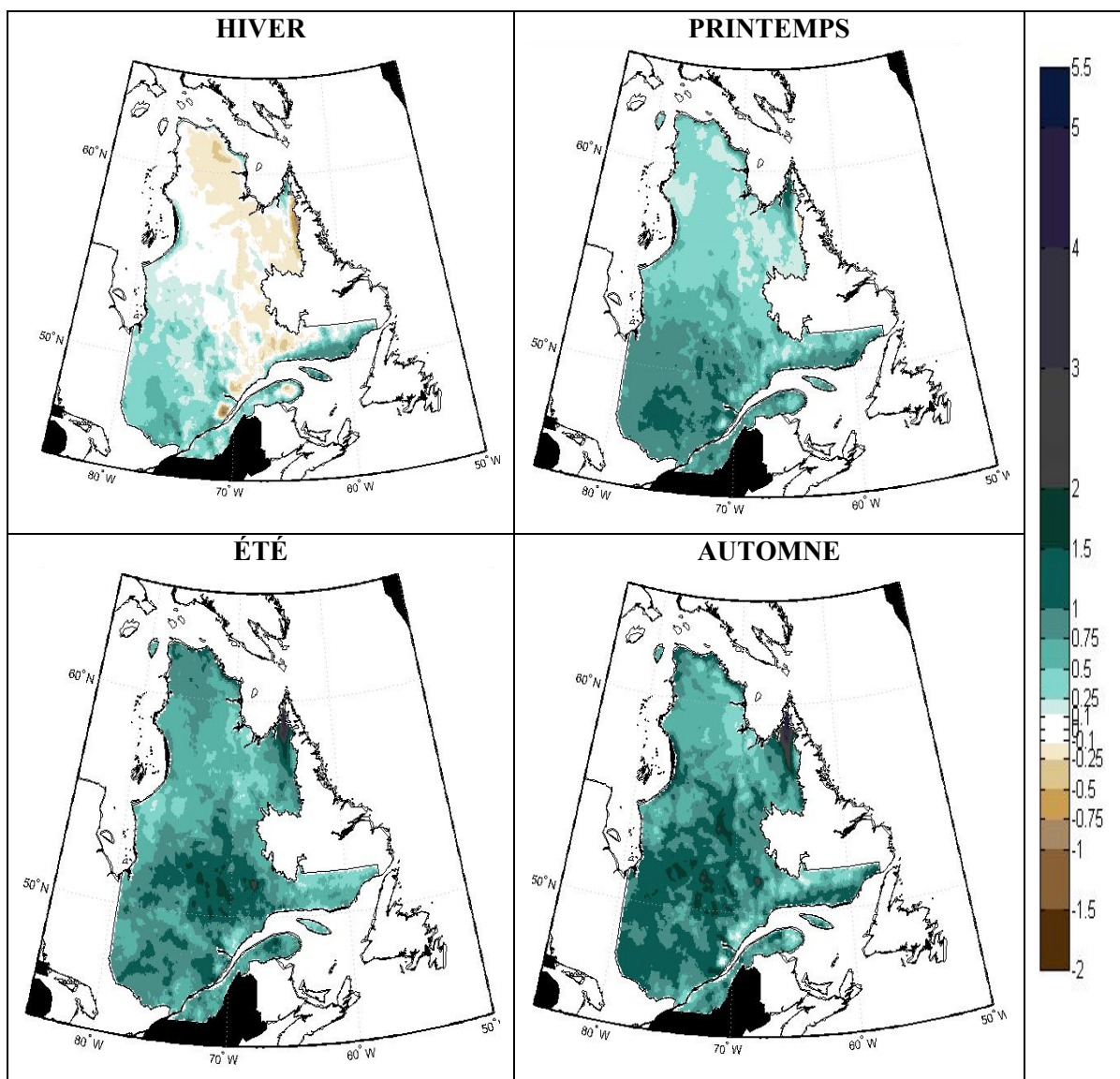


Figure 3.4 Biais de précipitation moyenne quotidienne par saison (mm/jour) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010

Les cartes de biais de température maximales de CROQ montrent un biais froid dans le nord du Québec durant l'hiver. Au printemps, CROQ montre les biais froids semblables plus prononcés au centre du Québec. En été, les biais sont relativement faibles, chauds au nord et froids au sud. Pour l'automne CROQ présente un biais froid au nord du Québec.

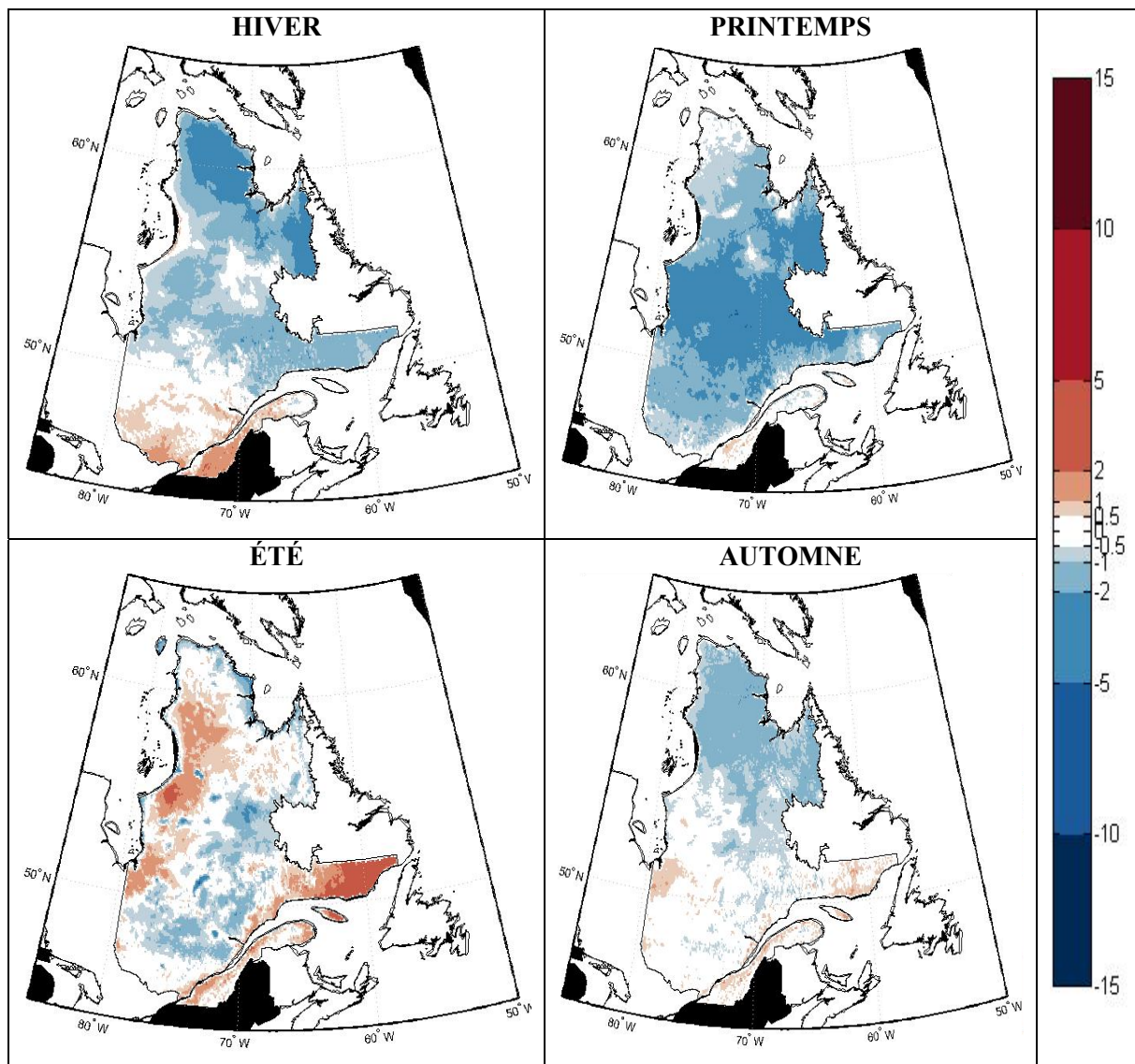


Figure 3.5 Biais de température max moyenne quotidienne par saison (°C) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010

Pour les températures minimales, les patrons de biais sont similaires pour toutes les saisons, à savoir des biais chauds au sud et froids au nord. Les biais chauds sont plus faibles au printemps et à l'automne, alors que le biais froid est minimal l'été.

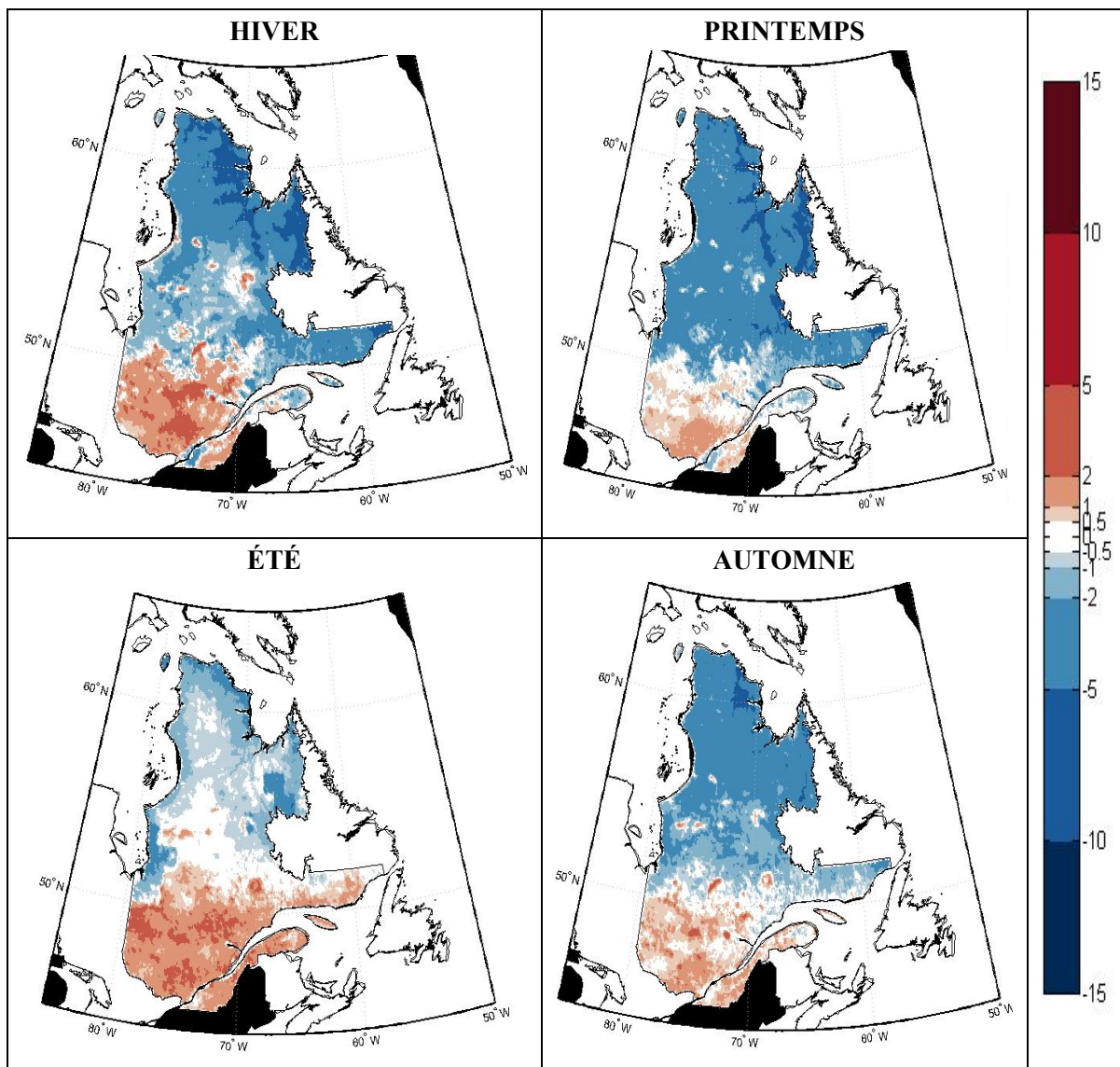


Figure 3.6 Biais de température min moyenne quotidienne par saison (°C) (CROQ(bba) / NRCan) pour la période 1980-2010

La figure 3.7 présente les biais saisonniers de précipitation sur 117 bassins versants québécois de la base de données CQ2. Les biais sur grille sont moyennés par bassin versant, alors chaque boîte à moustache représente la distribution des 117 valeurs de biais des

différents bassins versants. Ces biais sont présentés par rapport à NRCan pour toutes les autres bases de données discutées dans ce travail. On remarque que le biais de précipitation est essentiellement le même pour les simulations bba et bbq de CROQ. La simulation MRCC5 (version utilisée par Lucas-Picher et al. (2016)), présente des biais un peu plus petits que CROQ, et ce même s'il s'agit du même modèle régional. La réanalyse ERA présente les biais les plus petits. Puisque ERA est le pilote des trois autres simulations, on peut donc rapidement conclure que le modèle régional ajoute son propre biais en sus de celui lié à la réanalyse.

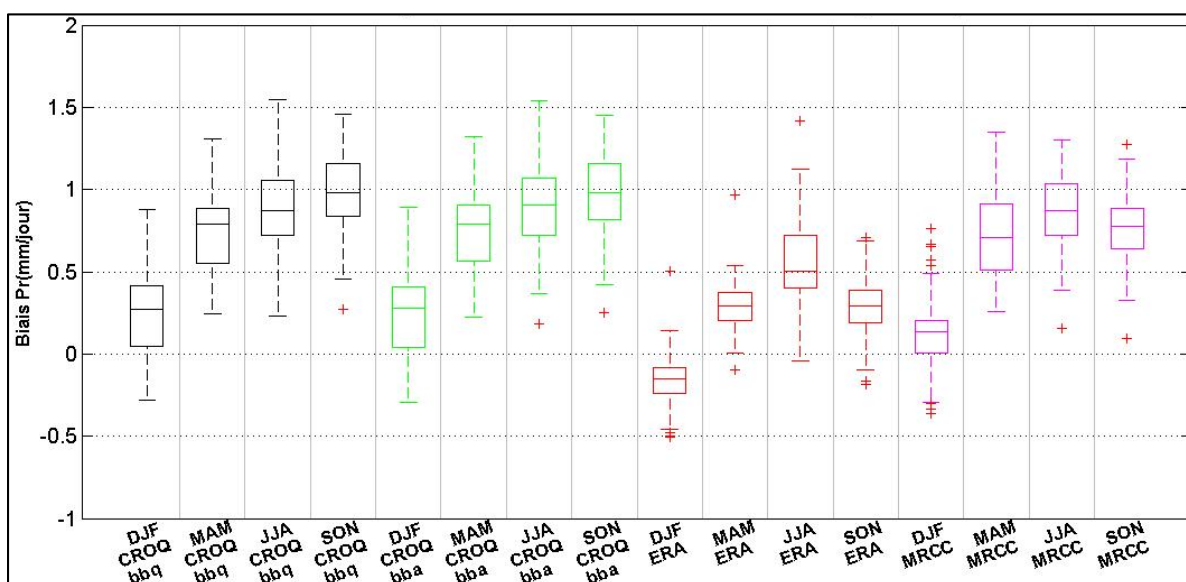


Figure 3.7 Diagramme en boîte à moustaches montrant le Biais (B) de la précipitation par saison (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur 117 bassins versants pour la période 1980-2010

La figure 3.8 présente les biais des températures minimales. Les températures maximales ont un comportement similaire bien qu'elles soient légèrement moins biaisées tel que présenté à l'annexe I (Figure-A I- 1). Les simulations CROQ (bbq) et CROQ (bba) sont très similaires avec un faible biais moyen mais avec une grande variabilité selon le bassin versant. Le pilote ERA et la simulation MRCC5 ont un biais moyen plus élevé mais avec une dispersion plus faible, en particulier pour ERA.

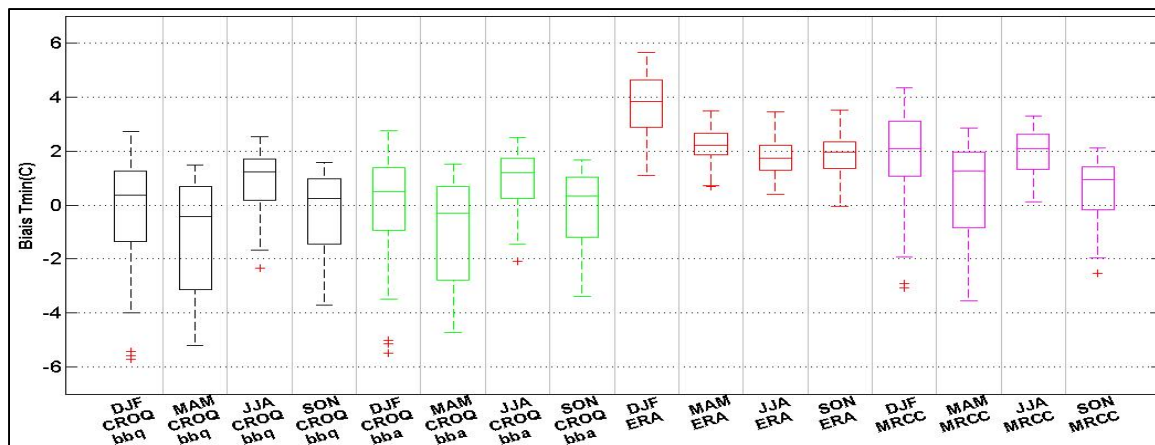


Figure 3.8 Diagramme en boîte à moustaches montrant le Biais (B) de la température minimale par saison (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur 117 bassins versants la période 1980-2010

La figure 3.9 présente la carte des biais de température minimale des 117 bassins versants pour les mois Avril et Mai. La carte des températures maximales est également présentée à l'annexe I (figure-A I- 2). Un patron spatial clair émerge de cette figure. Les biais sont froids dans le nord et chauds au sud durant la période de la fonte de la neige. Les biais froids sont plus élevés que les biais chauds.

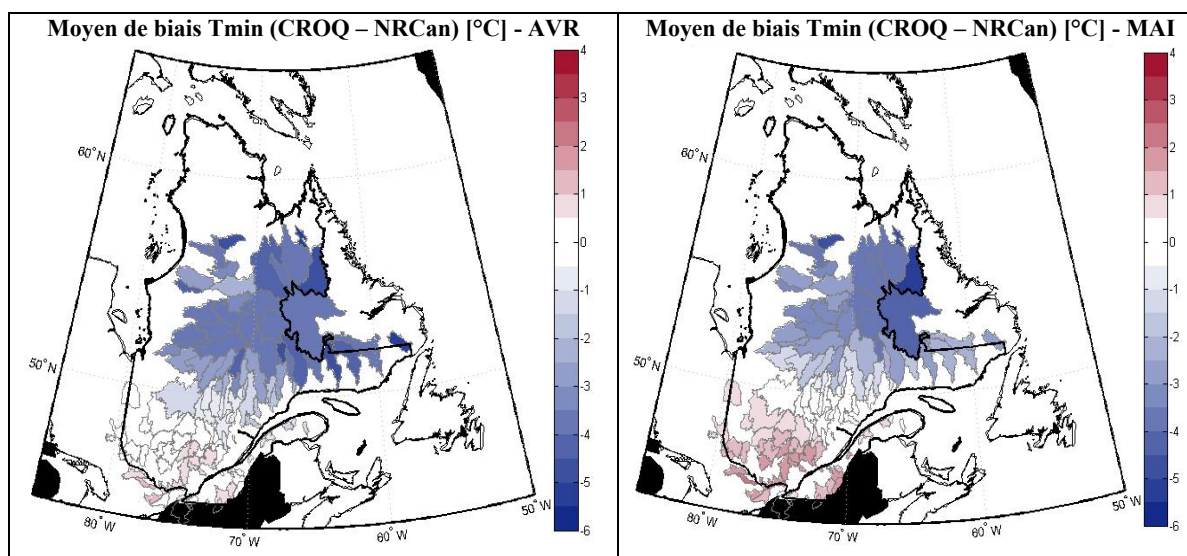


Figure 3.9 La carte de biais (B) de la température minimale moyenne quotidienne (°C) (CROQ(bba) / NRCan) de 117 bassins versants pour la période 1980-2010 et les mois Avril et Mai

3.1.1.3 Moyenne des cycles annuels

La figure 3.10 présente les cycles moyens annuels pour les températures minimale et maximale et la précipitation des différents jeux de données et leur biais par rapport à NRCan pour l'ensemble du Québec. On constate que les températures issues de CROQ sont les plus froides durant les mois de la fonte de neige (mars, avril et mai), surtout la température maximale. On peut aussi constater que CROQ est nettement plus humide par rapport à NRCan et au pilote ERA, mais comparable à MRCC5.

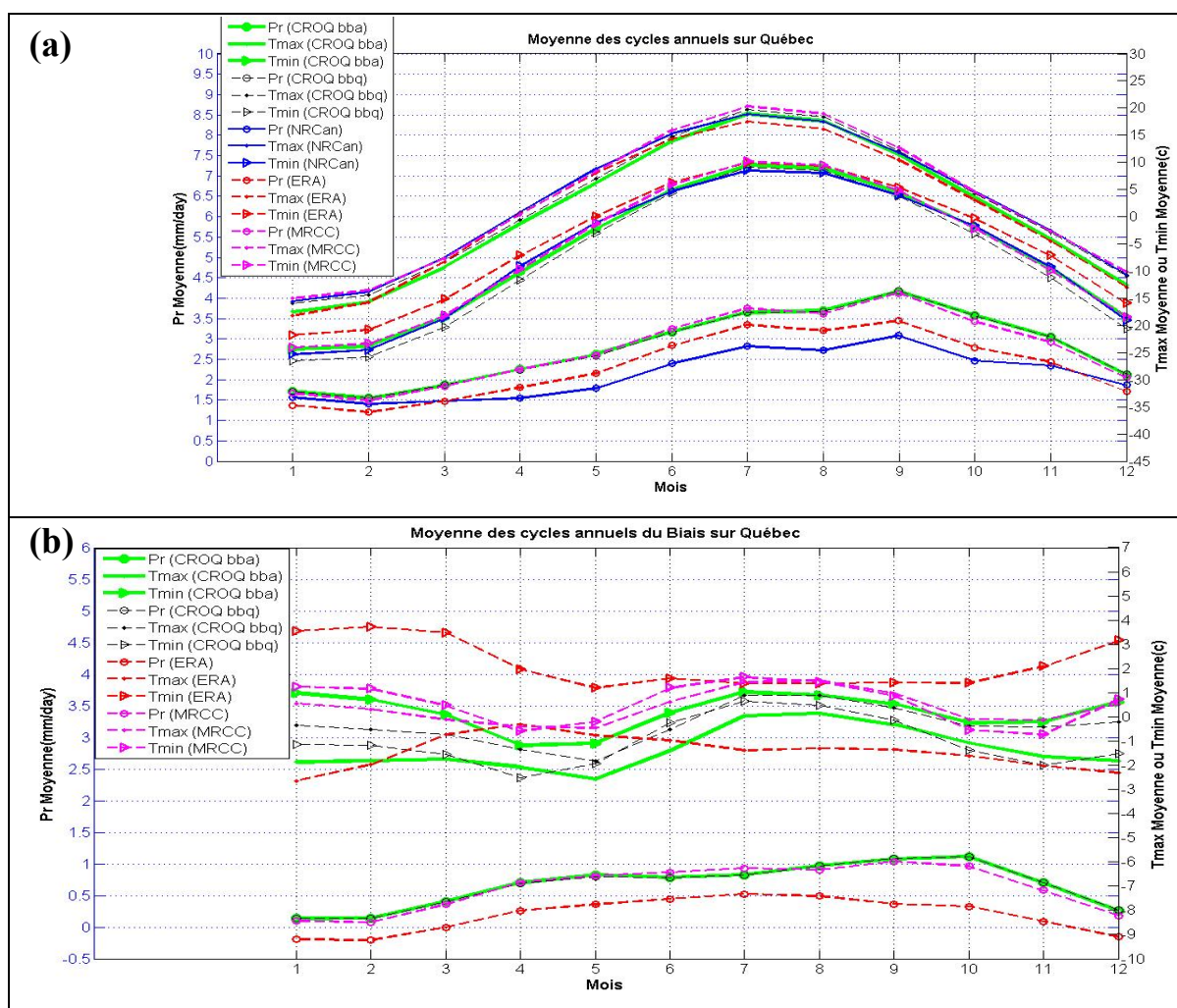


Figure 3.10 Moyen cycle annuel (a) de la précipitation, la température max et la température min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 et (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur province de Québec

3.1.2 Comparaison sur 20 grands bassins versants du Nord et du Sud

Afin de faire une comparaison plus détaillée au nord et au sud de la province, 10 grands bassins versants de CQ2 du nord et 10 grands bassins versants du sud ont été sélectionnés. La figure 3.11 présente la localisation des 20 bassins ainsi sélectionnés. Ces bassins sont brièvement décrits en Annexe (Tableau A I-1).

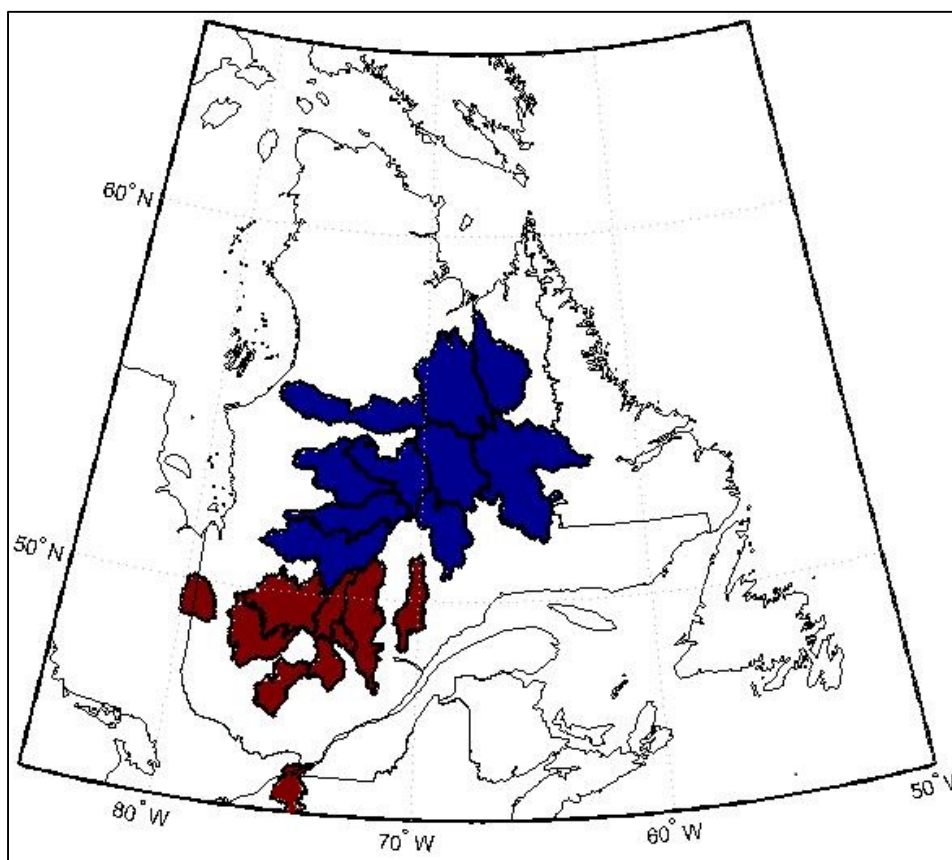


Figure 3.11 Localisation des 20 grands bassins versants de la base de données CQ2 divisée en deux groupes de 10 bassins versants du nord et du sud de la province de Québec

3.1.2.1 Biais moyen saisonnier

La figure 3.12 présente les diagrammes en boîte à moustaches des biais de précipitation pour les 20 bassins sélectionnés. Les valeurs de biais sur grille sont moyennées par bassin versant, et chaque boîte à moustache montre la distribution de 20 valeurs de biais représentant de 20

bassins. CROQ présente les biais maximums, suivi de MRCC5 et ERA. Les biais et la variabilité inter-bassin sont nettement plus grands au nord qu'au sud.

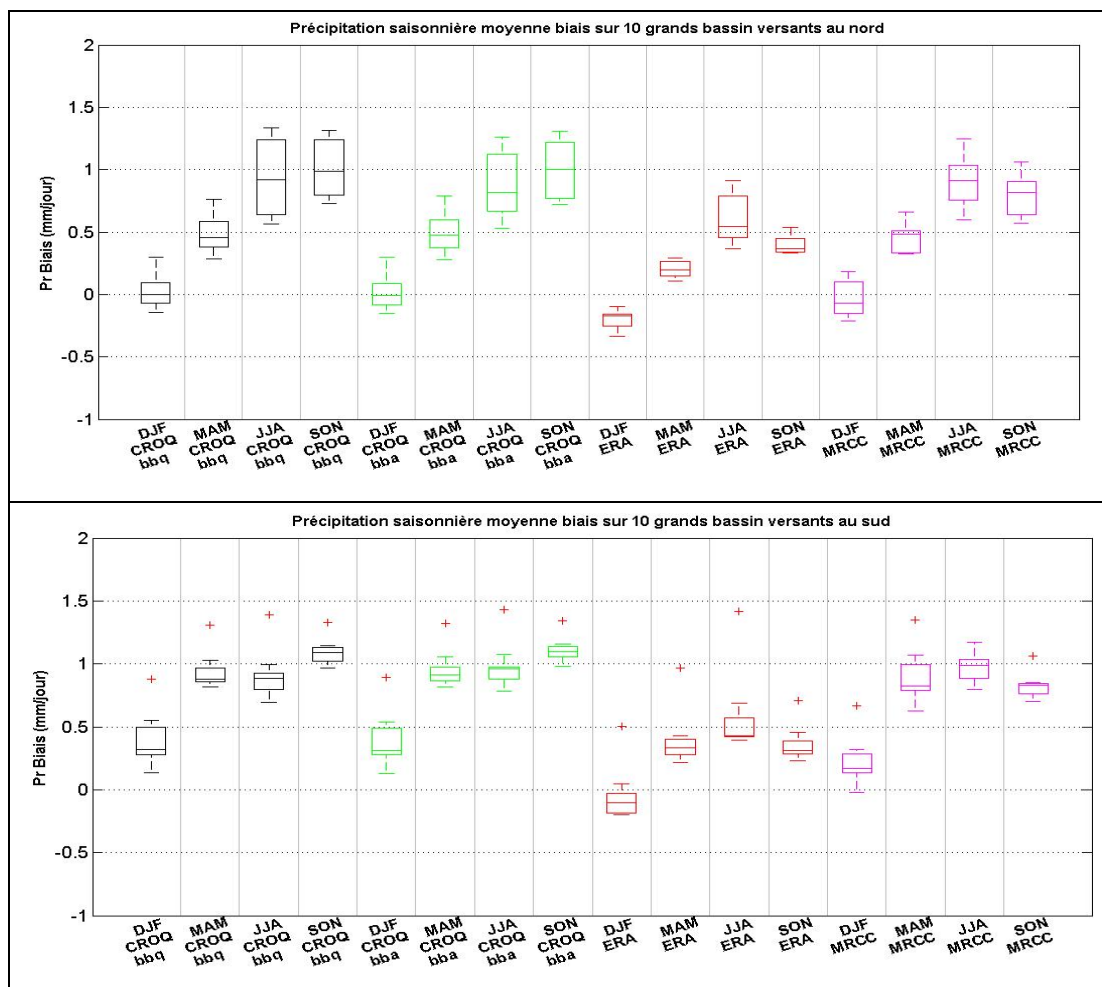


Figure 3.12 Diagramme en boîte à moustaches montrant les biais (B) de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

La figure 3.13 présente les mêmes résultats pour les températures minimales. CROQ présente les températures les plus froides et un écart inter-bassin plus élevé, surtout au nord. Les biais moins importants que les températures minimales peuvent être constatés pour les températures maximales (figure-A I-3 à l'annexe I).

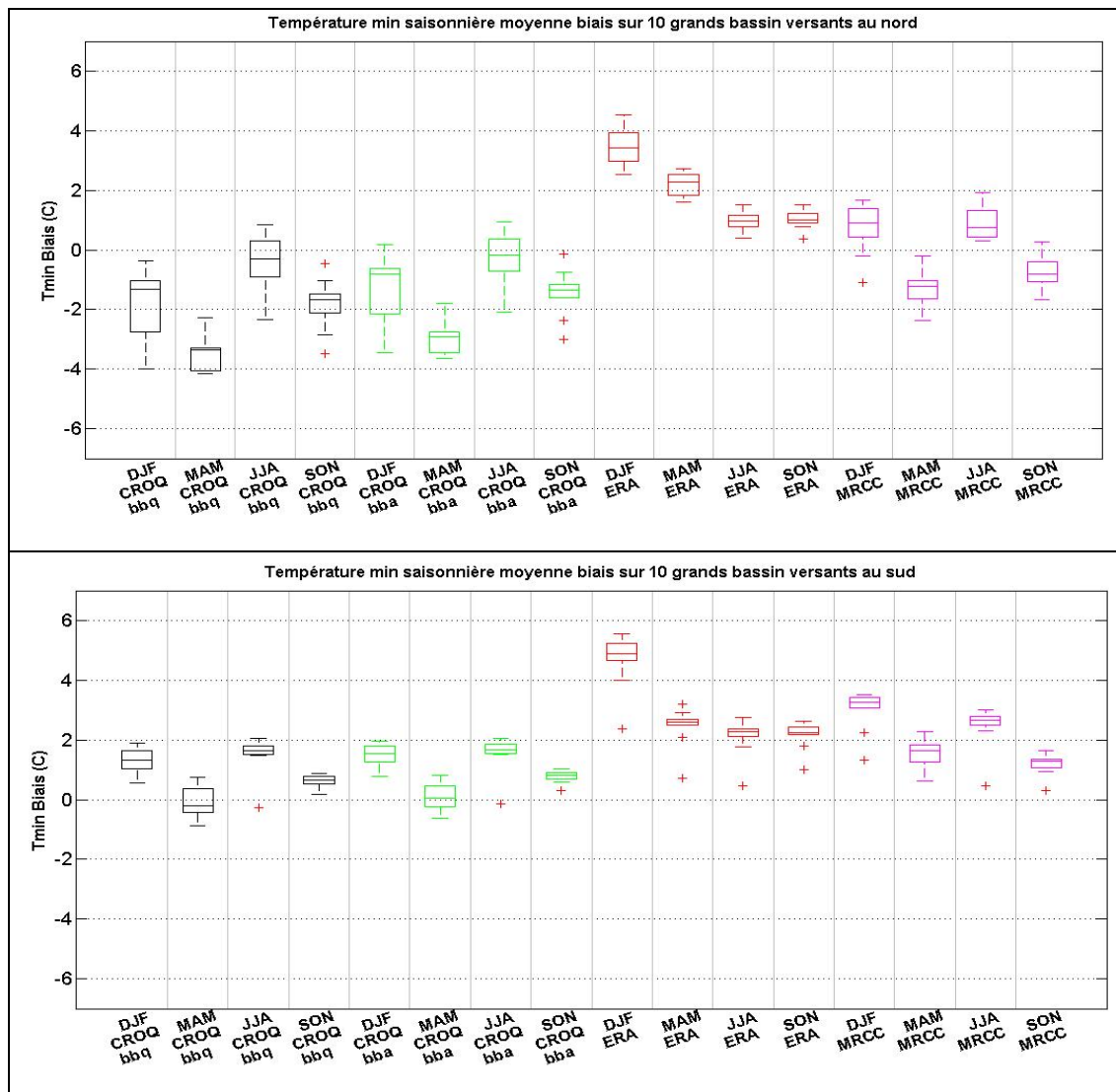


Figure 3.13 Diagramme en boîte à moustaches montrant les biais (B) de la température minimale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

3.1.2.2 Ratio des variances

Le ratio des variances est calculé sur les séries temporelles journalières pour chaque saison entre les différents jeux de données et la base de données NRCan. Les résultats sont présentés à la figure 3.14 pour les températures minimales. Les données CROQ et MRCC5 sont très similaires. Le ratio est généralement supérieur à 1 pour les températures minimales (figure-A

I-4) et inférieur à 1 pour les maximales et ils sont moins variables et plus près de 1 au sud. Selon la figure 3.15, le faible ratio des variances de précipitation existe entre NRCan et les autres jeux de données. Les résultats de CROQ et MRCC5 sont toujours près l'un de l'autre.

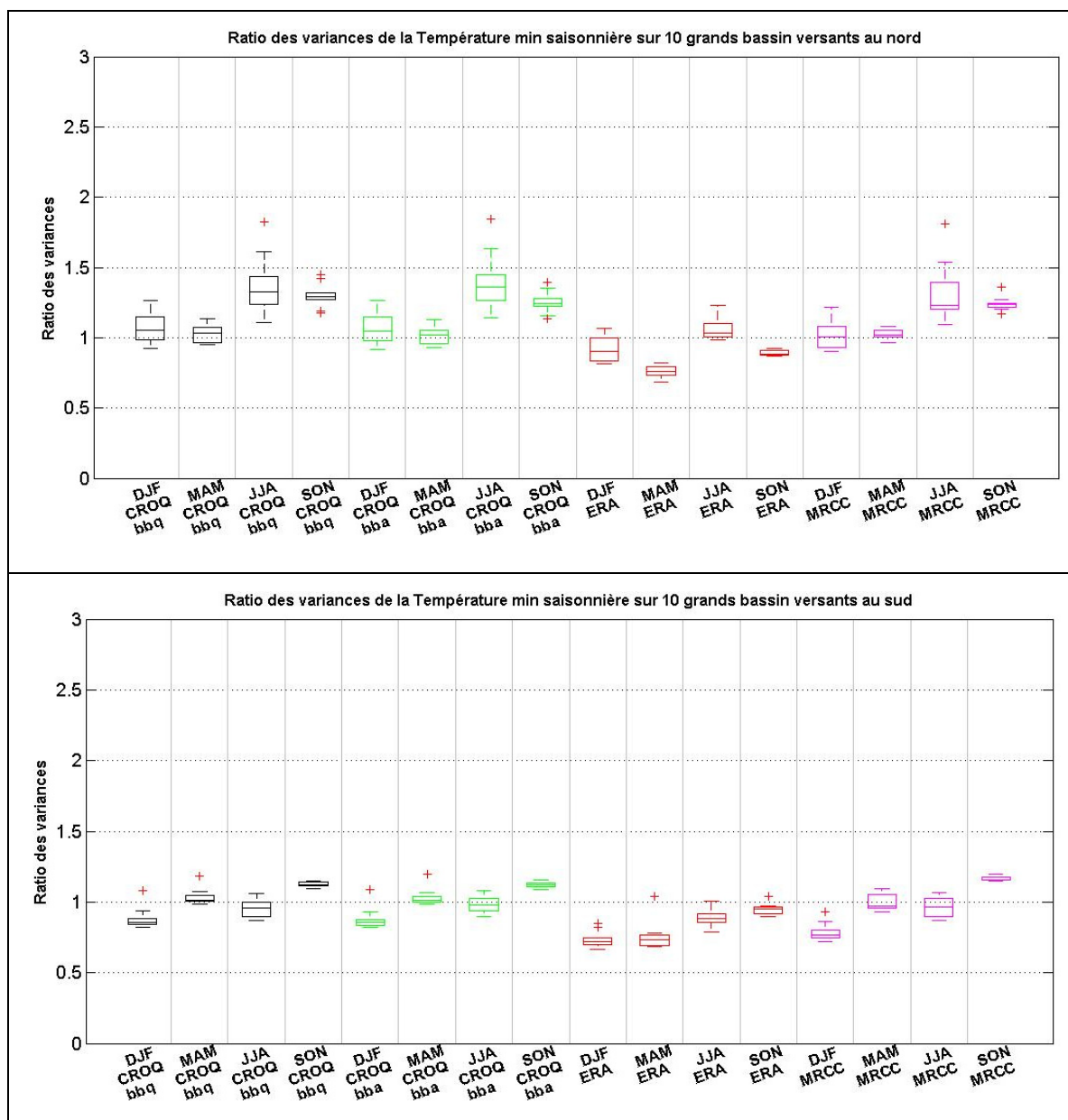


Figure 3.14 Diagramme en boîte à moustaches montrant les ratios des variances de la température minimale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

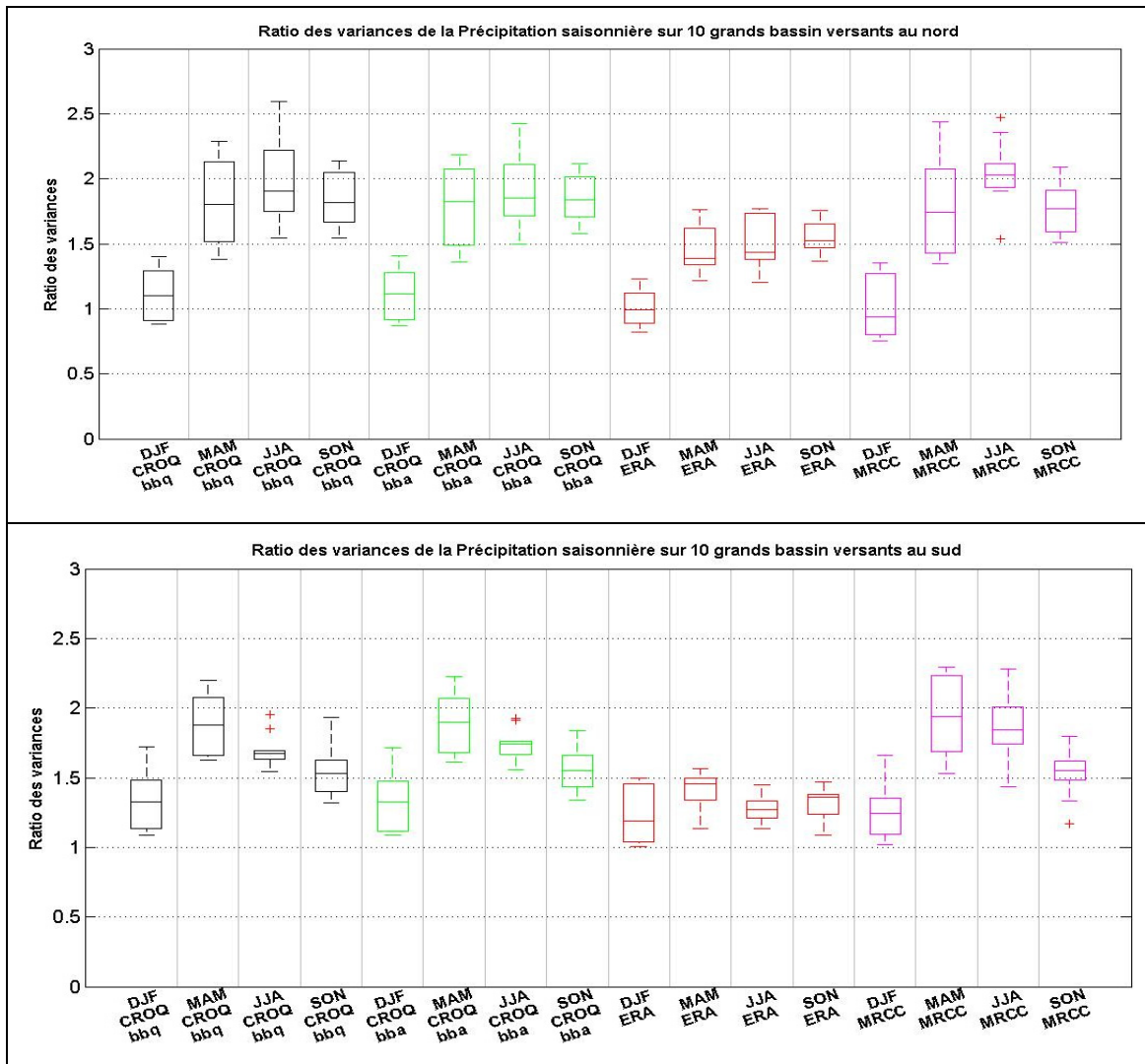


Figure 3.15 Diagramme en boîte à moustaches montrant les ratios des variances de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

3.1.2.3 Coefficient de corrélation

La figure 3.16 présente la corrélation des séries de précipitations journalières des jeux de données avec NRCan pour chaque saison. La corrélation est faible pour tous les jeux de données et particulièrement l'été. Les corrélations sont un peu plus faibles au sud du Québec et ERA présente la meilleure corrélation parmi les jeux de données. La même comparaison pour la température affiche la meilleure corrélation entre ERA et NRCan, et la pire entre

MRCC5 et NRCan (figure 3.17). Selon figure-A I-5, la température minimum est similaire mais plus corrélée que la température maximum.

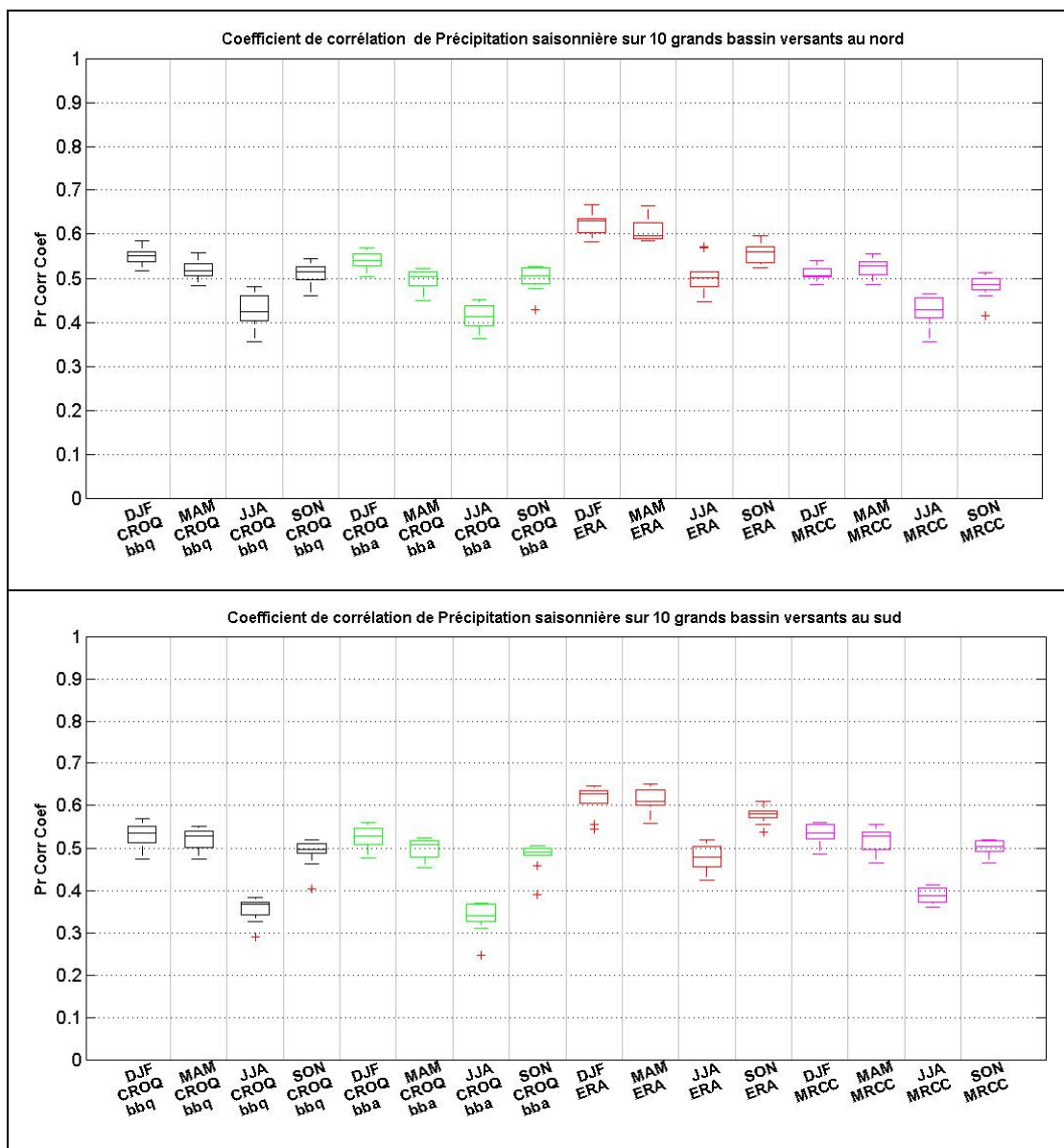


Figure 3.16 Diagramme en boîte à moustaches montrant les coefficients de corrélation de la précipitation moyenne (mm/jour) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

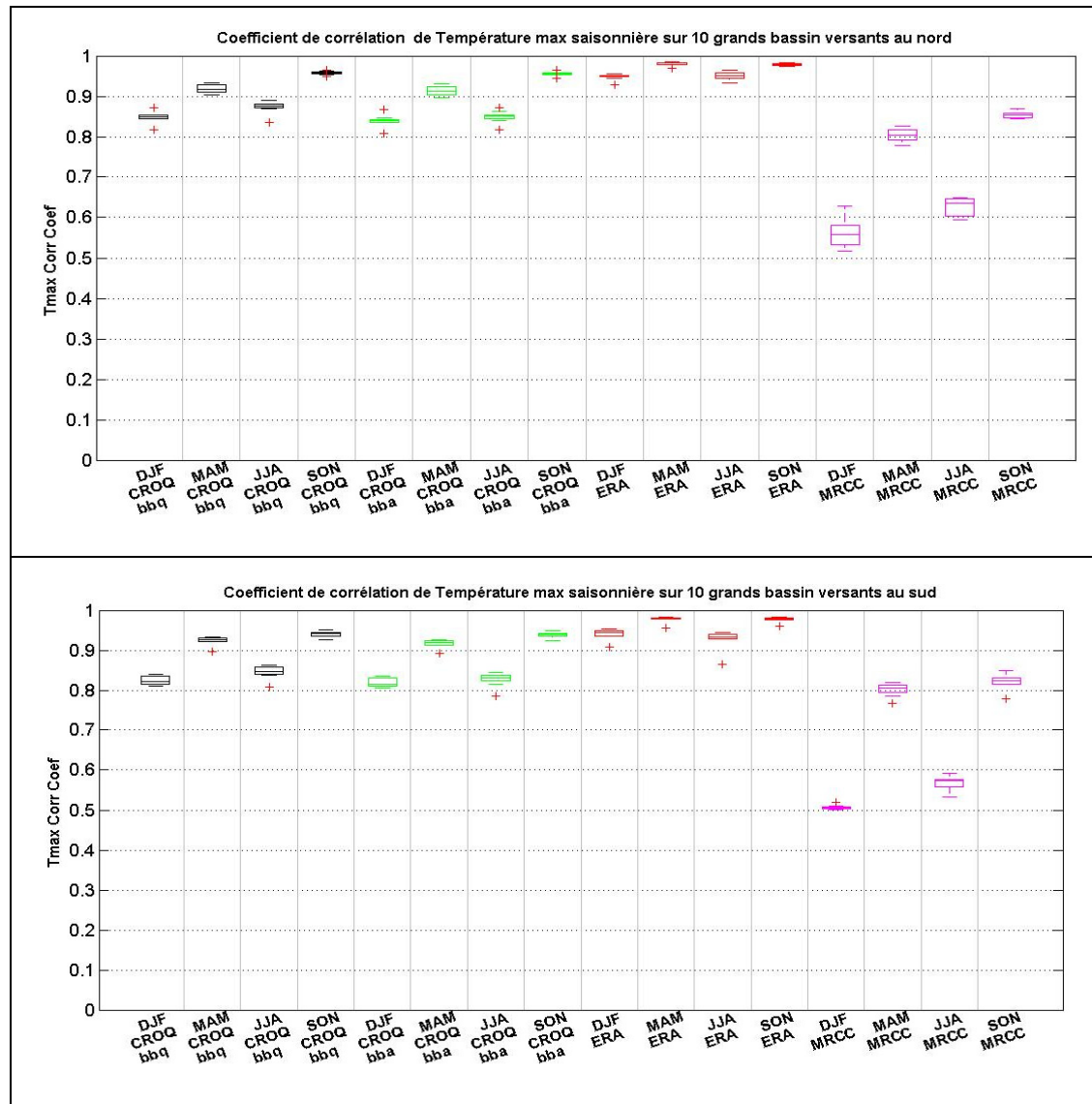


Figure 3.17 Diagramme en boîte à moustaches montrant les coefficients de corrélation de la température maximale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

3.1.3 Comparaison sur deux grands bassins versants du Nord et du Sud

Afin d'élaborer l'analyse comparative entre bassins versants au nord et au sud et bien détecter les différences parmi les jeux de données, une analyse plus détaillée sera menée sur deux bassins versants typiques du nord et du sud, à savoir les bassins de "Chutes Churchill" et "Rapide-Blanc aux barrages C et Gouin".

3.1.3.1 Moyenne des cycles annuels

Les cycles annuels sur le bassin du nord (figure 3.18) montrent un patron similaire à celui noté sur l'ensemble du Québec. Les températures maximale et minimale de CROQ sont inférieures durant les mois du printemps et la précipitation est supérieure à celle des autres jeux de données. Pour le bassin du sud (figure 3.19) le cycle de température maximale est plus près de celui de NRCan et celui de la température minimale est près (et même supérieur) de NRCan. On observe toujours une surestimation de la précipitation par rapport à NRCan.

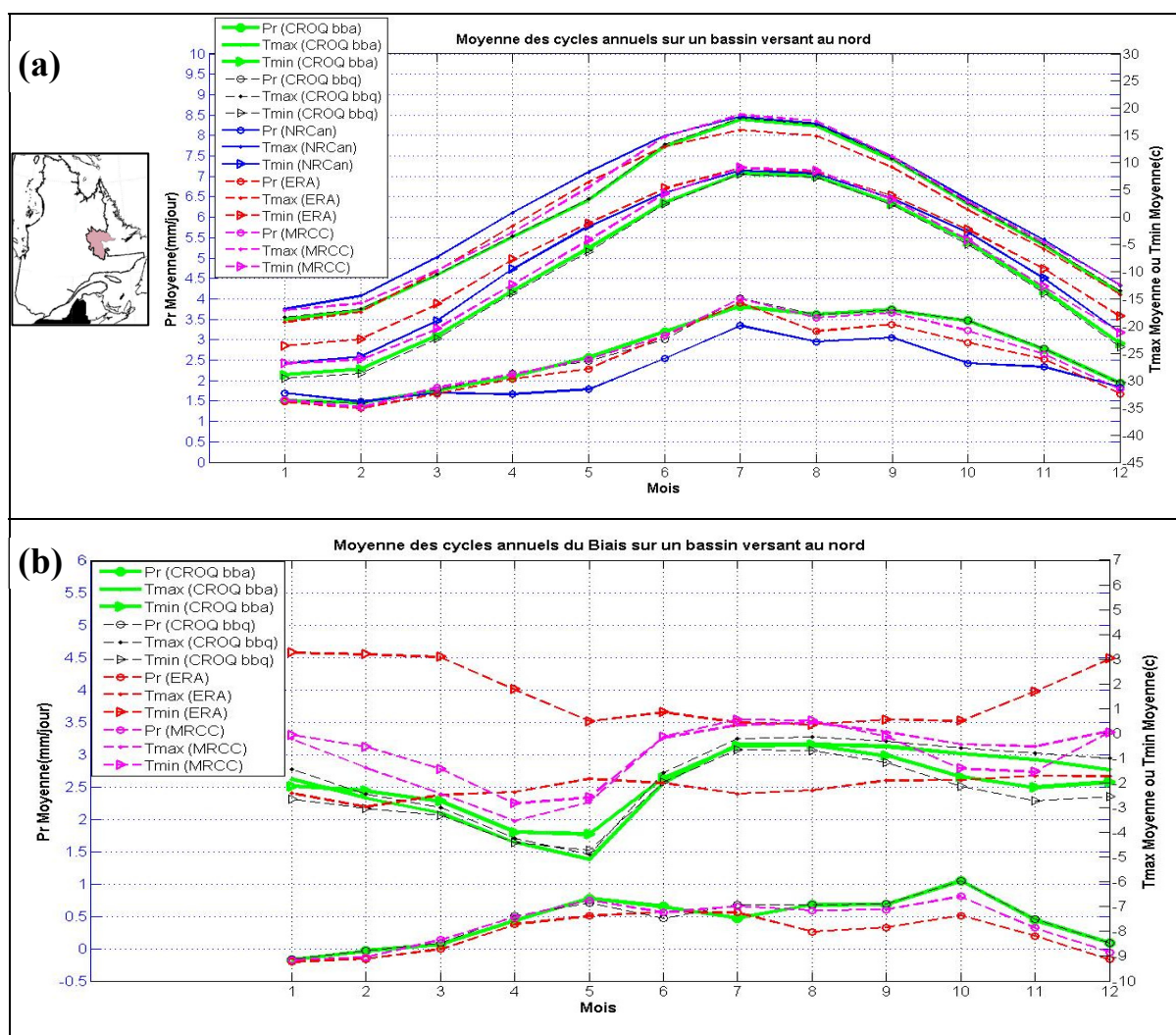


Figure 3.18 Moyen cycle annuel (a) de la précipitation, des températures max et min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur un bassin versant du nord du Québec

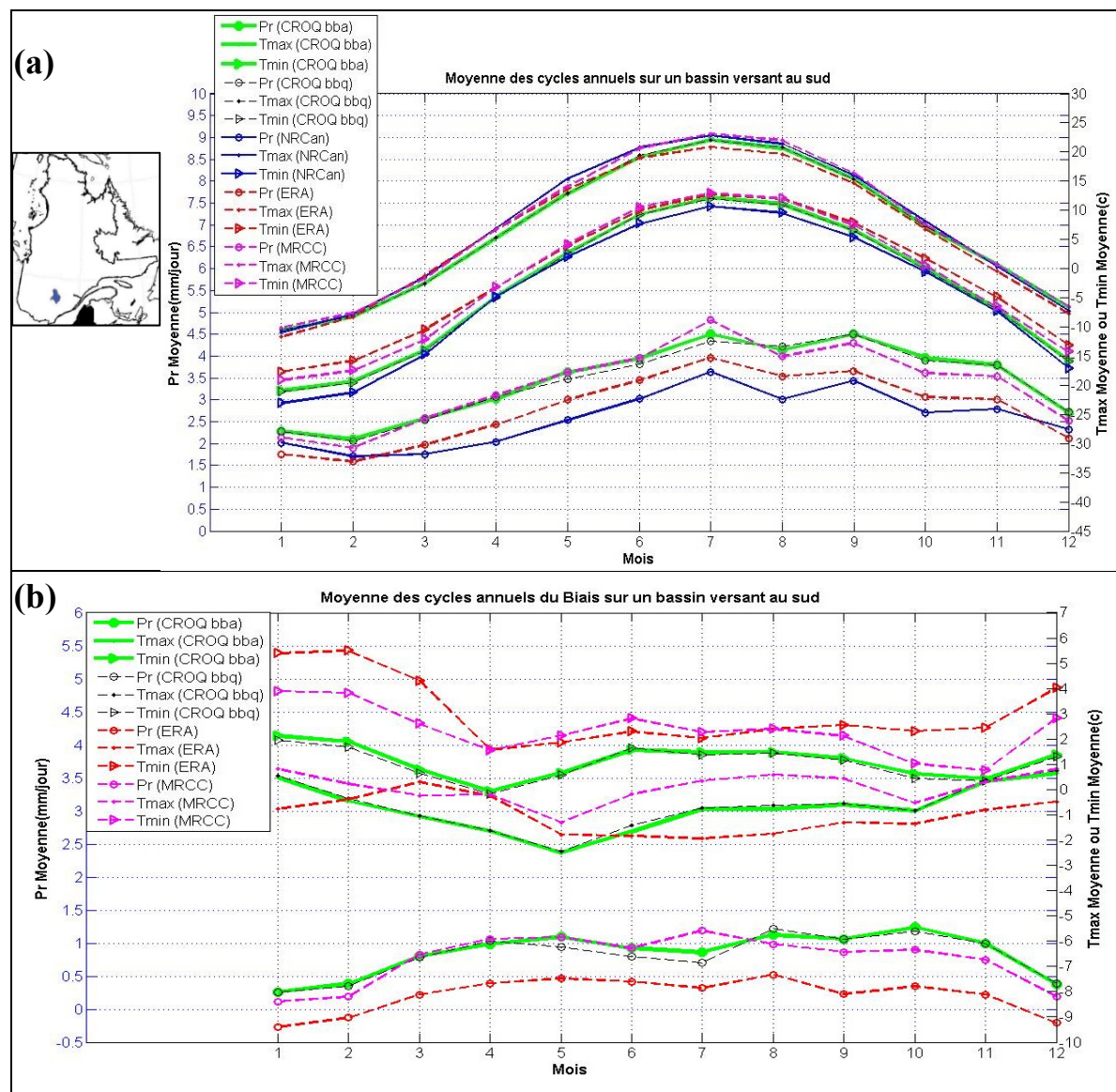


Figure 3.19 Moyenne cycle annuel (a) de la précipitation, des températures max et min pour la période 1980-2010 des données de CROQ(bba), CROQ(bbq), NRCan, ERA et MRCC5 (b) du biais des jeux de données par rapport à NRCan sur un bassin versant du sud du Québec

3.1.3.2 Diagramme de Taylor

La figure 3.20 présente le diagramme Taylor des séries journalières des 3 jeux de données par rapport à la référence NRCan pour le bassin du Nord du Québec. Cela est effectué sur les valeurs moyennées par bassin versant. Le point de référence sur un diagramme de Taylor se trouve sur la valeur zéro de RMSE centré où la corrélation et le ratio d'écart type ont une

valeur égale à 1. Sur le bassin versant du nord du Québec, ERA est clairement le meilleur jeu de données suivi de CROQ et MRCC5.

Pour le bassin versant du sud (figure 3.21), les résultats sont similaires mis à part que la précipitation est moins bien représentée alors que les températures maximale et minimale sont mieux représentées qu'au nord. CROQ montre une performance beaucoup plus comparable à celle de son pilote ERA.

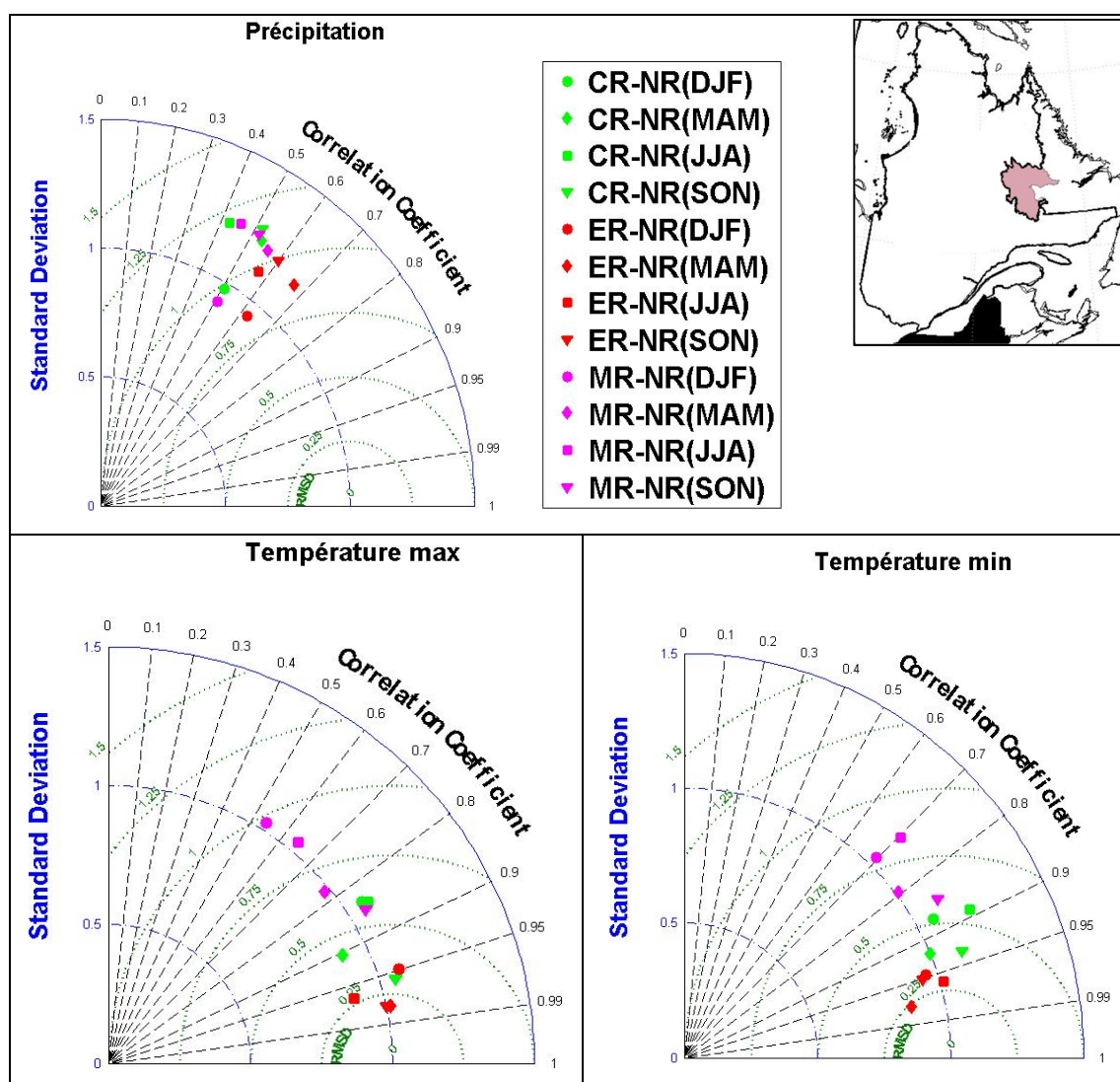


Figure 3.20 Diagramme de Taylor de la comparaison statistique entre la série chronologique quotidienne par saison de précipitation, température min et max de CROQ (bba) et RNCAN, (en vert), ERA et NRCAN(en rouge) et MRCC5 et NRCAN(en rose) sur un bassin versant du nord. Les séries temporelles sont prises par saison (hiver = cercle, printemps = losange, été = carré et automne = triangle)

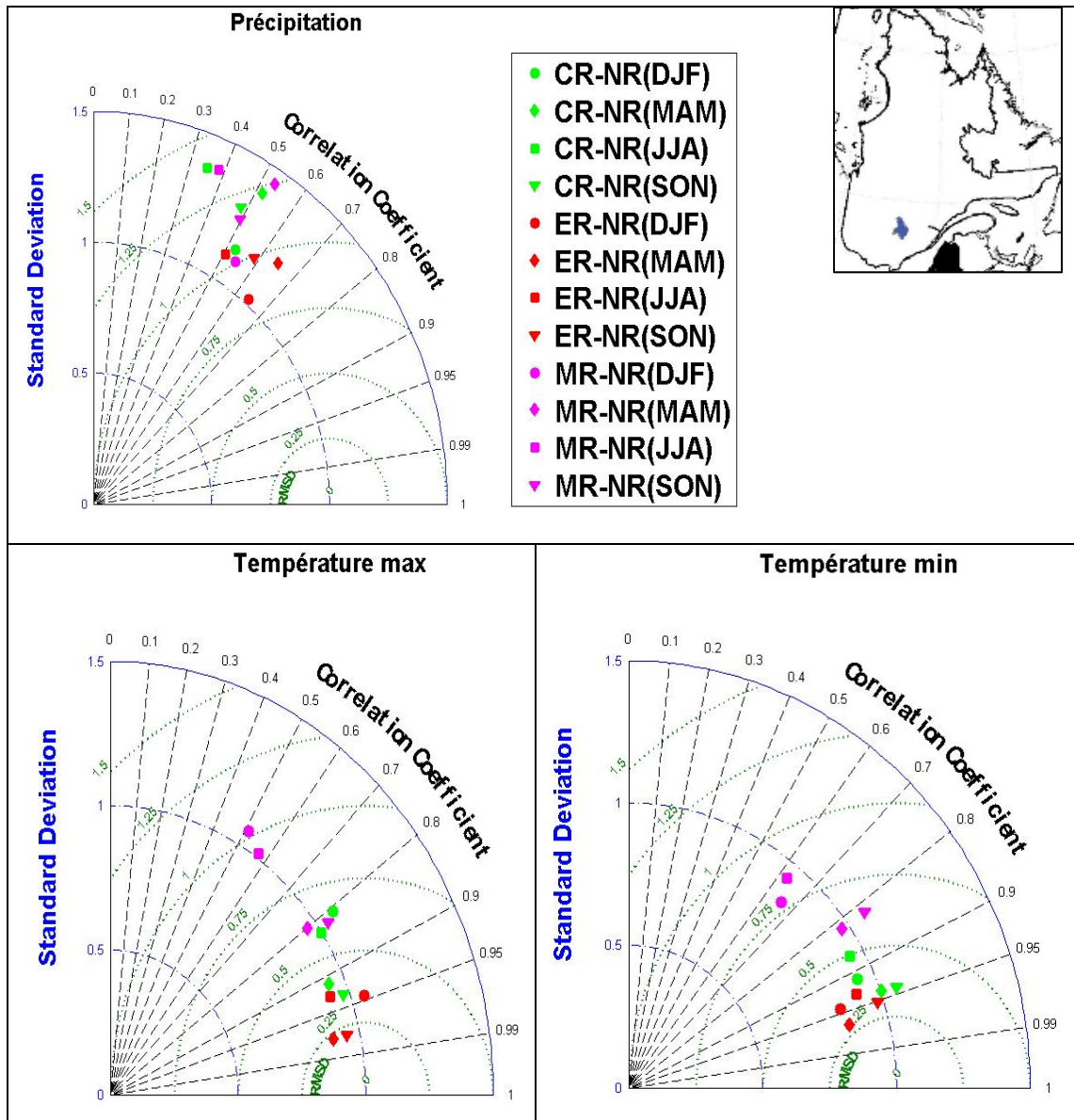


Figure 3.21 Diagramme de Taylor de la comparaison statistique entre la série chronologique quotidienne par saison de précipitation, température min et max de CROQ (bba) et NRCan (en vert), ERA et NRCan (en rouge) et MRCC5 et NRCan (en rose) sur un bassin versant du sud. Les séries temporelles sont prises par saison (hiver = cercle, printemps = losange, été = carré et automne = triangle)

3.1.3.3 Diagramme Quantile-Quantile

La figure 3.22 présente les diagrammes quantiles-quantiles pour la précipitation et les températures maximale et minimale des trois jeux de données par rapport à NRCan sur le bassin versant du nord. Les trois jeux de données surestiment la précipitation comparativement à NRCan. Ceci est particulièrement clair pour les plus hauts quantiles. Les correspondances sont meilleures pour les températures bien qu'elles soient légèrement sous-estimées dans tous les cas sauf pour les températures minimales de ERA qui sont légèrement surestimées. Les températures de CROQ et MRCC5 sont systématiquement un peu froides autour du point de congélation. Les résultats sont similaires pour le bassin du sud (Annexe I, figure A I-6).

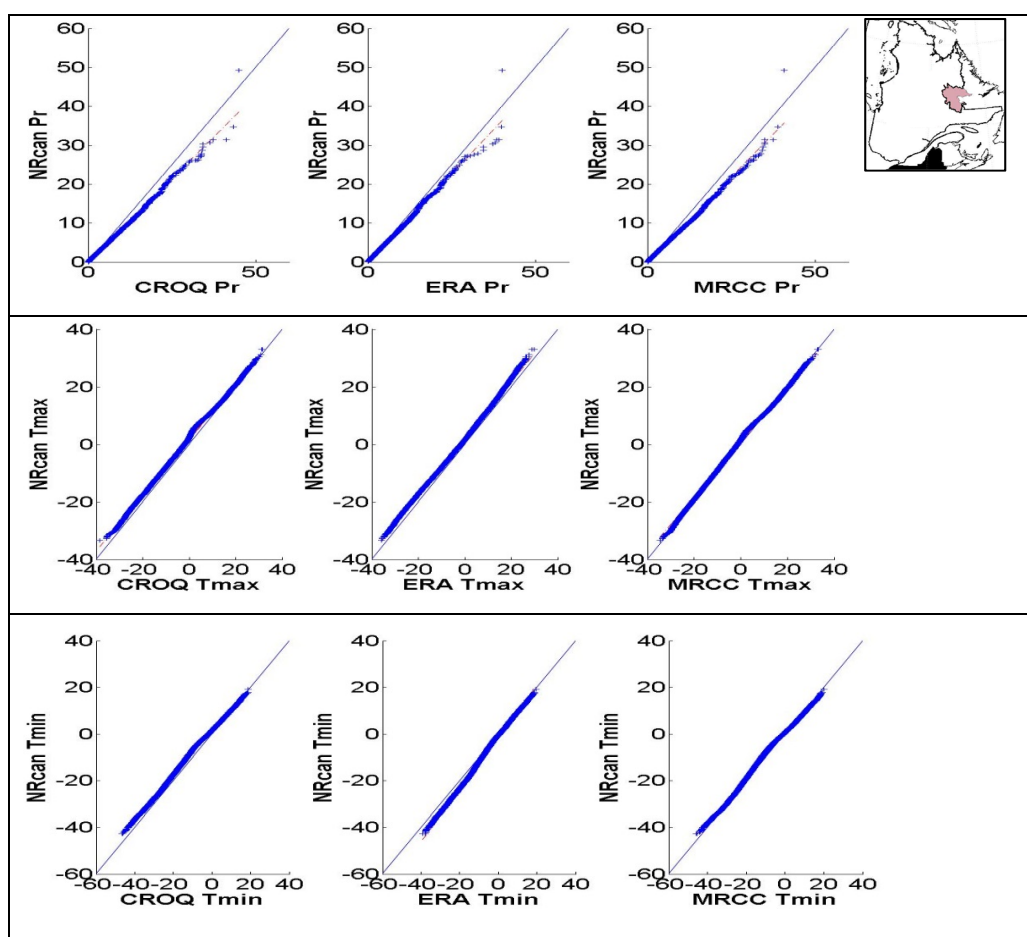


Figure 3.22 Diagramme quantiles-quantiles pour les précipitations et températures maximale et minimale annuelles pour le bassin sélectionné au nord

3.2 Simulation hydrologique en validation

Dans cette section, les résultats de modélisation hydrologique en validation sont d'abord présentés sur 117 bassins versants couvrant l'ensemble de Québec. La performance est ensuite détaillée sur 10 grands bassins versants du nord et du sud. Finalement, l'aptitude des deux modèles hydrologiques est comparée sur deux bassins versants représentatifs du nord et du sud.

3.2.1 Performance des modèles HSAMI & GR4J sur 117 bassins

La figure 3.23 présente les résultats de modélisation hydrologique en validation sur 117 bassins versants de la base de données CQ2, et ce pour les deux modèles hydrologiques. Pour le critère de Nash-Sutcliffe, pour les deux modèles, les données de ERA résultent en la meilleure performance, légèrement au-dessus de celle de NRCan. En retrait, suivent MRCC5 et les deux séries de CROQ. La performance des deux modèles hydrologiques est similaire, mais GR4J apparaît comme étant légèrement supérieur.

Les résultats statistiques (Tableau-A II-1) montrent toutefois qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les deux modèles pour tous les jeux de données sauf pour ERA-Intérim.

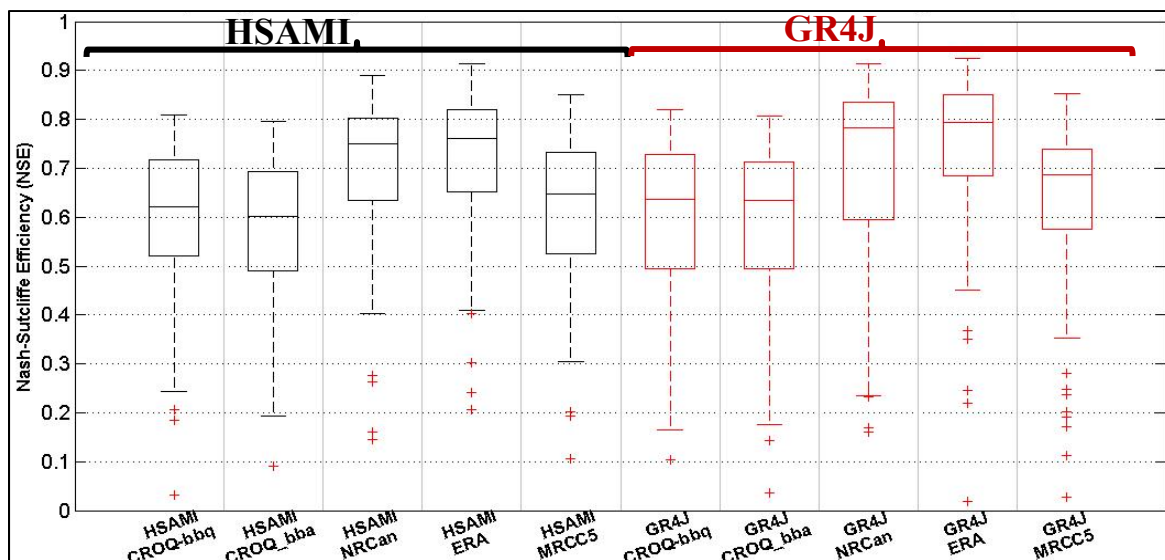


Figure 3.23 Diagramme en boîte à moustaches montrant les valeurs d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) de validation sur 117 bassins versants sur la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)

Afin d'examiner la performance des séries de précipitation et température du jeu de données CROQ en modélisation hydrologique, différentes combinaisons des trois séries d'intrants (P , $T_{\max}$, $T_{\min}$) en combinaison avec les autres jeux de données ont été utilisés avec les modèles hydrologiques. Les résultats sont présentés à la Figure 3.24. La meilleure combinaison incluant au moins une série issue de CROQ est celle qui utilise les séries de précipitation et température minimale de ERA, combinées à la température maximale de CROQ [CR(T) ER(pt)]. La performance de cette combinaison demeure par contre inférieure à celle résultant de la seule utilisation des données de ERA. Les résultats sont similaires pour les deux modèles hydrologiques.

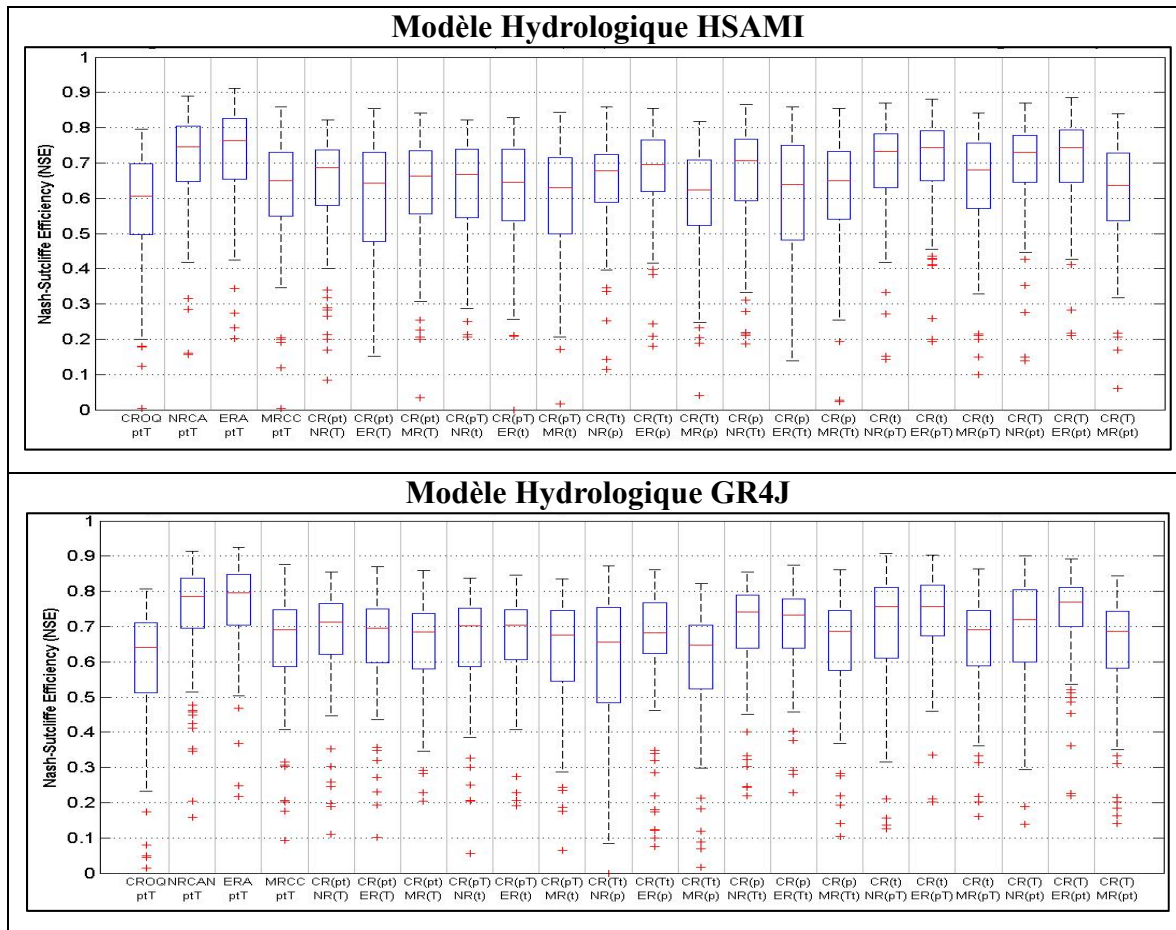


Figure 3.24 Les résultats de validation (NSE) du modèle hydrologique HSAMI (rangée supérieure) et GR4J (rangée inférieure) utilisant les différents jeux de données (CROQ(bba), ERA et MRCC5) et combinaisons de données de température et de précipitation sur 117 bassins versants durant la période 1979-2010 (T = Température maximale, t = Température minimale, p = Précipitation, CR=CROQ, NR=NRCan, ER=ERA, MR=MRCC5)

3.2.2 Analyse statistique et comparaison des modèles HSAMI et GR4J sur 20 grands bassins du Nord et du Sud du Québec

Afin de faire une comparaison plus détaillée au nord et au sud de la province, les résultats des simulations hydrologiques sont présentées sur 20 grands bassins versants du nord et du sud.

3.2.2.1 Critère de Nash-Sutcliffe

La comparaison de la performance hydrologique entre les bassins versants du nord et du sud est présentée à la figure 3.25. On peut noter un comportement très contrasté au nord et au sud. Au nord, les résultats sont plus variables et HSAMI performe mieux que GR4J à l'exception de ERA avec lequel les deux modèles hydrologiques performant de manière similaire. Au sud la variabilité est beaucoup plus faible et GR4J présente une performance nettement supérieure à celle de HSAMI.

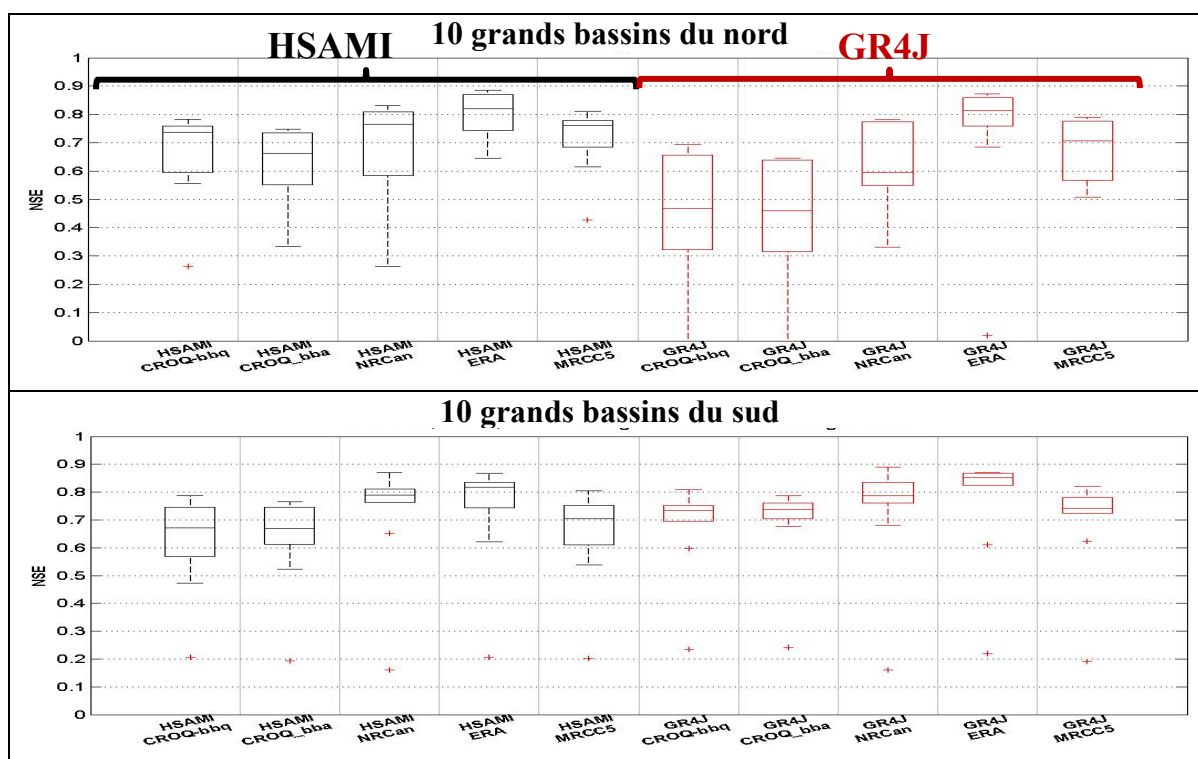


Figure 3.25 Diagramme en boîte à moustaches des valeurs d'efficacité de NSE en validation sur 20 grands bassins versants sur la période 1980-2010. Les résultats des modèles HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche en noir et à droite en rouge

Les résultats de performance en modélisation hydrologique utilisant les combinaisons des séries des différentes bases de données sur ces 20 bassins versants sont présentés aux figures A II-1 et A II-2. Les résultats sont très similaires à ceux présentés à la figure 3.24.

Les diagrammes de dispersion de la Figure 3.26 confirment l'observation précédente à savoir la meilleure performance de HSAMI au nord et celle de GR4J au sud.

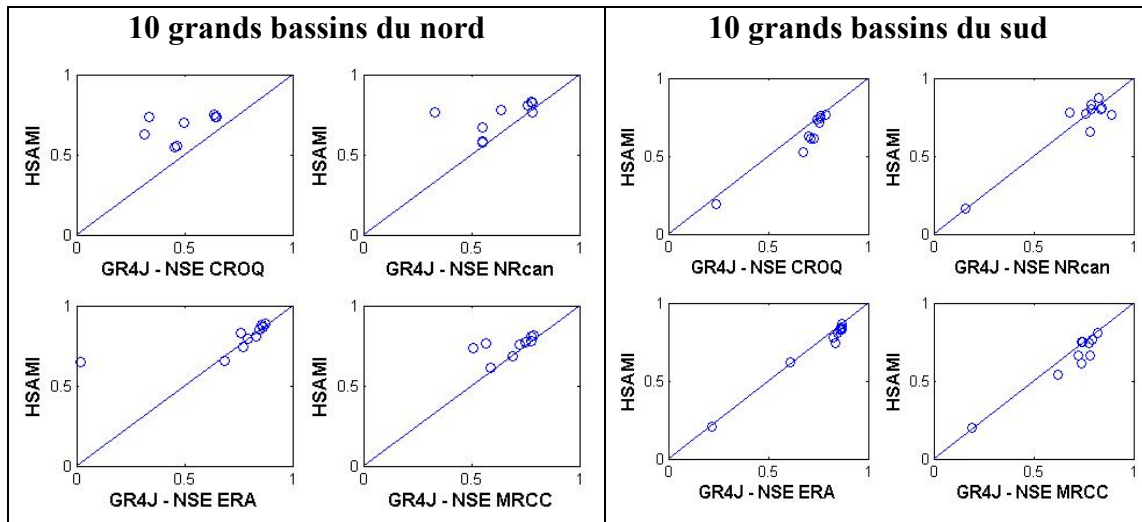


Figure 3.26 Diagramme de dispersion des valeurs de NSE de validation pour chacun des jeux de données (CROQ(bba), NRCan, ERA et MRCC5) en fonction des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J pour la période 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord(gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

3.2.2.2 Biais normalisé moyen annuel sur les débits simulés

La figure 3.27 illustre le résultat du biais normalisé moyen annuel des débits simulés par les deux modèles en rapport avec les débits observés. Les résultats montrent que les débits simulés avec CROQ sont sous-estimés par GR4J et surestimés par HSAMI. Les débits simulés de CROQ (bbq) sont moins biaisés que ceux issus de la simulation bba et particulièrement au nord. Sinon les biais sont relativement faibles, et notamment au sud pour GR4J.

Des résultats similaires sont obtenus via un diagramme de dispersion de biais normalisé moyen annuel (figure-A II-3).

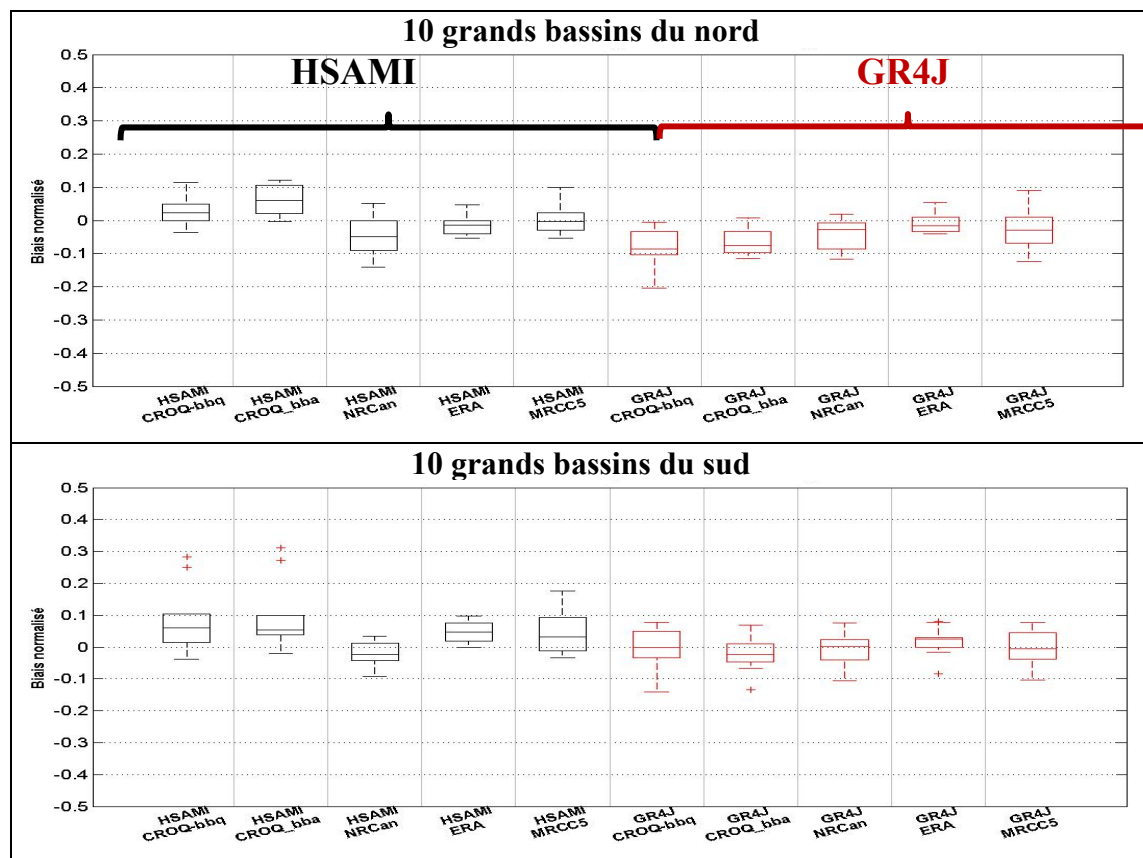


Figure 3.27 Diagramme en boîte à moustaches du biais normalisé annuel moyen par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)

3.2.2.3 Coefficient de corrélation des débits journaliers

La figure 3.28 présente les coefficients de corrélation des débits journaliers pour les modèles GR4J et HSAMI. La corrélation entre les débits simulés et observés est bonne dans le nord par HSAMI et meilleure au sud pour GR4J pour tous les jeux de données. La dispersion est plus faible au sud. Les corrélations sont meilleures pour ERA. Ceci est aussi confirmé en annexe à la figure-A II-4 qui présente les diagrammes en boîte à moustaches des mêmes coefficients de corrélation.

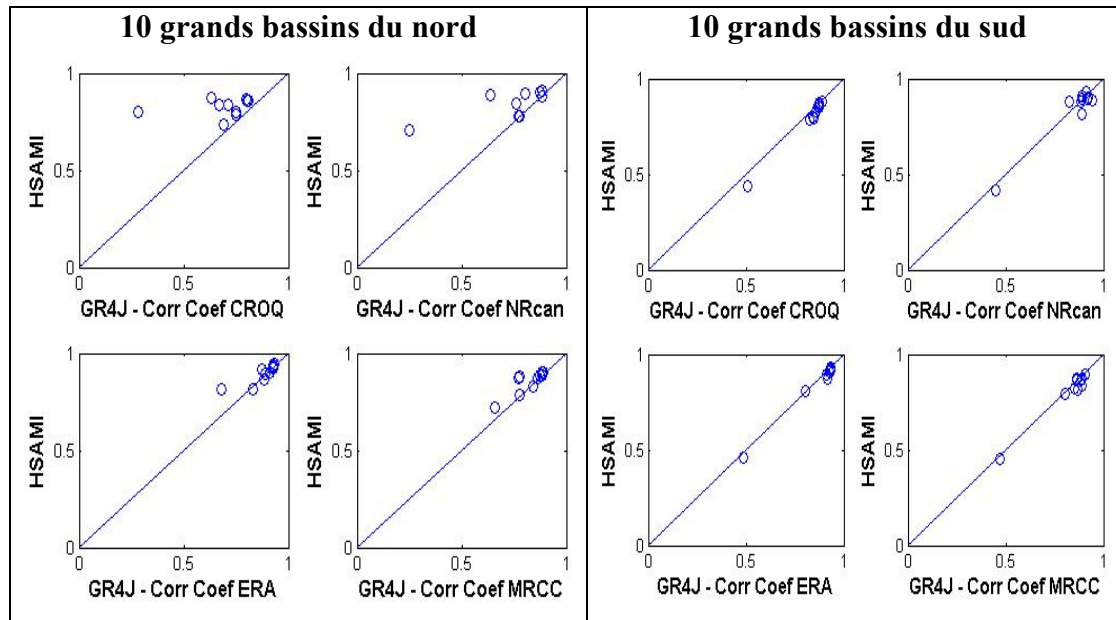


Figure 3.28 Diagramme de dispersion des valeurs des coefficients de corrélation des débits journaliers simulés par rapport aux débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

3.2.2.4 Ratio des Variances

La figure 3.29 présente le ratio des variances des séries temporelles journalières des débits observés et simulés par les deux modèles hydrologiques pour chaque saison sur les 20 bassins du sud et du nord. Le ratio est meilleur au sud avec moins de variabilité inter-bassin. Les jeux NRCan et ERA sont les meilleurs au sud. Au nord, les ratios issus de CROQ avec GR4J et de NRCan avec HSAMI sont les plus variables.

Les mêmes résultats sont aussi présentés sous forme de diagramme de dispersion à l'annexe II (figure-A II-5).

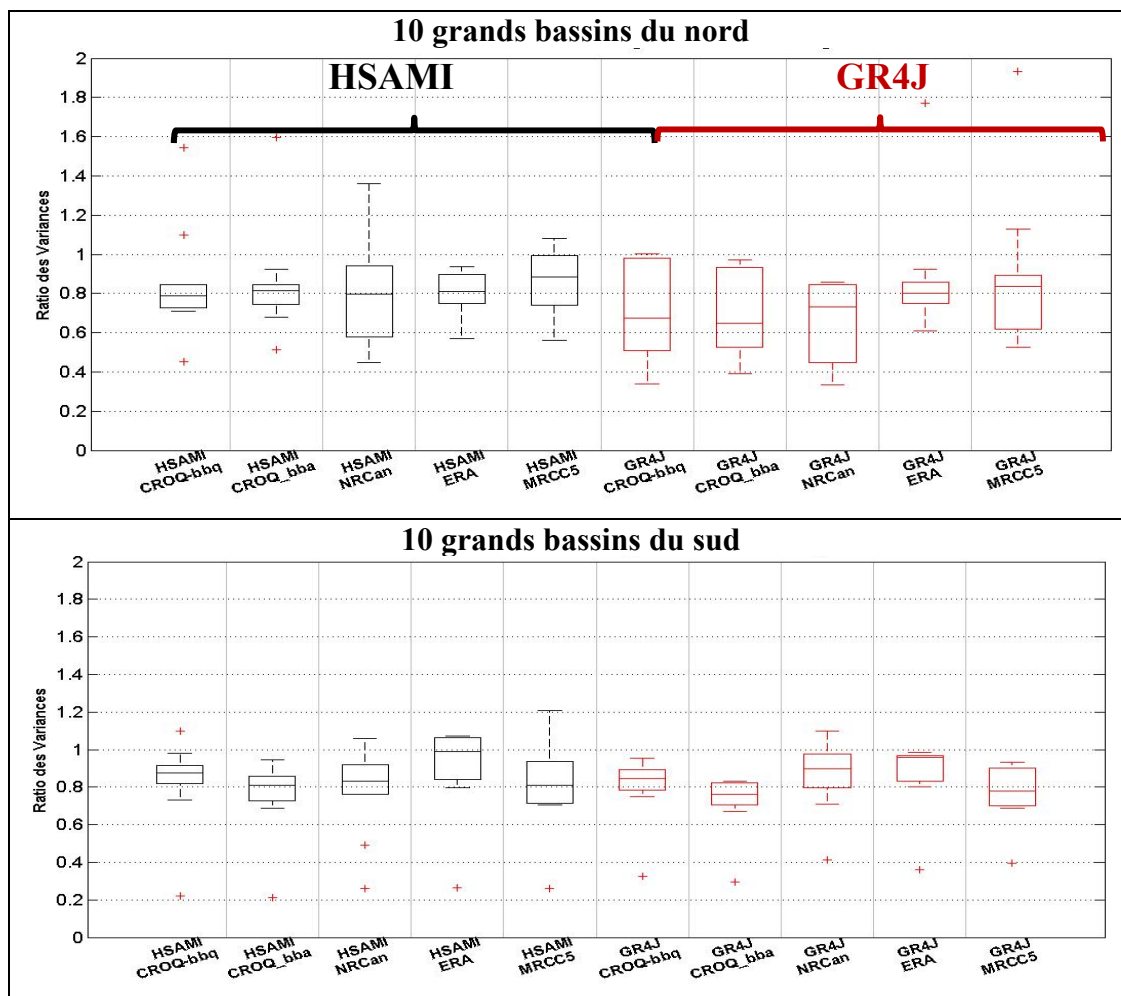


Figure 3.29 Diagramme en boîte à moustaches montrant les valeurs du ratio des variances des débits simulés par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)

3.2.2.5 RMSE normalisée, MAE10 & MAE90

La figure 3.30 présente les erreurs absolues moyennes (MAE10) entre les débits simulés et observés inférieurs au 10ième percentile des débits observés pour les deux modèles hydrologiques. Les résultats indiquent que les débits bas sont bien simulés au nord. Les erreurs sont plus grandes au sud et GR4J y performe mieux qu'HSAMI.

Le diagramme de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE90), figure 3.31, montre les débits max similaires dans le nord et le sud. D'ailleurs, deux modèles performant

similairement en simulation des débits max. En comparant les résultats de MAE10 et MAE90, cela peut suggérer que les débits max sont mieux simulés que les débits bas.

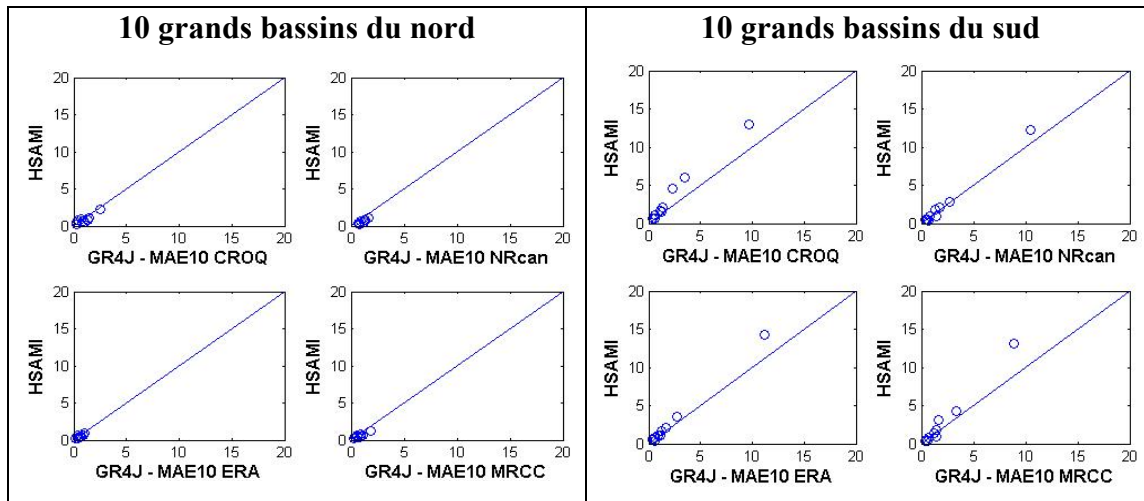


Figure 3.30 Diagramme de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE10) entre les débits journaliers simulés et observés inférieurs au 10ième percentile des débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

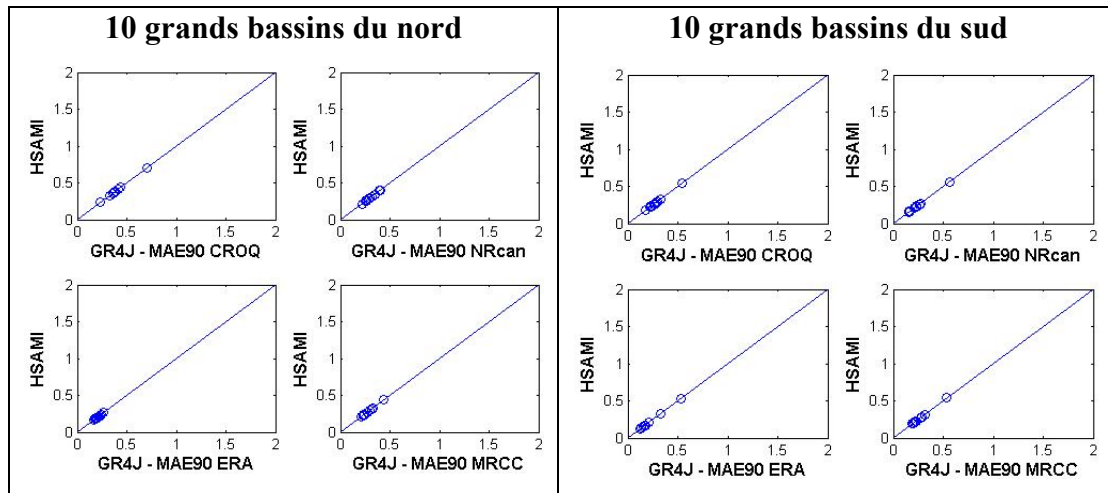


Figure 3.31 Diagramme de dispersion des erreurs absolues moyennes (MAE90) entre les débits journaliers simulés et observés supérieurs au 90ième percentile des débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

3.2.3 Comparaison des simulations hydrologiques des deux modèles sur un bassin du Nord et un bassin du Sud

La comparaison est effectuée sur deux grands bassins versants, l'un au sud et l'autre au nord. Les débits et la neige simulés des deux modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont analysés.

3.2.3.1 Hydrogramme Moyen annuel

La figure 3.32 montre les hydrogrammes annuels moyens pour les débits observés et simulés par le modèle hydrologique HSAMI sur un bassin du nord et un bassin du sud. Les débits issus des jeux de données ERA et NRCAN sont bien simulés et surtout bien superposés aux débits observés dans le sud. MRCC5 et CROQ performant moins bien. La performance générale au nord est moins bonne. MRCC5 performe particulièrement moins bien au printemps alors que CROQ présente des lacunes en automne.

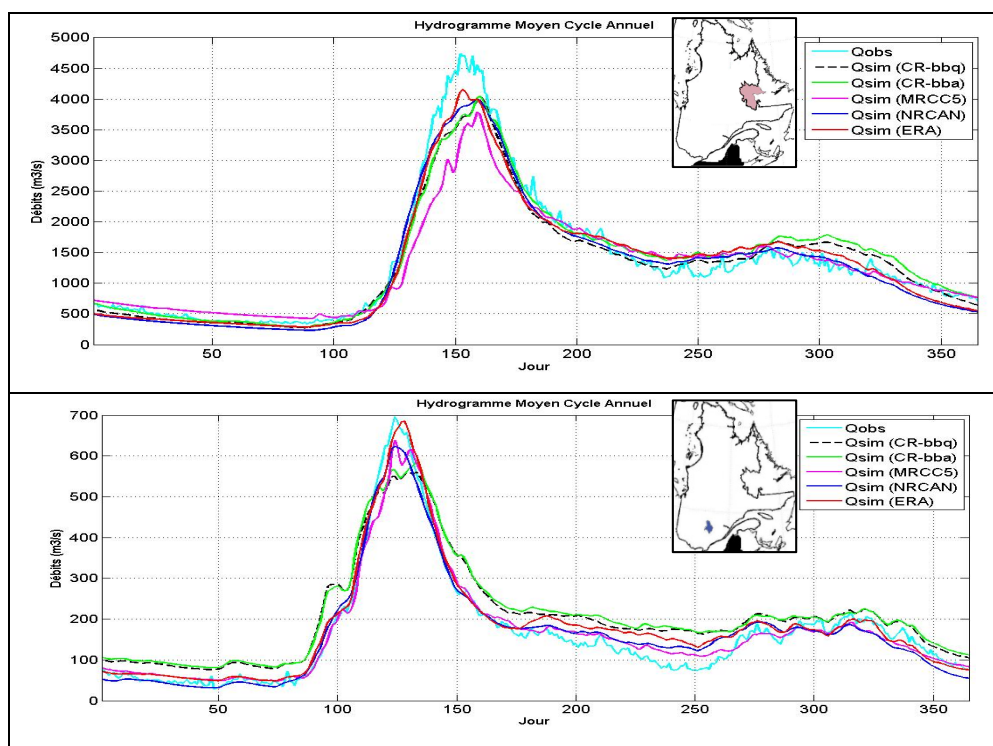


Figure 3.32 Comparaison des hydrogrammes annuels moyens observés et simulés par HSAMI pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)

Si on regarde les hydrogrammes annuels moyens simulés par le modèle GR4J à la figure 3.33, on constate que la crue est généralement sous-estimée et simulée tardivement pour tous les jeux de données. CROQ donne clairement la pire performance. Au sud, les débits simulés par les jeux NRCAN et ERA sont les meilleurs. CROQ et MRCC5 sont un peu moins bons mais leur performance est meilleure qu'au nord.

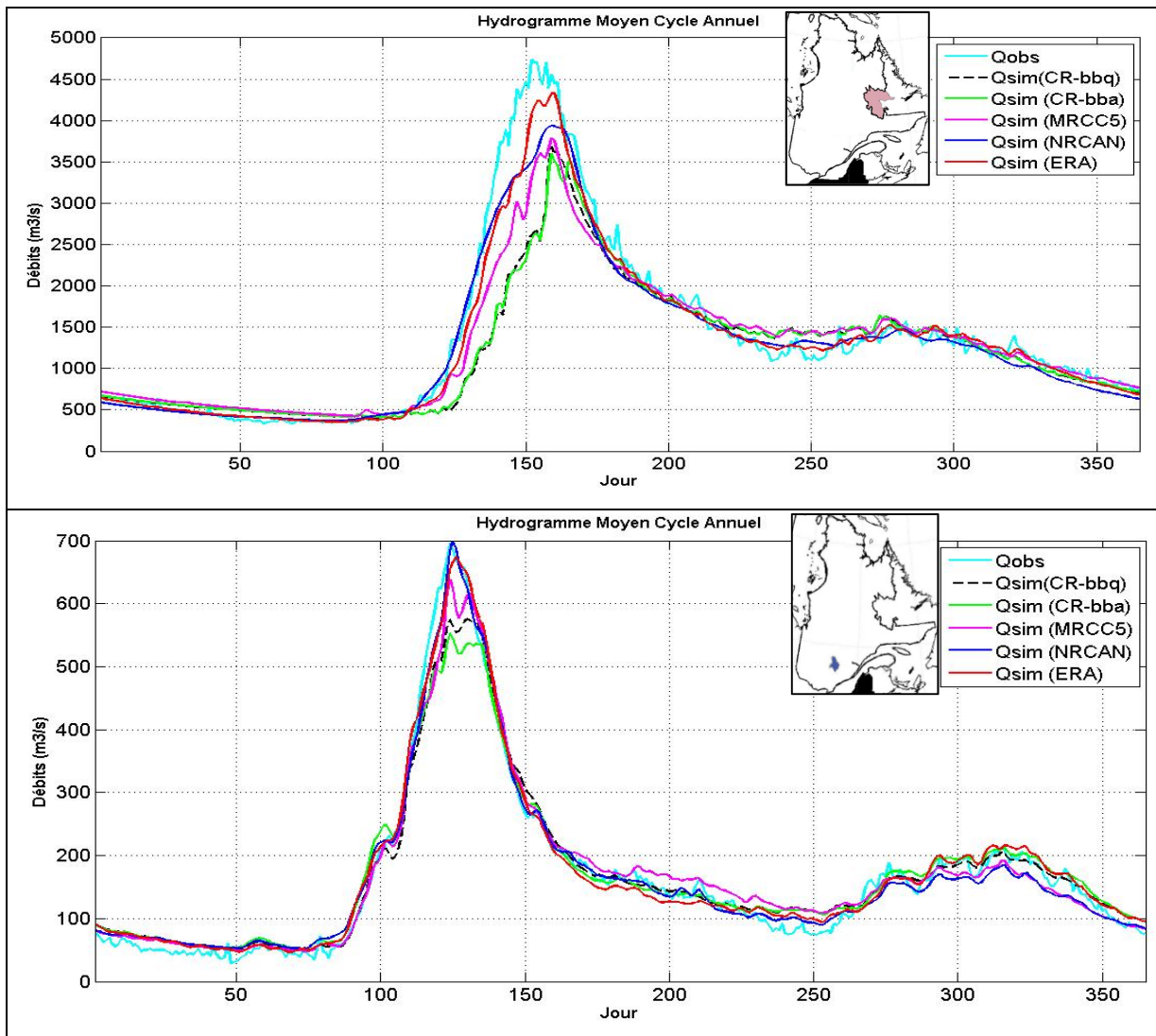


Figure 3.33 Comparaison des hydrogrammes annuels moyens observés et simulés par GR4J pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)

3.2.3.2 Moyenne annuelle des Neiges simulées

La figure 3.34 présente les cycles annuels moyens de la neige directement tirée de CROQ (bbq) ainsi que la neige simulée par HSAMI en utilisant des intrants de précipitation et température. Au sud la neige directement tirée de CROQ(bbq) est sous-estimée et présente une fonte trop hâtive. La performance est meilleure au nord. Les simulations de neige du modèle HSAMI avec les jeux de données CROQ et MRCC5 sont proches de celles d'ERA dans le nord et plus près de celles de NRCAN au sud.

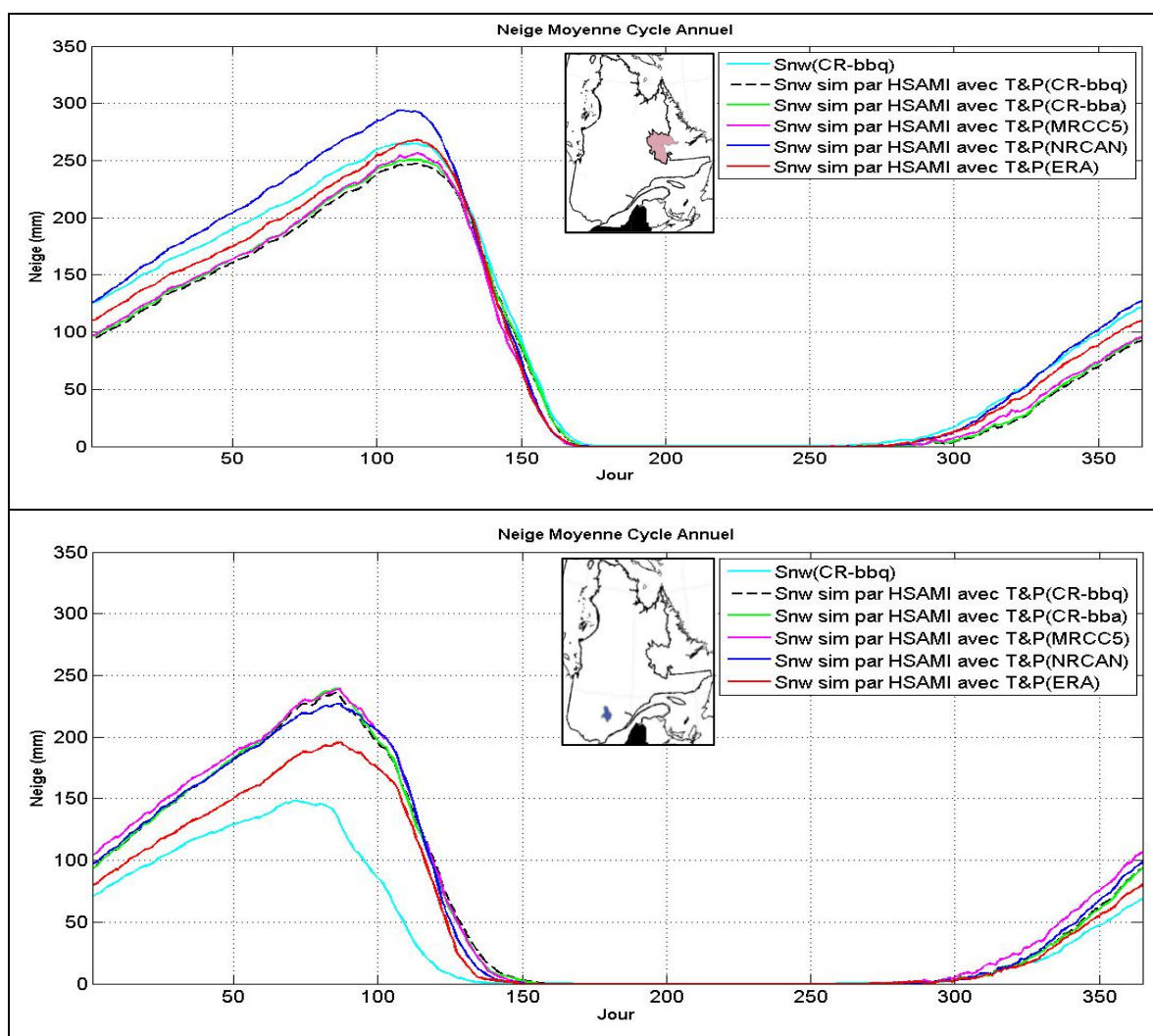


Figure 3.34 Comparaison des cycles moyens annuels de la neige de CROQ(bbq) et de la neige simulée par modèle HSAMI pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)

La même comparaison avec le modèle GR4J à la figure 3.35 montre qu'au nord, la neige simulée par modélisation hydrologique avec CROQ est plus élevée et avec une fonte tardive comparativement à NRCAN et ERA. Au sud les neiges modélisées sont en bon accord pour tous les jeux de données. La neige directement tirée de CROQ est sous-estimée et avec une fonte trop hâtive qui ne cadre pas avec les débits observés.

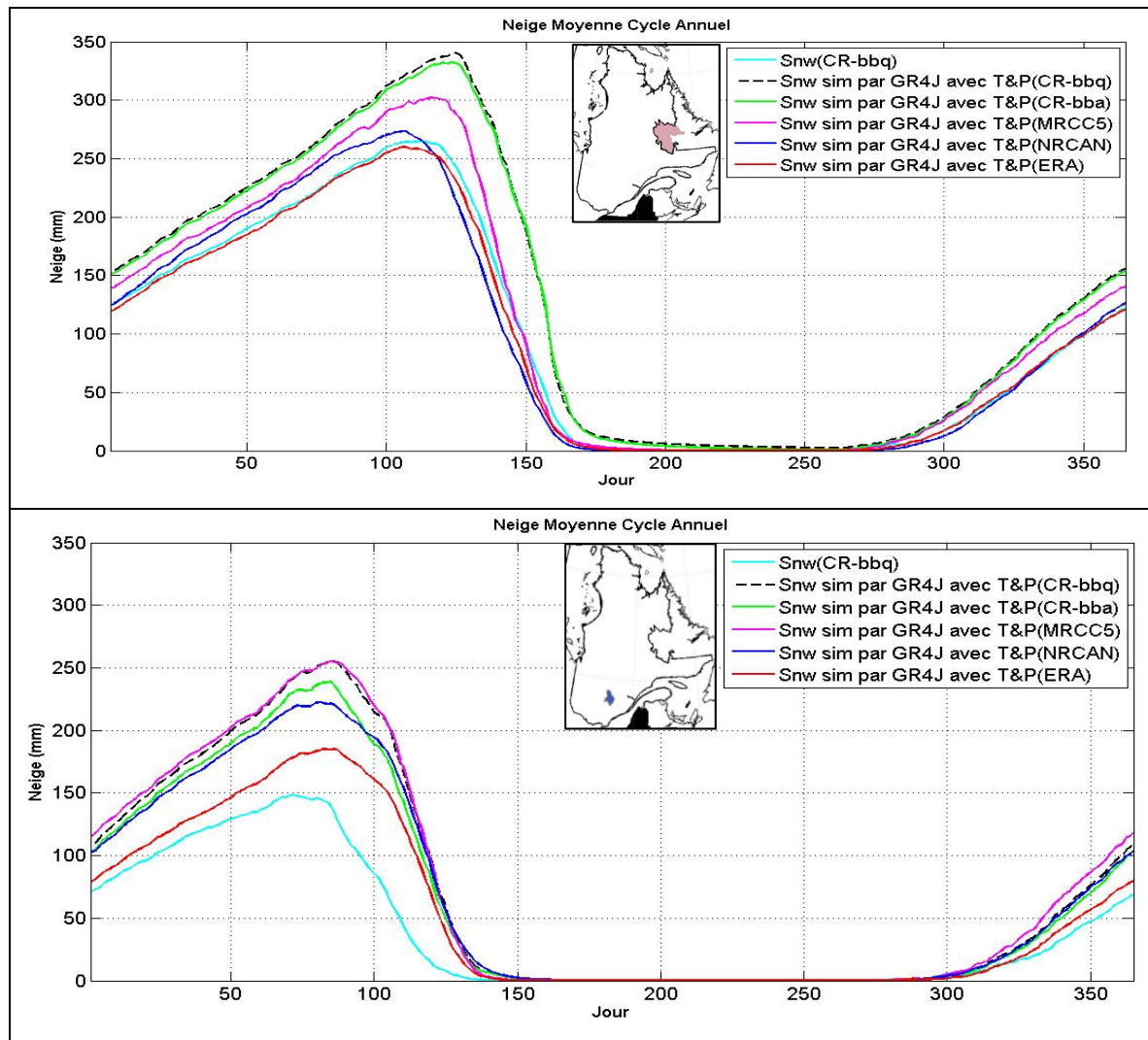


Figure 3.35 Comparaison des cycles moyens annuels de la neige de CROQ(bbq) et de la neige simulée par modèle GR4J pour un bassin du nord (rangée supérieure) et un bassin du sud (rangée inférieure)

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Cette recherche touche la validation du jeu de données CROQ issu d'un modèle régional de climat à haute résolution piloté par la réanalyse ERA-I. La simulation étant produite sur le domaine restreint de la province de Québec, le but recherché de cette simulation est de pouvoir suivre la chronologie observée des événements météorologiques, et ainsi pouvoir servir de référence climatologique sur la période de simulation. Cette étude utilise les données de précipitation et de températures minimale et maximale à 2m au pas de temps journalier et s'attarde particulièrement à la performance de ce jeu de données pour la modélisation hydrologique.

La discussion s'oriente autour des trois objectifs spécifiques de ce mémoire. La première partie discute de la comparaison des données de précipitation et température provenant des différents jeux de données. La seconde partie s'attarde à la modélisation hydrologique, alors que la troisième partie discute de l'habileté des deux modèles hydrologiques à représenter l'hydrologie des différents bassins versants du Québec pour chaque jeu de données.

4.1 Validation des données journalières de température et précipitation du jeu de données CROQ

La validation du jeu de données CROQ s'est faite par comparaison avec d'autres jeux de données, à savoir le jeu de données interpolées NRCan, la réanalyse ERA-Intérim et une autre simulation indépendante provenant du même modèle régional de climat aussi pilotée par la réanalyse ERA-Intérim. La base de données NRCan est utilisée comme principale référence étant donné qu'elle a démontré une performance hydrologique similaire aux autres bases de données interpolées sur la province de Québec (Bajamgnigni Gbambie et al. 2017), et que c'est le jeu le plus apparenté aux observations provenant des stations météorologiques.

4.1.1 Précipitation

En général, la comparaison des jeux de données montre une différence de comportement entre le sud et le nord du Québec. Pour l'ensemble du Québec, les simulations de CROQ présentent un biais humide. Le pilotage spectral a un effet négligeable sur ce biais. La différence maximale entre CROQ et NRCan se situe au Nord du Québec. Cette différence accrue au nord pourrait être en partie due à une baisse de la qualité du jeu NRCan au nord. En effet, la qualité de tout jeu de données interpolées dépend de la qualité du réseau d'observations sous-jacent. Le réseau de stations météorologiques au Québec est très déficient au nord et il est clair que le choix de NRCan comme jeu de référence est ouvert à débat sur cette région. Par contre, le pilote ERA-I montre un biais significativement plus faible et donc on peut conclure que le biais accru au nord est lié à la physique du modèle régional de climat.

Les corrélations journalières sont très bonnes entre les simulations provenant du modèle régional de climat (CROQ et MRCC5) et le pilote ERA-I ce qui a du sens puisque CROQ et MRCC5 sont intimement liés aux conditions frontières imposées par le pilote. De manière générale, le pilote ERA-I performe mieux que les deux autres lorsque comparé avec NRCan ce qui démontre que le modèle régional développe son propre espace de liberté à l'intérieur du domaine de calcul (même si ce dernier est relativement petit) et ce même lorsque soumis au pilotage spectral. Ceci est particulièrement évident l'été et l'automne, alors que la convection joue un rôle important au niveau de la génération des précipitations. Dans ce cas le modèle a beaucoup plus de liberté pour générer les séquences de précipitations journalières et s'écarter de son pilote. Lorsque les précipitations proviennent de systèmes synoptiques, la situation est différente et on peut s'attendre à ce que le modèle climatique suive son pilote de manière un peu plus fidèle, et c'est ce qui est observé ici.

4.1.2 Température

De manière générale, la reproduction des températures est meilleure que pour celle de la précipitation pour tous les jeux de données lorsque comparés à NRCan. L'observation

principale est que les températures issues de CROQ sont plus froides que pour les autres jeux de données durant le printemps pour l'ensemble du Québec. Ce biais froid est particulièrement clair au nord du Québec. Au nord, les biais sont maximaux en avril et mai durant la période principale de fonte de neige. Les températures minimales de CROQ sont plus biaisées que les températures maximales. La comparaison des distributions des valeurs de température entre les différents jeux de données confirme le caractère anormalique des températures minimums de CROQ. Le problème est beaucoup moins marqué au sud.

La grande variabilité inter-bassins observée au Nord au niveau des biais de température démontre la plus grande incertitude de ces données, et notamment au niveau de NRCan pour les raisons énoncées précédemment.

La plus faible corrélation des températures avec NRCan se présente pour MRCC5, et ce particulièrement pour les saisons d'été et d'hiver alors que la meilleure corrélation est observée pour la réanalyse ERA-I notamment au printemps et en automne. La performance des températures de CROQ est proche de celle d'ERA-Intérim dans le sud de Québec.

4.2 Évaluation hydrologique de jeu de données CROQ sur la province du Québec

L'évaluation hydrologique vise la validation d'un jeu de données au travers de l'utilisation d'un modèle hydrologique. Le modèle hydrologique agit comme un filtre non-linéaire et permet entre autres de valider la justesse du cycle interannuel des précipitations et températures ainsi que la cohérence entre les deux variables. La validation indirecte des jeux de données est appliquée en utilisant chaque jeu de données comme intrant aux deux modèles hydrologiques pour simuler des débits en rivière. Par la suite, les débits simulés sont comparés avec les débits mesurés en rivière avec l'aide de différentes métriques. L'analyse hydrologique est réalisée sur 117 bassins versants de la province de Québec et une comparaison plus poussée est effectuée entre les 10 grands bassins de nord et les 10 grands bassins de sud pour diminuer l'impact des différentes échelles spatiales pour les jeux de données avec une faible résolution spatiale.

De manière générale les meilleurs débits simulés sont ceux dérivés de la réanalyse ERA-I. Les débits simulés par le jeu NRCan, directement dérivé des stations météorologiques, ont une performance similaire quoique légèrement inférieure. Les moins bons résultats sont ceux qui proviennent de CROQ. Les versions avec (bbq) et sans (bba) pilotage spectral performant de manière similaire bien que bbq performe de manière très légèrement supérieure. Afin d'améliorer la performance hydrologique du jeu de données CROQ, différentes modélisations hydrologiques ont été réalisées en combinant les températures maximum, minimum ou les précipitations de jeu de données CROQ avec d'autres jeux de données. Le but de cette approche est d'identifier si une des trois variables de CROQ est particulièrement problématique. Le meilleur résultat est obtenu par la combinaison de la température max de CROQ et la précipitation et la température minimum du jeu de données ERA-Intérim. Ceci indique que le biais positif des données de précipitation et le biais négatif de la température minimale semblent les causes principales de la moins bonne performance de CROQ en modélisation hydrologique. Il faut toutefois noter que malgré cette substitution, la performance demeure inférieure à celle obtenue via les seules données de ERA-I ou NRCan. Ceci indique que chacune des trois variables de CROQ est inférieure à sa contrepartie de la réanalyse et du jeu interpolé NRCan.

La comparaison sur les bassins versants du nord et de sud, a clairement démontré que les résultats de modélisation hydrologique sont meilleurs au sud, et ce pour les deux modèles hydrologiques utilisés. Puisque le jeu de données CROQ est moins biaisé et plus corrélé au sud avec les autres jeux de données, il n'est pas surprenant de constater que CROQ performe mieux au sud, bien que sa performance soit toujours inférieure à celle d'ERA-I et NRCan. L'analyse du cycle annuel des débits et de neige simulés des différents jeux de données par rapport à ceux directement issus de CROQ dévoile la raison principale pour laquelle le modèle hydrologique utilisant les données CROQ performe moins bien sur les bassins versants nordiques. Les débits simulés via CROQ résultent en une fonte de neige tardive qui se répercute sur des débits printaniers décalés avec une crue moyenne plus faible. Le biais négatif important des températures au nord, et ce particulièrement au printemps est

responsable de cet état des choses. Puisque les deux modèles hydrologiques performant de manière supérieure avec les deux autres jeux de données, le problème doit être attribué aux données CROQ et non pas au processus de modélisation hydrologique.

4.3 Comparaison de la performance des deux modèles hydrologiques

Les deux modèles hydrologiques utilisés dans cette étude sont GR4J et HSAMI. Les deux modèles sont de types globaux et conceptuels. Dans cette gamme, le modèle GR4J est un modèle simple, dit parcimonieux avec relativement peu de paramètres ajustables (9) lors de la calibration. Comparativement, la formulation de HSAMI est plus complexe et possède plus de paramètres ajustables (23). Malgré sa formulation simple, GR4J a été utilisé partout sur la planète et a démontré sa capacité à très bien performer. HSAMI a surtout été utilisé au Québec, mais aussi dans le reste de l'Amérique du Nord, mais par des équipes de recherche québécoises. C'est un modèle qui a une grande capacité de s'ajuster aux biais intrinsèques liés aux données d'entrée, ainsi qu'aux débits observés.

De manière générale, les deux modèles ont bien performé sur les bassins versants du sud. La performance des deux modèles hydrologiques est comparable bien que celle de GR4J soit généralement supérieure à celle d'HSAMI. Dans le nord, HSAMI présente une performance satisfaisante quoiqu'inférieure à celle observée au sud. GR4J performe par contre beaucoup moins bien au nord. Les résultats indiquent que les biais observés au nord sont beaucoup plus grands qu'au sud et la parcimonie de GR4J ne lui permet pas de bien s'adapter aux biais observés. HSAMI fait un meilleur travail à ce niveau bien qu'il souffre tout de même du même problème comparativement au sud. On remarque aussi que la performance de la modélisation hydrologique est beaucoup moins dispersée au sud, là où les jeux de données sont plus fiables, et beaucoup plus dispersée au nord, là où les jeux de données présentent certaines déficiences. Ces résultats montrent que la modélisation hydrologique est un bon outil pour l'exploration des forces et des déficiences des bases de données météorologiques, là où il existe des données de débit. La différence de comportement des deux modèles hydrologiques au nord soulève quelques questions liées au processus de modélisation

hydrologique. La capacité d'ajustement d'un modèle hydrologique est-elle une force ou une faiblesse? Bien que l'ajustabilité du modèle soit nécessaire, existe-il une limite où l'ajustement perd son sens physique ? Il serait tentant de conclure que HSAMI est le meilleur modèle, compte tenu de sa performance supérieure au nord. En contrepartie, on pourrait aussi débattre de la supériorité du GR4J au sud et conclure du caractère déraisonnable de l'espace paramétrique d'HSAMI qui lui permet de s'ajuster à des données significativement biaisées.

La performance des deux modèles pour la simulation des débits maximums est similaire au nord et au sud alors que les débits bas sont bien simulés au Nord seulement par HSAMI. Les gains d'HSAMI au nord semblent donc le résultat des processus menant à la production du débit de base.

CONCLUSION

Les études hydrologiques se fondent sur des données météorologiques qui proviennent généralement de stations météorologiques. Étant donné que la densité du réseau d'observations est fortement variable dans le temps et l'espace, plusieurs jeux de données dits 'alternatifs' ont été mis sur pied pour combler les lacunes des séries météorologiques et ainsi produire des jeux dont la couverture spatiale et temporelle est constante dans le temps et l'espace.

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer le jeu de données CROQ produit par la descente d'échelle dynamique à haute résolution de la réanalyse ERA-I, via la 5^{ème} version du modèle régional canadien du climat. Cette évaluation couvrait entre autres la capacité de ces données à bien représenter les données de débits observés dans plusieurs rivières du Québec, lorsque utilisées avec un modèle hydrologique. La recherche visait trois objectifs spécifiques:

1. Valider les séries de températures et de précipitation du jeu de données CROQ par rapport aux différents jeux de données existants;
2. Valider de manière indirecte le jeu de données CROQ via la modélisation hydrologique sur des bassins versants au Québec ;
3. Comparer la performance de deux modèles hydrologiques globaux différents par rapport à leur capacité à simuler l'hydrologie des bassins versants au Québec.

La validation de la précipitation de CROQ par rapport aux autres jeux de données a montré que CROQ est généralement plus humide que les autres sur l'ensemble du Québec. L'analyse des températures de CROQ indique qu'elles ont un biais froid sur l'ensemble du Québec, et ce particulièrement pour les mois de printemps (Mai et Avril) au moment de la fonte de la neige.

Les résultats de modélisation hydrologique sur 117 bassins versants de Québec ont montré que la réanalyse ERA-Intérim, malgré sa faible résolution spatiale, est le meilleur jeu de données pour la modélisation hydrologique, dans les conditions de cette étude. Les données interpolées NRCan donnent des résultats similaires quoique légèrement inférieurs et ce particulièrement au nord. CROQ performe significativement moins bien que les deux autres et ce particulièrement au nord. Le pilotage spectral du MRCC n'a entraîné que de très faibles améliorations aux résultats en modélisation hydrologique. Tous les jeux de données performant mieux au sud qu'au nord, en se basant sur la modélisation hydrologique. Les faiblesses des sorties de CROQ semblent plus manifestes au niveau des biais positifs de précipitation et des biais négatifs des températures minimales. Les biais négatifs des températures retardent la fonte de la neige et c'est ce qui limite la performance en modélisation hydrologique.

Au niveau de la modélisation hydrologique, les deux modèles hydrologiques performant bien au sud bien que GR4J soit légèrement supérieur à HASMI. Au nord, les deux modèles performant nettement moins bien, et ce particulièrement pour GR4J qui peine à s'adapter aux biais présents dans les données d'entrée.

RECOMMANDATIONS

Cette étude a mené l'évaluation comparative climatologique et hydrologique du jeu de données issu du modèle régional de climat canadien piloté par la réanalyse ERA-I (CROQ). Ces travaux sont parmi les premiers à s'intéresser aux données de CROQ. En conséquence, il y a plusieurs suggestions de travaux futurs visant à améliorer ceux présentés dans ce mémoire :

- cette étude a seulement porté sur les données de précipitation et température. Par contre, CROQ fournit plusieurs autres variables qui ont un intérêt hydrologique certain. De futures études pourraient entre autres s'attarder à l'évaporation, aux ruissellement de surface et souterrain ainsi qu'à l'épaisseur de neige;
- cette étude n'a pas spécifiquement considéré les extrêmes de précipitation et des débits. La fine résolution spatiale de CROQ pourrait possiblement lui permettre de s'illustrer comparativement à son pilote (ERA-I) et aux données interpolées (NRCan);
- les deux modèles hydrologiques utilisés dans cette étude sont du même type, à savoir globaux et conceptuels. Aux fins de mieux exploiter la haute résolution spatiale de CROQ, l'utilisation d'un modèle hydrologique distribué pourrait être considérée;
- afin d'améliorer la qualité de simulation hydrologique de jeux de données CROQ, il serait possible de modifier l'espace paramétrique de chacun des deux modèles ainsi que l'algorithme d'optimisation pour mieux comprendre comment les modèles hydrologiques peuvent intégrer les biais des intrants. Une approche de combinaison multi-modèle/multi-input pourrait aussi être considérée.

ANNEXE I

LISTE DES FIGURES CONCERNANT LA COMPARAISON MÉTÉOROLOGIQUE DES JEUX DE DONNÉES

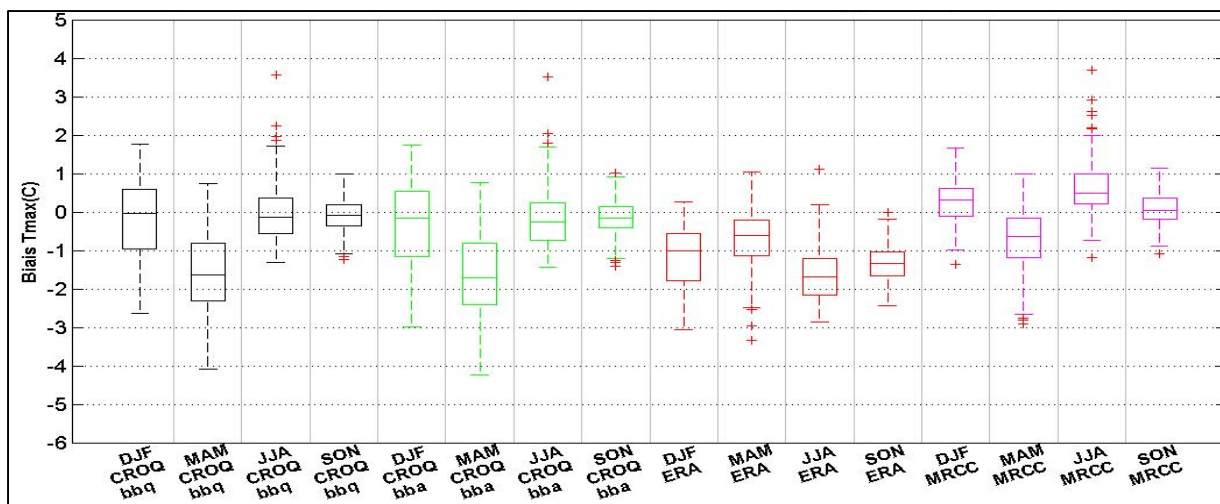


Figure-A I- 1 Diagramme en boîte à moustaches montrant le Biais (B) de la température maximale par saison (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur 117 bassins versants pour la période 1980-2010

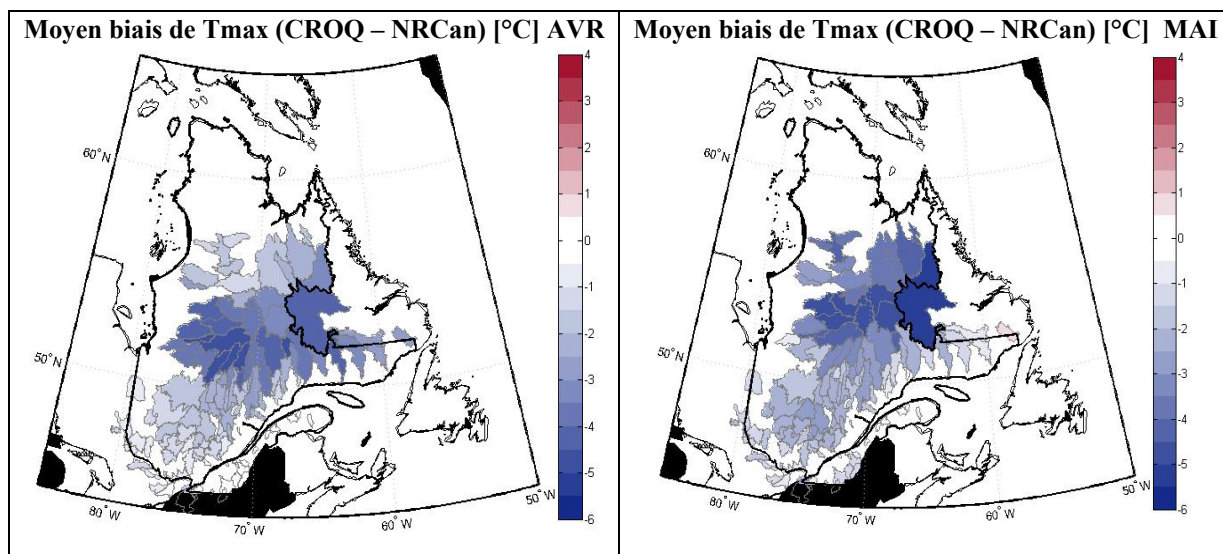


Figure-A I- 2 La carte de biais (B) de la température maximale moyenne quotidienne (°C) (CROQ(bba) / NRCan) de 117 bassins versants pour la période 1980-2010 et les mois de Avril et Mai

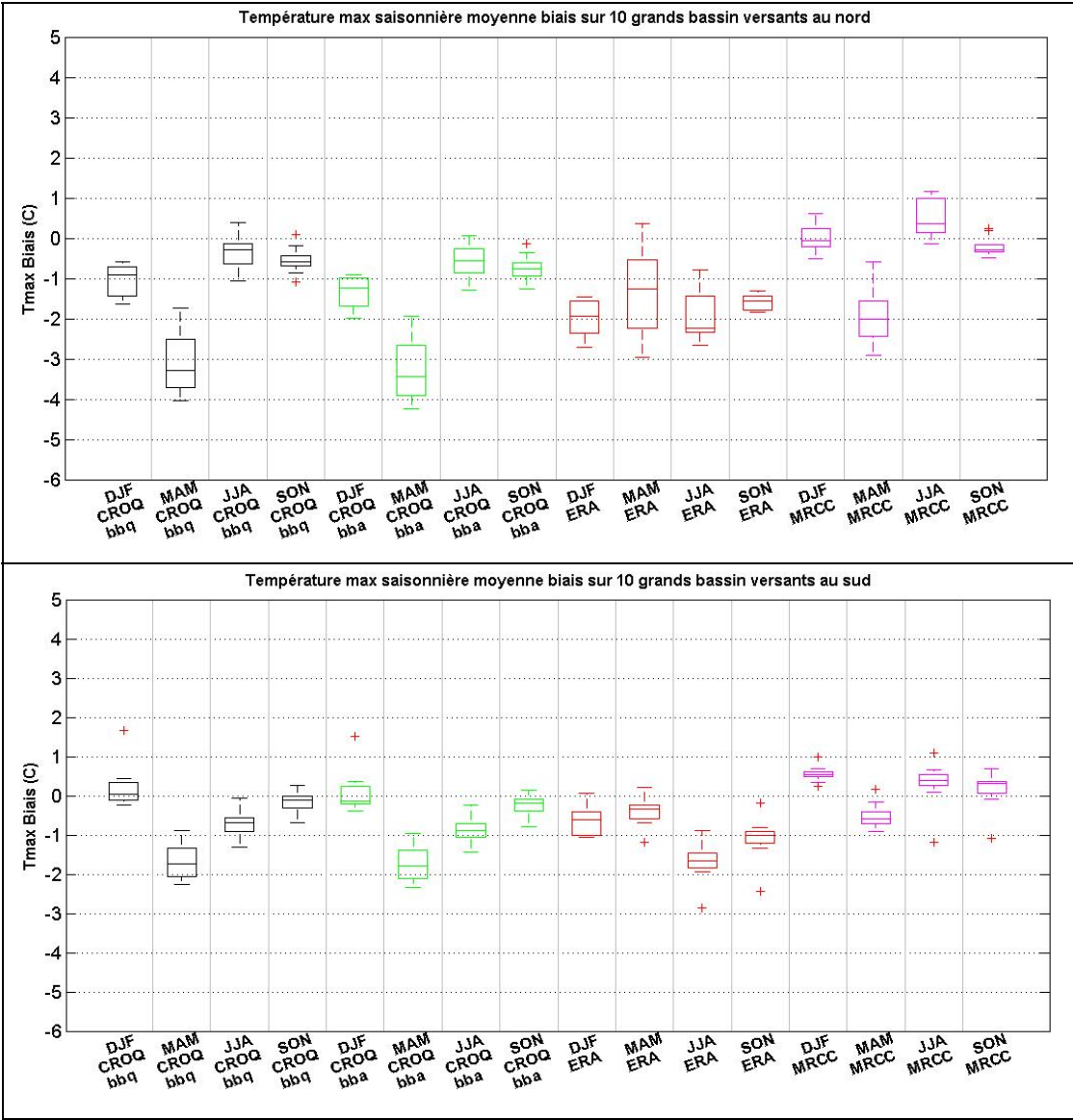


Figure-A I- 3 Diagramme en boîte à moustaches montrant biais (B) de la température maximale moyenne quotidienne par saison (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (en rose) par rapport à NRCan sur 20 grands bassins versants. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

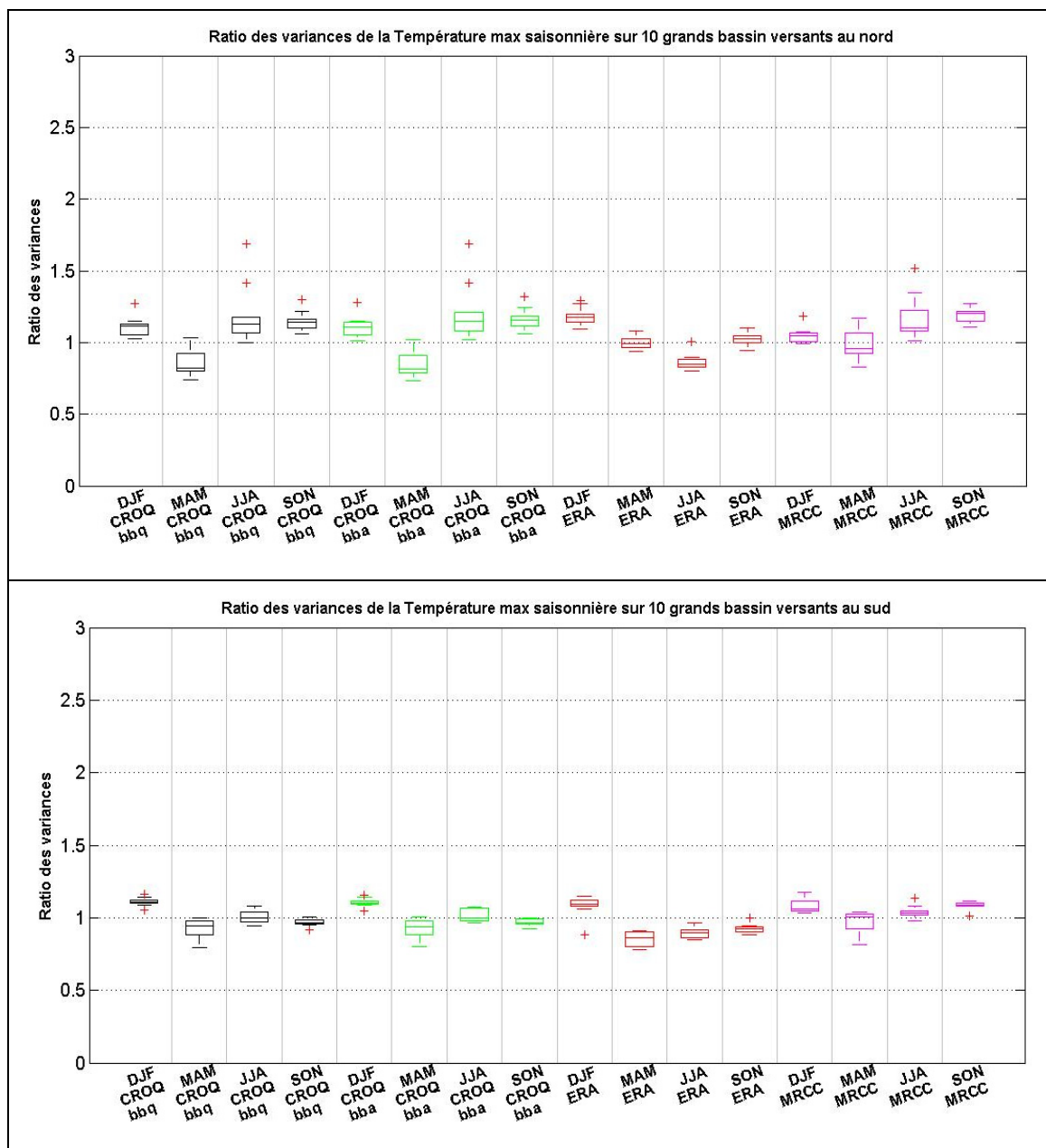


Figure-A I- 4 Diagramme en boîte à moustaches montrant les ratios des variances de température maximale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

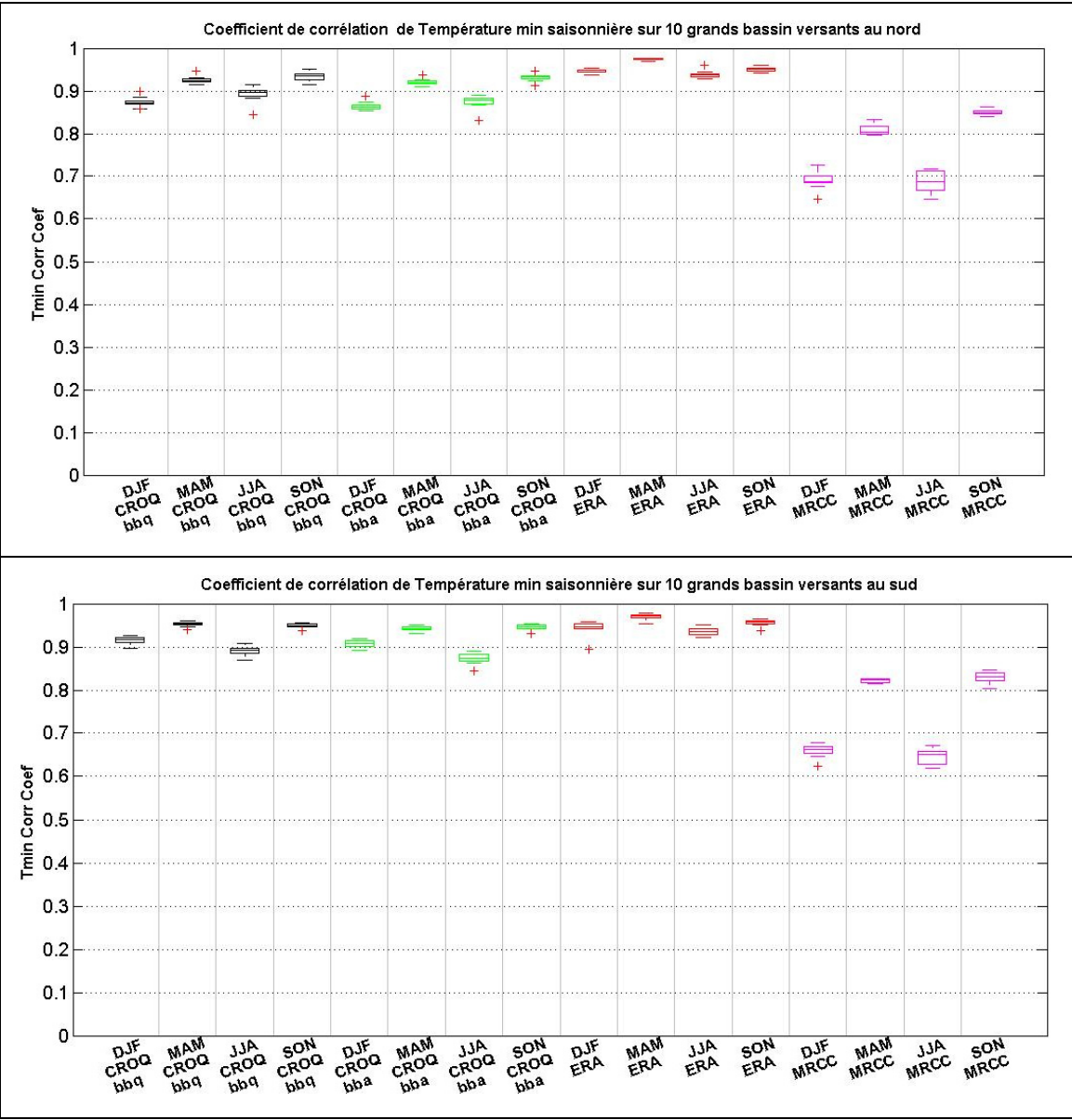


Figure-A I- 5 Diagramme en boîte à moustaches montrant les coefficients de corrélation de la température minimale moyenne (°C) de CROQ (bbq) (noir), CROQ (bba) (vert), ERA (rouge) et MRCC5 (rose) par rapport à NRCan sur les bassins versants sélectionnés. Rangée supérieure: 10 bassins au nord, rangée inférieure: 10 bassins au sud

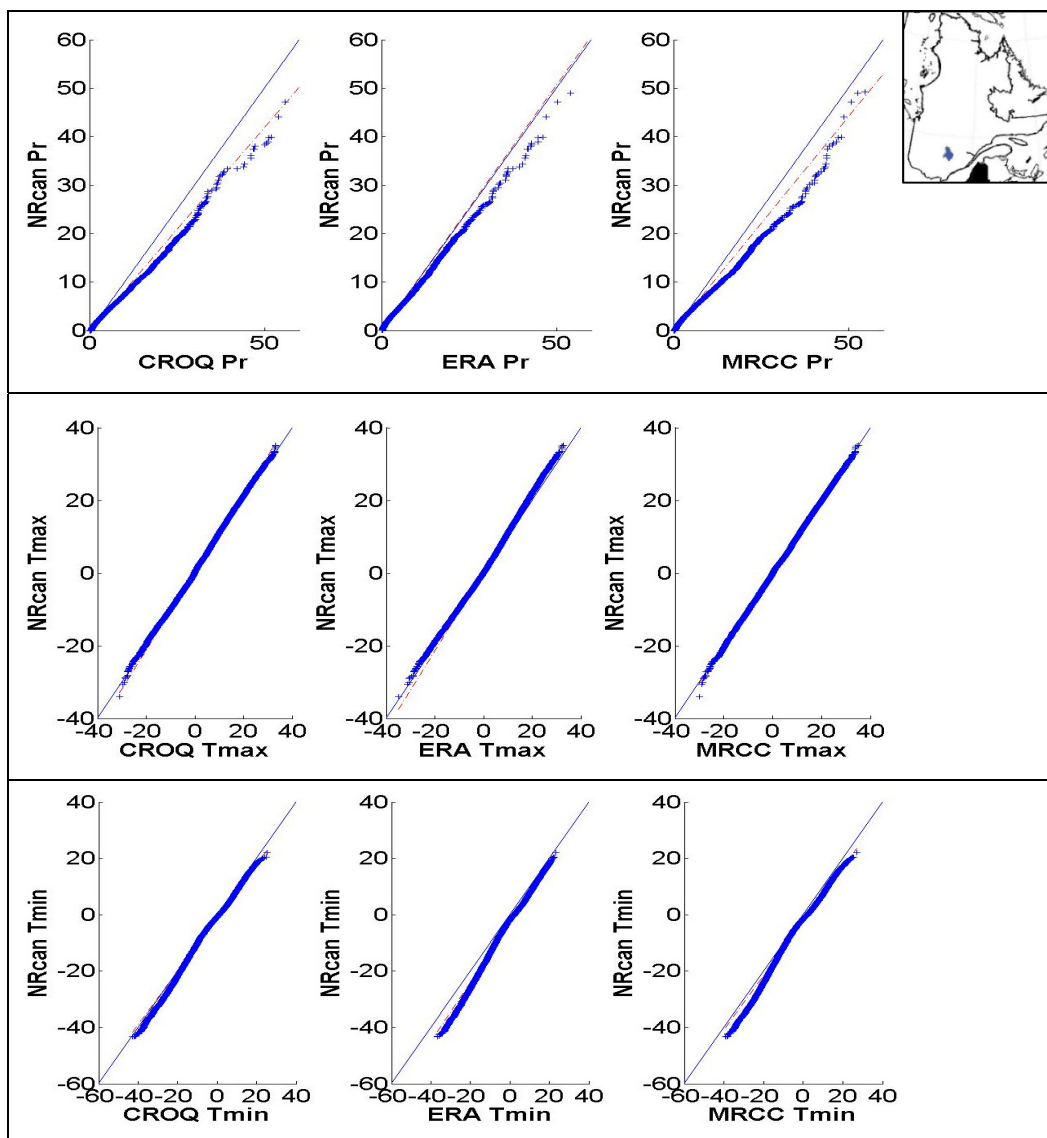


Figure-A I- 6 Diagramme quantiles-quantiles pour les précipitations et températures maximale et minimale annuelles pour le bassin sélectionné au sud

Tableau-A I-1 La liste du nom et de la superficie de 20 grands bassins versants de CQ2

10 grands bassins du nord		10 grands bassins du sud	
Nom	Superficie (km2)	Nom	Superficie (km2)
Chutes Churchill	69,191	Bv_regroup_RT5	45,261
Riviere_Caniapiscou	48,132	Waswanipi	31,533
Rupert	40,882	Bell	22,245
Caniapiscou	37,328	Ashuapmushuan	15,487
Grande rivière de la Baleine	34,057	Pipmuacan	13,523
à la Baleine	29,723	Baskatong	13,057
La Grande-3	28,492	Ashuapmushuan	11,305
La Grande-4	28,443	Turgeon	10,334
Eastmain-1	25,857	Rapide-Blanc aux barrages C et Gouin	10,053
Manic-5 et Hart-Jaune et Barrage Inter	24,608	Lac Saint-François	9,871

ANNEXE II

LISTE DES FIGURES CONCERNANT LA COMPARAISON DES DEUX MODÈLES HYDROLOGIQUES

Tableau-A II-2 Test de "Wilcoxon rank sum" pour les résultats de deux modèles GR4J et HSAMI des jeux de données (p-value > 0.05 : différence non significative)

Jeu de donnée	CROQ (bbq)	CROQ (bba)	NRCan	ERA-Intérim	MRCC5 (PLP)
p-value	0.57	0.75	0.13	0.04	0.22

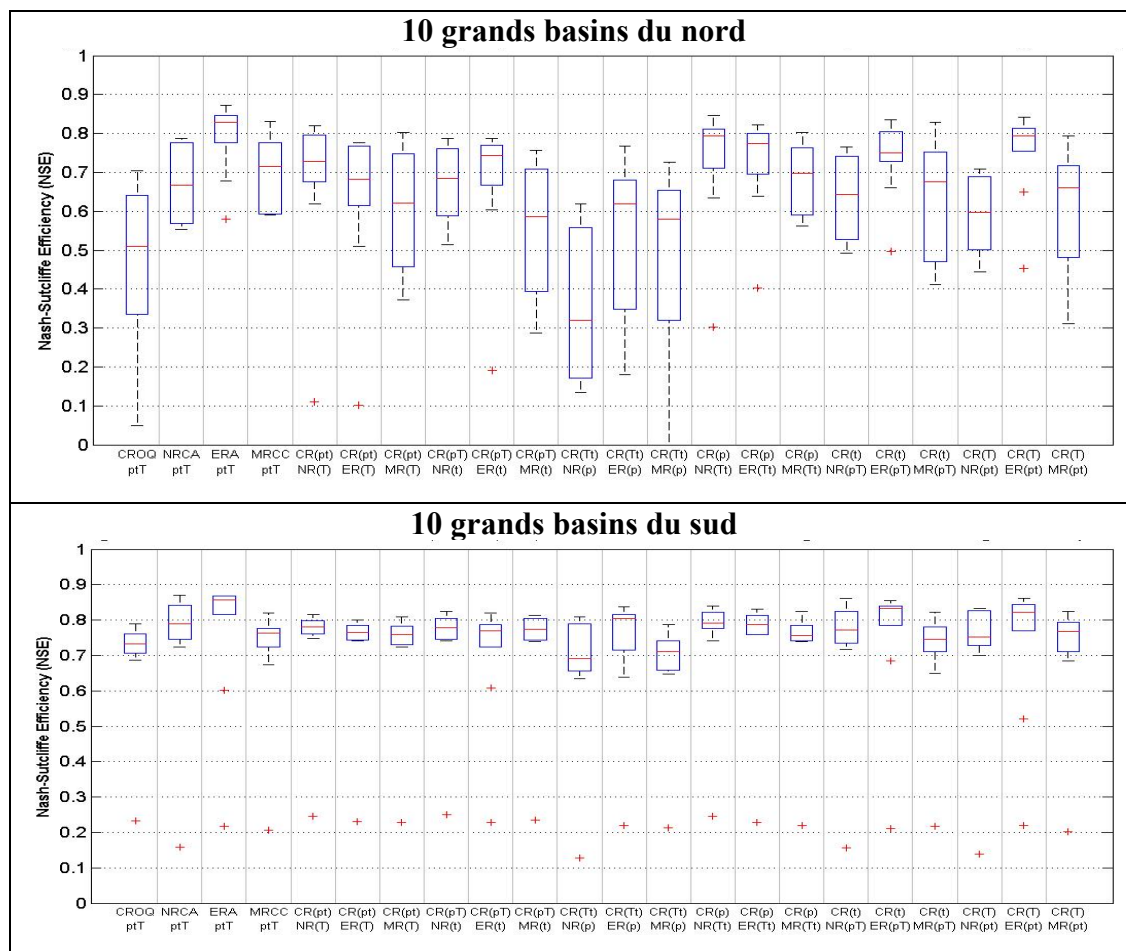


Figure-A II- 1 Les résultats de validation (NSE) du modèle hydrologique GR4J utilisant les différents jeux de données (CROQ(bba), ERA et MRCC5) et combinaisons de données de température et de précipitation sur 20 bassins versants durant la période 1979-2010 (T= Température maximale, t = Température minimale, p = Précipitation, CR=CROQ, NR=NRCan , ER=ERA, MR=MRCC5)

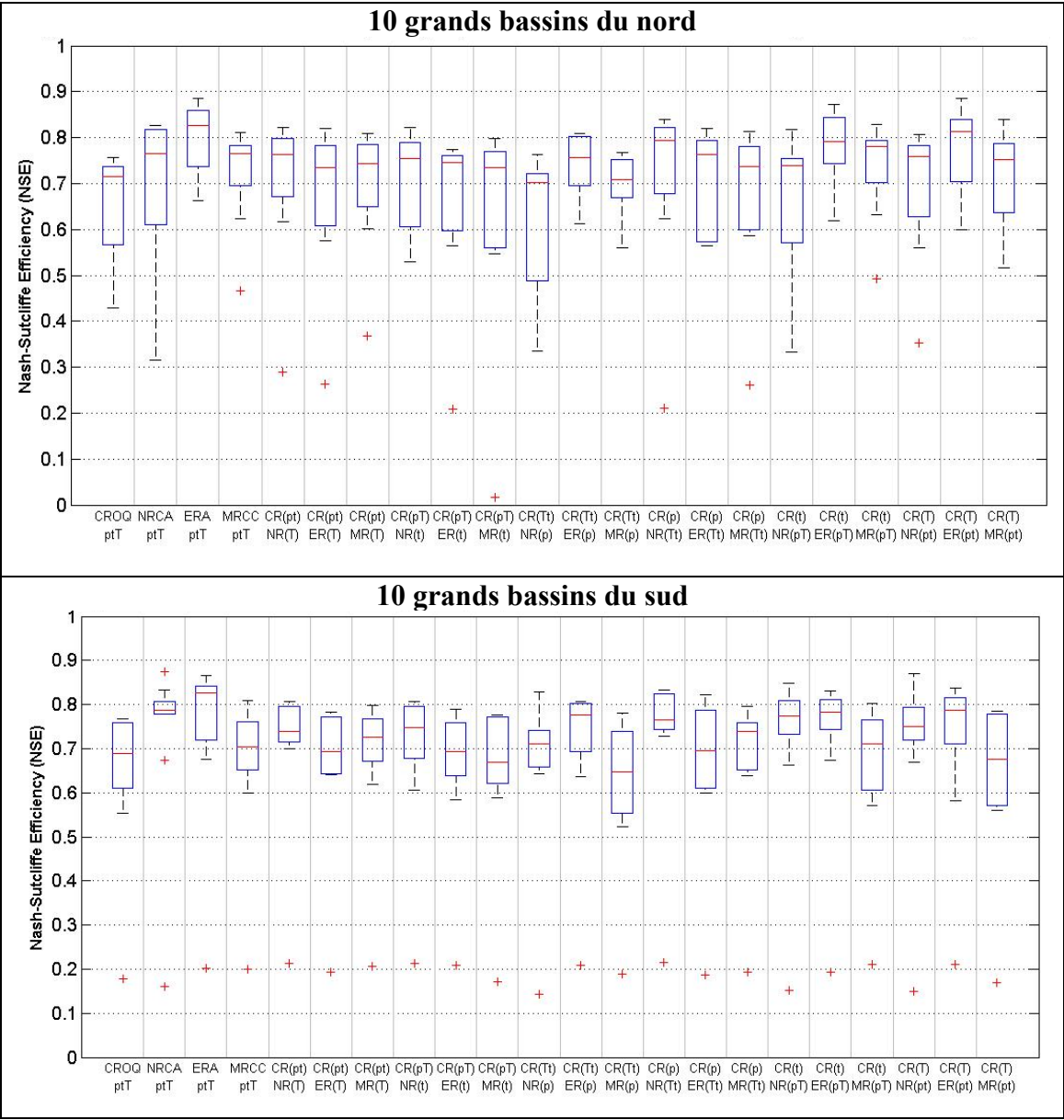


Figure-A II-2 Les résultats de validation (NSE) du modèle hydrologique HSAMI utilisant les différents jeux de données (CROQ(bba), ERA et MRCC5) et combinaisons de données de température et de précipitation sur 20 bassins versants durant la période 1979-2010 (T= Température maximale, t= Température minimale, p= Précipitation, CR=CROQ, NR=NRCan , ER=ERA, MR=MRCC5)

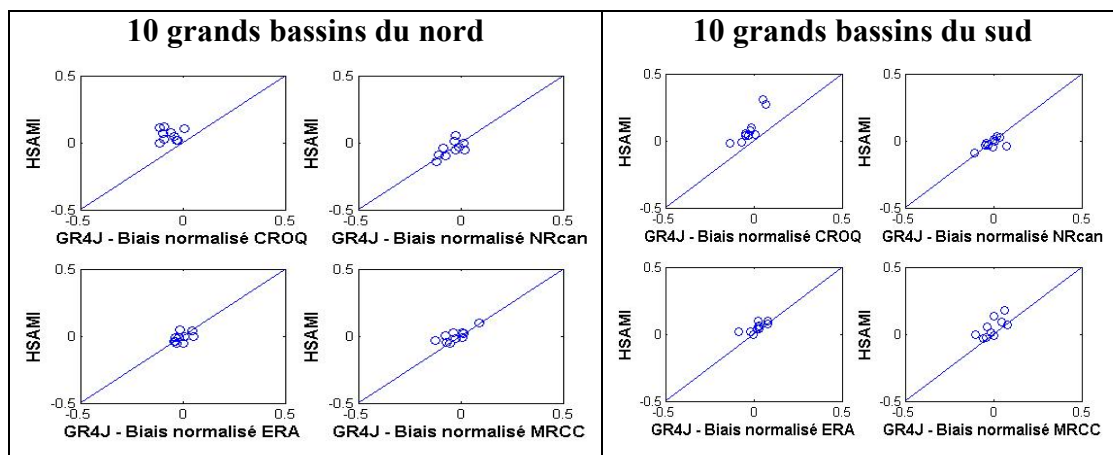


Figure-A II-3 Diagrammes de dispersion de Biais normalisé annuel moyen des débits journaliers simulés par rapport aux débits observés fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

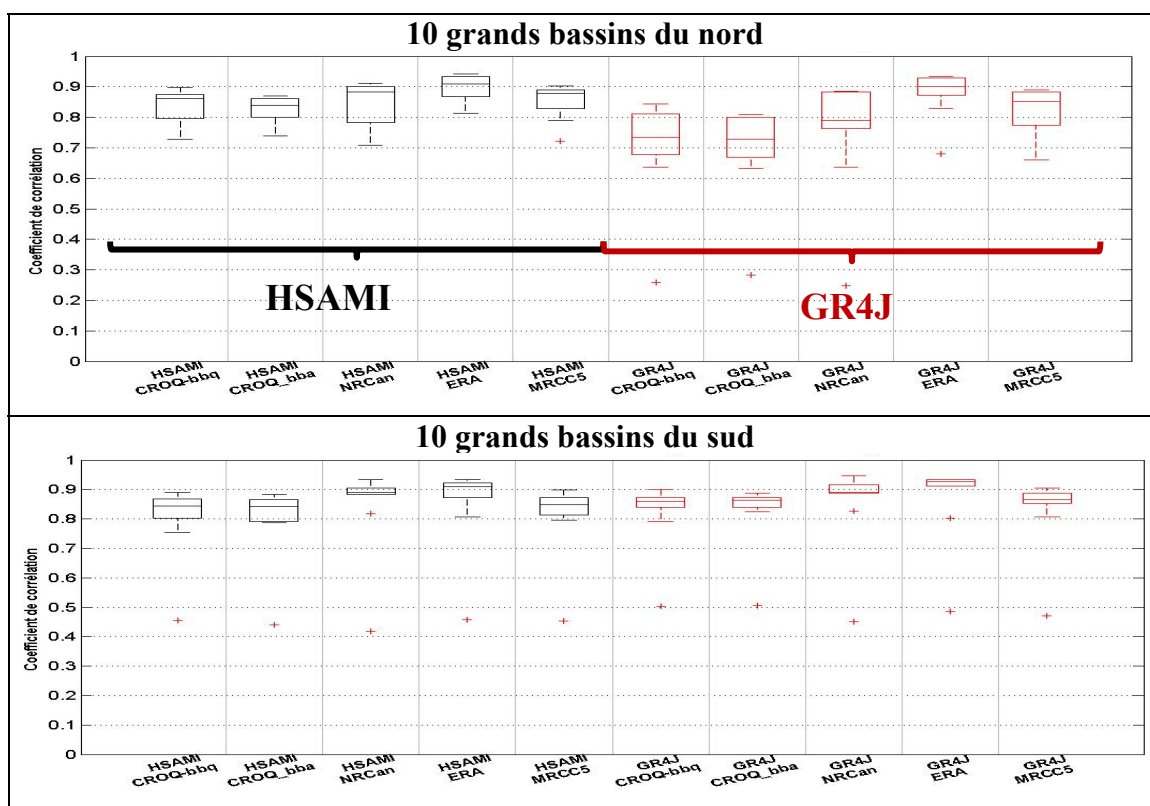


Figure-A II-4 Diagramme en boîte à moustaches montrant les valeurs des coefficients de corrélation des débits simulés par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)

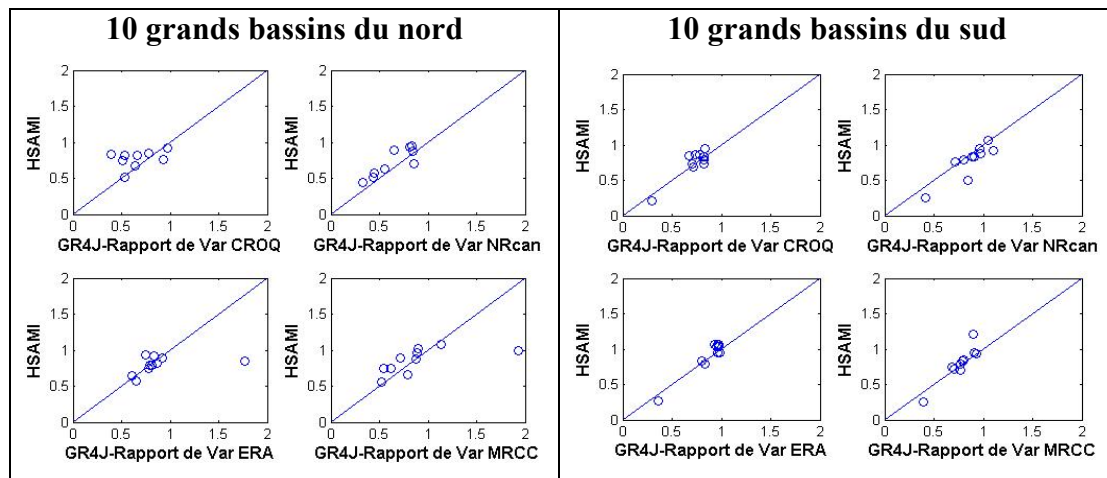


Figure-A II-5 Diagramme de dispersion des Ratios des Variances des débits journaliers simulés par rapport aux débits observés en fonction du modèle hydrologique pour la période de 1980-2010 sur 10 grands bassins versants du nord (gauche) et 10 grands bassins versants du sud (droite)

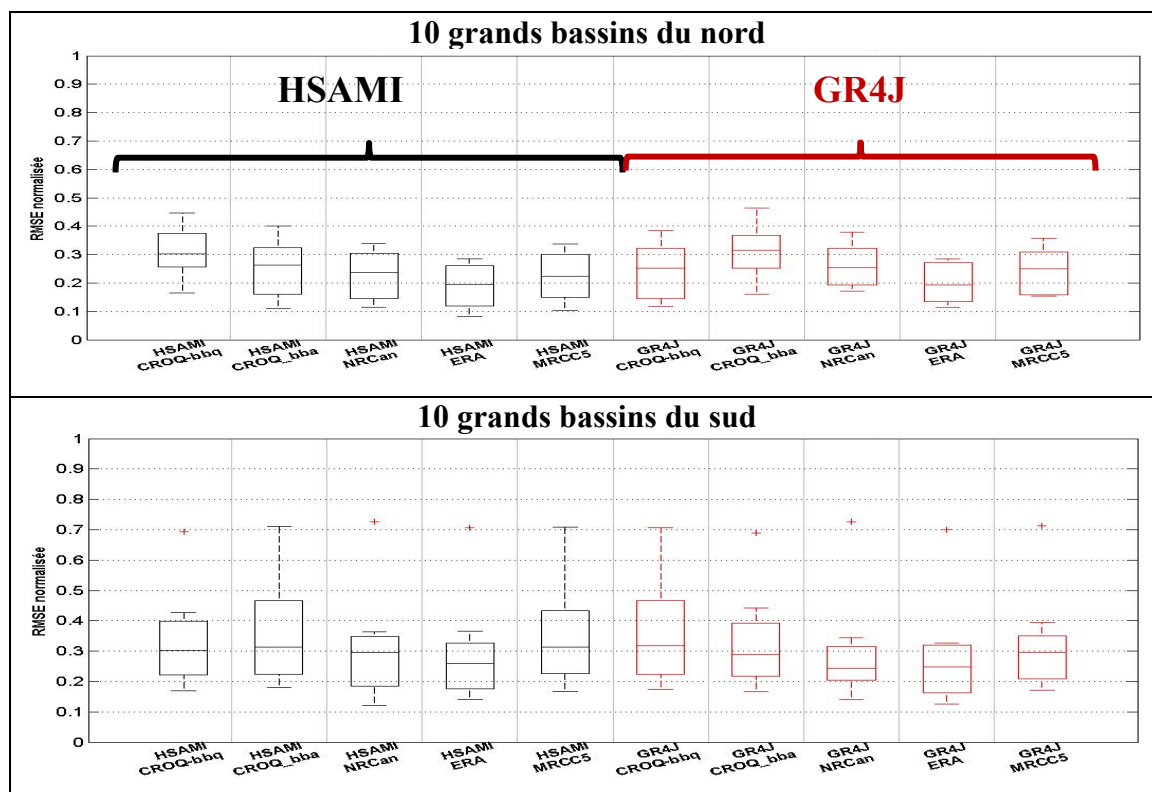


Figure-A II-6 Diagramme en boîte à moustaches montrant RMSE normalisée des débits simulés par rapport aux débits observés sur 20 grands bassins versants durant la période 1980-2010. Les résultats des modèles hydrologiques HSAMI et GR4J sont respectivement présentés à gauche (en noir) et à droite (en rouge)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amidror, I., 2002: Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey. *Journal of electronic imaging*, n° 11, p. 157-176.
- Arsenault, R., and F. Brissette, 2014a: Determining the optimal spatial distribution of weather station networks for hydrological modeling purposes using RCM datasets: An experimental approach. *Journal of Hydrometeorology*, n° 15, p. 517-526.
- Arsenault, R., and F. P. Brissette, 2014b: Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. *Water Resources Research*, n° 50, p. 6135-6153.
- Bajamgnigni Gbambie, A. S., A. Poulin, M.-A. Boucher, and R. Arsenault, 2017: Added Value of Alternative Information in Interpolated Precipitation Datasets for Hydrology. *Journal of Hydrometeorology*, n° 18, p. 247-264.
- Bergeron, O., 2015: Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec. version 1.2, Guide d'utilisation. 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, p. 33.
- Biner, S., 2016: Validation des premières simulations MRCC5 pilotées par des réanalyses sur le Québec. Rapport interne, n° 19, p. 21.
- Biner, S., D. Caya, R. Laprise, and L. Spacek, 2000: Nesting of RCMs by imposing large scales. *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-PUBLICATIONS-WMO TD*, p. 7.3-7.3.
- Bormann, H., L. Breuer, S. Giertz, J. A. Huisman, and N. R. Viney, 2009: Spatially explicit versus lumped models in catchment hydrology—experiences from two case studies. *Uncertainties in environmental modelling and consequences for policy making*, p. 3-26.
- Bosilovich, M. G., C. Junye, F. R. Robertson, and R. F. Adler, 2008: Evaluation of global precipitation in reanalyses. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, n° 47, p. 2279-2299.
- Bresson, R., and R. Laprise, 2011: Scale-decomposed atmospheric water budget over North America as simulated by the Canadian Regional Climate Model for current and future climates. *Climate Dynamics*, n° 36, p. 365-384.
- Cardin-Ouellette, S., 2013: La convergence du flux de vapeur d'eau et son potentiel comme variable hydrologique de surface. École de technologie supérieure, 1 ressource en ligne (xvi, 101 pages).

- Chen, J., F. P. Brissette, D. Chaumont, and M. Braun, 2013: Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, n° 49, p. 4187-4205.
- Choi, W., S. J. Kim, P. F. Rasmussen, and A. R. Moore, 2009: Use of the North American regional reanalysis for hydrological modelling in Manitoba. *Canadian Water Resources Journal*, n° 34, p. 17-36.
- Cholette, M., 2013: Méthode de télescopage appliquée au Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5) pour une étude de faisabilité de ce modèle à très haute résolution.
- Creutin, J., and C. Obled, 1982: Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water resources research*, n° 18, p. 413-431.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n° 137, p. 553-597.
- Delfiner, P., and J. Delhomme, 1975: Optimum interpolation by kriging.
- Delhomme, J., 1978: Kriging in the hydrosociences. *Advances in water resources*, n° 1, p. 251-266.
- Dirks, K. N., J. E. Hay, C. D. Stow, and D. Harris, 1998: High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, n° 208, p. 187-193.
- Essou, G. R., F. Brissette, and P. Lucas-Picher, 2016a: The use of reanalyses and gridded observations as weather input data for a hydrological model: comparison of performances of simulated river flows based on the density of weather stations. *Journal of Hydrometeorology*.
- Essou, G. R., F. Sabarly, P. Lucas-Picher, F. Brissette, and A. Poulin, 2016b: Can precipitation and temperature from meteorological reanalyses be used for hydrological modeling? *Journal of Hydrometeorology*, n° 17, p. 1929-1950.
- Essou, G. R. C., 2016: Potentiel des données de précipitation et température des réanalyses atmosphériques en modélisation hydrologique, École de technologie supérieure, 1 ressource en ligne (xxvi, 245 pages).
- Essou, G. R. C., R. Arsenault, and F. P. Brissette, 2016c: Comparison of climate datasets for lumped hydrological modeling over the continental United States. *Journal of Hydrology*, n° 537, p. 334-345.
- Fortin, V., 2000: Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes, n° 68.
- Goovaerts, P., 2000: Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, n° 228, p. 113-129.

- Hutchinson, M. F., 1995: Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, n° 9, p. 385-403.
- Hutchinson, M. F., D. W. McKenney, K. Lawrence, J. H. Pedlar, R. F. Hopkinson, E. Milewska, and P. 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*, n° 48, p. 725-741.
- Hyung-II, E., Y. Dibike, T. Prowse, and B. 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*, n° 28, p. 4250-4271.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n° 77, p. 437-471.
- Lepinas, F., V. Fortin, G. Roy, P. Rasmussen, and T. Stadnyk, 2015: Performance evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrometeorology*, n° 16, p. 2045-2064.
- Lu, G. Y., and D. W. Wong, 2008: An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, n° 34, p. 1044-1055.
- Lucas-Picher, P., R. Laprise, and K. Winger, 2016: Evidence of added value in North American regional climate model hindcast simulations using ever-increasing horizontal resolutions. *Climate Dynamics*, p. 1-23.
- Lucas-Picher, P., S. Somot, M. Déqué, B. Decharme, and A. Alias, 2013: Evaluation of the regional climate model ALADIN to simulate the climate over North America in the CORDEX framework. *Climate Dynamics*, n° 41, p. 1117-1137.
- Mahfouf, J. F., B. Brasnett, and S. Gagnon, 2007: A Canadian precipitation analysis (CaPA) project: Description and preliminary results. *Atmosphere-Ocean*, n° 45, p. 1-17.
- Manoj, J., P. Zaitao, E. S. Takle, and R. Gu, 2004: Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: a regional climate model perspective. *Journal of Geophysical Research*, n° 109, p. 12.
- Martel, J.-L., F. Brissette, D. Caya, and A. Mailhot, 2015: Évaluation de l'impact de la variabilité naturelle du climat sur l'estimation statistique des extrêmes hydrologiques. Communication orale présentée au colloque RHQ 2015, Montréal, Canada.
- Martynov, A., R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Šeparović, and B. Dugas, 2013: Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Climate dynamics*, n° 41, p. 2973-3005.

- McFarlane, N., J. Scinocca, M. Lazare, R. Harvey, D. Verseghy, and J. Li, 2005: The CCCma third generation atmospheric general circulation model. CCCma internal rep, vol. 25, p. 16.
- Mesinger, F., and Coauthors, 2004: North American regional reanalysis. Combined Preprints: 84th American Meteorological Society (AMS) Annual Meeting, January 11, 2004 - January 15, 2004, Seattle, WA., United states, American Meteorological Society, p. 4189-4201.
- Minville, M., 2008: Potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique exploité pour la production hydroélectrique : étude de la rivière Péribonka (Québec, Canada), École de technologie supérieure, xii, 273 f. pages.
- Music, B., and D. Caya, 2007: Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, n° 8, p. 969-988.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, n° 10, p. 282-290.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, n° 85, p. 369-432.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian, 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, n° 279, p. 275-289.
- Poissant, D., R. Arsenault, and F. Brissette, 2017: Impact of parameter set dimensionality and calibration procedures on streamflow prediction at ungauged catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, n° 12, p. 220-237.
- Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, n° 24, p. 3624-3648.
- Riette, S., and D. Caya, 2002: Sensitivity of short simulations to the various parameters in the new CRCM spectral nudging. *Research activities in atmospheric and oceanic modelling. WMO/TD*, p. 7.39-37.40.
- Ruelland, D., S. Ardoin-Bardin, G. Billen, and E. 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*, n° 361, p. 96-117.
- Sabarly, F., 2015: Évaluation du potentiel des réanalyses à représenter le cycle hydrologique de surface et de leur performance en modélisation hydrologique dans la province de Québec au Canada. École de technologie supérieure, 1 ressource en ligne (xx, 90 pages).

- Sabarly, F., G. Essou, P. Lucas-Picher, A. Poulin, and F. Brissette, 2016: Use of four reanalysis datasets to assess the terrestrial branch of the water cycle over Quebec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, n° 17, p. 1447-1466.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n° 91, p. 1015-1057.
- Scinocca, J. F., and N. A. McFarlane, 2004: The variability of modeled tropical precipitation. *Journal of the atmospheric sciences*, n° 61, p. 1993-2015.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, n° 106, p. 7183-7192.
- Uppala, S. M., and Coauthors, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n° 131, p. 2961-3012.
- Valéry, A., 2010: Modélisation précipitations-débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. *Agro Paris Tech*: Paris, France.
- Wang, W., P. Xie, S.-H. Yoo, Y. Xue, A. Kumar, and X. Wu, 2011: An assessment of the surface climate in the NCEP climate forecast system reanalysis. *Climate Dynamics*, n° 37, p. 1601-1620.