

**Étude exploratoire de membres
de deux versions du MRCC en climats passé et
futur : Analyse de variables
hydrométéorologiques et
détermination des débits d'été de
quatre bassins versants canadiens**

Rapport de recherche No R-1038 Janvier 2009

**Étude exploratoire de membres
de deux versions du MRCC en climats passé et futur :
Analyse de variables hydrométéorologiques et
détermination des débits d'été de
quatre bassins versants canadiens**

Mushombe Muma¹, Alain N Rousseau¹, Christine Rivard²

¹Centre Eau Terre et Environnement
Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

²Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada
Commission géologique du Canada - Division Qc
Geological Survey of Canada - Qc Division
490 rue de la Couronne, Québec (QC) G1K 9A9

Rapport N° R-1038

Janvier 2009

ISBN : 978-2-89146-589-2

REMERCIEMENTS

Diane Chaumont du consortium Ouranos pour la transmission des données du MRCC,
Patrick Gagnon pour l'assistance technique dans l'élaboration des programmes MATLAB,
Alain Mailhot pour ses conseils.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
RÉSUMÉ.....	XI
1 INTRODUCTION.....	1
2 DESCRIPTION DU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DE CLIMAT ET DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES.....	3
3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET	5
4 MATÉRIEL ET MÉTHODE	7
4.1 Présentation des territoires à l'étude	7
4.2 Les variables à l'étude et calcul de leurs valeurs.....	8
4.3 Comparaison des données MRCC du passé et du futur.....	9
4.4 Tests statistiques : analyse de l'égalité des membres	10
4.5 Calcul des débits d'étiage.....	12
5 RÉSULTATS.....	13
5.1 Comparaison des données MRCC passées et futures	13
5.2 Comparaison des débits des étiages de deux périodes.....	18
5.3 Analyse de l'égalité des membres pour une même version du MRCC et pour des versions différentes	20
5.3.1 Égalité des membres pour une même version	20
5.3.2 Égalité de deux membres des versions différentes.....	25
5.4 Comparaison d'utilisation du sol MRCC_V4.2.0 versus utilisation du sol observée.....	28
6 CONCLUSION	31
7 BIBLIOGRAPHIE.....	33
ANNEXE	35

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Localisation des zones à l'étude	7
Figure 4.2	Schéma d'application des tests statistiques aux membres de même version	11
Figure 4.3	Schéma d'application des tests statistiques à deux membres de versions différents	11
Figure 5.1	Données de précipitation totale sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	14
Figure 5.2	Données de température à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	14
Figure 5.3	Données de la neige au sol (équivalent en eau) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	15
Figure 5.4	Données du ruissellement total (surface et drainage) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	16
Figure 5.5	Données de l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	17
Figure 5.6	Moyennes interannuelles de l'écoulement total du membre adj par saison sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	18
Figure 5.7	Données d'amplitude du vent sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison du membre adj sur quatre bassins	30
Figure A 1	Données de flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (positif vers le haut) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins : a) Chaudière, b) Salmon River, c) South Nation et d) Wilmot	35

Figure A 2	Données de température minimale quotidienne à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins : a) Chaudière, b) Salmon, c) South Nation et d) Wilmot	35
Figure A 3	Données de température maximale quotidienne à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins	36
Figure A 4	Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Chaudière pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c)aez/afc et d) afa/afd	36
Figure A 5	Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Salmon pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c)aez/afc et d) afa/afd	37
Figure A 6	Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur South Nation pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c)aez/afc et d) afa/afd	37
Figure A 7	Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Wilmot pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c)aez/afc et d) afa/afd	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Répartition d'occupation du sol sur chaque bassin.....	8
Tableau 4.2	Superficie du bassin et nombre de points de grille considérés par bassin ...	9
Tableau 5.1	Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Chaudière	19
Tableau 5.2	Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Salmon.....	19
Tableau 5.3	Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur South Nation ...	20
Tableau 5.4	Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Wilmot	20
Tableau 5.5	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes pour le taux de précipitations totales	21
Tableau 5.6	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes du flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère	21
Tableau 5.7	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes du ruissellement total	22
Tableau 5.8	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de l'équivalent en eau de la neige au sol.....	22
Tableau 5.9	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température à 2 mètres.....	23
Tableau 5.10	Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température minimale quotidienne à 2 mètres	23

Tableau 5.11 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température maximale quotidienne à 2 mètres	24
Tableau 5.12 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur	24
Tableau 5.13 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Chaudière	26
Tableau 5.14 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Salmon	26
Tableau 5.15 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin South Nation	27
Tableau 5.16 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Wilmot	27
Tableau 5.17 Fraction de la canopée observée versus canopée MRCC	28
Tableau A 1 Seuil de signification des tests d'auto-corrélation (U), de tendance (K) et d'égalité des médianes (HW et HKW) et des distributions (ZC) des membres de chaque version	39
Tableau A 2 Seuil de signification des tests d'auto-corrélation (U), de tendance (K) et d'égalité des médianes (HW et HKW) et des distributions (ZC) des membres issus de deux versions	43

RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'analyses de huit variables climatiques fournies par Ouranos et simulées par deux versions du MRCC pour des climats passé (1961-1990) et futur (2041-2070) sur quatre bassins versants répartis à travers le Canada : Wilmot (Île-du-Prince-Edouard), Chaudière (Québec), South Nation (Ontario) et Salmon (Colombie Britannique). Les variables à l'étude sont le taux de précipitations totales, le flux de vapeur d'eau (évapotranspiration), le ruissellement total, l'équivalent en eau de la neige au sol, les températures moyenne, minimale et maximale et l'amplitude du vent. Il s'agit d'établir le portrait des données futures par rapport à celles passées pour les données annuelles et saisonnières et vérifier si les données des cinq membres sont significativement différentes pour les données annuelles. Les tests statistiques sélectionnés pour cette étude sont : Mann-Kendall et Wald-Wolfowitz pour la tendance et l'auto-corrélation des données de chaque membre, Wilcoxon et Kruskal-Wallis pour l'égalité des médianes, et Zhang et Wu pour l'égalité des distributions de données des membres d'une même version du MRCC ou de versions différentes.

Les analyses au moyen de boîtes à moustaches (*box plots*) montrent qu'il y a des variables pour lesquelles les valeurs moyennes interannuelles futures sont statistiquement plus élevées que celles du passé pour tous les membres (précipitation totale, évapotranspiration, températures moyenne, minimale et maximale), des variables dont les comportements dans les deux climats dépendent du bassin (ruissellement total, amplitude du vent) et une seule variable dont les valeurs de la période de référence (passée) sont plus élevées que celles du futur (neige au sol). En ce qui concerne les débits d'étiage de deux climats sur deux périodes différentes de l'année (de juin à septembre et de mars à novembre), tout est fonction du bassin, c'est-à-dire que leur augmentation ou diminution dépend du bassin à l'étude. En général, excepté pour certaines variables, les membres ont des médianes égales et ne sont pas significativement différents entre eux, surtout dans le futur.

1. INTRODUCTION

Les changements climatiques, vraisemblablement liés à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, peuvent entraîner des modifications dans les températures, les précipitations et autres variables climatiques. Ces changements sont devenus une source d'inquiétudes tant à l'échelle nationale que mondiale. Afin de mieux comprendre et projeter les changements climatiques, les chercheurs ont développé des simulateurs informatiques ou modèles climatiques basés sur des équations physiques et thermodynamiques capables de reproduire les principales caractéristiques de notre système climatique.

Les modèles du climat du globe ou modèles de circulation générale (MCG) peuvent ainsi fournir des estimations quantitatives de variables. Cependant, les simulations de ces modèles couvrent l'ensemble du globe et présentent donc une faible résolution horizontale (quelques centaines de km de résolution). Fondés sur les mêmes principes que ceux à la base des MCG, les modèles régionaux de climat (MRC) focalisent sur une plus petite région du globe (domaine régional, 45 x 45 km). Ceci a pour avantage de produire des simulations à plus haute résolution. En fonction de la méthode employée pour établir les conditions aux frontières du domaine régional, un MRC peut être piloté par un MCG ou par des ré-analyses d'observations (afin de simuler un passé récent seulement).

2. DESCRIPTION DU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DE CLIMAT ET DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Parmi la grande variété de modèles régionaux de climat développés à travers le monde, le modèle régional canadien du climat (MRCC), développé au début des années 90 à l'Université du Québec à Montréal, est basé sur les techniques les plus modernes et les plus performantes de la simulation numérique. Caya et al. (1995) et Laprise (1999) présentent une description détaillée du modèle. Ce modèle permet d'effectuer des simulations climatiques à de fines échelles. Les tuiles du MRCC couvrent une surface d'environ 45 km x 45 km et les simulations sont produites avec un pas de temps de 15 minutes entre chaque intégration. Les travaux de Brochu et Laprise (2007), Music et Caya (2007), Frigon et al. (2007) et Gagnon et al. (accepté) respectivement sur le bassin de la rivière Columbia, celui de la rivière Mississippi, ceux du centre et du nord du Québec ainsi que ceux de la Châteauguay et Chaudière dans le sud du Québec sont des exemples récents de validation du MRCC.

Les simulations utilisées dans ce travail ont été produites sur un domaine large couvrant l'Amérique du Nord (AMNO) ayant 201 x 193 points grille (tuiles) avec une grille horizontale d'une maille de 45 km (vrai à la latitude 60° N). Deux versions (V4.2.0 et V4.2.3) du modèle MRCC ont été pilotées par 5 différents membres du modèle couplé climatique global de troisième génération (MCCG3)(Scinocca et McFarlane, 2004). La différence entre les versions MRCC_V4.2.0 et MRCC_V4.2.3 se situe principalement dans le schéma de surface pour le contenu en eau dans le sol alors que les membres du MCCG3 diffèrent entre eux par les conditions initiales. Signalons que nous avons pris des versions différentes parce que les simulations MRCC_V4.2.3 avec les membres 4 et 5 n'étaient pas terminées au moment d'entreprendre l'analyse. Idéalement, nous aurions pris la version 4.2.3 pour les 5 membres. Ces simulations régionales ont été effectuées en utilisant le scénario A2 d'émissions des gaz à effet de serre du rapport spécial du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (Nakicenovic et Swart, 2000; Parry, 2002). Rappelons ici que le scénario A2 correspond à une croissance élevée de la population, une croissance moyenne du produit intérieur brut (PIB), une utilisation élevée d'énergie, un changement d'affectation des terres moyen à élevé, une faible disponibilité du pétrole et du gaz, un développement économique régional et un progrès technologique

moins rapide. Le tableau 1 donne les différents codes ou membres de modélisation des données des climats passé et futur fournies par Ouranos.

TABLEAU 1 Codes de simulation

Simulation		Domaine	Modèle et version	Pilote et membre	Scénario d'ém. GES
Passée	Future				
adj	adj	AMNO	MRCC_V4.2.0	CGCM3 #4 archives aux 6 heures	A2
adl	adl	AMNO	MRCC_V4.2.0	CGCM3 #5 archives aux 6 heures	A2
aey	afb	AMNO	MRCC_V4.2.3	CGCM3 #1 archives aux 12 heures	A2
aez	afc	AMNO	MRCC_V4.2.3	CGCM3 #2 archives aux 12 heures	A2
afa	afd	AMNO	MRCC_V4.2.3	CGCM3 #3 archives aux 12 heures	A2

3. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET

Le climat est un résultat des interactions complexes entre l'atmosphère, la cryosphère (glace), l'hydrosphère (océans), la lithosphère (terre) et la biosphère (vie) alimentées par la distribution spatiale non uniforme du rayonnement solaire (Stute et al. 2001). Des projections variées (Villeneuve et Richard, 2007) indiquent que plusieurs bassins dans le monde connaîtront des changements dans les débits de rivière – certains bassins sont supposés avoir une augmentation de leurs débits des crues pendant que d'autres subiront des baisses. Étant indicatrices de la quantité d'eau souterraine, les statistiques de débits d'étiage des rivières sont utiles pour la gestion des ressources hydriques. Les impacts potentiels des changements climatiques sur la recharge des aquifères sont mal connus au Canada. Ainsi, on a recourt aux modèles climatiques afin de répondre à plusieurs questions liées à l'avenir de notre climat. Deux périodes doivent être générées : d'abord pour pouvoir comparer une période passée (de référence) aux observations pour évaluer les performances du simulateur et ensuite pour comparer les données (différences ou écarts) de la période future avec celle passée.

Cette étude a pour but de répondre aux questions suivantes :

- 1) Pour la période passée comme pour la période future, les cinq simulations climatiques résultant de conditions initiales différentes impliquent-elles l'obtention des membres qui sont significativement différents?
- 2) Quel est le portrait des débits d'étiage du futur par rapport à ceux du passé?
- 3) Les données de la fraction surfacique du couvert végétal (canopée) fournies par le module CLASS 2.7 du MRCC sont-elles comparables à celles observées?

Au vu de ce qui précède, notre étude vise les objectifs suivants :

1. Analyser le comportement des différentes variables de la période future par rapport à celle du passé des séries annuelles et saisonnières à l'aide de boîtes à moustaches (*box plots*);

2. Comparer les débits d'étiage des séries temporelles des minima 7 et 30 jours consécutifs du passé et ceux du futur;
3. Analyser, au moyen des tests statistiques, les deux groupes de membres issus de deux versions du MRCC pour la période passée et celle future afin de savoir si ces membres sont significativement différents;
4. Vérifier si la répartition d'occupation du sol MRCC correspond à celle observée.

4. MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.1 Présentation des territoires à l'étude

L'étude porte sur quatre bassins versants, à savoir le bassin de la rivière Chaudière au Québec, le bassin de la rivière Salmon en Colombie Britannique, le bassin de la rivière South Nation en Ontario et le bassin de la rivière Wilmot sur l'Île-du-Prince Édouard dont les localisations sont montrées à la figure 1 et les descriptions détaillées d'utilisation du sol sont présentées dans le tableau 2. Ces chiffres seront comparés à ceux issus du MRCC à la section 5.4.

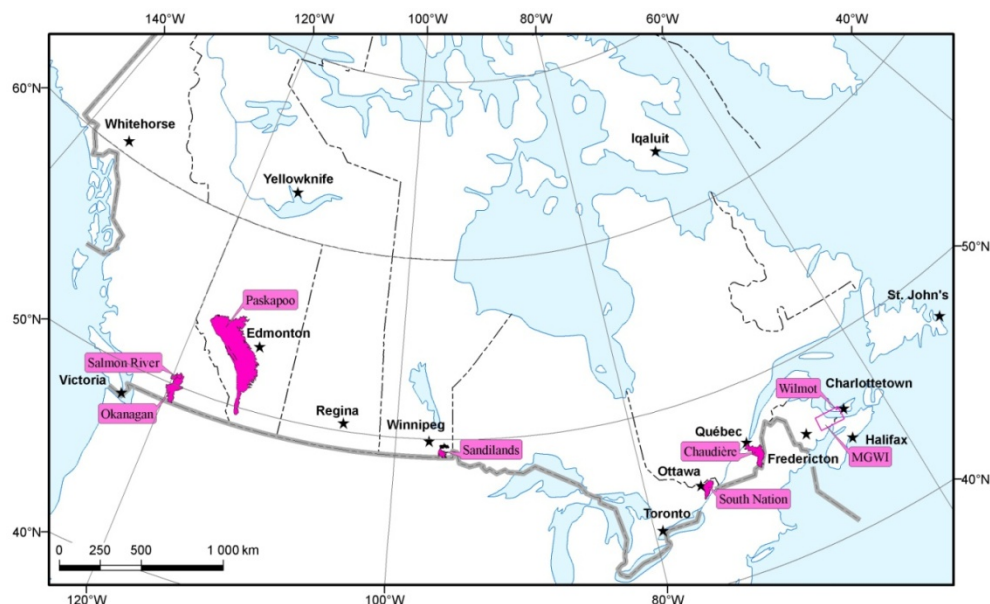


Figure 4.1 Localisation des zones à l'étude

Faisant de la région des Appalaches, le bassin de la rivière Chaudière est localisé au sud de la ville de Québec et couvre une superficie de 6 730 km² avec diverses utilisations du sol : 63 % de la superficie du bassin sont des forêts, 17 % des terres agricoles, 15 % des boisés, 3% de développement urbain et 2 % des eaux et marais (Rousseau et al., 2008a). Les données de onze (11) tuiles du MRCC ont été fournies pour couvrir entièrement ce bassin.

Située dans le bassin versant de la rivière Fraser, Salmon fait 150 km de long et draine un territoire d'environ 1 510 km² dont 69 % sont occupés par la forêt résineuse (Rousseau et al., 2008b). Seulement 16 % de la superficie du bassin est à vocation agricole, et celle-ci

est essentiellement constituée par la culture du foin, les pâturages et l'élevage. Trois (3) tuiles permettent de couvrir ce bassin.

Étant un affluent de la rivière Ottawa, la rivière South Nation draine un bassin versant de 3700 km² où les activités agricoles couvrent 61 % et sont dominées par la culture du foin, qui occupe 27 % du bassin, ainsi que du maïs et du soya qui occupent chacune 11 % du bassin versant (Rousseau et al., 2008b). Ce bassin est couvert par huit (8) tuiles.

La superficie drainée par la rivière Wilmot est d'environ 60 km². Les activités agricoles couvrent 82 % du bassin versant et se divisent en trois types de cultures, soient les pâturages et le foin avec 31 % de la superficie, les pommes de terre avec 26 % et les céréales avec 24 % (Rousseau et al., 2008b). Étant donnée sa petitesse, une (1) seule tuile permet de couvrir le bassin Wilmot.

Tableau 4.1 Répartition d'occupation du sol sur chaque bassin

	Chaudière	Wilmot	Salmon	
Occupation du sol	Superficie (ha)		Occupation du sol	Superficie (ha)
Urbain	24 053	102	Volaille	114
Pâturage, foin, trèfle et luzerne	75 905	1 878	Céréales	524
Céréales et horticulture	23 382	1 434	Pépinrière	110
Maïs*/Pomme de terre**	*2 036	**1 643	Urbain et routes	124
Eau	11 079	3	Petits fruits	8
Milieux humides	15 231	97	Tourbière	47
Sols nus	14 070	25	Cultures en serre	2
Friches arbustives	86 287	71	Ginseng	196
Forêt à dominance feuillue	269 065	408	Maraîcher	20
Forêt à dominance résineuse	149 659	237	Sol nu	1 433
South Nation			Verger	12
Urbain	9 413		Eau	1 211
Foin	128 153		Forêt conifères	104 652
Céréales	17 520		Forêt feuillus	7 162
Maïs	43 055		Friches	10 364
Patates	932		Roche	948
Soya	40 457		Milieux humides	1 354
Friches	10 242		Foin, pâtur., éleva.	23 019
Feuillus	115 773			
Milieux humides	5 235			

4.2 Les variables à l'étude et calcul de leurs valeurs

Les périodes d'analyse des simulations sont : de 1961 à 1990 pour la période de référence et de 2041 à 2070 pour la période future. Considérées uniformes sur toute la tuile pour chaque point grille, les valeurs des variables suivantes ont été utilisées :

- P_{cp} : taux de précipitations totales (liquide et solide) en mm/j;
- Q_{fs} : flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (positif vers le haut) en mm/j;
- R_{of} : ruissellement total (surface et drainage) en mm/j;
- S_{no} : neige au sol (équivalent en eau) en mm;
- St : température quotidienne à 2 mètres en K;
- St_{mn} : température minimale quotidienne à 2 mètres en K;
- St_{mx} : température maximale quotidienne à 2 mètres en K;
- S_{wmx} : amplitude moyenne du vent soutenu à 10 mètres de hauteur en m/s.

Le tableau 3 présente la superficie de drainage et le nombre des points de grille localisés à l'intérieur du bassin. Les valeurs des variables utilisées correspondent aux moyennes pondérées obtenues en utilisant les polygones de Thiessen pour estimer les superficies de chaque point grille (centroïde de la tuile) applicables au bassin :

$$\bar{X}_j = \frac{\sum X_i S_i}{S}$$

où $\bar{X}_j$ est la valeur moyenne de la variable sur le bassin au jour j;

X_i est la valeur enregistrée de la variable sur la $i^{\text{ème}}$ tuile;

S_i est la superficie du polygone associé à la $i^{\text{ème}}$ tuile;

S est l'aire du bassin.

Tableau 4.2 Superficie du bassin et nombre de points de grille considérés par bassin

Bassin versant	Superficie du bassin (km ²)	Nombre de points de grille dans le bassin ou à sa proximité
Chaudière	6 730	11
South Nation	3 700	8
Salmon	1 510	3
Wilmot	60	1

4.3 Comparaison des données MRCC du passé et du futur

Des analyses statistiques conventionnelles ont été réalisées au moyen de boîtes à moustaches sur des moyennes interannuelles (réalisées à partir de données journalières) par membre pour toutes les variables et sur des moyennes intersaisonnières pour tous les

membres de la variable *Rof* et le membre adj de la variable *Swmx* afin de comparer les données du futur vis-à-vis de celles du passé.

4.4 Tests statistiques : analyse de l'égalité des membres

Afin de vérifier si les membres de chaque version du MRCC d'une part, et de deux membres donnés issus de deux versions différentes du MRCC d'autre part, ne sont pas statistiquement différents, nous avons utilisé les tests de Wilcoxon (H_W) (pour la description de ce test, voir Wilks, 2006; Triola, 1998), Kruskal-Wallis (H_{KW}) (Wilcox, 2003; Ostle and Malone, 1988; Hamburg, 1987), Wald-Wolfowitz (U) (McCuen, 2003), Mann-Kendall (K) (McCuen, 2003) et Zhang et Wu (Z_C) (2007). Ces tests ont été effectués sur des moyennes interannuelles journalières des variables.

Les tests de Wilcoxon ($k = 2$, où k est le nombre d'échantillon à tester) et Kruskal-Wallis ($k \geq 2$) sont des tests non paramétriques d'identité qui permettent de déterminer si les k échantillons indépendants sont issus de la même population. Dans cette étude, ils sont utilisés pour tester l'hypothèse nulle H sur la médiane (c'est-à-dire si les k populations ou échantillons ont la même médiane ou si elle est statistiquement différente). À un seuil supérieur à 5 %, on conclut que les médianes des séries sont égales ou les données sont identiquement distribuées.

Le test de Wald-Wolfowitz sert à tester l'hypothèse selon laquelle les éléments ou données d'une séquence sont mutuellement indépendants ou s'il y a présence d'auto-corrélation. Ce test peut être utilisé pour tester si une distribution (échantillon) est aléatoire en ordonnant les données et en identifiant les données qui sont inférieures à la médiane avec un signe négatif et supérieures avec un signe positif. Lorsque son seuil est supérieur à 1 %, on conclut qu'il n'y a pas d'auto-corrélation entre les observations.

Le test de Mann-Kendall permet de déterminer si elles montrent une tendance à la hausse ou à la baisse avec le temps. Le niveau de confiance utilisé dans cette étude pour tester l'hypothèse nulle de stationnarité est de 1 %. En dessous de ce seuil, on conclut qu'il n'y a aucune tendance dans les données.

Le test de Zhang et Wu (2007), permet de vérifier si plusieurs distributions (échantillons ou séries de données) ne sont pas significativement différentes. Un seuil de 5 % a été choisi dans cette étude pour accepter ou rejeter l'hypothèse nulle à l'effet que les distributions sont égales. Pour ce test, il faut que les données des séries soient indépendantes

(qu'elles ne soient pas auto-corrélées) et qu'elles n'aient pas de tendance. Si au moins une série montre une tendance significative au seuil de 1 %, on enlève la tendance (supposée linéaire) et on reprend la série de tests sur les résidus (Mann-Kendall, puis Wald-Wolfowitz et Zhang et Wu).

Notons que les tests de Wald-Wolfowitz (U) et de Mann-Kendall (K) se font sur chaque membre tandis que ceux de Wilcoxon (H_W), Kruskal-Wallis (H_{KW}) et Zhang et Wu (Z_C) s'appliquent à l'ensemble formé de deux ou trois membres. Les figures 2 et 3 illustrent les tests appliqués.

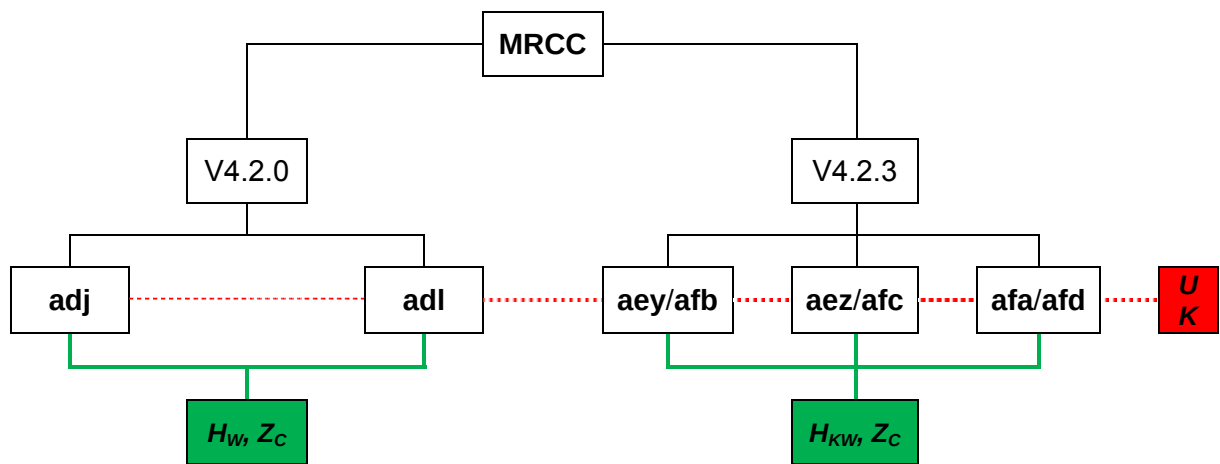


Figure 4.2 Schéma d'application des tests statistiques aux membres de même version

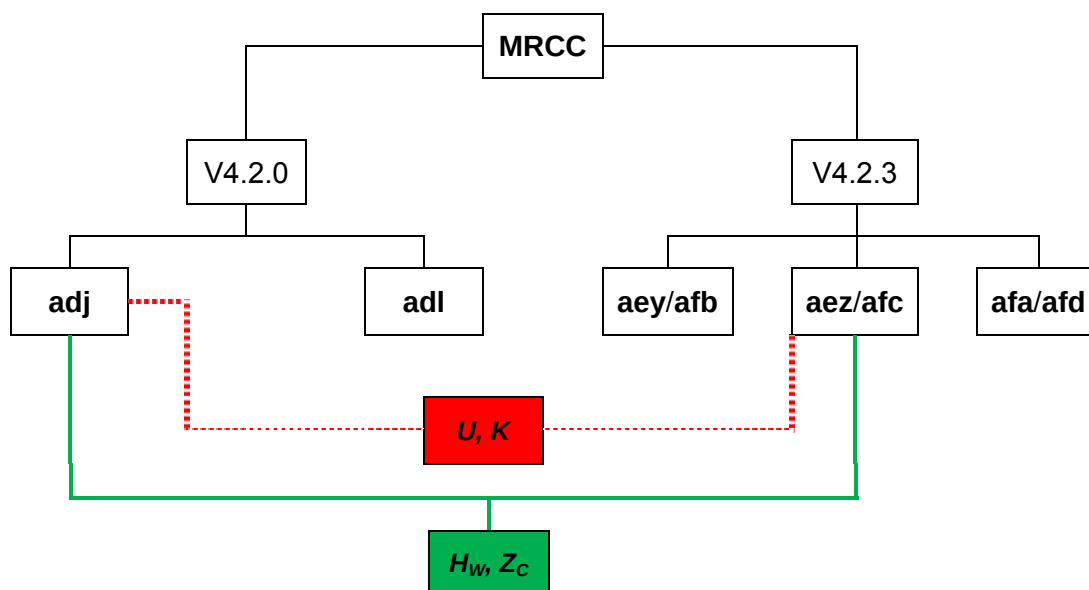


Figure 4.3 Schéma d'application des tests statistiques à deux membres de versions différents

4.5 Calcul des débits d'étiage

Nous avons déterminé les étiages minima (valeurs minima des moyennes mobiles sur 30 ans) des lames d'eau pour chaque année (1961-1990 et 2041-2070) sur sept et trente jours consécutifs sur des périodes allant du 1^{er} juin au 30 septembre (période de l'année où les précipitations sont faibles ou rares) et du 1^{er} mars au 31 novembre (les neuf mois de l'année pendant lesquels le sol n'est pas couvert de neige). Ces données correspondent aux variables Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} dont le premier chiffre de l'indice indique la période de retour deux, dix et cinq ans et le second chiffre le nombre de jours consécutifs utilisés pour calculer les débits minima, tels que décrits dans Quilbé et al. (2008a; 2008b). Ces variables ont été choisies du fait qu'elles sont utilisées dans le cadre législatif qui réglemente les débits minima des rivières en Amérique du Nord (pour Q_{2-7} , Q_{10-7}) et en Europe (pour Q_{5-30}).

5. RÉSULTATS

5.1 Comparaison des données MRCC passées et futures

Les analyses statistiques qui ont été réalisées au moyen de boîtes à moustaches sur les différentes variables, peuvent être regroupées en 3 catégories. Sur ces graphiques, l'étoile représente la moyenne, la ligne rouge la médiane, le rond le mode, et la boîte les 25^e et 75^e percentiles. La limite inférieure (supérieure) de la *moustache* est la plus petite (grande) valeur de l'échantillon si cette valeur est plus grande (petite) que le 25^e (75^e) percentile – (+) 1.5 fois l'écart entre les 25^e et 75^e percentiles. Les observations éloignées sont indiquées par le symbole rouge «+». Les membres adj_P, adl_P, aey, aez et afa étant du passé et les membres adj_F, adl_F, afb, afc et afd étant du futur, la comparaison se fait alors entre adj_P et adj_F, adl_P et adl_F, aey et afb, aez et afc, afa et afd.

- Les variables dont les valeurs futures sont plus élevées que celles du passé sur tous les quatre bassins : la précipitation totale, l'évapotranspiration (flux de vapeur d'eau), la température moyenne, la température minimale et la température maximale. Dépendant du bassin, les valeurs médianes de deux premières variables augmentent de 3.9 à 16.8 % et de 10 à 19.8 % tandis que celles des températures subissent une augmentation de 1.7 à 4.2 degrés celsius. D'une manière générale, il ressort que les valeurs minimales de toutes les températures (moyenne, minimum et maximum) de la période future ne sont pas éloignées des valeurs maximales des températures de la période passée. Les figures 4 et 5 et les annexes A1, A2 et A3 présentent les boîtes à moustaches de ces variables.

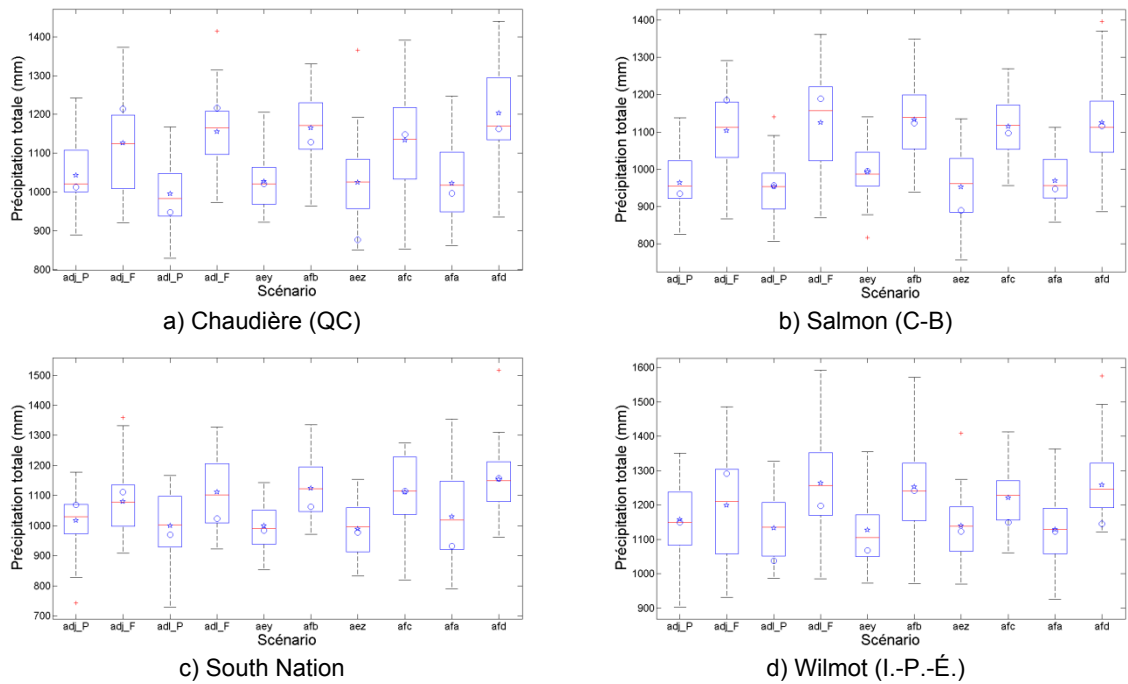


Figure 5.1 Données de précipitation totale sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

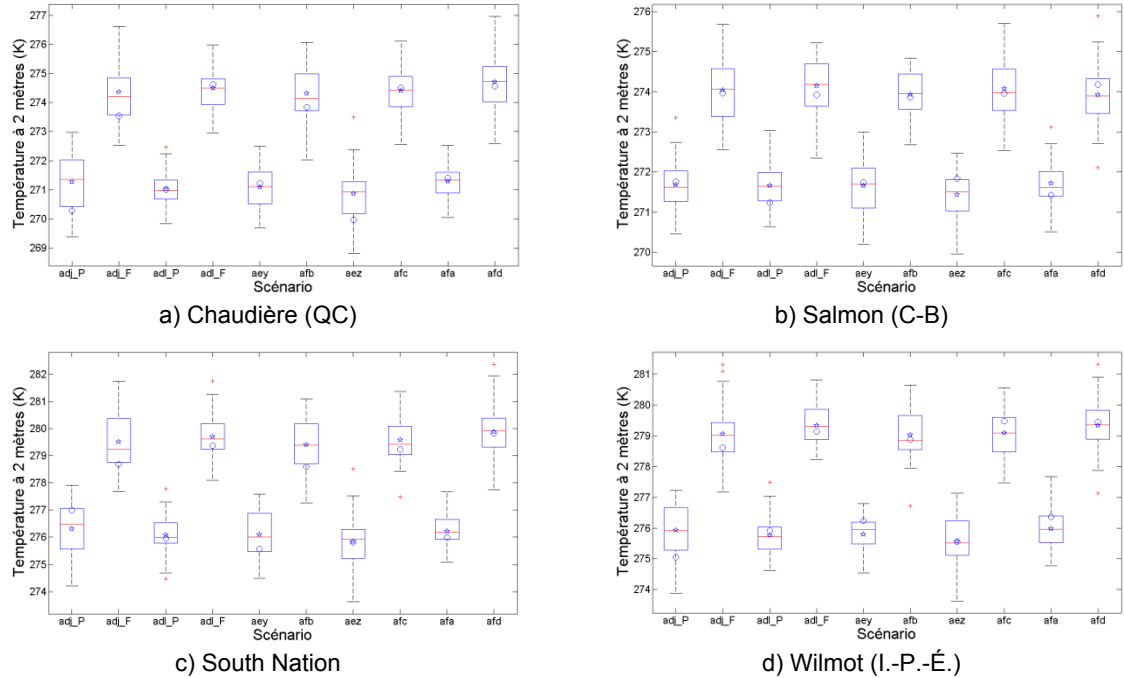


Figure 5.2 Données de température à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

- La seule variable dont les valeurs du passé sont plus élevées que celles du futur est l'équivalence en eau de la neige au sol. Il ressort que pendant la période future, la couverture de neige (équivalent en eau) va considérablement diminuer (figure 6). Ainsi, les valeurs médianes de la neige au sol sur les bassins diminuent de 7.9 à 48 %.

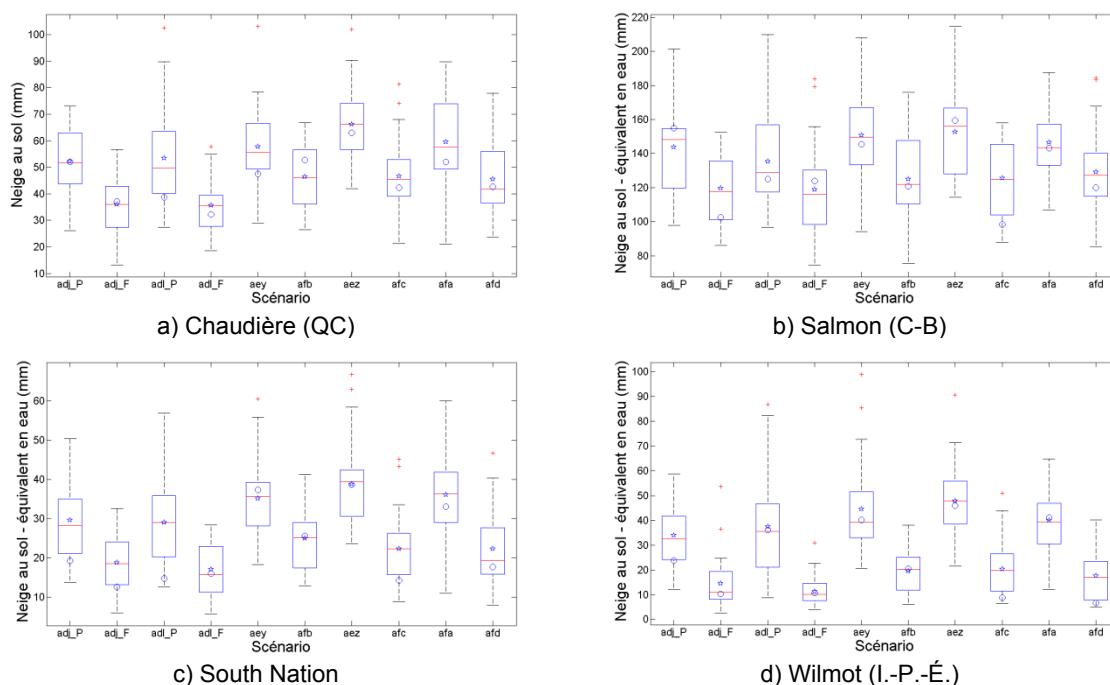


Figure 5.3 Données de la neige au sol (équivalent en eau) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

- Certaines variables ont un comportement dans le futur qui dépend du bassin. Il s'agit du ruissellement total et de l'amplitude du vent. En moyenne, le ruissellement total augmente dans le futur, de façon plus ou moins importante en fonction du bassin étudié, mais celui-ci peut parfois diminuer pour certains membres. Sur les bassins Chaudière, South Nation et Wilmot, les valeurs médianes de l'écoulement total vont légèrement augmenter d'une manière générale alors qu'elles sont considérablement plus élevées sur le bassin Salmon pendant la période future (figure 7). Pour les bassins Chaudière et Salmon, les distributions des observations futures sont plus étendues (plus variables) que celles du passé. Dépendant des membres, les valeurs médianes du ruissellement vont diminuer de 1.5 à 11 % ou augmenter de 0 à 18.1 % sur les bassins Chaudière, South Nation et Wilmot. Sur le bassin Salmon, ces valeurs augmentent de 13.8 à 35.8 %.

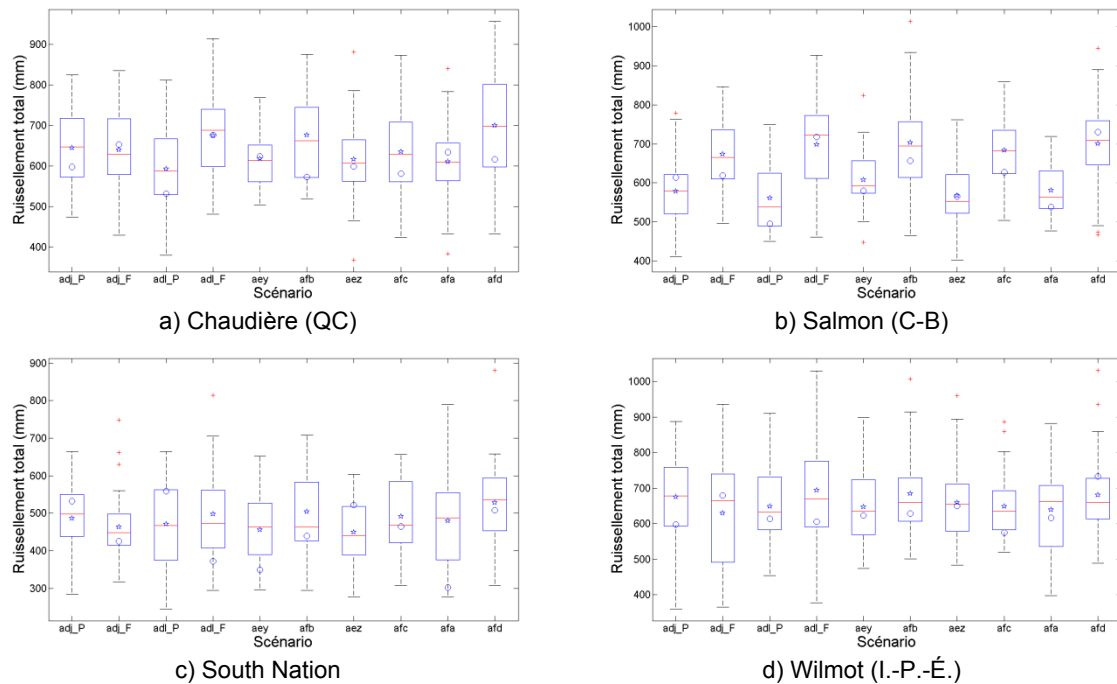


Figure 5.4 Données du ruissellement total (surface et drainage) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

La figure 8 présente l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur pour les quatre bassins. Les valeurs médianes futures de l'amplitude du vent du futur sont plus élevées que celles du passé pour tous les membres du bassin South Nation. Pour les trois autres bassins, les membres de la période future ne se comportent pas nécessairement de la même manière vis-à-vis de ceux du passé : ils peuvent afficher une valeur médiane supérieure ou inférieure à celle du passé : ils peuvent afficher une valeur médiane supérieure ou inférieure à celle du passé. Par exemple sur le bassin Chaudière, la valeur médiane de l'amplitude du vent aez (passé) est légèrement supérieure à afc (future) tandis que sur les bassins Salmon et Wilmot, c'est la valeur adj_P qui est plus élevée que la valeur adj_F. Cependant, toute élévation ou diminution de ces valeurs demeurent faibles : sur le bassin South Nation, ces valeurs augmentent de 0.04 à 0.09 m/s tandis que sur les autres bassins, dépendamment du membre, elles diminueront de 0,01 à 0.04 m/s ou augmenteront de 0.005 à 0.09 m/s.

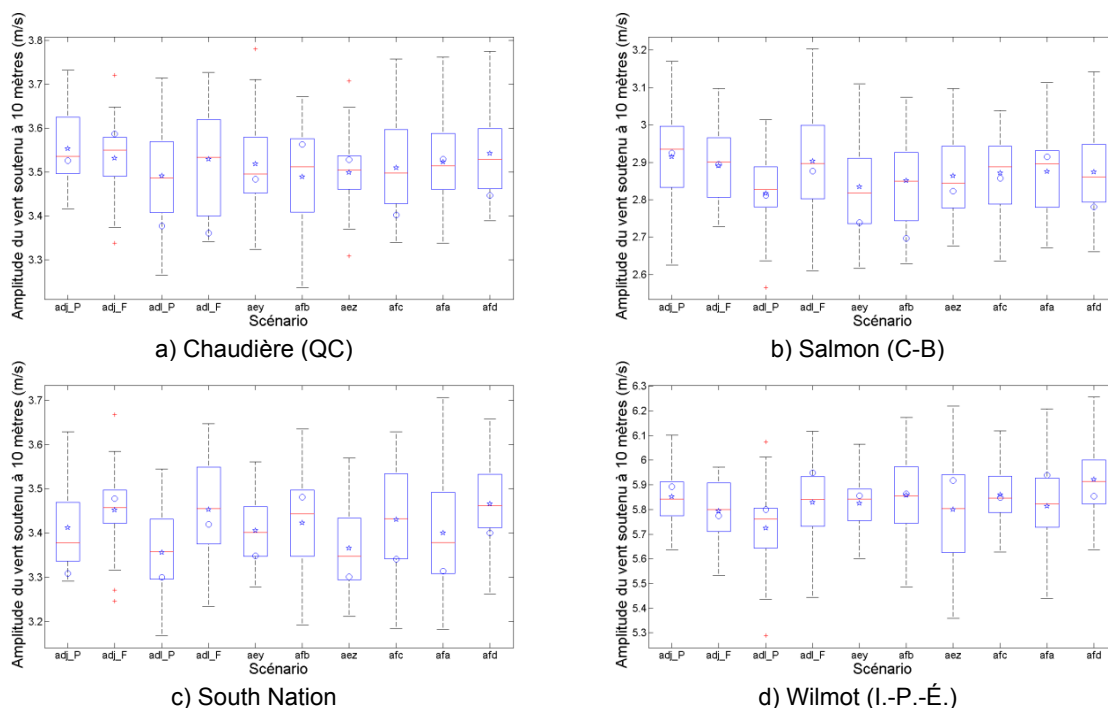


Figure 5.5 Données de l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

La figure 9 présente les *box plots* des moyennes intersaisonnières de ruissellement total du membre adj pour les deux périodes (référence et future) sur les quatre bassins versants. Les autres membres sont illustrés aux annexes A4 à A7. Les symboles DJF, MAM, JJA et SON désignent respectivement la première lettre des mois de l'hiver, du printemps, de l'été et l'automne et les lettres P et F symbolisent les périodes de référence et future. Le comportement le plus évident et le plus commun aux quatre bassins est que l'écoulement (ruissellement) total hivernal futur est beaucoup plus élevé que celui dans le passé et que sa distribution est plus étendue (variable). Contrairement au bassin de la rivière Salmon dont l'écoulement augmente plus en automne qu'en été et au printemps, les autres rivières affichent de manière générale une diminution plus ou moins importante d'écoulement au cours de ces trois saisons (printemps, été, automne) dans le futur.

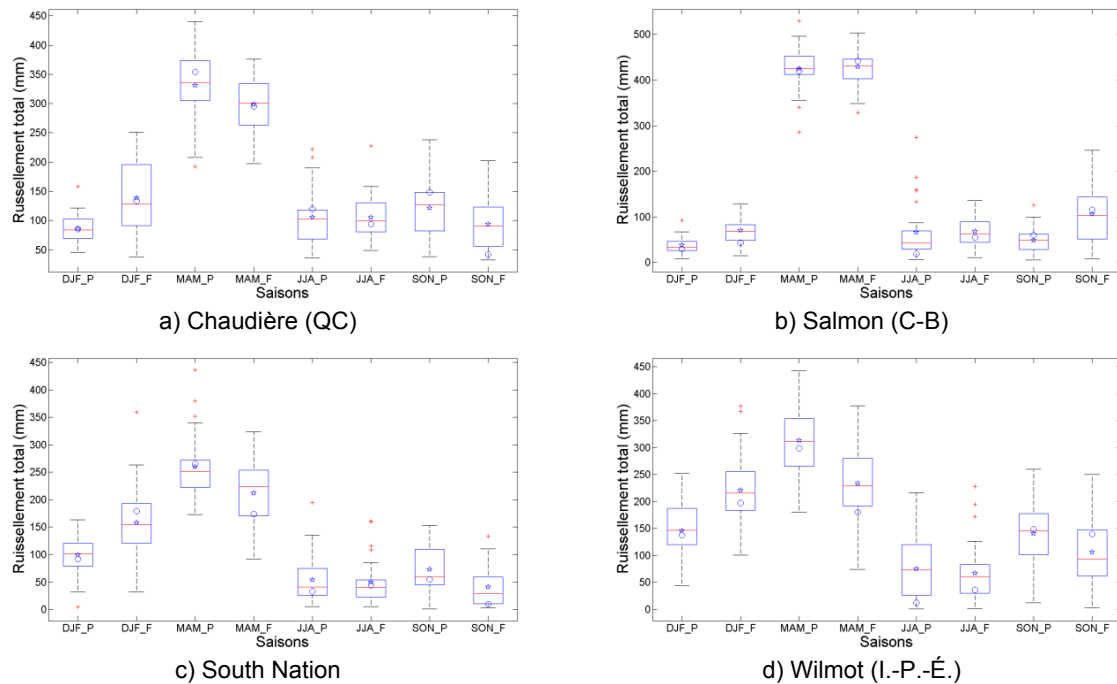


Figure 5.6 Moyennes interannuelles de l'écoulement total du membre adj par saison sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

5.2 Comparaison des débits des étiages de deux périodes

Les valeurs des séquences de débits d'étiage sur 7 et 30 jours consécutifs sur les périodes du 1^{er} juin au 30 septembre et du 1^{er} mars au 30 novembre de quatre bassins sont données dans les tableaux 4 à 6 pour tous les membres des deux périodes (passée et future). De ces tableaux, il ressort que :

- Du 1^{er} juin au 30 septembre (4 mois), les débits d'étiage de la période future sont moins élevés que ceux de la période de référence sur les bassins Chaudière, South Nation et Wilmot alors que c'est la situation inverse qui se produit sur le bassin Salmon : les débits d'étiage du futur sont plus élevés que ceux du passé. À l'exception du bassin Wilmot, les séquences des débits d'étiage suivent l'ordre de grandeur suivant: $Q_{10-7} < Q_{2-7} < Q_{5-30}$.
- Du 1^{er} mars au 30 novembre (9 mois, soit trois saisons), sur les bassins Chaudière et Salmon, les débits d'étiage du futur sont plus élevés que ceux du passé tandis que sur le bassin South Nation, les débits d'étiage du passé sont plus élevés que ceux du futur.

Sur le bassin Wilmot, les résultats ne permettent pas de tirer de conclusions car le comportement varie en fonction évidente du membre. Sur tous les bassins, les séquences des débits d'étiage suivent cet ordre de grandeur : $Q_{10-7} < Q_{5-30} < Q_{2-7}$.

- c) De façon générale, les débits des étiages du 1^{er} mars au 30 novembre sont plus faibles que ceux du 1^{er} juin au 30 septembre. Ceci suggère que plusieurs faibles valeurs sont comprises dans les mois de mars, octobre et novembre (le mois d'avril étant généralement associé à la crue printanière).
- d) L'ordre de la séquence des grandeurs des débits d'étiage dans les deux périodes de l'année change pour les variables ou indicateurs Q_{2-7} et Q_{5-30} . Signalons d'abord que pour les indicateurs Q_{10-7} et Q_{2-7} de même nombre de jours consécutifs, la période de retour la plus élevée donne des débits d'étiage les plus faibles. Pour Q_{2-7} et Q_{5-30} , la période allant du 1^{er} juin au 30 septembre, étant la plus courte, c'est l'indicateur ayant la faible fréquence d'occurrence des débits d'étiage qui donne les débits les plus élevés. L'inverse s'observe pour la période du 1^{er} mars au 30 novembre.

Tableau 5.1 Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Chaudière

	Membre	Période passé			Période future		
		Q_{10-7}	Q_{2-7}	Q_{5-30}	Q_{10-7}	Q_{2-7}	Q_{5-30}
Juin à septembre	adj	1.3863	3.5028	12.8404	1.3511	3.2020	9.2350
	adl	1.4024	3.3140	10.4101	1.1488	2.7941	9.2704
	aez/afb	1.9530	5.2426	21.5290	1.4527	3.3623	8.9400
	aez/afc	2.2442	5.0009	15.7138	0.8648	3.3534	7.0093
	afa/afd	2.8454	4.8067	19.4332	0.8207	3.3414	5.8850
mars à novembre	adj	0.7983	1.7672	1.2085	1.2243	2.1047	1.5991
	adl	0.6002	1.8191	1.0828	1.1488	2.5214	1.6221
	aez/afb	0.0145	0.1875	0.0544	0.8434	1.7122	1.1033
	aez/afc	0.0773	0.2509	0.1400	0.6811	1.3618	0.8648
	afa/afd	0.0361	0.2927	0.0744	0.7156	1.5343	0.8207

Tableau 5.2 Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Salmon

	Membre	Période passé			Période future		
		Q_{10-7}	Q_{2-7}	Q_{5-30}	Q_{10-7}	Q_{2-7}	Q_{5-30}
Juin à septembre	adj	0.2933	0.4692	1.7697	0.4008	1.1586	3.1879
	adl	0.1537	0.4762	1.1693	0.4254	1.1441	3.0915
	aez/afb	0.1694	0.4878	1.3280	0.2590	0.7645	1.6945
	aez/afc	0.1084	0.3850	0.7650	0.1913	0.8491	1.8941
	afa/afd	0.1621	0.4602	1.1409	0.1989	0.8103	1.5553
mars à novembre	adj	0.2904	0.4692	0.3548	0.4008	1.1307	0.5260
	adl	0.1506	0.4138	0.2361	0.4121	1.0866	0.5352
	aez/afb	0.1526	0.3836	0.2028	0.2572	0.6782	0.3315
	aez/afc	0.0930	0.2277	0.1195	0.1913	0.7972	0.3738
	afa/afd	0.0577	0.3495	0.1703	0.1679	0.5592	0.2600

Tableau 5.3 Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur South Nation

	Membre	Période passé			Période future		
		Q ₁₀₋₇	Q ₂₋₇	Q ₅₋₃₀	Q ₁₀₋₇	Q ₂₋₇	Q ₅₋₃₀
Juin à septembre	adj	0.1417	0.9906	2.4170	0.0853	0.4010	0.8600
	adl	0.2003	1.2270	2.2312	0.0433	0.3679	0.5518
	aey/afb	0.5173	1.0284	3.7053	0.1081	0.4837	0.7433
	aez/afc	0.1882	0.7985	1.5684	0.0551	0.5430	0.6904
	afa/afd	0.3074	0.9851	2.2111	0.0247	0.3630	0.5812
mars à novembre	adj	0.1417	0.9762	0.4903	0.0853	0.3210	0.1556
	adl	0.1672	1.1952	0.4479	0.0416	0.3596	0.0872
	aey/afb	0.2388	0.7886	0.5152	0.1040	0.4590	0.1219
	aez/afc	0.1882	0.7072	0.2865	0.0551	0.4570	0.1208
	afa/afd	0.1202	0.6956	0.3587	0.0241	0.2935	0.1005

Tableau 5.4 Séquence des minima de débits des étiages (en mm) sur Wilmot

	Membre	Période passé			Période future		
		Q ₁₀₋₇	Q ₂₋₇	Q ₅₋₃₀	Q ₁₀₋₇	Q ₂₋₇	Q ₅₋₃₀
Juin à septembre	adj	0.0151	0.6982	0.3588	0.0041	0.5093	0.2224
	adl	0.0440	0.8897	2.3301	0.0331	0.3192	0.2029
	aey/afb	0.2059	1.1915	2.2898	0.0218	0.5665	0.7542
	aez/afc	0.1224	0.9664	2.6148	0.0530	0.3809	0.6969
	afa/afd	0.2033	0.8675	2.4110	0.0586	0.5365	1.0065
mars à novembre	adj	0.0151	0.2282	0.0573	0.0037	0.2664	0.0348
	adl	0.0440	0.3948	0.1701	0.0228	0.2528	0.0407
	aey/afb	0.0284	0.2480	0.0632	0.0218	0.4103	0.0907
	aez/afc	0.0423	0.2995	0.0513	0.0530	0.3089	0.0870
	afa/afd	0.0250	0.2945	0.0879	0.0586	0.4054	0.1293

5.3 Analyse de l'égalité des membres pour une même version du MRCC et pour des versions différentes

5.3.1 Égalité des membres pour une même version

Rappelons qu'il s'agit ici de vérifier si les séries des données des deux membres de la version MRCC_V4.2.0 d'une part, et celles de trois membres de la version MRCC_V4.2.3 d'autre part, ne sont pas significativement différentes ou du moins proviennent de la même distribution. Les tableaux 8 à 15 présentent les résultats des tests de Wilcoxon, Kruskal-Wallis et de Zhang et Wu au seuil de 5 %.

- Taux de précipitations totales

Le tableau 8 donne les résultats des tests utilisés en vue de vérifier si les séries de données du taux de précipitation total de chaque version du MRCC sont identiquement distribuées ou proviennent d'une même distribution. Il ressort de ce tableau que toutes les hypothèses sont vérifiées, c'est-à-dire que les deux séries de la version 4.2.0 et les trois séries de la version 4.2.3 pour le taux de précipitations totales ont les mêmes médianes et leurs distributions ne sont pas significativement différentes sur tous les bassins et pour les

deux périodes. Les tableaux a et b de l'annexe A8 présentent les valeurs de signification (*p_value*) de tous les tests pour le taux de précipitations totales.

Tableau 5.5 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes pour le taux de précipitations totales

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	+
Wilmot	+	+	+	+	+	+	+	+

+ : hypothèse de test vérifiée

- Flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (évapotranspiration)

Le tableau 9 révèle que les deux membres de la version 4.2.0 pour la période passée n'ont pas la même médiane et leurs distributions ne sont pas égales pour le bassin Chaudière par le fait que l'hypothèse d'égalité des distributions n'est pas vérifiée; les trois séries de la version 4.2.3 n'ont pas de distributions égales à cause de la présence d'auto-corrélation dans l'un des membres. Sur le bassin South Nation, pour la période passée, les trois séries de la version 4.2.3 n'ont pas la même médiane et leurs distributions ne sont pas égales car l'hypothèse d'égalité des distributions n'a pas été vérifiée. Les hypothèses d'égalité des médianes et des distributions sont vérifiées sur les bassins Salmon et Wilmot pour la période passée. Pour la période future, les séries sont identiquement distribuées et proviennent d'une même distribution pour tous les bassins. Les seuils de signification de tous les tests pour le flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère sont consignés dans les tableaux c et d de l'annexe A8.

Tableau 5.6 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes du flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	-	-(³)	+	-(¹)	+	+	+	+
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	-	-(³)	+	+	+	+
Wilmot	+	+	+	+	+	+	+	+

+ : hypothèse de test vérifiée

- : hypothèse de test non vérifiée

(¹) : présence d'auto-corrélation à l'une des séries

(²) : présence de tendance significative à l'une des séries

(³) : l'hypothèse d'égalité des distributions non vérifiée

- Ruissellement total (surface et drainage)

Les hypothèses d'égalité des médianes et des distributions du ruissellement total sont vérifiées sur tous les bassins pour les deux versions au cours de la période de référence et pour la version 4.2.0 de la période future (tableau 10). Elles le sont aussi pour les bassins Chaudière et Wilmot pour la version 4.2.3 de la période future. Suite à la présence d'une tendance positive à l'une des trois séries sur le bassin Salmon et l'hypothèse d'égalité des distributions qui n'est pas vérifiée sur le bassin South Nation, les distributions des différents membres de la version 4.2.3 ne sont pas considérées égales pour la période future. Par contre, leurs médianes le sont. Les tableaux e et f de l'annexe A8 donnent les seuils de signification de tous les tests sur le ruissellement total.

Tableau 5.7 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes du ruissellement total

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	-(2)
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	-(3)
Wilmot	+	+	+	+	+	+	+	+

- Neige au sol (équivalent en eau)

Le tableau 11 montre que l'hypothèse d'égalité des médianes est vérifiée tant pour le passé que le futur pour tous les bassins. Quant à celle des distributions, elle n'est pas vérifiée sur le bassin Salmon pour les deux versions de la période de référence et sur les bassins Wilmot pour le passé et South Nation pour le futur de la version 4.2.0 à cause respectivement de la présence d'auto-corrélation, de la tendance négative à l'une de deux séries et du test d'égalité des distributions lui-même qui n'est pas vérifié. Les seuils de signification de tous les tests sur l'équivalent en eau de la neige au sol sont présentés dans les tableaux g et h de l'annexe A8.

Tableau 5.8 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de l'équivalent en eau de la neige au sol

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	+	-(1)	+	-(2)	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	-(3)	+	+
Wilmot	+	-(2)	+	+	+	+	+	+

- Température moyenne à 2 mètres

Le tableau 12 montre que les médianes et les distributions de toutes les séries d'une même version sont égales au cours de la période passée. Les distributions des trois séries (membres) de la version 4.2.3 sur le bassin Chaudière et celles des deux séries de la version 4.2.0 sur le bassin Wilmot ne sont pas égales pour la période future à cause de l'égalité des distributions qui n'a pas été vérifiée et la présence d'auto-corrélation. Les tableaux i et k de l'annexe A8 donnent les seuils observés pour tous les tests sur la température moyenne à 2 mètres.

Tableau 5.9 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température à 2 mètres

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Bassin								
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	-(³)
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	+
Wilmot	+	+	+	+	+	-(¹)	+	+

- Température minimale quotidienne à 2 mètres

À la seule exception du bassin Wilmot qui a les trois séries de la version 4.2.3 n'ayant pas de distributions égales pour le passé à cause de la présence d'auto-corrélation, les hypothèses d'égalité des médianes et des distributions sont vérifiées pour toutes les séries des deux versions tant pour le passé que le futur (tableau 13). Les seuils observés de tous les tests sur la température minimale quotidienne à 2 mètres sont présentés dans les tableaux l et m de l'annexe A8.

Tableau 5.10 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température minimale quotidienne à 2 mètres

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Bassin								
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	+
Wilmot	+	+	+	-(¹)	+	+	+	+

- Température maximale quotidienne à 2 mètres

Le tableau 14 révèle que les séries de données de la température maximale quotidienne des deux versions du MRCC ont des médianes et des distributions égales pour les deux périodes sauf pour le bassin Wilmot, dont les séries de données du passé de la version 4.2.3 n'ont pas de médianes égales. Les seuils de signification de tous les tests sur la température maximale quotidienne sont repris dans les tableaux n et o de l'annexe A8.

Tableau 5.11 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de la température maximale quotidienne à 2 mètres

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	+	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	+	+	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	+
Wilmot	+	+	-	+	+	+	+	+

- Amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur

Il découle du tableau 15 que les séries de données de l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur de la version 4.2.0 pour le passé n'ont pas de médianes égales sur les bassins Chaudière, Salmon et Wilmot. Quant à l'hypothèse d'égalité des distributions, c'est seulement sur le bassin Salmon que cette dernière n'a pas été vérifiée. Les tableaux p et q de l'annexe A8 présentent les seuils de signification de la variable d'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur de tous les tests.

Tableau 5.12 Résumé des tests d'égalité des médianes et des distributions des membres de chaque version pour les deux périodes de l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur

	Période passée				Période future			
	MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3		MRCC V4.2.0		MRCC V4.2.3	
Bassin	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C	H_W	Z_C	H_{KW}	Z_C
Chaudière	-	+	+	+	+	+	+	+
Salmon	-	-(3)	+	+	+	+	+	+
South Nation	+	+	+	+	+	+	+	+
Wilmot	-	+	+	+	+	+	+	+

De ces résultats sur les hypothèses d'égalité des médianes et des distributions des séries de données des membres de même version, il en ressort les conclusions suivantes pour l'ensemble des variables et des bassins :

L'hypothèse d'égalité des médianes n'a pas été vérifiée six fois dans le passé dont quatre fois pour la version 4.2.0 et deux fois pour la version 4.2.3. La variable ayant le plus souvent été caractérisée par une inégalité des médianes est l'amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur pour la version 4.2.0 (pour les bassins Chaudière, Salmon et Wilmot au cours de la période passée) suivie par le flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (bassins Chaudière pour la version 4.2.0 et South Nation pour la version 4.2.3).

L'hypothèse d'égalité des distributions n'a pas été vérifiée treize fois dont six fois pour la version 4.2.0 et sept fois pour la version 4.2.3, huit fois dans le passé et cinq fois dans le futur. L'équivalent en eau de la neige au sol est la variable la plus marquée par des membres dont les distributions sont statistiquement différentes (une fois pour chaque version dans le passé pour le bassin Salmon, une fois pour la version 4.2.0 dans le futur pour le bassin South Nation et une fois pour la version 4.2.0 dans le passé pour le bassin Wilmot) suivie par le flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (une fois pour chaque version pour le bassin Chaudière et une fois pour la version 4.2.3 pour le bassin South Nation dans le passé).

Les hypothèses d'égalité des médianes et des distributions n'ont pas été vérifiées respectivement six fois et treize fois sur 256 résultats en tout (4 bassins x 2 versions du MRCC x 2 périodes x 2 tests statistiques x 8 paramètres). Sur l'ensemble des bassins, nous pouvons conclure, de façon générale, que les membres de même version ne sont pas statistiquement différents. Notons que le taux de précipitations totales est la seule variable pour laquelle les médianes sont égales et les distributions ne sont pas statistiquement différentes sur tous les bassins pour les deux périodes. Les tests d'auto-corrélation, de tendance et d'égalité des distributions ont été faits sur les résidus pour les variables St , $Stmn$, $Stmx$, Qfs , dans une large mesure, et Sno , dans une faible proportion (Annexe A8).

5.3.2 Égalité de deux membres des versions différentes

Il s'agit de vérifier si un membre donné de la version MRCC_V4.2.0 et un membre donné de la version MRCC_V4.2.3 ne sont pas significativement différents. Pour ce faire, les tests ont été effectués de façon arbitraire sur le membre adj de la version 4.2.0 et le

membre aez de la version 4.2.3 pour la période passée et sur le membre adj de la version 4.2.0 et le membre afc de la version 4.2.3 pour la période future.

Tableau 5.13 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Chaudière

	Période passée		Période future	
	adj-aez (V4.2.0-V4.2.3)		adj-afc (V4.2.0-V4.2.3)	
	H_W	Z_C	H_W	Z_C
<i>Pcp</i>	+	+	+	+
<i>Qfs</i>	+	-(¹)	+	+
<i>Rof</i>	+	+	+	+
<i>Sno</i>	-	+	-	+
<i>St</i>	+	+	+	+
<i>Stmn</i>	-	+	+	+
<i>Stmx</i>	+	+	+	+
<i>Swmx</i>	-	-(³)	+	+

Sur le bassin Chaudière, le membre adj de la version 4.2.0 et le membre aez de la version 4.2.3 de la période passée n'ont pas les mêmes médianes pour *Sno*, *Stmn* et *Swmx* tandis que les variables *Qfs* et *Swmx* n'ont pas des distributions égales suite à la présence de l'auto-corrélation dans l'une des deux séries et à l'hypothèse d'égalité des distributions qui n'est pas vérifiée (tableau 16). Quant à la période future, les médianes des données des deux séries pour *Sno* ne sont pas considérées égales.

Tableau 5.14 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Salmon

	Période passée		Période future	
	adj-aez (V4.2.0-V4.2.3)		adj-afc (V4.2.0-V4.2.3)	
	H_W	Z_C	H_W	Z_C
<i>Pcp</i>	+	-(³)	+	+
<i>Qfs</i>	+	+	+	+
<i>Rof</i>	+	-(³)	+	+
<i>Sno</i>	+	+	+	+
<i>St</i>	+	-(¹)	+	+
<i>Stmn</i>	+	+	+	+
<i>Stmx</i>	+	+	+	+
<i>Swmx</i>	+	+	+	+

Les distributions des deux membres issus de deux versions ne sont pas égales pour *Pcp*, *Rof* et *St* par le fait que l'hypothèse d'égalité des distributions n'est pas vérifiée et la présence d'auto-corrélation dans l'une des deux séries au cours de la période passée

(tableau 17). Les distributions pour les deux périodes ont des médianes égales et dans le futur, elles ne sont pas significativement différentes pour toutes les variables.

Tableau 5.15 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin South Nation

	Période passée		Période future	
	adj-aez (V4.2.0-V4.2.3)		adj-afc (V4.2.0-V4.2.3)	
	H_W	Z_C	H_W	Z_C
<i>Pcp</i>	+	+	+	+
<i>Qfs</i>	+	+	+	+
<i>Rof</i>	+	+	+	+
<i>Sno</i>	-	_ ⁽³⁾	+	+
<i>St</i>	-	_ ⁽¹⁾	+	+
<i>Stmn</i>	-	_ ⁽³⁾	+	+
<i>Stmx</i>	+	+	+	+
<i>Swmx</i>	+	+	+	+

Le tableau 18 révèle que les membres adj et aez n'ont pas de médianes égales et de distributions égales (l'hypothèse d'égalité des distributions n'est pas vérifiée et présence d'auto-corrélation dans l'une des séries) pour les variables *Sno*, *St* et *Stmn* dans le passé. Partout ailleurs, les deux membres issus de deux versions différentes ont des médianes égales et leurs distributions ne sont pas significativement différentes.

Tableau 5.16 Égalité des médianes et des distributions de deux versions par variable pour le bassin Wilmot

	Période passée		Période future	
	adj-aez (V4.2.0-V4.2.3)		adj-afc (V4.2.0-V4.2.3)	
	H_W	Z_C	H_W	Z_C
<i>Pcp</i>	+	+	+	+
<i>Qfs</i>	+	+	+	+
<i>Rof</i>	+	+	+	+
<i>Sno</i>	-	_ ⁽³⁾	-	_ ⁽³⁾
<i>St</i>	+	+	+	+
<i>Stmn</i>	+	+	+	+
<i>Stmx</i>	+	+	+	+
<i>Swmx</i>	+	+	+	+

Les membres étudiés n'ont pas des médianes ni des distributions égales (l'hypothèse d'égalité des distributions n'est pas vérifiée) pour la variable *Sno* tant pour le passé que le

futur. Pour toutes les autres variables, les médianes et les distributions des membres sont statistiquement égales (tableau 19).

L'hypothèse d'égalité des médianes n'est pas vérifiée sept fois dans le passé et deux fois dans le futur. La variable qui est la plus affectée par l'inégalité est la neige au sol, soit cinq fois en tout sur trois bassins (Chaudière, South Nation et Wilmot). L'hypothèse d'égalité des distributions n'est pas vérifiée neuf fois pour le passé et une fois pour le futur. On peut donc conclure que la période future est largement caractérisée par des membres ayant des distributions qui ne sont pas significativement différentes, du moins pour les cas étudiés. La température maximale est la seule variable qui n'est jamais considérée statistiquement différente (égalité des médianes et des distributions). Les tableaux a à h de l'annexe A9 présentent les résultats du seuil de signification de tous les tests pour toutes les variables. Les tests d'auto-corrélation, de tendance et d'égalité des distributions ont dû être effectués sur les résidus pour les variables *St*, *Stmn*, *Stmx* pour tous les bassins.

5.4 Comparaison d'utilisation du sol MRCC_V4.2.0 versus utilisation du sol observée

Cette comparaison concerne la fraction surfacique du couvert végétal (canopée). Les différents types de végétation sont groupés en cinq (5) classes : conifères (classe 1), feuillus (classe 2), terres arables et cultures (classe 3), herbes, terres humides et toundra (classe 4) et urbain (classe 5). Du tableau 20, on peut noter que MRCC surestime le pourcentage des conifères sur tous les bassins, des feuillus sur South Nation et Wilmot, et des herbes, terres humides et toundra sur Salmon et Wilmot. Partout ailleurs, les pourcentages observés d'utilisation du sol occupée par la végétation sont plus élevés que ceux du MRCC.

Tableau 5.17 Fraction de la canopée observée versus canopée MRCC

Classe	Chaudière		Salmon		South Nation		Wilmot	
	Observée	MRCC	Observée	MRCC	Observée	MRCC	Observée	MRCC
1	0.2225	0.6292	0.6917	0.8077	0.0000	0.1125	0.0402	0.3324
2	0.5282	0.2724	0.1158	0.0169	0.3399	0.6130	0.0812	0.1268
3	0.1745	0.0763	0.1681	0.0493	0.6206	0.2526	0.8443	0.3177
4	0.0226	0.0099	0.0089	0.1254	0.0141	0.0111	0.0165	0.2210
5	0.0358	0.0022	0.0008	0.0006	0.0254	0.0108	0.0174	0.0021

Étant donné que les variations du futur par rapport au passé du ruissellement total et l'amplitude du vent dépendent du bassin, il a fallu regarder si l'occupation du sol peut avoir de l'influence sur ces variables. En ce qui concerne les résultats des moyennes interannuelles du ruissellement total, il est évident qu'aucun lien ne peut être établi entre ce dernier et la présence de la forêt sur le bassin. Au vu du comportement de l'amplitude du vent tout au long des saisons sur les quatre bassins, en considérant juste un seul membre, soit adj., on remarque que la forêt (selon l'occupation du sol MRCC) aurait de l'influence sur l'amplitude du vent. La figure 10 montre que les bassins Chaudière, Salmon et Wimot regorgeant un pourcentage de forêt à conifères plus élevé (respectivement 63, 81 et 33 %) comparé à celui de South Nation (qui n'a que 11 %) ont des valeurs médianes d'amplitude de vent plus élevées en moyenne pendant l'hiver et l'automne qu'au printemps et en été. Sur le bassin South Nation, c'est l'inverse qui se produit : les valeurs médianes de l'amplitude du vent au printemps et en été sont plus élevées que celles d'automne et hiver. La presque absence de forêt de conifères ou à dominance résineuse considérée dans le MRCC sur le bassin South Nation peut expliquer son comportement différent pour tous ses membres dans le futur comparativement aux autres trois bassins. En effet, la forêt à feuillus perdant ses feuilles en automne et hiver, la forêt sur le bassin se comporte comme une clairière qui influence la stabilité du vent des peuplements forestiers (Frank et Ruck, 2008).

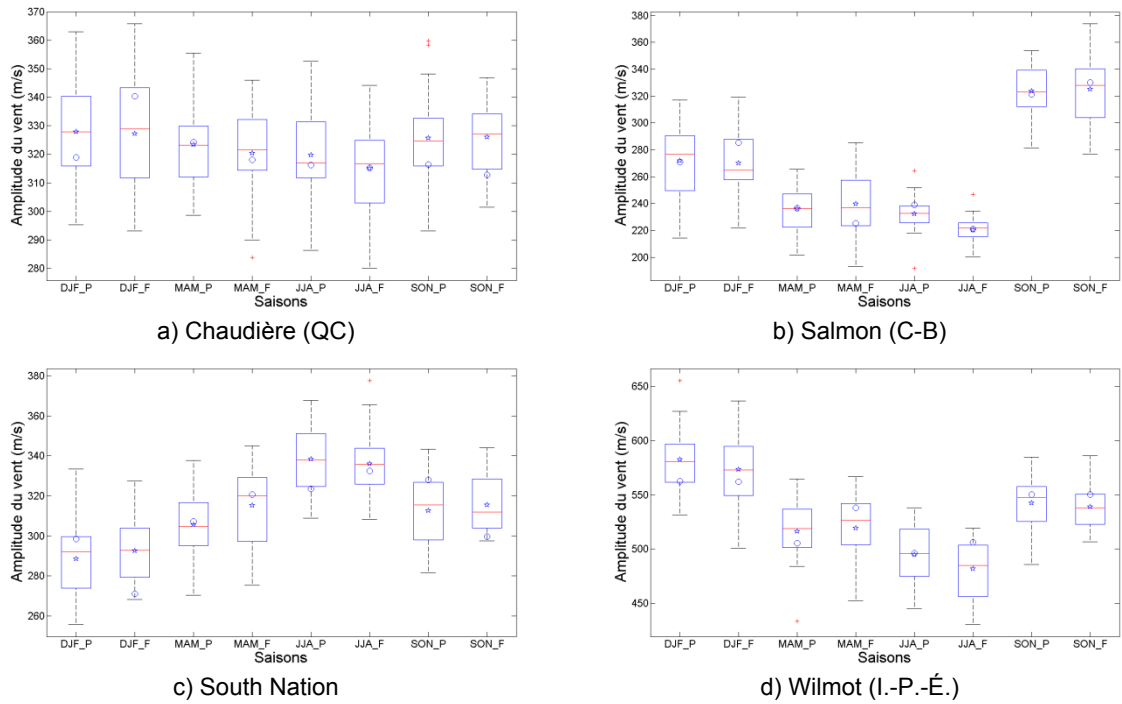


Figure 5.7 Données d'amplitude du vent sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison du membre adj sur quatre bassins

6. CONCLUSION

Les phénomènes climatiques naturels tels que les variations de températures et de précipitations sont complexes. Voilà plusieurs années que l'homme a commencé à s'intéresser à ces phénomènes naturels en essayant de les analyser et de comprendre les processus selon lesquels ils se manifestent; les changements climatiques ont probablement amplifié cet intérêt dans les dernières décennies. Plusieurs réponses naturelles aux changements climatiques ne peuvent pas être prédites avec précision suite aux incertitudes liées à la prédiction du climat futur. L'objectif de ce travail était d'analyser huit variables hydrométéorologiques et les indicateurs des débits d'étiage pour les deux séries de données synthétiques (1961-1990 et 2041-2070) générées par le modèle régional climatique canadien (MRCC4). Ces variables ne se sont pas comportées de la même manière dans le futur sur les quatre bassins.

En accord avec Villeneuve et Richard (2007), les changements climatiques observés dans cette étude conduisent à des modifications plus ou moins importantes des températures et des précipitations en fonction des régions et des saisons. Sur tous les bassins et pour tous les membres, les précipitations, l'évapotranspiration et les températures sont plus élevées dans le climat futur. L'élévation des températures induit un réchauffement plus prononcé en hiver et au printemps. Ce phénomène explique la diminution du couvert de neige et l'augmentation du ruissellement total en hiver dans la période future sur tous les bassins. La géologie et la topographie formant le bassin versant restant inchangées, une modification de la fréquence, de la durée et de l'abondance des précipitations de même que des températures plus élevées vont affecter aussi bien les hautes eaux (crues) que les basses eaux (étiages). Ainsi, l'augmentation fréquente de la variabilité du ruissellement total et l'augmentation de sa valeur médiane sur le bassin Salmon et sa diminution sur les bassins Chaudière, South Nation et Wilmot au cours du printemps, de l'été et de l'automne dans la période future, pourrait accroître la possibilité d'inondation ou de sécheresse.

Les débits d'étiages de juin à septembre restent plus élevés comparativement à ceux de mars à novembre du fait qu'ils se situent dans une période sans gel/dégel.

De l'étude de l'égalité des médianes et des distributions des membres d'une même version et de versions différentes du MRCC, il ressort que c'est souvent pendant la

période future que les membres ont des médianes égales et que les distributions ne sont pas significativement différentes.

Ce travail a permis de confirmer la difficulté de tester des séries relativement courtes (30 ans). Dans le cadre d'une étude sur les effets du changement climatique, Kundzewicz et Robson (2000) ont suggéré que les données de débit devraient s'étaler sur une longue période, de préférence au-delà de 50 ans, puisque ces séries permettent de mieux mettre à l'épreuve les tests statistiques.

7. BIBLIOGRAPHIE

Brochu R. and Laprise R. 2007. Surface water and energy budgets over the Mississippi and Columbia river basins as simulated by two generations of the Canadian Regional Climate Model. *Atmos.-Ocean*, 45(1), 19-35.

Frank C., Ruck B. 2008. Numerical study of the airflow over forest clearings. *Forestry*, Vol. 81, N° 3, pp. 259-277.

Frigon A., Slivitzky M., Caya D., Roy R. 2007. Construction of hydro-climatic projections and first-order estimation of their associated uncertainties from Regional Climate Model simulation : Application to water management of hydropower reservoirs in Québec. *La Houille*, 6 : 97-103.

Gagnon P., Konan B., Rousseau A.N. and Slivitzky M. (Accepté 3/11/2008). Hydrometeorological validation of a Canadian Regional Climate Model Simulation within the Chaudière and Châteauguay watersheds, Québec, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*.

Hamburg, M. 1987. *Statistical Analysis for Decision Making*. 4th edition. Harcourt Brace Jovanovich.

Kundzewicz Z., Radziejewski M. (ed.) 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. World Climate Programme – Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD – N° 1013. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

McCuen, 2003. *Modelling Hydrologic Change – Statistical Methods*. Lewis Publishers

Music B. and Caya D. 2007. Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi river basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydromet.*, 8(5), 969-988.

Nakicenovic N. and Swart R (Eds.) 2000. *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK, 570p.

Ostle B. and Malone L.C. 1988. *Statistics in research : Basic concepts and techniques for research workers*. 4th Edition. Iowa State University Press/AMES, 664p.

Parry M. 2002. Scenarios of climate impact and adaptation assessment. *Global Environmental Change* 12, 149-153.

Rousseau A.N., Savary S., Tremblay S., Thomassin P., Baker L., Rivet S., Larue B., Ghazalian P. 2008a. Développement du système de modélisation intégrée GIBSI (économie-hydrologie) et évaluation de pratiques de gestion bénéfiques (PGB) à l'échelle des bassins hydrographiques Bras d'Henri et Beaurivage, Québec. Development of the GIBSI integrated modelling framework (economic-hydrologic) and evaluation of beneficial management practices (BMPs) at the Bras d'Henri and Beaurivage Watersheds, Québec. Rapport No R-918. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ. 256p.

Rousseau, A.N., Lafrance P., Lavigne M.P., Savary S., Konan B., Quilbé R. 2008b. Développement de normes de performance agro-environnementales atteignables (NPA)

pour les pesticides à l'échelle des bassins versants. Rapport final, R-985. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ 325 pages. Série technique de l'initiative nationale de l'élaboration de normes agroenvironnementales, rapport no 4-29, 381 p.

Quilbé R., Rousseau A. N., Moquet J.-S., Savary S., Ricard S., Garbouj M. S. 2008a. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 101-110.

Quilbé R., Rousseau A. N., Moquet J.-S., Trinh N. B., Dibike Y., Gachon P., Chaumont D. 2008b. Assessing the effect of climate change on river flow using General Circulation Models and Hydrological Modelling – Application to the Chaudière river, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Association*, Vol. 33(1) : 73-94.

Scinocca, J.F. and McFarlane N.A. 2004. The variability of modelled tropical precipitation. *J. Atmos. Sci.*, 61, 1993-2015.

Triola M.F. 1998. *Elementary statistics*. Seventh Edition. Addison-Wesley, USA, 791p.

Villeneuve C., Richard F. 2007. *Vivre les changements climatiques : Réagir pour l'avenir*. Éditions Multimondes, Sainte-Foy, Canada, 449p.

Wilcox R.R. 2003. *Applying contemporary statistical techniques*. Academic Press, Los Angeles, USA, 608p.

Wilks, D.S. 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2nd Edition). Elsevier Academic Press Publications, New York, NY.

Zhang J. and Wu Y. 2007. *k*-Sample tests based on the likelihood ration. *Computational Statistics & Data Analysis* 51, 4682-4691.

ANNEXE

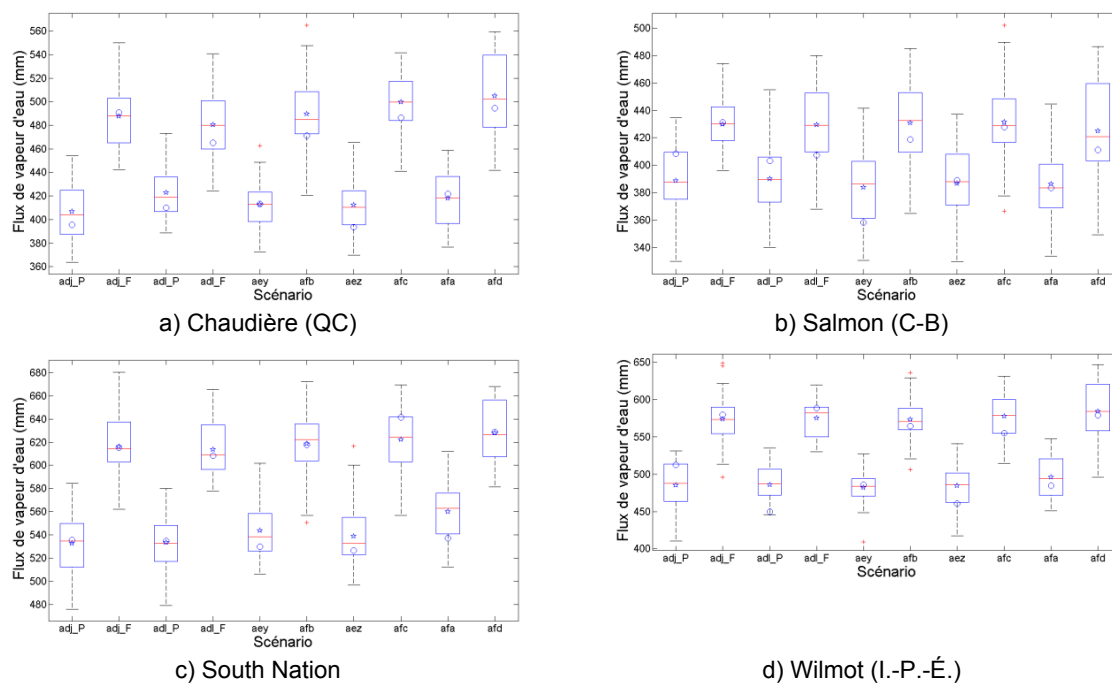


Figure A 1 Données de flux de vapeur d'eau de la surface vers l'atmosphère (positif vers le haut) sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins : a) Chaudière, b) Salmon River, c) South Nation et d) Wilmot

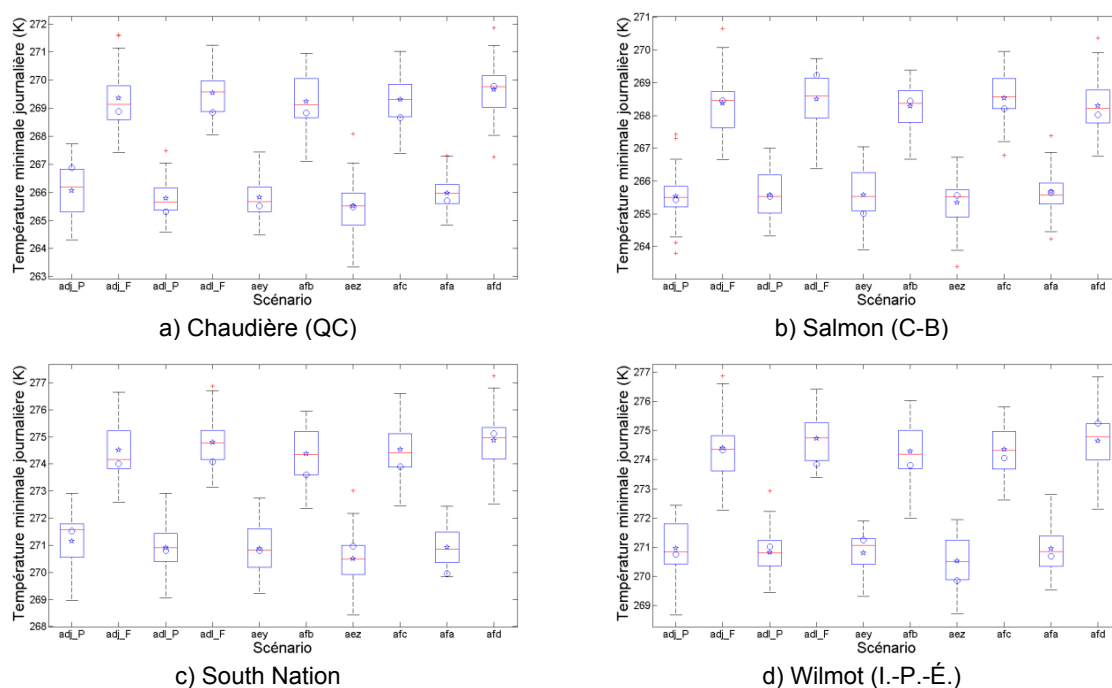


Figure A 2 Données de température minimale quotidienne à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins : a) Chaudière, b) Salmon, c) South Nation et d) Wilmot

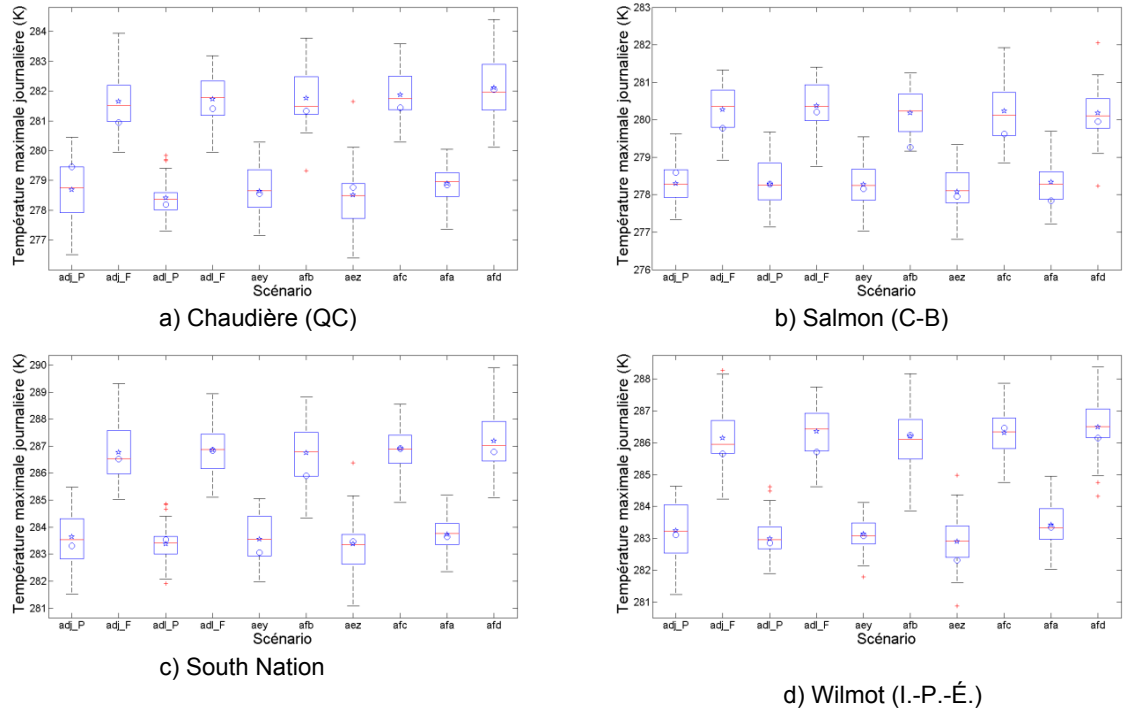


Figure A 3 Données de température maximale quotidienne à 2 mètres sur les 30 ans pour les périodes de référence et future de quatre bassins

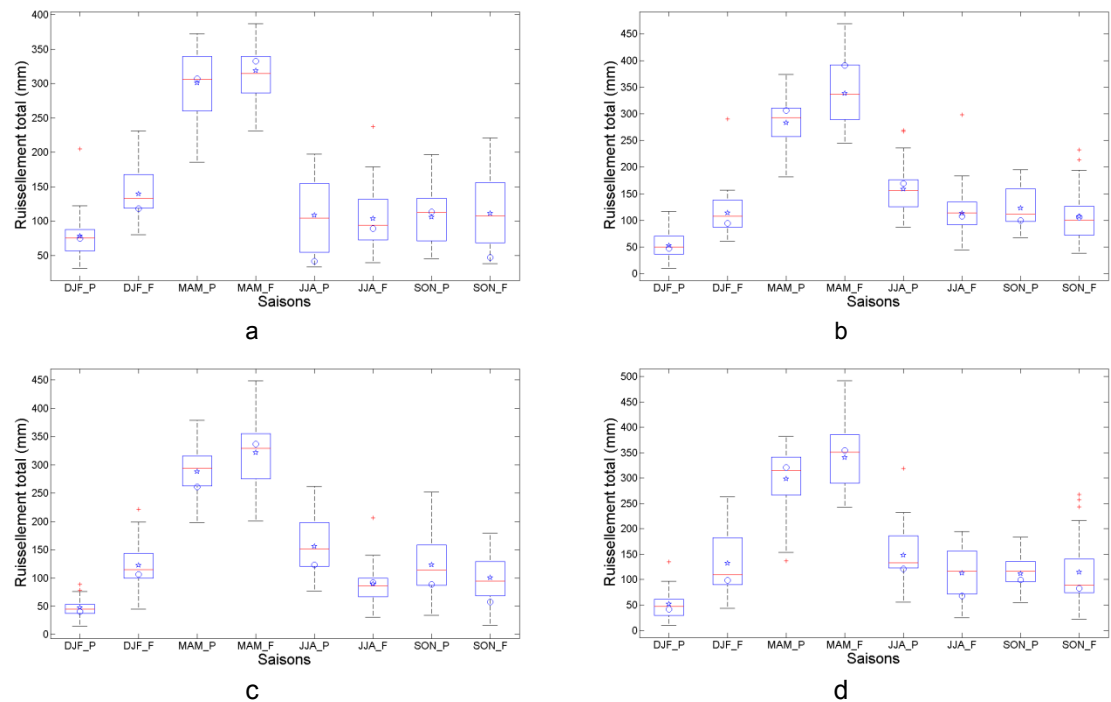


Figure A 4 Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Chaudière pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c) aez/afc et d) afa/afd

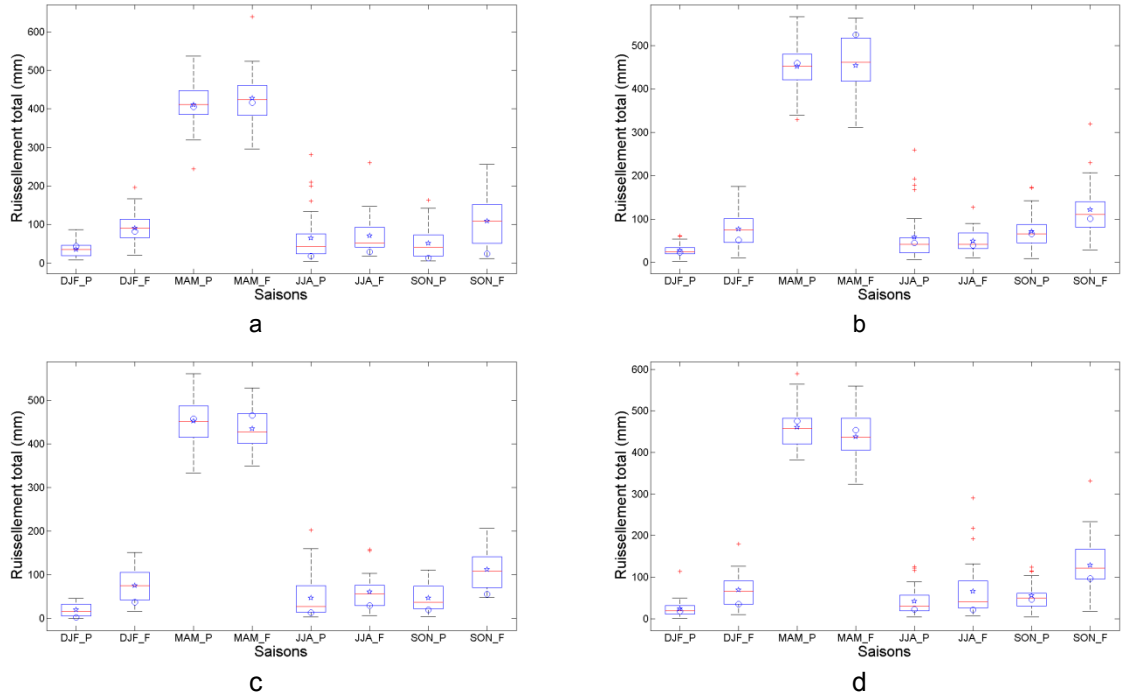


Figure A 5 Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Salmon pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c) aez/afc et d) afa/afd

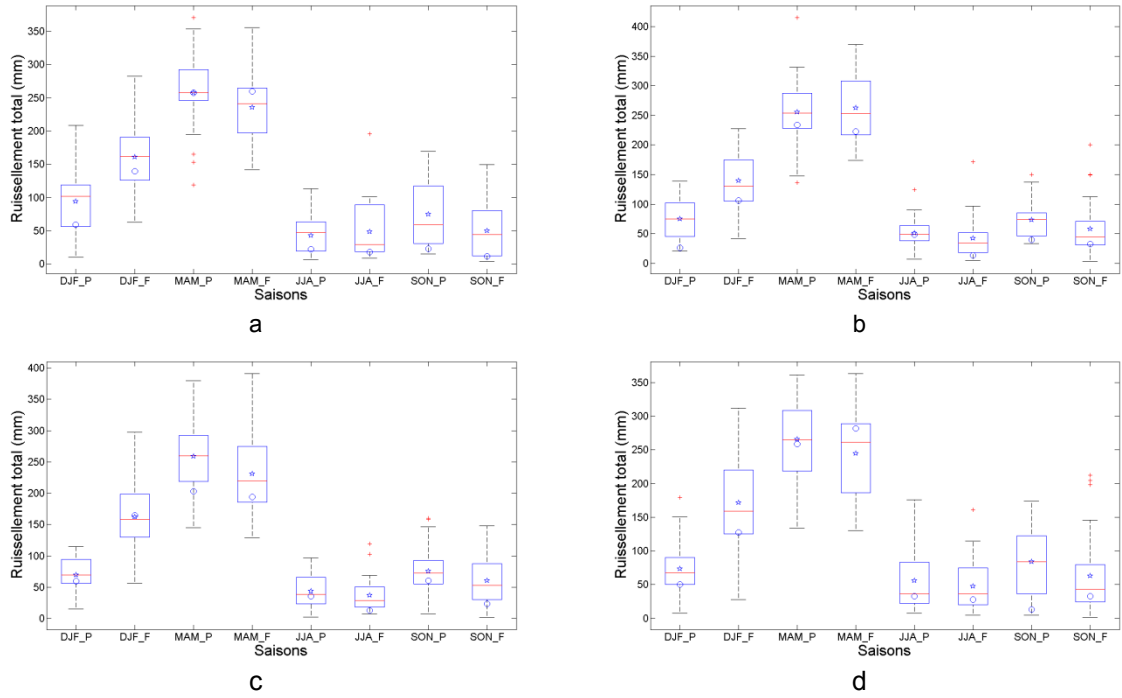


Figure A 6 Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur South Nation pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c) aez/afc et d) afa/afd

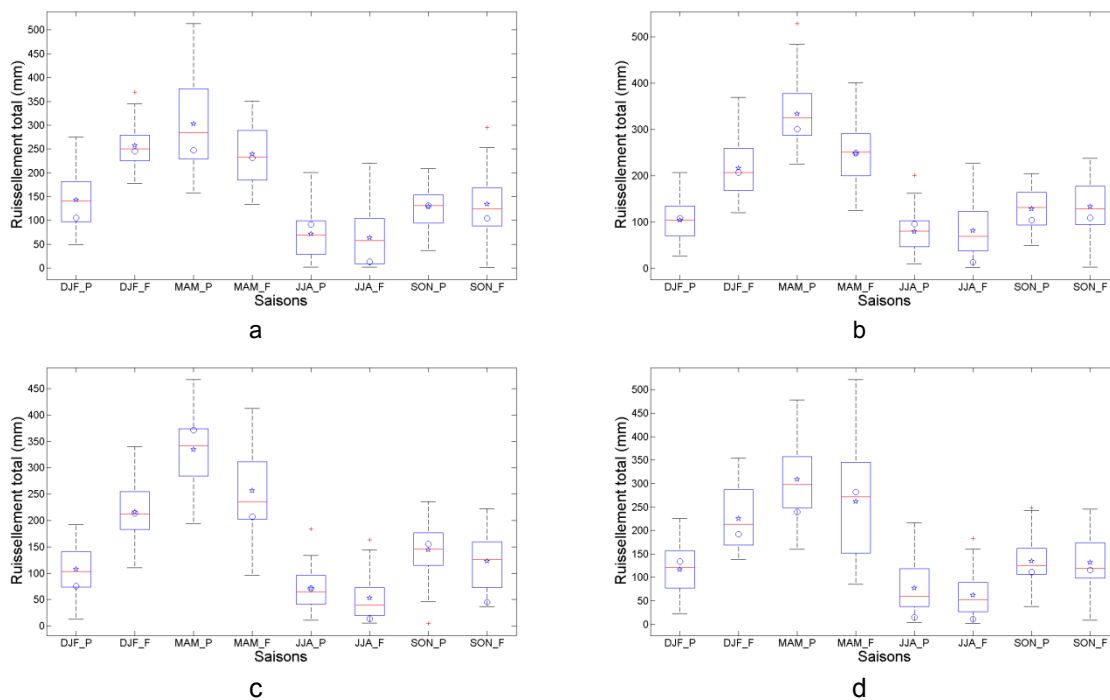


Figure A 7 Données de ruissellement total sur les 30 ans pour les périodes de référence et future par saison sur Wilmot pour quatre membres : a) adl, b) aey/afb, c) aez/afc et d) afa/afd

Tableau A 1 Seuil de signification des tests d'auto-corrélation (U), de tendance (K) et d'égalité des médianes (HW et HKW) et des distributions (ZC) des membres de chaque version

*Tests d'auto-corrélation, de tendance et d'égalité des distributions effectués sur les résidus après avoir enlevé la tendance commune des séries

(-) ou (+) : présence de tendance négative ou positive significative à l'une des séries

a) Taux de précipitation total – Période passée

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	aez	aez	afa	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0974	0.7088	0.0615	0.6882	0.9577	0.9977	0.8251	0.9937	*0.4577
	K	0.4866	0.7617			0.8444	0.8166	0.9006		
Salmon	U	0.5759	0.2912	0.6843	*0.5668	0.8251	0.4241	0.9543	0.1461	0.4749
	K	0.6556	0.5560			0.9289	0.0257	0.8444		
South N.	U	0.9543	0.9026	0.4643	0.7770	0.0199	0.5759	0.7088	0.6182	0.2721
	K	0.9573	0.3820			0.1695	0.6556	0.5560		
Wilmot	U	0.9026	0.5759	0.2905	0.9637	0.0199	0.2912	0.0199	0.5890	0.1452
	K	0.6816	0.4221			0.3265	0.0661	0.9006		

b) Taux de précipitation total – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	afb	afc	afd	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.8251	0.4241	0.3183	*0.8468	0.5759	0.4241	0.7088	0.0803	0.7794
	K	0.4430	0.4645			0.0716	0.3265	0.1206		
Salmon	U	0.8251	0.9026	0.3790	0.7396	0.5759	0.4241	0.9801	0.7538	*0.5603
	K	0.2765	0.5323			0.3629	0.5802	0.3444		
South N.	U	0.9543	0.9543	0.4290	0.2341	0.0457	0.7088	0.0974	0.4037	0.3516
	K	0.0309	0.8724			0.5802	0.6816	0.3629		
Wilmot	U	0.2912	0.1749	0.0993	0.4825	0.9026	0.0457	0.9543	0.4818	0.9447
	K	0.3092	0.5560			0.4221	0.5092	0.1123		

c) Flux de vapeur d'eau – Période passée

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	aez	aez	afa	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0974	0.7088	0.0133	*0.0041	0.2912	0.0070	0.7088	0.4580	*0.5343
	K	0.5802	0.7617			0.5092	0.7346	0.9006		
Salmon	U	0.1749	0.0457	0.8534	0.3528	0.8251	0.9026	0.9026	0.8849	0.4749
	K	0.3265	0.0257			0.1587	0.6300	0.4866		
South N.	U	0.7088	0.8251	0.9117	*0.7752	0.7088	0.2912	0.7088	0.0019	*0.0097
	K	0.9573	0.7346			0.1587	0.4221	0.6816		
Wilmot	U	0.4241	0.0974	0.8766	*0.5399	0.8251	0.2912	0.7088	0.1487	*0.0858
	K	0.4221	0.5323			0.4866	0.0901	0.5098		

d) Flux de vapeur d'eau – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	afb	afc	afd	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0199	0.8251	0.4290	*0.5071	0.8251	0.9026	0.9801	0.1972	*0.1421
	K	0.4430	0.6300			0.5560	0.4866	0.2320		
Salmon	U	0.9930	0.5759	0.7394	*0.4757	0.0199	0.4241	0.7088	0.9139	0.6282
	K	0.5802	0.4017			0.0971	0.1123	0.9289		
South N.	U	0.8251	0.9026	0.6414	*0.6964	0.4241	0.9026	0.9930	0.6160	*0.9672
	K	0.4866	0.6049			0.3092	0.9006	0.3629		
Wilmot	U	0.2912	0.7088	0.9117	*0.7073	0.7088	0.9543	0.0974	0.4340	*0.1188
	K	0.7346	0.6300			0.3265	0.9006	0.2183		

e) Ruissellement total – Période passée

		MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
Bassin	Tests	adj	adl	H_W	Z_C	aeY	aeZ	afA	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0974	0.2912	0.0594	0.1638	0.0457	0.9801	0.8251	0.9972	0.4975
	K	0.9289	0.9858			0.0901	0.8166	0.5323		
Salmon	U	0.1749	0.5759	0.3329	*0.1971	0.9930	0.0974	0.4241	0.0747	0.3061
	K	0.2925	0.5323			0.8444	0.0716	0.9573		
South N.	U	0.8251	0.9026	0.7394	0.6856	0.0974	0.2912	0.4241	0.7388	0.6671
	K	0.5802	0.8166			0.2320	0.3265	0.5092		
Wilmot	U	0.9026	0.9543	0.2581	0.6499	0.4241	0.7088	0.0199	0.8592	0.4450
	K	0.8724	0.7346			0.5092	0.4017	0.9858		

f) Ruissellement total – Période future

		MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
Bassin	Tests	adj	adl	H_W	Z_C	afB	afC	afD	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.2912	0.0974	0.2226	0.1674	0.8251	0.1749	0.2912	0.1172	0.7933
	K	0.1294	0.5092			0.3444	0.5802	0.0518		
Salmon	U	0.5759	0.5759	0.3403	0.2634	0.5759	0.1749	0.5759	0.7149	0.2359
	K	0.2925	0.6300			0.3092	0.6300	(+)0.0037		
South N.	U	0.8251	0.2912	0.3403	0.1365	0.2912	0.1749	0.0457	0.5457	0.0284
	K	0.1484	0.7617			0.4645	0.7617	0.0477		
Wilmot	U	0.2912	0.1749	0.1335	0.5706	0.4241	0.1749	0.8251	0.4136	0.9690
	K	0.6816	0.8724			0.7617	0.7617	0.0145		

g) Neige au sol – Période passée

		MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
Bassin	Tests	adj	adl	H_W	Z_C	aeY	aeZ	afA	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0974	0.7088	0.8883	*0.6354	0.2912	0.0199	0.8251	0.0680	0.4427
	K	0.3265	0.5323			0.4430	0.0257	0.4645		
Salmon	U	0.4241	0.0070	0.2340	0.4297	0.0199	0.0974	0.1749	0.5660	*0.4844
	K	0.7890	0.0835			(-)0.0097	0.0901	0.3820		
South N.	U	0.1749	0.2912	0.8073	0.1335	0.0974	0.4241	0.7088	0.4315	0.2601
	K	0.0160	0.2925			0.7671	0.0774	0.5802		
Wilmot	U	0.0974	0.2912	0.8883	0.4875	0.1749	0.0974	0.9026	0.1020	*0.8862
	K	(-)3.8e-4	0.2765			0.9858	0.5802	0.9289		

h) Neige au sol – Période future

		MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
Bassin	Tests	adj	adl	H_W	Z_C	afB	afC	afD	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.9026	0.0457	0.8534	*0.9038	0.8251	0.5759	0.0974	0.7736	0.5289
	K	0.9289	0.6556			0.9573	0.8166	0.0214		
Salmon	U	0.0457	0.8251	0.6520	*0.8534	0.4241	0.1749	0.9026	0.8297	0.7756
	K	0.4866	0.9858			0.1695	0.0402	0.7079		
South N.	U	0.7088	0.8251	0.3329	0.0323	0.8251	0.8251	0.8251	0.1927	0.4063
	K	0.1587	0.0774			0.7346	0.6816	0.2053		
Wilmot	U	0.0457	0.8251	0.3112	*0.7818	0.5759	0.9026	0.9543	0.4928	*0.9809
	K	0.7346	0.4645			0.3629	0.8724	0.5560		

i) Température à 2 mètres – Période passée

		MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
Bassin	Tests	adj	adl	H_W	Z_C	aeY	aeZ	afA	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.7088	0.5759	0.2643	*0.4308	0.1749	0.7088	0.9543	0.0610	*0.4053
	K	0.5802	0.3629			0.6556	0.8724	0.4221		
Salmon	U	0.0974	0.0974	0.9352	*0.4489	0.9543	0.8251	0.2912	0.3413	*0.7233
	K	0.7346	0.5802			0.5092	0.8166	0.5092		
South N.	U	0.4241	0.4241	0.3403	*0.3187	0.7088	0.4241	0.9026	0.1225	*0.9525
	K	0.8724	0.5323			0.8444	0.7890	0.6816		
Wilmot	U	0.4241	0.5759	0.3478	*0.1107	0.4241	0.2912	0.8251	0.1443	*0.7627
	K	0.1123	0.1587			0.3092	0.9289	0.4017		

j) Température à 2 mètres – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	afb	afc	afd	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.0457	0.9801	0.4290	*0.4236	0.9543	0.7088	0.5759	0.2286	*0.0385
	K	0.5802	0.3629			0.7346	0.7346	0.3092		
Salmon	U	0.4241	0.9026	0.5298	*0.2936	0.1749	0.9543	0.9026	0.7735	*0.8610
	K	0.4241	0.9026			0.1749	0.9543	0.9026		
South N.	U	0.5759	0.9801	0.2340	*0.6900	0.9026	0.9026	0.2912	0.2320	*0.4518
	K	0.6049	0.5323			0.4866	0.8444	0.4221		
Wilmot	U	0.0023	0.7088	0.1580	*0.5871	0.2912	0.5759	0.4241	0.2655	*0.4157
	K	0.4017	0.2462			0.9006	0.9573	0.8444		

k) Température minimale quotidienne à 2 mètres – Période passée

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	aeY	aeZ	afA	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.7088	0.5759	0.1907	*0.3013	0.4241	0.1749	0.9543	0.0541	*0.6140
	K	0.3092	0.1587			0.8724	0.7346	0.2765		
Salmon	U	0.2912	0.0978	0.8073	*0.4113	0.2912	0.9543	0.1749	0.3629	*0.8862
	K	0.5802	0.2183			0.4645	0.9289	0.4221		
South N.	U	0.4241	0.4241	0.2905	*0.4451	0.4241	0.1749	0.9801	0.1580	*0.9428
	K	0.6816	0.5560			0.7079	0.7890	0.5092		
Wilmot	U	0.4241	0.8251	0.4290	*0.1095	0.0070	0.2912	0.2912	0.2093	*0.7167
	K	0.0716	0.1045			0.3629	0.9573	0.3820		

l) Température minimale quotidienne à 2 mètres – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	afb	afc	afd	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.1749	0.9026	0.3403	*0.1934	0.8251	0.7088	0.5759	0.1414	*0.0654
	K	0.5802	0.5323			0.9573	0.8444	0.3629		
Salmon	U	0.7088	0.8251	0.4464	*0.1766	0.1749	0.9026	0.9801	0.3984	*0.8849
	K	0.9573	0.8724			0.2765	0.2320	0.8724		
South N.	U	0.4241	0.7088	0.1958	*0.1713	0.9026	0.7088	0.2912	0.1805	*0.4422
	K	0.7346	0.8724			0.6049	0.8724	0.4221		
Wilmot	U	0.0974	0.4241	0.1087	*0.6796	0.5759	0.9543	0.4241	0.2974	*0.1761
	K	0.3629	0.2053			0.9573	0.8166	0.7346		

m) Température maximale quotidienne à 2 mètres – Période passée

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	aeY	aeZ	afA	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.7088	0.4241	0.1858	*0.1952	0.9026	0.7088	0.8251	0.0789	*0.5543
	K	0.6300	0.4221			0.8724	0.7079	0.4866		
Salmon	U	0.0974	0.0457	0.9234	0.3992	0.8251	0.5759	0.9543	0.4807	*0.7475
	K	0.3820	0.3820			0.8166	0.5092	0.9006		
South N.	U	0.4241	0.7088	0.3632	*0.3078	0.9801	0.4241	0.4241	0.1385	*0.7247
	K	0.8444	0.9289			0.7617	0.6816	0.9858		
Wilmot	U	0.4241	0.2912	0.1297	*0.0740	0.9026	0.5759	0.8251	0.0250	*0.5777
	K	0.3820	0.4017			0.9289	0.6816	0.4017		

n) Température maximale quotidienne à 2 mètres – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_W	Z_C	afb	afc	afd	H_{KW}	Z_C
Chaudière	U	0.1749	0.8251	0.5493	*0.6368	0.8251	0.7088	0.2912	0.3689	*0.5095
	K	0.4866	0.5092			0.2610	0.4017	0.1123		
Salmon	U	0.0457	0.7088	0.5298	*0.4899	0.1749	0.8251	0.7088	0.9880	*0.8066
	K	0.9006	0.4866			0.7346	0.1387	0.4017		
South N.	U	0.4241	0.5759	0.3711	*0.2342	0.9543	0.7088	0.5759	0.3843	*0.7670
	K	0.9858	0.7079			0.5323	0.5323	0.0835		
Wilmot	U	0.0974	0.7088	0.2398	*0.8519	0.8251	0.8251	0.7088	0.3321	*0.5636
	K	0.5802	0.4430			0.9858	0.6816	0.6816		

o) Amplitude du vent soutenu à 10 mètres – Période passée

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_w	Z_c	ae _y	ae _z	af _a	H_{KW}	Z_c
Chaudière	U	0.4241	0.9930	0.0176	0.1344	0.5759	0.7088	0.1749	0.6367	0.6789
	K	0.1484	0.5092			0.1294	0.9289	0.2462		
Salmon	U	0.9543	0.5759	9.0e-4	0.0357	0.8251	0.2912	0.9026	0.3011	0.8867
	K	0.9573	0.3444			0.2320	0.8166	0.9006		
South N.	U	0.8251	0.8251	0.0657	0.7992	0.8251	0.9543	0.7088	0.1755	0.1350
	K	0.8444	0.2462			0.6049	0.9289	0.6556		
Wilmot	U	0.7088	0.1749	0.0011	0.0940	0.9543	0.7088	0.5759	0.9227	0.0956
	K	0.1484	0.6049			0.6556	0.7890	0.7890		

p) Amplitude du vent soutenu à 10 mètres – Période future

Bassin	Tests	MRCC V4.2.0				MRCC V4.2.3				
		adj	adl	H_w	Z_c	af _b	af _c	af _d	H_{KW}	Z_c
Chaudière	U	0.5759	0.7088	0.8534	0.5664	0.9543	0.2912	0.5759	0.3153	0.6486
	K	0.3820	0.6816			0.7617	0.3092	0.4866		
Salmon	U	0.4241	0.8251	0.5895	0.5133	0.7088	0.0974	0.5759	0.6500	0.5827
	K	0.2183	0.2925			0.1484	0.8444	0.0610		
South N.	U	0.9930	0.4241	0.9705	0.9334	0.8251	0.4241	0.2912	0.3559	0.4900
	K	0.7079	0.9573			0.7346	0.5092	0.7346		
Wilmot	U	0.1749	0.7088	0.2398	0.0497	0.5759	0.0974	0.5759	0.2373	*0.8202
	K	0.6816	0.0901			0.7617	0.6049	0.2925		

Tableau A 2 Seuil de signification des tests d'auto-corrélation (U), de tendance (K) et d'égalité des médianes (HW et HKW) et des distributions (ZC) des membres issus de deux versions

*Tests d'auto-corrélation, de tendance et d'égalité des distributions effectués sur les résidus après avoir enlevé la tendance commune des séries

a) Taux de précipitation total

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0 adj	V4.2.3 aez	H_w	Z_c	V4.2.0 adl	V4.2.3 afc	H_w	Z_c
Chaudière	U	0.0974	0.9543			0.8251	0.5759		
	K	0.4866	0.3265	0.5011	0.2662	0.4017	0.3629	0.7731	*0.7452
Salmon	U	0.1749	0.1749	0.6204	*0.0448	0.8251	0.7088	0.8187	0.7611
	K	0.3629	0.3629			0.2765	0.7346		
South Nation	U	0.9543	0.5759	0.1907	0.4993	0.9543	0.7088	0.2116	0.0903
	K	0.9573	0.6556			0.0309	0.6816		
Wilmot	U	0.9026	0.2912	0.5493	0.5232	0.2912	0.0457	0.7283	0.8061
	K	0.6816	0.0661			0.3092	0.5092		

b) Flux de vapeur d'eau

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0 adj	V4.2.3 aez	H_w	Z_c	V4.2.0 adl	V4.2.3 afc	H_w	Z_c
Chaudière	U	0.0974	0.0070	0.2905	*0.3947	0.0199	0.9026	0.0850	*0.6685
	K	0.9006	0.8724			0.4645	0.4645		
Salmon	U	0.1749	0.9026	0.7062	0.9786	0.2912	0.4241	0.9117	0.9305
	K	0.3265	0.6300			0.1484	0.1123		
South Nation	U	0.7088	0.2912	0.7394	*0.8095	0.8251	0.5759	0.4035	*0.8898
	K	0.4866	0.7346			0.6300	0.5560		
Wilmot	U	0.7088	0.4241	0.8534	*0.7255	0.2912	0.9543	0.5692	*0.6589
	K	0.8166	0.7346			0.4221	0.6300		

c) Ruissellement total

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0 adj	V4.2.3 aez	H_w	Z_c	V4.2.0 adl	V4.2.3 afc	H_w	Z_c
Chaudière	U	0.0974	0.9801	0.2838	0.2944	0.2912	0.1749	0.8073	0.7228
	K	0.9289	0.8166			0.1294	0.5802		
Salmon	U	0.7088	0.0974	0.7618	0.0451	0.5759	0.1749	0.6414	0.4056
	K	0.6300	0.0716			0.2925	0.6300		
South Nation	U	0.8251	0.2912	0.0773	0.1078	0.8251	0.1749	0.2772	0.2510
	K	0.5802	0.3265			0.1484	0.7617		
Wilmot	U	0.9026	0.7088	0.4119	0.4495	0.2912	0.1749	0.5997	0.6366
	K	0.8724	0.4017			0.6816	0.7617		

d) Neige au sol

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0 adj	V4.2.3 aez	H_w	Z_c	V4.2.0 adl	V4.2.3 afc	H_w	Z_c
Chaudière	U	0.0974	0.1749	8.5e-4	*0.1243	0.9801	0.5759	0.0021	0.0684
	K	0.5560	0.9026			0.1387	0.8166		
Salmon	U	0.4241	0.0457	0.1624	0.0627	0.0457	0.0974	0.2707	*0.3276
	K	0.7890	0.4221			0.9289	0.9289		
South Nation	U	0.9026	0.0974	0.0026	*0.0309	0.7088	0.8251	0.1494	0.2055
	K	0.7346	0.7346			0.1587	0.6816		
Wilmot	U	0.8251	0.2912	3.2 e-4	*0.0032	0.0457	0.9026	0.0127	*0.0134
	K	0.1123	0.3092			0.4430	0.9006		

e) Température à 2 mètres

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c	V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c
		adj	aez			adl	afc		
Chaudière	U	0.7088	0.7088	0.0724	*0.2079	0.0457	0.7088	0.5895	*0.6398
	K	0.7079	0.7079			0.6300	0.5092		
Salmon	U	0.0023	0.8251	0.2458	*0.3277	0.4241	0.9801	0.9705	*0.4789
	K	0.6816	0.6816			0.9006	0.2462		
South Nation	U	0.4241	0.4241	0.0484	*0.0317	0.5759	0.9026	0.5201	*0.5064
	K	0.8724	0.4866			0.6300	0.6556		
Wilmot	U	0.4241	0.2912	0.0824	*0.2502	0.0199	0.5759	0.6952	*0.4977
	K	0.3265	0.3444			0.7346	0.6049		

f) Température minimale quotidienne à 2 mètres

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c	V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c
		adj	aez			adl	afc		
Chaudière	U	0.7088	0.4241	0.0281	*0.2568	0.1749	0.7088	0.9352	*0.6187
	K	0.6300	0.8166			0.6556	0.7890		
Salmon	U	0.0974	0.9543	0.6735	*0.5661	0.7088	0.9801	0.4035	*0.2745
	K	0.6556	0.9858			0.9006	0.6816		
South Nation	U	0.4241	0.4241	0.0112	*0.0490	0.4241	0.9026	0.8187	*0.4991
	K	0.5802	0.6049			0.7346	0.6816		
Wilmot	U	0.4241	0.2912	0.0748	*0.1948	0.0974	0.8251	0.9352	*0.6149
	K	0.1695	0.3444			0.7346	0.6556		

g) Température maximale quotidienne à 2 mètres

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c	V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c
		adj	aez			adl	afc		
Chaudière	U	0.7088	0.7088	0.2973	*0.4298	0.1749	0.7088	0.2973	*0.3229
	K	0.9289	0.8166			0.6049	0.3820		
Salmon	U	0.0199	0.5759	0.2643	*0.6445	0.1749	0.8251	0.7618	*0.2322
	K	0.5323	0.2925			0.7079	0.1387		
South Nation	U	0.4241	0.4241	0.2519	*0.5379	0.4241	0.7088	0.3711	*0.2301
	K	0.8724	0.6049			0.9289	0.5092		
Wilmot	U	0.7088	0.4241	0.1188	*0.3011	0.0974	0.8251	0.3413	*0.9342
	K	0.6556	0.6049			0.6556	0.5802		

h) Amplitude du vent soutenu à 10 mètres de hauteur

Bassin	Test	Période passée				Période future			
		V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c	V4.2.0	V4.2.3	H_w	Z_c
		adj	aez			adl	afc		
Chaudière	U	0.4241	0.7088	0.0364	0.0433	0.5759	0.2912	0.3711	0.5948
	K	0.1484	0.9289			0.3820	0.3092		
Salmon	U	0.9543	0.2952	0.0679	0.2860	0.4241	0.0974	0.5895	0.1056
	K	0.9573	0.8166			0.2183	0.8444		
South Nation	U	0.8251	0.9543	0.1023	0.6776	0.9930	0.4241	0.5793	0.6972
	K	0.8444	0.9289			0.7079	0.5092		
Wilmot	U	0.7088	0.7088	0.3183	0.8462	0.1749	0.5759	0.0773	0.1589
	K	0.1484	0.7890			0.6816	0.7079		