

**Effets des changements climatiques
sur la recharge de bassins versants de
l'est du canada**

Rapport de recherche No R-1049

Janvier 2009

Effets des Changements Climatiques sur la recharge de bassins versants de l'Est du Canada.

Rapport final

Préparé par :
Gwenael Carrer¹
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

Rapport N° R-1049

Janvier 2009

ISBN : 978-2-89146-593-9

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
RÉSUMÉ	1
1 INTRODUCTION	3
1.1 Études antérieures :	4
2 MATÉRIEL ET MÉTHODE	7
2.1 Sites à l'étude.....	7
2.2 Données climatiques du MRCC.....	7
2.3 Modélisation	8
2.3.1 Outils informatiques	8
2.3.2 Attribution des données d'entrée dans le modèle Hydrotel	9
Test statistiques	10
2.4	10
2.5 Simulations.....	11
3 RÉSULTATS	13
3.1 Tests de similarité entre les membres d'une même version du MRCC.....	13
3.2 Évolution du ruissellement suite aux CC.....	13
3.2.1 Wilmot.....	14
3.2.2 Beaurivage.....	15
3.2.3 South Nation	16
3.3 Comparaison des débits d'étiage observés et simulés	17
3.4 Comparaisons du ruissellement et de l'évapotranspiration : simulations par HYDROTEL et simulations du MRCC.....	18

4	DISCUSSION	21
5	CONCLUSION.....	25
6	REMERCIEMENTS	27
7	RÉFÉRENCES	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Localisation des zones d'étude.....	35
Figure 2	Topographie du bassin versant de Wilmot. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.....	36
Figure 3	Topographie du bassin versant de Beaurivage. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.....	37
Figure 4	Topographie du bassin versant de South Nation. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.....	38
Figure 5	Fréquences cumulées du ruissellement annuel du bassin versant de Wilmot (a) : période passée (1961-1990) pour les membres adj et adl de la version MRCC_4.2.0, ainsi que le membre aey de la version MRCC_4.2.3. (b) : période future (2041-2070) pour les membres adj et adl de la version MRCC_4.2.0, ainsi que les membres aey de la version MRCC_4.2.3. Le débit observé à la station 01CB004 est pris comme référence.	39
Figure 6	Débits saisonniers observés sur le bassin de Wilmot à la station hydrologique de référence 01CB004 (1972-2001), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1er et 3e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.....	40

- Figure 7 Fréquence cumulée du ruissellement annuel du bassin versant de Beaurivage de la période passée (1961-1990) et future (2041-2070) pour le membre *adj* MRCC_4.2.0. Le ruissellement observé à la station 02PJ007 est pris comme référence. 41
- Figure 8 Débits saisonniers observés sur le bassin de Beaurivage à la station hydrologique de référence 02PJ007 (1961-1990), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales. 42
- Figure 9 Fréquence cumulée des débits annuels du bassin versant de South Nation (a) : période passée (1961-1990) pour les membres *adj* MRCC_4.2.0 et *afa* MRCC-4.2.3. Période future (2041-2070) pour les membres *adj* MRCC_4.2.0 et *afa* MRCC_4.2.3. Les débits observés à la station 02PJ007 sont pris comme référence. 43
- Figure 10 Débits saisonniers observés sur le bassin de South Nation à la station hydrologique de référence 02LB005 (1961-1990), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales. 44
- Figure 11 Comparaison inter membres du ruissellement annuel et de l'évapotranspiration réelle annuelle simulés sur la période (1961-1990) par HYDROTEL (H) et par le MRCC (M) (mm/an). Variables simulées sur Wilmot (a), sur Beaurivage (b) et sur

South Nation (c). Les membres *adj* et *adl* sont issus de la version MRCC_4.2.0 et les membres *aei*, *aez* et *afa* sont issus de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.45

Figure 12 Comparaison du bilan hydrologique (*Pcp*, *Rof*, *Qfs*) simulé par le MRCC et HYDROTEL entre 1961 et 1990 d’après le membre *adj* de la version MRCC_4.2.0 (mm/an)..... 46

Figure 13 Évolution inter-membre de la moyenne saisonnière des débits sur 30 ans entre la période 1961-1990 et la période 2041-2070 (%). Le MRCC_4.2.0 est composé des membres *adj* et *adl* tandis que le MRCC_4.2.3 est composé des membres *aei*, *aez* et *afa*. Les mêmes comparaisons ont été effectuées sur Wilmot (a), Beaurivage (b) et South Nation (c).47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Données générales morphologiques et climatiques des quatre bassins versants étudiés.	48
Tableau 2	Tableau 2 : Coefficients de Nash (N) et rapports débits simulés sur débits observés (R) obtenus lors des études antérieures et pour cette étude durant les périodes de calage (c) et de vérification (v). Wilmot (c) 22.07.02 - 30.09.04 ; (v) 01.05.05 – 30.09.06. Beaurivage (c) 01.10.85 – 30.09.89 ; (v) 01.10.89 – 30.09.94. South Nation (c) 01.10.95 – 30.09.01 ; (v) 01.10.01 – 30.09.05.	48
Tableau 3	GCM, Modèles GES et membres utilisés dans cette étude.	49
Tableau 4	Test de similarité (Zc) des données annuelles de ruissellement, de précipitation, d'évapotranspiration réelle pour les trois bassins versants en fonction de la version du MRCC et la période de simulation.	49
Tableau 5	Débits d'étiage (juin à septembre) observés aux stations de référence et simulés sur les bassins de Wilmot (a), de Beaurivage (b), de South Nation (c) sur les périodes du passé (1961-1990) et du futur (2041-2070). Les stations observées sont : 01CB004 (1972-2001) pour Wilmot, 02PJ007 (1961-1990) pour Beaurivage et 02LB005 (1961-1990) pour South Nation. Les débits sont en m ³ /s.	50

RÉSUMÉ

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un projet sur l'impact potentiel des changements climatiques sur la recharge des aquifères au Canada. Trois applications précédemment développées avec le modèle hydrologique distribué HYDROTEL et étalonnées avec des données observées ont été utilisées pour cette étude, mais cette fois le modèle est alimenté par les données synthétiques du modèle climatique MRCC4. L'objectif était de simuler deux variables hydrologiques (ruissellement total et évapotranspiration réelle) et de les comparer aux variables issues du modèle MRCC sur trois petits bassins ($<10^4$ km²) de l'est du Canada: Wilmot (I.-P.-É.), Beaurivage (QC) et South Nation (ON). Des simulations ont été effectuées sur deux périodes de 30 ans, soit une de référence (1961-1990) et une future (2041-2070). Trois variables climatiques du MRCC (Pcp, Tmin, Tmax) ont été utilisées comme données d'entrée journalières. Afin d'augmenter la gamme de conditions climatiques possibles, deux versions du MRCC (4.2.0 et 4.2.3) comprenant respectivement deux et trois membres ont été utilisées d'après le scénario A2 de gaz à effet de serre.

Suite aux simulations, la première étape a consisté à réaliser des tests statistiques de similarité (Z_c) entre les résultats issus des différents membres. Puis, différentes échelles de temps (annuelle et saisonnière) ont été considérées pour étudier l'évolution du ruissellement entre les deux périodes. Enfin, les deux variables (ruissellement et évapotranspiration) ont été comparées aux valeurs simulées avec HYDROTEL. Les résultats des tests statistiques ont montré que les membres n'étaient pas significativement différents. Cependant, le faible jeu de données (30 ans) ne permet pas de lisser la variabilité propre à chaque membre. Ainsi, dans le futur, l'évolution du ruissellement annuel diffère entre les cinq membres, avec par exemple de -10% à +2% d'écart sur le bassin Wilmot. À l'échelle des saisons, on constate sur les trois bassins une

augmentation importante du ruissellement en hiver (+35% en moyenne), peu de variations au printemps et une diminution en été et en automne (-20% en moyenne) comparativement à la période de référence. Cette baisse du ruissellement en été influence directement les débits d'été qui chutent de 25%. La comparaison des modèles climatique et hydrologique suggère que ces derniers produisent des valeurs similaires de ruissellement et d'évapotranspiration réelle sur de petits bassins, même si des disparités ont été observées sur le bassin Beaurivage.

Mots clés : Ruissellement, évapotranspiration, changements climatiques, étiage, modélisation, HYDROTEL, MRCC

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, de nombreux scientifiques s'accordent sur les causes des changements climatiques (CC) et leurs impacts sur les sociétés préoccupent la communauté internationale. À la suite de la création du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 1988, une dizaine de modèles de circulation générale (MCG) ont été créés. Ces modèles fournissent d'importants renseignements sur la variabilité naturelle du système climatique global qui servent de support aux différents modèles régionaux du climat (MRC). Depuis plus de quinze ans, le modèle régional canadien du climat (MRCC) de Caya *et al.* (1995) et Caya and Laprise (1999) est l'outil de base de nombreuses études canadiennes (réf?).

Un des impacts occasionné par un réchauffement du climat de la Terre, serait une modification de l'hydrologie des bassins versants, induisant une diminution de la recharge des aquifères. De nombreuses études nord américaines se sont intéressées aux tendances issues de périodes d'enregistrement pluri-décennales de débits telles que celles produites par Douglas *et al.* (2000), Whitfields et Cannon (2000), Zhang *et al.* (2001), Burn et Hag Elnur (2002), Yue *et al.* (2003) et Rivard *et al.* (2008). Toutes ces études montrent des évolutions différentes en fonction des sites et de la période choisies, mais des tendances significatives à la hausse ou à la baisse sont souvent enregistrées, particulièrement au niveau des extrêmes (débits minimums et maximums). Cependant, ces études fournissent des tendances basées sur le passé et il est souvent présumé que les changements climatiques pourraient s'accélérer..

Coupler un modèle climatique à un modèle hydrologique permet d'étudier le comportement hydrologique d'un bassin versant avec un climat prédit. Ce dernier est inévitablement empreint

d'incertitude, mais il représente probablement le meilleur outil de simulations du système climatique. En effet, les modèles hydrologiques sont assez robustes pour décrire les fluctuations des débits à partir de données météorologiques (ex. : précipitations, température minimale, température maximale) fournies par un modèle régional ou global (MRC ou MCG) .

Les objectifs de cette étude sont : (i) de simuler deux variables hydrologiques (ruissellement total et évapotranspiration réelle) et de les comparer aux variables issues du modèle MRCC sur trois petits bassins (10^4 km^2) de l'est du Canada: Wilmot (Î.-P.-É.), Beauvillage (QC) et South Nation (ON) et (ii) d'estimer la capacité du MRCC à reproduire les débits. Trois applications précédemment développées avec le modèle hydrologique distribué HYDROTEL et étalonnées avec des données observées ont été utilisées pour cette étude, mais cette fois le modèle est alimenté par les données synthétiques de précipitations (*pcp*) et de températures minimales (*stmn*) et maximales (*stmx*) issues du modèle climatique MRCC4. Deux périodes de 30 ans ont été utilisées pour les simulations, soit une de référence (1961-1990) et une future (2041-2070). Afin d'augmenter la gamme de conditions climatiques possibles, deux versions du MRCC (4.2.0 et 4.2.3) comprenant respectivement deux et trois membres ont été utilisées d'après le scénario A2 de gaz à effet de serre.

1.1 Études antérieures :

Quelques études utilisant les modèles hydrologiques alimentés par des données de précipitations et de températures provenant de modèles climatiques ont été réalisées au Canada comme : Rousseau *et al.* (2007), Quilbé *et al.* (2008), Rousseau *et al.* (2008a). Ces projets ont utilisé le modèle hydrologique distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001 et Turcotte *et al.*, 2003). Pour améliorer la représentativité des estimations des débits futurs, Quilbé *et al.* (2008) comparent les résultats de trois méthodes de calculs pour le bassin de la rivière Chaudière (QC).

Les données sont issues directement ou indirectement de trois MCG et utilisent deux scénarios de gaz à effet de serre (GES). À cette large gamme de combinaisons s'ajoutent différents membres dont les variables climatiques diffèrent à cause des différentes conditions initiales imposées. L'ensemble des combinaisons possibles indique une légère diminution de la lame d'eau annuelle. Cependant sur une base mensuelle on peut y voir une augmentation des débits en hiver et une diminution sur le reste de l'année.

Plusieurs études se sont aussi intéressées à la validité des données fournies par le MRCC : Brochu et Laprise (2007), Music et Caya (2007), Frigon *et al.* (2007) et Gagnon *et al.* (accepté). L'étude statistique de Gagnon *et al.* (accepté) analyse le comportement saisonnier de la version 4.1.1 du MRCC sur une période passée, vis à vis des données d'observations sur deux bassins versants de moins de 10^4 km² situés au sud de la rivière St Laurent, Québec. Pour assimiler les observations à une grille telle que vue par le MRCC, les auteurs pondèrent les données observées en fonction de la représentativité spatiale des stations. La méthode retenue pour la pondération entre les stations est la méthode des polygones de Thiessen (Dingman, 2002). Il ressort de cette étude que le MRCC fournit des résultats acceptables dans l'ensemble, mais sous-estime généralement les températures minimales et surestime les précipitations dans les régions étudiées.

Toutes ces études montrent la nécessité de prendre en compte différents paramètres pour l'analyse du climat futur ainsi que l'utilisation d'une large gamme de scénarios. La plupart de ces études se sont intéressées à quelques variables climatiques sur un seul bassin versant et souvent de taille importante ($>10^4$ km²).

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Sites à l'étude

Trois petits bassins versants de l'est du Canada ont été étudiés (figure 1). Il s'agit des bassins des rivières Wilmot (île-du-Prince-Édouard, 59 km²), Beaurivage (Québec, 713 km²) et South Nation (Ontario, 3708 km²). La majorité des études antérieures citées se sont cantonnées à des bassins importants (>10⁴ km²), entre autres pour éviter les problèmes de résolutions et d'échelle. Dans cette étude, nous avons choisi d'étudier la capacité du MRCC à reproduire les débits sur de petits bassins. Les paramètres morphologiques principaux sont détaillés dans le tableau 1. Il existe une grande hétérogénéité au niveau du type de climat. Le bassin Wilmot possède un climat maritime alors que les bassins South Nation et Beaurivage, qui est un sous bassin de la rivière Chaudière (Québec), ont tous deux un climat continental. Ces trois bassins sont fortement agricoles; leurs pourcentages de terrains cultivés sont respectivement de 84% (Wilmot), 35% (Beaurivage) et 62% (South Nation).

2.2 Données climatiques du MRCC

Cinq variables climatiques du MRCC ont été utilisées dans cette étude:

- *Pcp* : précipitation totale quotidienne en mm/j.
- *Stmn* : température minimale quotidienne à deux mètres en K
- *Stmx* : température maximale quotidienne à deux mètres en K
- *Qfs* : flux de vapeur d'eau vers l'atmosphère (évapotranspiration) en mm/j

- *Rof* : ruissellement total en mm/j

Ces cinq variables ont été simulées d'après le pilote CGCM3, le scénario de GES A2 et suivant deux versions du modèle régional : MRCC4.2.0 et MRCC4.2.3. Pour compléter l'analyse des scénarios, cinq membres aux conditions initiales différentes ont été considérés (tableau 3). Les membres *adj* et *adl* de la version 4.2.0 sont issus de simulations continues entre 1961 et 2070. Les trois membres de la version 4.2.3 sont quant à eux issus de simulations différentes pour le passé et le futur mais conservent toutes leurs propriétés.

2.3 Modélisation

2.3.1 Outils informatiques

HYDROTEL est un logiciel de modélisation hydrologique distribuée ayant pour but la simulation des écoulements dans le réseau hydrographique (Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2003). Il utilise les données géomorphologiques du logiciel PHYSITEL (Royer *et al.*, 2006; Turcotte *et al.*, 2001; Rousseau *et al.*, en préparation) dont la physiographie est basée sur un modèle numérique d'altitude (MNA) de résolution 20 m x 20 m. La maille élémentaire d'HYDROTEL est composée d'unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) qui correspondent à des sous bassins élémentaires dont les caractéristiques sont homogènes sur l'ensemble de l'unité définie. HYDROTEL nécessite entre autres des données d'entrée météorologiques (précipitations, températures minimales et maximales) au pas de temps journalier ou horaire. Dans cette étude, ces trois variables proviennent des simulations du modèle climatique MRCC4.

Les calages des bassins versants ont tous été réalisés lors d'études précédentes : Wilmot et South Nation (Rousseau *et al.*, 2008b) et Beaurivage (Rousseau *et al.*, 2008a). Ils ont été réalisés

à l'aide du coefficient de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970)¹ qui permet de qualifier la qualité d'un calage (tableau 2).

Le MRCC est un modèle climatique régional, piloté dans cette étude par le modèle de circulation globale de troisième génération CGCM3 (McFarlane *et al.*, 2005; Scinocca *et al.*, 2008 soumis) et avec A2 comme scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES). Le scénario A2 est l'un des plus pessimistes et probablement le plus réalistes proposés par le GIEC (www.ipcc.ch). Le MRCC est un modèle climatique dont le domaine stéréographique (AMNO) définit des tuiles de 45 km de résolution vraie à 60°N.

2.3.2 Attribution des données d'entrée dans le modèle Hydrotel

Le modèle hydrologique HYDROTEL nécessite l'utilisation de stations météorologiques de référence. Pour que les résultats de débits à l'exutoire d'HYDROTEL puissent être comparés à ceux générés par les simulations climatiques du MRCC, il a fallu modifier les coordonnées des stations météorologiques et les mettre égales au centre des tuiles du domaine AMNO qui recouvrent chaque bassin. Les valeurs journalières des trois variables utilisées ne sont donc non plus affectées à une surface mais à un point (la station). Pour représenter les conditions climatiques du MRCC, il a été décidé d'utiliser les polygones de Thiessen pour interpoler les

1

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

où O : débit observé et S : débit simulé. . Le coefficient de Nash a au maximum une valeur égale à 1. Cette dernière valeur correspond à un calage parfait.

données météorologiques, basé sur l'étude de Gagnon *et al.* (accepté). Cette interpolation affecte à tout point la valeur de la station météorologique la plus proche. Le domaine est alors délimité par la médiatrice entre deux stations. Ainsi, les données climatiques « vues » par HYDROTEL sont les mêmes que celles « vues » par le MRCC (figures 2, 3 et 4).

Afin de valider cette approche, une vérification préalable des données a été réalisée sur Beaurivage qui contient quatre stations météorologiques. Des données climatiques fictives ont été imposées aux stations. Les résultats ont montré que les UHRH traversées par une médiatrice acquièrent des valeurs pondérées en fonction de la superficie inscrite dans chaque polygone. HYDROTEL décrit donc bien le climat décrit par le MRCC.

Un petit programme permettant de recalculer les données quotidiennes d'entrées de précipitations totales d'après les données quotidiennes de sortie d'HYDROTEL (précipitations liquide et solides, températures minimales et maximales) a été réalisé dans cette étude. Ce programme nous permet de s'assurer que les précipitations simulées par HYDROTEL correspondent aux données du MRCC.

2.4 Test statistiques

Un récent test statistique nommé Z_c (Zhang et Wu, 2007) a été utilisé pour définir un degré de similarité entre les membres d'une même version du MRCC. Cette étape permet de voir si les changements de conditions initiales des différents membres influencent les données. Ce test utilise les tests de Wad Wolfowitz (auto-corrélation) et de Mann-Kendall (stationnarité). Il est réalisé sur les trente valeurs annuelles des variables : *Rof*, *Pcp*, et *ETR* provenant des simulations d'HYDROTEL. Le test Z_c est valable s'il n'y a ni auto-corrélation ni tendance (non-stationnarité correspondant à $p > 0,05$). Si le test rejette la série, une deuxième étape consiste à déduire de

chaque jeu de données la tendance commune estimée et à refaire la série de tests (auto-corrélation, tendance, Zc) sur les résidus. Compte tenu de la taille limitée de notre jeu de données (30 ans), nous avons délibérément choisi un seuil de similarité faible (5%). Au-dessus de 5% de similarité, les membres sont considérés comme identiques.

2.5 Simulations

Les simulations hydrologiques avec HYDROTEL ont été réalisées sur des périodes de trente ans, soit entre le 01 janvier 1961 et le 31 décembre 1990 pour la période de référence et entre le 01 janvier 2041 et le 31 décembre 2070 pour la période future. Pour fins de comparaison, les données de trois stations hydrométriques à proximité des exutoires des bassins ont été recueillies (tableau 1).

L'évapotranspiration réelle (*ETR*) a été estimée en faisant la somme des *ETR* des trois couches du module BV3C d'HYDROTEL. Ce module simule le bilan vertical et l'écoulement de l'eau dans le sol. « BV3c propose une représentation relativement simple des écoulements souterrains par le biais d'une séquence verticale composée de trois couches de sol » (Ricard, 2008).

3 RÉSULTATS

3.1 Tests de similarité entre les membres d'une même version du MRCC

Une première étape a consisté à voir s'il y avait une différence entre les membres d'une même version du MRCC, soient adj et adl pour la version 4.2.0 et aey, aez et afa ainsi que afb, afc et afd pour la version 4.2.3. Une similitude entre les membres pourrait ainsi alléger le nombre de simulations à étudier. Nous avons donc appliqué le test de similarité Z_c (Zhang et Wu, 2007) aux membres de chaque version. Les tests ont été réalisés sur trois variables, à savoir P_{cp} , R_{of} et Q_{fs} (évapotranspiration réelle) simulées par HYDROTEL d'après les données du MRCC. Les résultats obtenus montrent généralement une très forte similarité entre les membres d'une même version du MRCC (tableau 4) pour les trois variables étudiées. Seuls les ruissellements passé et futur du bassin versant Wilmot ne remplissent pas les conditions du test.

3.2 Évolution du ruissellement suite aux CC

Nous avons commencé par étudier l'influence des CC sur le ruissellement annuel à l'exutoire des trois bassins versants. Étant donné le nombre de données à comparer et pour éviter une redondance, nous nous sommes limités à détailler les membres dont l'évolution était intermédiaire. Des données de stations hydrologiques situées le plus près possible des exutoires ont été utilisées à des fins de comparaisons. Les données des stations 02LB005 (South Nation) et 02PJ007 (Beaurivage) ont été recueillies sur une période de 30 ans entre 1961 et 1990 tandis que les données de la station 01CB004 (Wilmot) s'étalent sur une période de référence de 1972 à 2001 puisque les données de 1961 à 1990 n'étaient pas disponibles.

3.2.1 Wilmot

La figure 5 (a) présente la fréquence cumulée du ruissellement annuel passé (1961-1990) de Wilmot sur 30 ans, ainsi que le ruissellement observé à la station 01CB004 sur 30 ans (1972-2001). On ne distingue pas de différences significatives entre les simulations. Cependant, les simulations surestiment légèrement les valeurs par rapport aux données observées et tendent à atténuer les ruissellements extrêmes (maximums et minimums). Ainsi, on peut noter que le ruissellement est, en moyenne, surestimé sur les trente ans de 11% pour *adj*, de 7% pour *adi* et de 5% pour *aej*. Les figures 5(a) et 5(b) semblent confirmer les tests statistiques précédents qui rejettent l'égalité des membres d'une même version. L'évolution du ruissellement entre le passé et le futur est très différente suivant les membres d'une même version du MRCC. Ainsi, pour le MRCC_4.2.0, la baisse est de 10% pour *adj* alors qu'*adi* augmente de 2%. Les variations de la version MRCC_4.2.3 sont du même ordre avec -6% pour *aez*, +1% pour *aej* et +2% pour *afa*. Pour savoir comment cette variabilité des débits s'exprime à une échelle saisonnière, on a réalisé des « box plot » ou « boîtes à moustaches » en découpant les saisons de décembre à février, de mars à mai, de juin à août et de septembre à novembre (figure 6). On a utilisé les débits de la station 01CB004 comme référence. Même si cette station ne draine que 76% du territoire, elle n'en reste pas moins représentative de l'évolution du ruissellement en fonction des saisons. On peut premièrement remarquer que l'amplitude des quartiles et la distribution des extrêmes est assez bien simulée sur l'ensemble des cinq membres. Les débits simulés sont légèrement plus importants au printemps et en hiver que les débits observés, mais cet écart pourrait être simplement dû à la localisation de la station hydrométrique en amont du bassin. En effet, celle-ci ne représente que 76% du bassin (tableau 1). Cependant, en été et en automne les débits sont largement surestimés. Lorsque l'on compare les simulations du passé et du futur, on s'aperçoit que le comportement hydrologique

entre les membres n'est pas très différent, ils enregistrent tous une forte augmentation des débits moyens en hiver et une légère diminution des débits moyens au printemps, en été et en automne. Ainsi, les augmentations des débits moyens hivernaux sont de 37% pour *adi* et 28% pour *afa*. En été, la baisse est relativement modérée avec -11% pour *adi* et -10% pour *afa*. On obtient des résultats de même ordre au printemps et en automne. Ces fortes ressemblances entre les membres semblent en désaccord avec les résultats des tests Z_c sur ce bassin.

3.2.2 *Beaurivage*

Sur le bassin versant de la rivière Beaurivage, les simulations semblent nous donner des résultats beaucoup plus homogènes que sur le bassin Wilmot. D'ailleurs, les tests statistiques réalisés précédemment indiquaient que pour une même version du MRCC, les membres étaient assez similaires. Cette similarité se retrouve au niveau des moyennes du ruissellement annuel sur trente ans. Les diminutions entre le passé (1961-1990) et le futur (2041-2070) sont semblables et importantes, de l'ordre de -30% ($\pm 1\%$) sur chaque version du MRCC. Ainsi on peut remarquer sur la figure 7 que le membre *adi* subit une baisse homogène de ses débits sur les trente années de simulation. Cette diminution est indépendante des années sèches ou des années humides. Les résultats des simulations de la période 1961-1990 sont en accord avec les débits observés à la station 02PJ007 avec une légère sous-estimation de -4% (MRCC_4.2.0-*adi*). En revanche, en fonction des saisons, les résultats diffèrent (figure 8). Dans l'ensemble, les débits sont assez bien simulés sauf pour le printemps. Les débits simulés sont plus faibles en hiver et en automne, relativement plus forts en été et largement sous-estimés au printemps. Cette observation s'accroît lorsque l'on compare les quartiles et les extrêmes de cette même période. Les variations hydrologiques entre les simulations du passé et du futur indiquent des comportements différents au niveau des saisons. Ainsi, en hiver, il y a une nette augmentation

des débits moyens de l'ordre de +68% pour *adj* et de + 69% pour *afa*. D'après la figure 8, le printemps semble être stable et conserver l'amplitude de ses débits par rapport à la période passée. Cette période est relativement importante pour le bilan annuel car elle l'influence significativement en raison des crues associées à la fonte du couvert de neige. La baisse des débits dans le futur est assez semblable pour les périodes d'été et d'automne. On enregistre une diminution de -29% en été et -45% en automne pour *adj* et une diminution de -37% en été et -32% en automne pour *aez*.

3.2.3 South Nation

Comme pour les deux autres bassins, les résultats des simulations sur le bassin South Nation suivent relativement bien la courbe de fréquence du ruissellement observé (station 02LB005) indépendamment des périodes sèches ou des périodes humides (figure 9). Cependant, les données simulées sont largement surestimées par rapport aux données observées. Les différences avec le ruissellement moyen simulé sur la période 1961-1990 sont de +25% pour *adj* et de +24% pour *afa*. Les comparaisons entre les résultats des fréquences cumulées du passé et du futur révèlent que le comportement du ruissellement total diffère suivant les membres d'une même version. Ainsi, la moyenne du ruissellement sur 30 ans du membre *adj* baisse de 6% alors qu'elle augmente de 2% pour *adl*. Ces deux membres, issus de la même version (MRCC_4.2.0), indiquent des variations futures contraires; les pourcentages sont néanmoins petits. Les tests de similarité n'indiquaient pas de différence. Le membre *afa* de la version 4.2.3 subit quant à lui une hausse du ruissellement de 6%. Comme pour les deux autres bassins, on distingue des différences significatives entre les simulations et les observations sur les débits saisonniers (figure 10). Les moyennes des débits simulés sont largement surestimées en hiver, en été et en automne. Les moyennes et les quartiles sont assez bien reproduits au printemps. L'une des

seules différences sur cette saison se situe au niveau des débits médians, qui sont nettement surestimés. Ceci pourrait indiquer que de forts débits ont été enregistrés à la station 02LB005, gonflant ainsi la moyenne (la variabilité traduite par le 3^e quartile et la valeur maximale est d'ailleurs beaucoup plus importante). Les débits extrêmes sont aussi moins bien simulés avec une diminution de la variabilité. Les comparaisons saisonnières du passé et du futur entre les différents membres appuient l'hypothèse de similarité vérifiée précédemment par les tests statistiques. En effet, le même comportement peut généralement être observé indépendamment de la version du MRCC utilisée. Les débits moyens d'hiver sont augmentés de 31% pour *adi* et de 57% pour *aez* par rapport à la période passée correspondante. Au printemps, les débits sont assez constants. Cependant, certaines variations subsistent. Les débits printaniers du membre *adj* diminuent de 7% alors que ceux du membre *adi* augmentent de 10%. Sur cette même période, les débits de la version MRCC_4.2.3 sont plus stables avec +4% pour *afa*. Enfin, en été et en automne, on observe une baisse des débits moyens sur l'ensemble des membres avec en période estivale -21% pour *adj* et -31% pour *afa* et en automne -32% pour *adj* et -18% pour *afa*.

3.3 Comparaison des débits d'étiage observés et simulés

Les débits d'étiage (tableau 5) ont été calculés d'après la méthode de Weibull sur deux intervalles de temps de sept et trente jours consécutifs et suivant trois périodes de retour à savoir : deux, cinq et dix ans. On a considéré l'intervalle 01 juin – 30 septembre comme étant représentatif de la période d'étiage, les valeurs en hiver étant souvent considérées comme peu fiable. Les valeurs obtenues d'après les trois stations hydrométriques d'observation montrent que les débits minimums simulés sur les trois bassins sont surestimés pour la période de référence (1961-1990). Les débits d'étiage sur le bassin Wilmot pour la période passée sont

approximativement doublés par rapport aux observations pour les différentes périodes de retour et de nombre de jours consécutifs et ce, pour tous les membres. Les débits plus faibles enregistrés à la station hydrométrique qui sont dus à la localisation de la station plus en amont sur le bassin, n'expliquent pas à eux seuls cet écart. Sur le bassin Beaurivage, les débits simulés pour le passé sont également deux fois plus importants que les observations à la station. Enfin, on obtient des résultats largement surestimés sur le bassin de South Nation à cause du projet HYDROTEL dont le calage des périodes d'étiage réalisé avant cette étude, n'était pas bon. Néanmoins, ce dernier reste utile pour comparer deux périodes de temps aux conditions climatiques différentes.

Au regard des résultats obtenus avec les données synthétiques du passé et du futur, les trois bassins étudiés nous révèlent une tendance à la baisse assez importante pour le futur. Ainsi, les diminutions des débits d'étiage sur les bassins Wilmot et South Nation atteignent globalement 15% et 25% sur l'ensemble des membres et sans distinction des périodes de retour. Les mêmes variations sont observées sur le bassin Beaurivage qui montre une baisse moyenne un peu plus prononcée pour le MRCC_4.2.3 avec -35% (Q_{5-30}) et -46% (Q_{10-7}), tandis que la version MRCC_4.2.0 indique des baisses de -24% (Q_{5-30}) et -30% (Q_{2-7}). Ces baisses significatives des débits d'étiage sur les trois bassins versants corroborent les baisses de débits d'été dans le futur, simulés précédemment dans l'étude.

3.4 Comparaisons du ruissellement et de l'évapotranspiration : simulations par HYDROTEL et simulations du MRCC

L'utilisation d'un modèle hydrologique tel qu'HYDROTEL dans une étude climatique est un atout pour estimer la qualité des données générées par un modèle climatique. En effet, le modèle hydrologique est assez bien paramétré pour prédire le ruissellement et l'évapotranspiration

réelle à partir de données climatiques (*pcp*, *tmin*, *tmax*). Dans cette section, nous comparons les estimations de ruissellement et d'évapotranspiration réelle annuels générés par HYDROTEL et le MRCC.

Les « box plot » de la figure 11 sont réalisés sur les bilans annuels des trente ans de la période passée (1961-1990). Chaque membre des deux versions du MRCC a été représenté afin de montrer la constance dans les résultats. On peut premièrement voir que la similarité des variables? varie suivant le bassin versant étudié. Ainsi, les bassins Wilmot et South Nation ont des valeurs assez proches, tandis que sur le bassin Beaurivage, les écarts entre les simulations d'HYDROTEL et du MRCC sont importants. En revanche, comme précédemment, on remarque une constance entre? les membres. HYDROTEL simule un ruissellement légèrement plus important sur les bassins Wilmot et South Nation. Ainsi, si l'on compare les moyennes du ruissellement sur trente ans, les écarts sont compris entre 6% (*aez*) et 7% (*adj*) sur Wilmot et entre 0% (*adi*) et 2% (*aez*) sur South Nation. Les données recueillies sur le bassin Beaurivage montrent des résultats inverses avec un ruissellement largement inférieur pour les résultats d'HYDROTEL et des écarts qui varient entre 38% (*aez*) et 42% (*aez*). Les résultats de la seconde variable sont comparables à ceux obtenus sur le ruissellement. Ainsi, sur le bassin Wilmot l'évapotranspiration réelle simulée est légèrement plus faible que celles générées par le MRCC. Les écarts varient entre 8% (*aez*) et 11% (*adj*). Pour le bassin South Nation, les écarts restent insignifiants, entre 1% (*aez*) et 2% (*adj*). Comme précédemment, les écarts des simulations sur le bassin Beaurivage restent importants avec cette fois une estimation plus forte de l'évapotranspiration par HYDROTEL. Les écarts sont du même ordre, entre 26% (*adi*) et 35% (*adj*). Ces résultats suggèrent que sur une base annuelle, la gamme de variations des deux modèles est très limitée. Les écarts entre les premiers et troisièmes quartiles sont semblables,

tout comme les extrêmes, ce qui indique la très forte similarité des deux modèles sur une base annuelle (voir figure 12).

4 DISCUSSION

Le test statistique récent Z_c (Zhang et Wu 2007) utilisé dans cette étude est plus performant que les autres tests pour montrer une similarité dans des séries de données. L'application de ce test aux différents membres simulés par HYDROTEL a permis de conclure que la majorité des séries de données de précipitation, ruissellement total et évapotranspiration générées à partir d'une même version du MRCC pour les deux périodes (1961-1990 et 2041-2070) étaient similaires. Cependant, une variabilité importante dans les données peut être observée pour les moyennes de ruissellement et d'évapotranspiration réelle entre les cinq membres. La comparaison des débits (ruissellement total) futurs et passés indique aussi de fortes variations inter-membre à l'échelle de la saison (figure 13). Cette variabilité peut s'expliquer par la faible taille du jeu de données. Les trente valeurs issues de trente années de simulation ne permettent pas de lisser les phénomènes aléatoires. Ainsi, les séries qui n'ont pas passé le test de Z_c sur le bassin Wilmot pourraient être finalement assez similaires, mais la faible taille de l'échantillon ferait probablement rejeter le test statistique. Cette hypothèse pourrait être appuyée par les résultats obtenus sur le ruissellement annuel et saisonnier. En effet, même si les évolutions hydrologiques (courbes de fréquence) sont parfois différentes, le comportement hydrologique annuel ou saisonnier des différents membres pour le bassin Wilmot est très semblable. L'ensemble des résultats obtenus sur les trois bassins versants étudiés montre une très forte similarité, indépendamment des deux versions du MRCC ou des membres utilisés. Les conditions initiales différentes n'influenceraient donc pas beaucoup les résultats sur 30 ans. Les différences au niveau des versions 4.2.0 et 4.2.3 du MRCC, qui se situent principalement au niveau du contenu en eau dans le sol, ne semblent pas non plus influencer beaucoup les variables

étudiées. Enfin, cette variabilité inter-membre permet l'obtention d'un panel de climats qui nous donne une vision étendue des possibles changements à venir.

Les résultats des simulations d'HYDROTEL montrent que les trois bassins subissent différemment les effets des changements climatiques. Le bassin Beauvillage, situé au sud du Québec, semble être largement affecté avec une baisse de 30% des débits sur l'année. Plus modérément touchés, les deux autres bassins (Wilmot et South Nation) indiquent les mêmes tendances même si sur South Nation il est difficile de conclure à une baisse. Wilmot subirait une légère variation de ses débits annuels de -10% à +2% et South Nation de -6% à +6%. Ces résultats coïncident avec les conclusions d'études récentes qui indiqueraient une légère diminution des débits annuels dans la même région (Mortsch *et al.*, 2000 ; Rousseau *et al.*, 2004 ; Quilbé *et al.*, 2008). Cependant d'autres études donneraient des tendances à la hausse sur d'autres bassins du Québec (Roy *et al.*, 2001 ; Dibike et Coulibaly, 2005).

Ces baisses de débits annuels s'expriment différemment suivant les saisons. La baisse est assez marquée sur les trois bassins en été et en automne comme le résume la figure 13 avec une diminution des débits d'environ 25%. Cette baisse des débits en été affecte sensiblement les étiages entre -15% et -25%, voire jusqu'à -46% sur le bassin Beauvillage. Cette dernière valeur doit cependant être considérée avec prudence, car le calage d'HYDROTEL ne reproduit pas très bien les étiages sur ce bassin. Des tendances à la baisse dans l'est du Canada ont déjà été observées par Rivard *et al.* (2008) à l'aide de tests statistiques sur des données historiques. Pour les autres saisons, le printemps semble rester constant tandis qu'on observe une forte augmentation des débits en hiver, ce qui concorde avec les conclusions de Quilbé *et al.* (2008) sur le bassin de la Chaudière.

Les changements climatiques simulés dans notre étude utilisent le scénario A2 du GIEC qui simule un réchauffement mondial important (entraînant un changement important? dans le régime de circulation atmosphérique). Gagnon *et al.* (accepté) ont montré que les précipitations simulées par le MRCC sur deux bassins voisins du sud du Québec sont affectées par des biais très différents. Cependant, il n’y aurait pas de surestimations notoires des précipitations sur le bassin de la Chaudière dont Beaurivage est un sous bassin. Ainsi, la hausse des débits simulés dans le futur en hiver pourraient provenir d’une hausse des précipitations conjointement avec une hausse des températures. Ces changements se traduiraient par une augmentation des précipitations sous forme liquides et une augmentation de la fonte. Finalement, ce bouleversement de l’hydrologie des saisons contraindrait fortement l’agriculture car l’indisponibilité en eau des sols serait probablement accrue en période de croissance des plantes.

La comparaison des résultats du MRCC et d’HYDROTEL montre que le modèle climatique possède une très bonne capacité à reproduire à l’échelle annuelle le ruissellement et l’évapotranspiration réelle sur deux des trois bassins étudiés. Cependant, sur le bassin Beaurivage, les écarts sont importants, de l’ordre de 50%. Le changement d’équation de l’évapotranspiration est l’une des différences majeures entre les trois applications d’HYDROTEL. Le bassin Beaurivage est paramétré avec l’équation d’Hydro-Québec alors que les deux autres bassins utilisent l’équation de Thornthwaite. Cependant, les observations à la station hydrométrique de référence confirment le choix de l’utilisation de l’équation d’Hydro-Québec avec des débits annuels de bonne qualité (-4%). Ces observations ont déjà été montrées par Gagnon *et al.* (accepté). Il en ressort que sur le bassin de la Chaudière, le MRCC surestime de 30% le ruissellement sur toute la période hydrologique.

Cette étude montre que le MRCC est capable de faire de bonnes prédictions sur de tout petits bassins comme Wilmot. Par contre, il simule moins bien les débits sur le bassin Beaurivage. Dans sa thèse, Music (2008) a montré que les changements effectués sur le schéma de radiation de la version MRCC_4.2.0 ainsi que sur le traitement de la couverture des nuages ont réduit sensiblement les surestimations d'évapotranspiration des versions antérieures. Ces modifications semblent avoir amélioré le MRCC mais des irrégularités subsistent apparemment toujours sur certains bassins comme celui de la rivière Beaurivage.

5 CONCLUSION

Les changements climatiques provoquent sur les trois bassins étudiés les mêmes effets sur les débits d'étiage (souvent considérés comme la contribution des aquifères aux rivières et utilisés comme approximation pour estimer les taux de recharge des aquifères) : Une diminution plus ou moins importante est observée sur les trois bassins et ce, pour les trois périodes de retour et les deux nombres de jours consécutifs utilisés (7 et 30). Une diminution plus ou moins importante du ruissellement total (débit à l'exutoire) annuel avec une augmentation importante des débits en hiver et une diminution en été et en automne ont été simulées. Le printemps ne semble pas réellement affecté. Le bassin de la rivière Beaurivage serait le plus touché avec 30% de baisse des débits annuels dans le futur. Le bassin de Wilmot aurait une tendance significative à la baisse de ses débits annuels (-10% à +2%). Le bassin South Nation, quant à lui, ne subirait pas de baisse. Les débits de pointe de ce dernier ainsi que de Beaurivage ne semblent pas non plus être affectés par ces changements climatiques.

Cette étude a démontré la capacité du MRCC à reproduire les débits annuels aux exutoires de petits bassins versants en fonction des précipitations et températures qu'il génère, même si des différences relativement importantes ont été observées sur le bassin. Beaurivage. Dans ce cas, la différence de débits pourrait être due à une mauvaise estimation de l'évapotranspiration. Les changements effectués au niveau du schéma de radiation du MRCC, qui ont permis de diminuer la surestimation de l'évapotranspiration par rapport aux versions précédentes, ne semblent pas adéquats dans ce cas.

Les modifications du régime hydrologique mis en évidence dans cette étude pour l'horizon 2041-2070 pourraient bouleverser l'agriculture dans l'est du Canada. Les cultures d'été seraient ainsi plus fortement soumises à un stress hydrique.

6 REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier mon encadrant pour ce projet, Madame Christine Rivard, ainsi que mon directeur de recherche, Monsieur Alain N. Rousseau. Je tiens également à faire participer à ces travaux tous ceux qui m'ont apporté leur aide précieuse: Sébastien Tremblay, Martin-Pierre Lavigne, Alain Royer, Stéphane Savary, Brou Konan et Patrick Gagnon. Enfin, je remercie Diane Chaumont pour m'avoir permis de travailler sur les données du MRCC.

7 RÉFÉRENCES

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

Burn, D.H. and M.H. Hag Elnur. 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 255: 107-122.

Caya, D., and Laprise, R. 1999. A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127 (3): 341-362.

Caya, D., Laprise, R., Giguère, M., Bergeron, G., Blanchet, J.P., Stocks, B.J., Boer, G.J., and McFarlane, N.A. 1995. Description of the Canadian regional climate model. *Water, Air and Soil Pollution*, 82 (1-2): 477-482.

Dibike, Y.B. and P. Coulibaly. 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed : Comparaison of Downscaling methods and hydrologic Models. *Journal of Hydrology*, 307(1-4) : 145-163.

Dingman, S.L. 2002. *Physical hydrology* (2nd edition). Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.

Douglas, E. M., R.M. Vogel and C.N. Kroll. (2000) Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240: 90-105.

Frigon, A., M. Slivitzky, D. Caya and R. Roy. 2007. Construction of hydro-climatic projections and first-order estimation of their associated uncertainties from Regional Climate Model

simulations: Application to water management of hydropower reservoirs in Quebec. *La Houille Blanche*, 6: 97-103.

Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. mMoussa, J. Fitzback and J.-P. Villeneuve. 2001. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1 : Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 91-99.

Gagnon P., B. Konan, A.N. Rousseau and M. Slivitzky. (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*

Intergovernmental panel on climate change. www.ipcc.ch

McFarlane, N.A., J. F. Scinocca, M. Lazare, R. Harvey, D. Verseghy, and J. Li, 2005: The CCCma third generation atmospheric general circulation model. CCCma Internal Rep., 25 pp

Mortsch, L., H. Hengeveld, M. Lister, B. Lofgren, F. Quinn, M. Slivitzky and L. Wenger. 2000. Climate change impacts on the Hydrology of the great lakes St. Lawrence system. *Canadian Water Resources Journal*, 25(2): 153-179.

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*, 8(5): 969-988.

Music, Biljala. 2008. Étude quantitative du cycle de l'eau à l'échelle de grands bassins versants de l'Amérique du Nord avec le Modèle Régional Canadien du Climat. *Thèse de l'Université du Québec à Montréal*. Montréal, 230p.

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282-290.

Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.-S. Moquet, N.B. Trinh, Y. Dibike, P. Gachon and D. Chaumont. 2008. 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 Journal*, 33 (1): 73-94.

Ricard S. 2008. Caractérisation de la recharge potentielle du bassin versant de la rivière Châteauguay à l'aide du modèle HYDROTEL. Rapport de maîtrise. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE. Québec. 174 pages.

Rivard C., H. Vigneault, A.R. Piggot, M. Larocque, F. Anctil, L. Tremblay and A.N. Rousseau. 2008. Examining the impacts of climate change and human activities on groundwater recharge in Canada using historical data. Groundwater Conference, GeoEdmonton 2008.

Rousseau, A.N., A. Mailhot, M. Slivitzky, J.-P. Villeneuve, M.J. Rodriguez and A. Bourque. 2004. Usage et approvisionnement en eau dans le sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques. *Canadian Water Resources Journal*, 29(2): 125-138.

Rousseau, A.N., R. Quilbé, S. Savary, S. Ricard, J.-S. Moquet, M. S. Garbouj, and M. Duchemin. 2007. Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques : étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydraulique et la qualité de l'eau d'un bassin versant à l'aide d'un système de modélisation intégrée. *Rapport final N° R-796-f. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.*

Rousseau A.N, Savary S, S. Tremblay, P. Thomassin, L Baker, S. Rivet, B. Larue, P. Ghazalian. 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, Quebec. Rapport No R-918. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ. 256 pages

Rousseau, A.N., Lafrance, P., Lavigne, M.P., Savary, S. B. Konan, Quilbe, 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 d'élaboration de normes agroenvironnementales rapport no 4-29. 381 p.

Rousseau, A.N., A. Royer, J.-P. Fortin, P. Noël, S. Jutras, R. Turcotte. (En preparation). PHYSITEL, a specialized GIS for distributed hydrological models. (Article en préparation pour Environmental Modelling & Software)

Roy, L., R. Leconte, F.P. Brissette and C. Marche. 2001. The impact of climate Change on seasonal floods of a southern Quebec river basin. *Hydrological processes*, 15(16): 3167-3179.

Royer, A., A.N. Rousseau, J.-P. Fortin, R. Turcotte. 2006. PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée dans le cadre du Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

Savary S., A.N. Rousseau and R. Quilbé. Accepté 10/09/2008. Impact of land use evolution scenarios on the hydrology of the Chaudière river watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*.

Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, and D. Plummer, 2008: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmos. Chem. and Phys.*, (soumis)

Turcotte, R., A.N. Rousseau, J.P. Fortin and J.-P. Villeneuve. 2003. A process-oriented multiple-objective calibration strategy accounting for model structure. In Duan, Q., V.K. Gupta, S. Sorooshian, A.N. Rousseau and Turcotte (Editors), calibration of watershed models. *American Geophysical Union, Washington*, 153-163.

Turcotte, R., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte, J.-P. Villeneuve. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240: 225-242.

Whitfield, P. H. and A.J Cannon. 2000. Recent variations in climate and hydrology in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 25: 19-65.

Yue, S., P. Pilon and B. Phinney. 2003. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross correlation. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1): 51-63.

Zhang, X., K.D. Harvey, W.D. Hogg and T.R. Yuzyk. 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4): 987-998.

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



Figure 1 Localisation des zones d'étude.

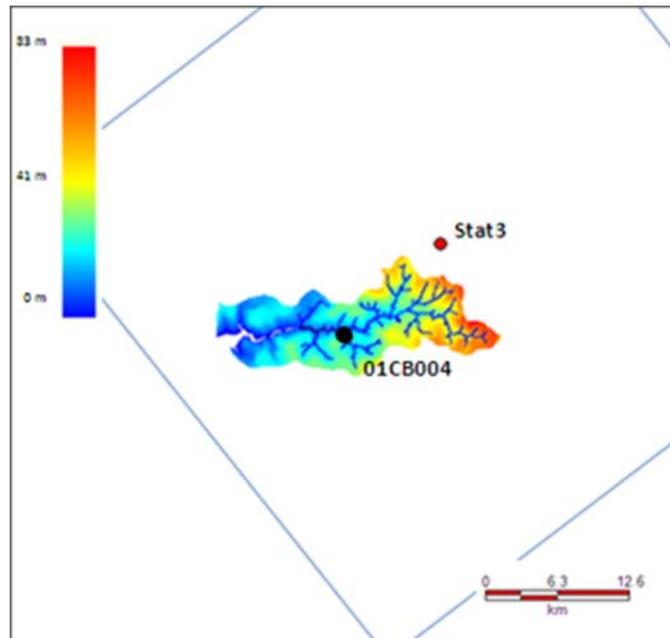


Figure 2 Topographie du bassin versant de Wimot. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.

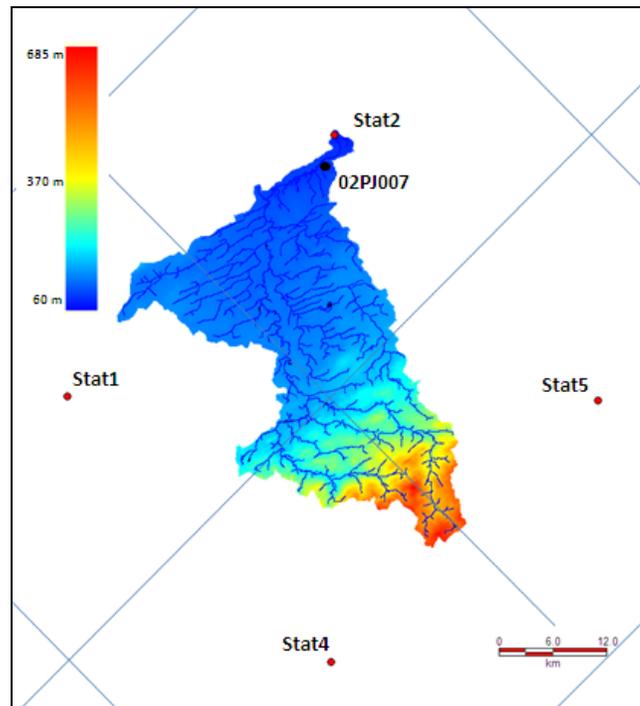


Figure 3 Topographie du bassin versant de Beaurivage. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.

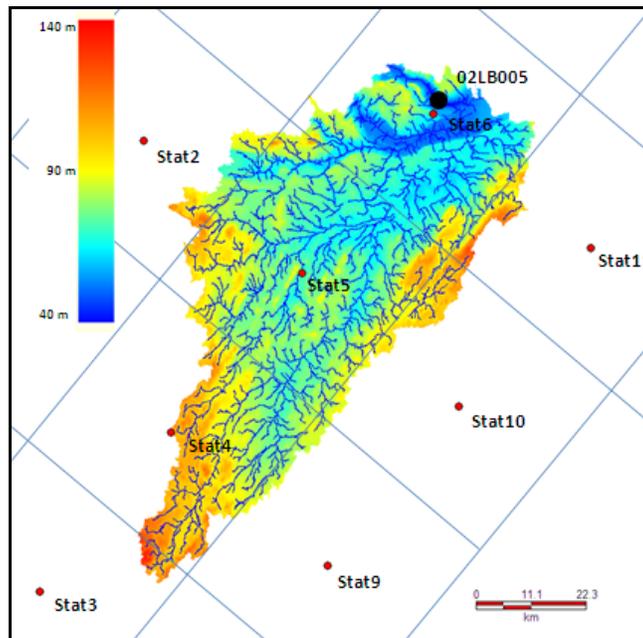


Figure 4 Topographie du bassin versant de South Nation. Le point rouge indique la station météorologique définie d'après la grille du MRCC représentée ici en lignes bleues. Le point noir localise la station hydrométrique.

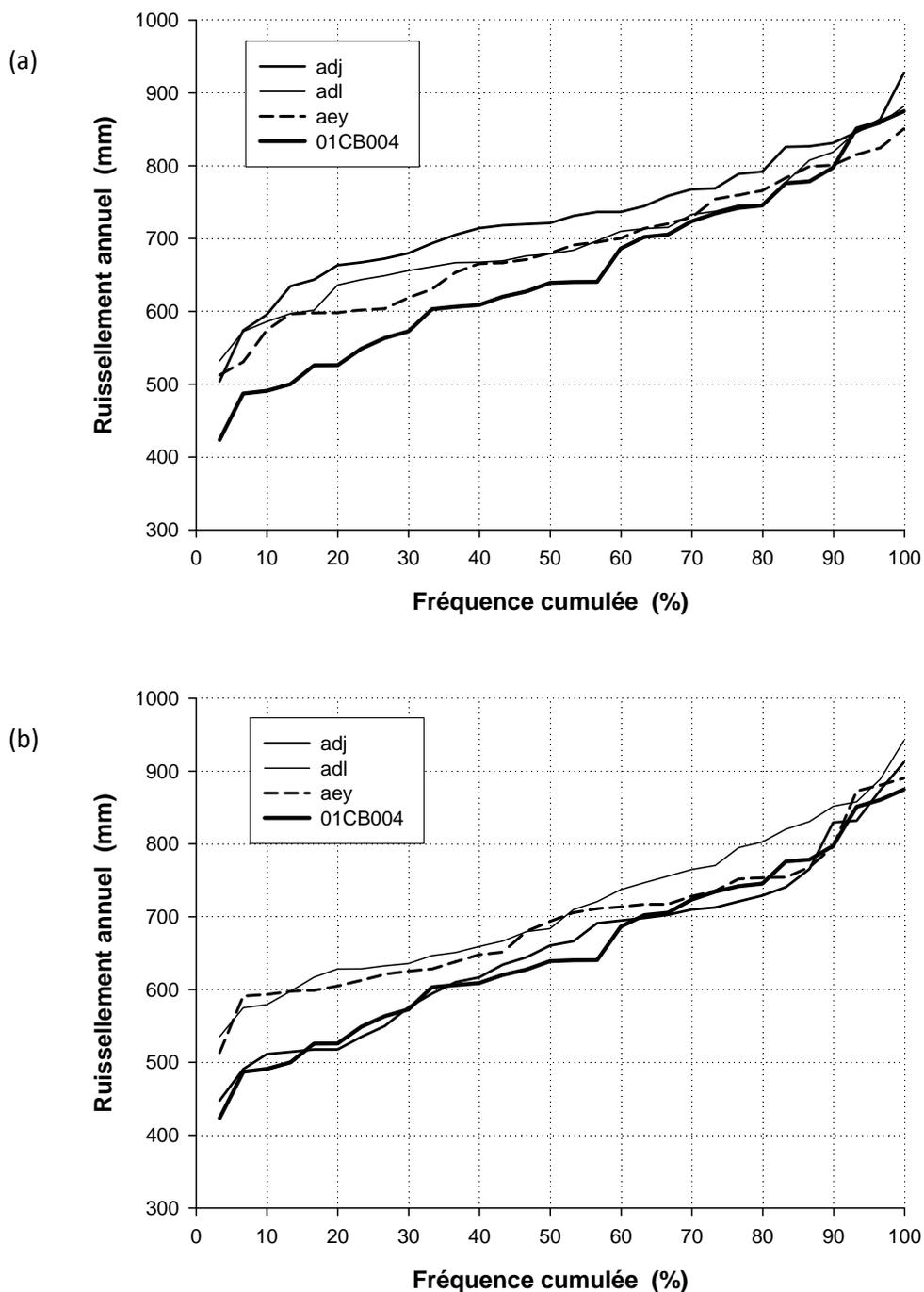


Figure 5 Fréquences cumulées du ruissellement annuel du bassin versant de Wilmot (a) : période passée (1961-1990) pour les membres adj et adl de la version MRCC_4.2.0, ainsi que le membre aey de la version MRCC_4.2.3. (b) : période future (2041-2070) pour les membres adj et adl de la version MRCC_4.2.0, ainsi que les membres aey de la version MRCC_4.2.3. Le débit observé à la station 01CB004 est pris comme référence.

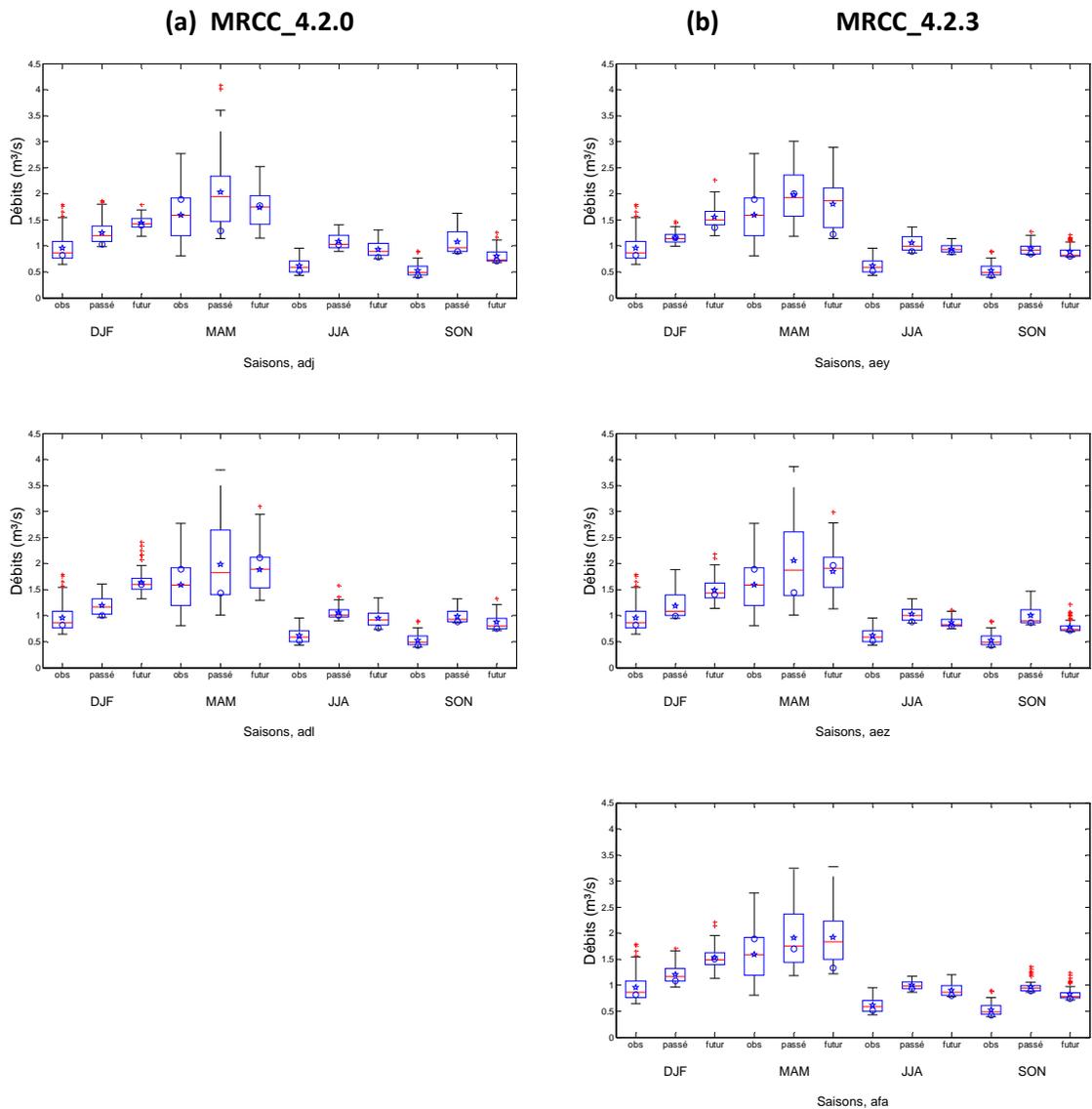


Figure 6 Débits saisonniers observés sur le bassin de Wilmot à la station hydrologique de référence 01CB004 (1972-2001), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1er et 3e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.

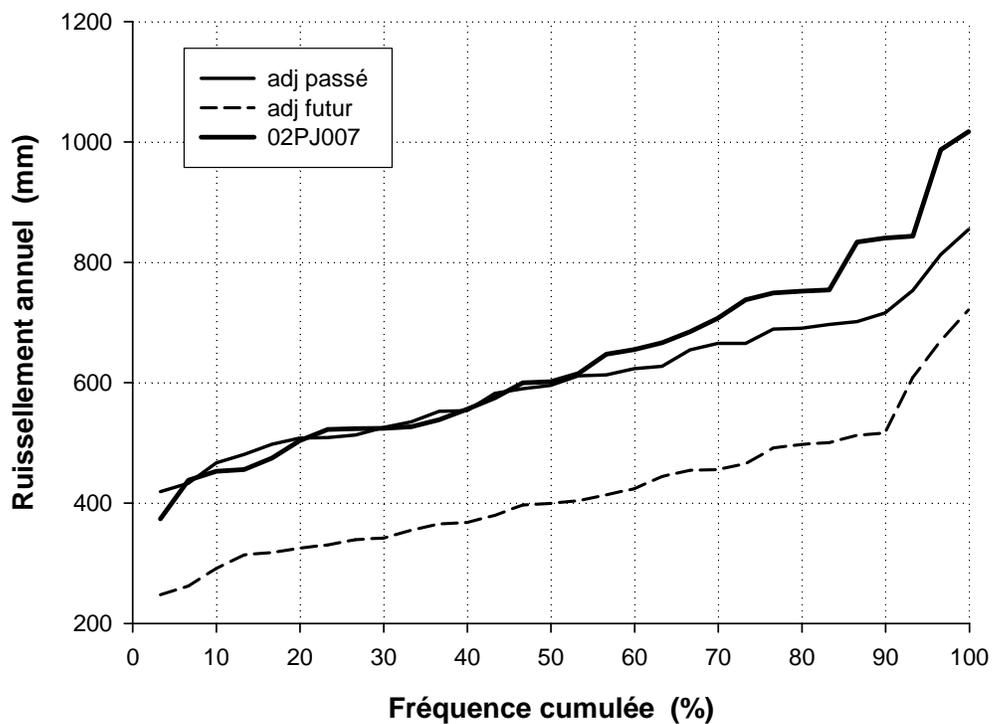


Figure 7 Fréquence cumulée du ruissellement annuel du bassin versant de Beurivage de la période passée (1961-1990) et future (2041-2070) pour le membre adj MRCC_4.2.0. Le ruissellement observé à la station 02PJ007 est pris comme référence.

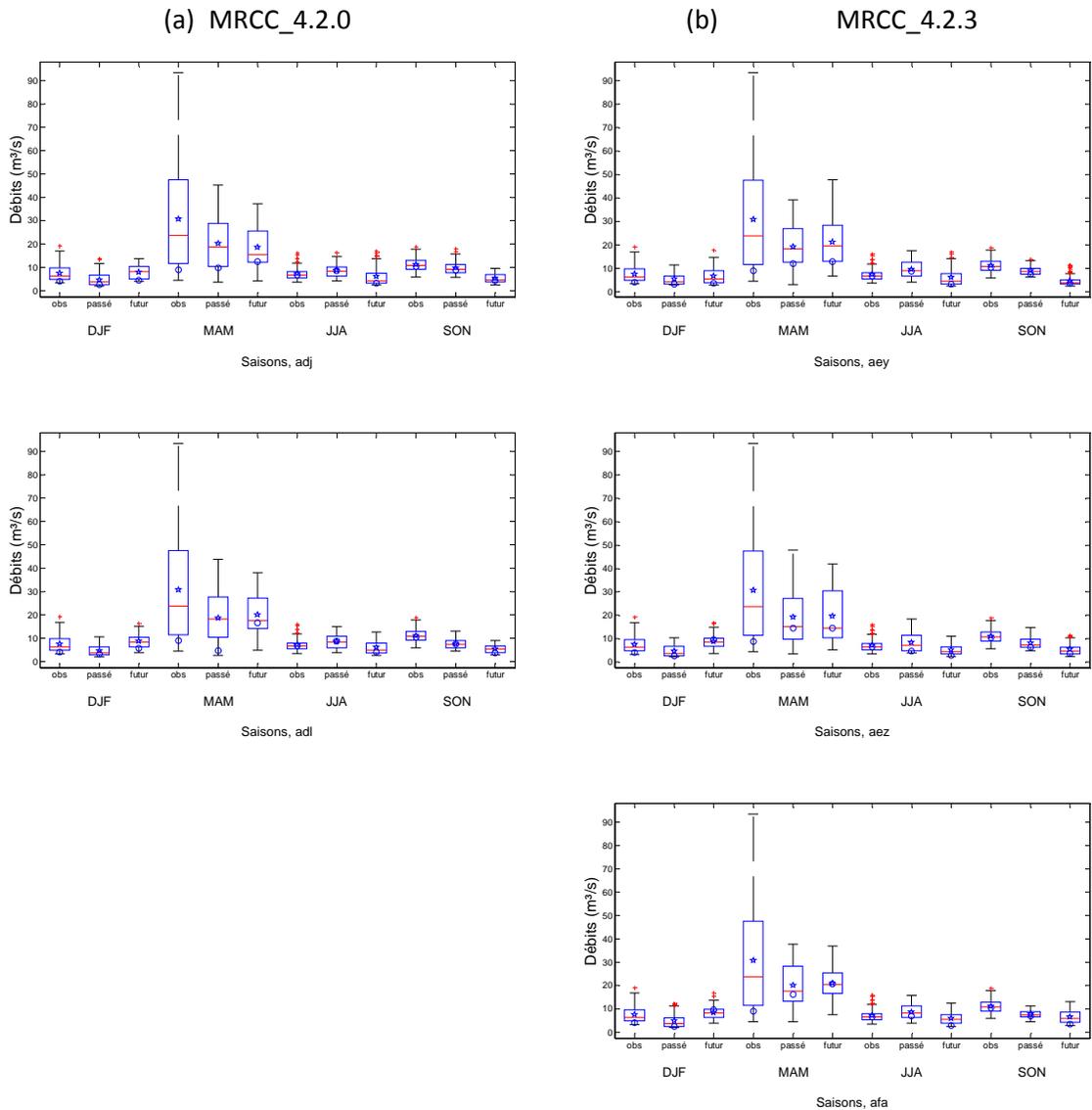


Figure 8 Débits saisonniers observés sur le bassin de Beaurivage à la station hydrologique de référence 02PJ007 (1961-1990), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1er et 3e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.

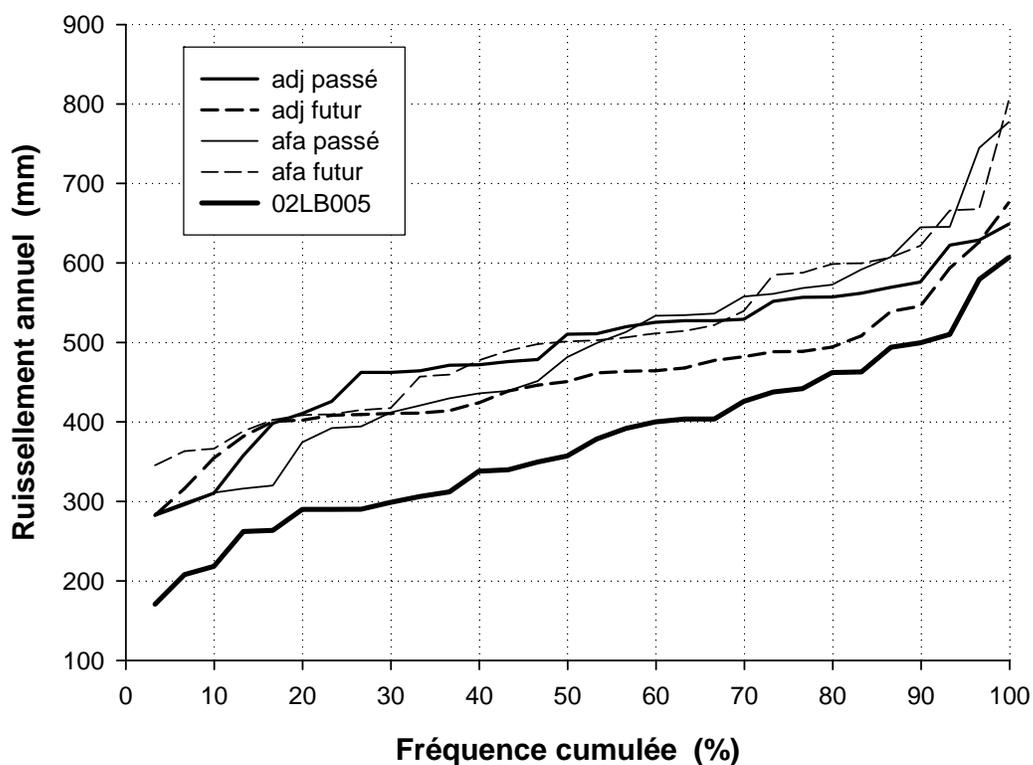


Figure 9 Fréquence cumulée des débits annuels du bassin versant de South Nation (a) : période passée (1961-1990) pour les membres *adj* MRCC_4.2.0 et *afa* MRCC-4.2.3. Période future (2041-2070) pour les membres *adj* MRCC_4.2.0 et *afa* MRCC_4.2.3. Les débits observés à la station 02PJ007 sont pris comme référence.

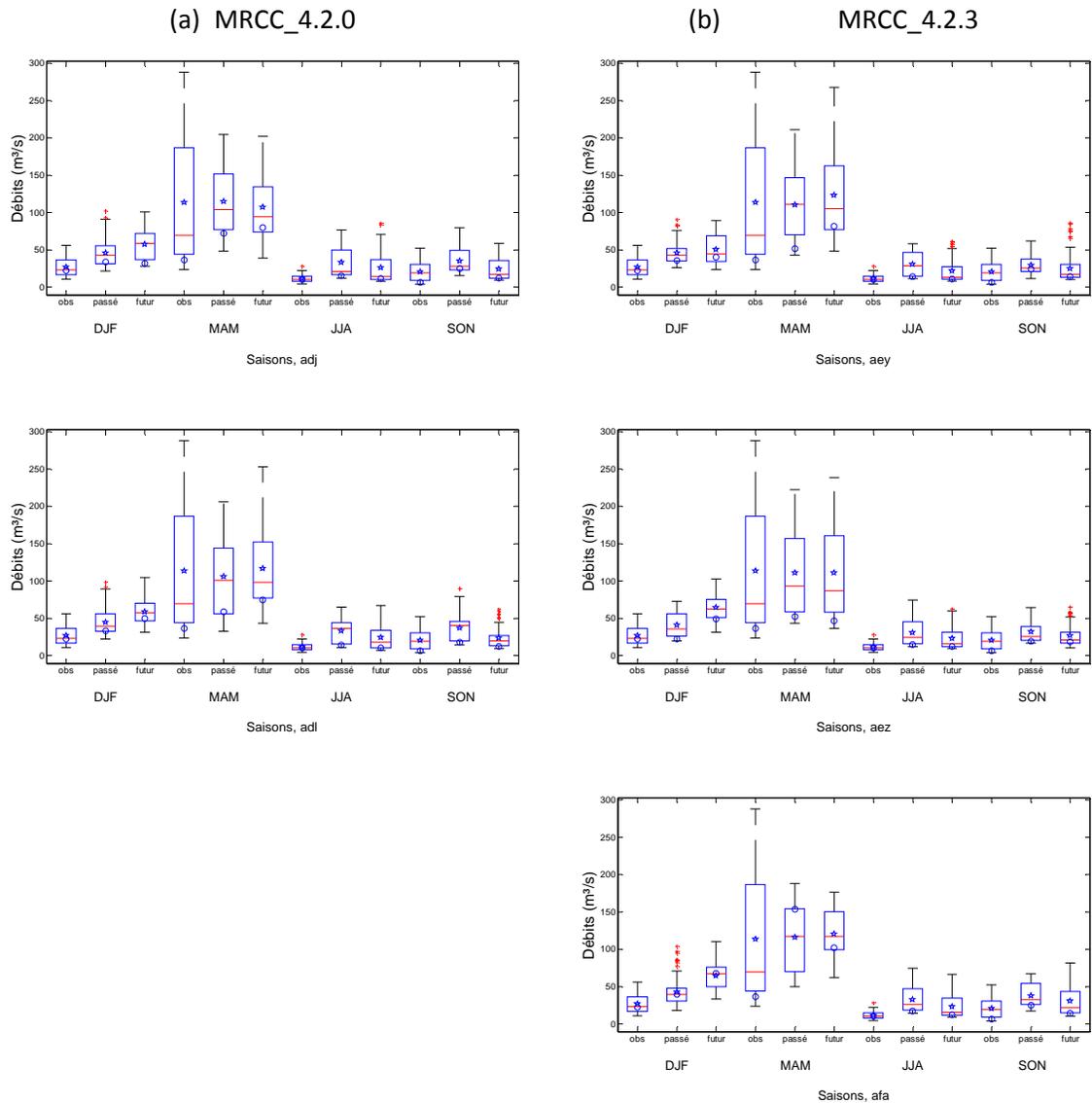


Figure 10 Débits saisonniers observés sur le bassin de South Nation à la station hydrologique de référence 02LB005 (1961-1990), ainsi que les débits saisonniers simulés à l'exutoire sur une période passée (1961-1990) et une période future (2041-2070). (a) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.0, (b) simulation utilisant une combinaison de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.

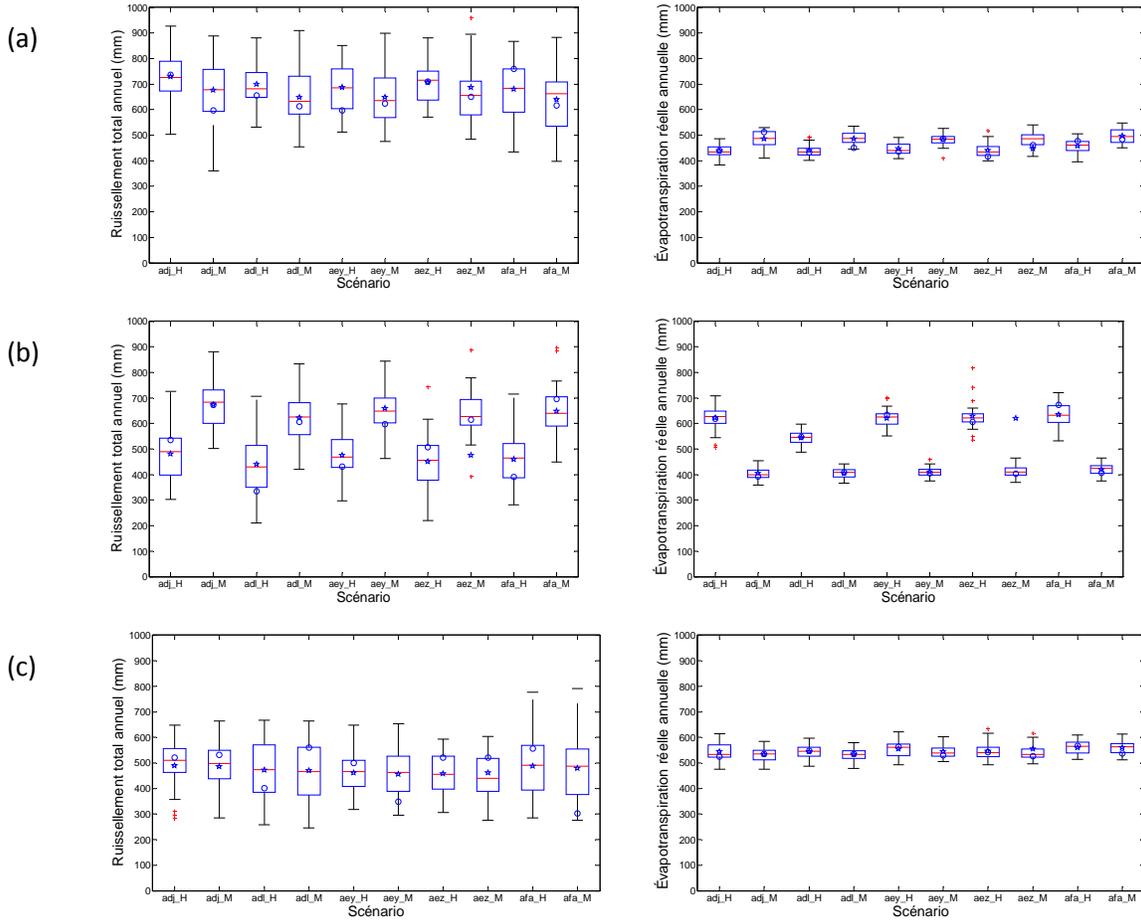


Figure 11 Comparaison inter membres du ruissellement annuel et de l'évapotranspiration réelle annuelle simulés sur la période (1961-1990) par HYDROTEL (H) et par le MRCC (M) (mm/an). Variables simulées sur Wilmot (a), sur Beaurivage (b) et sur South Nation (c). Les membres *adj* et *adi* sont issus de la version MRCC_4.2.0 et les membres *aey*, *aez* et *afa* sont issus de la version MRCC_4.2.3. Pour chaque « box plot », la médiane est définie par la ligne centrale, la moyenne par la croix et les limites inférieure et supérieure de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles. Les barres indiquent les valeurs minimales et maximales.

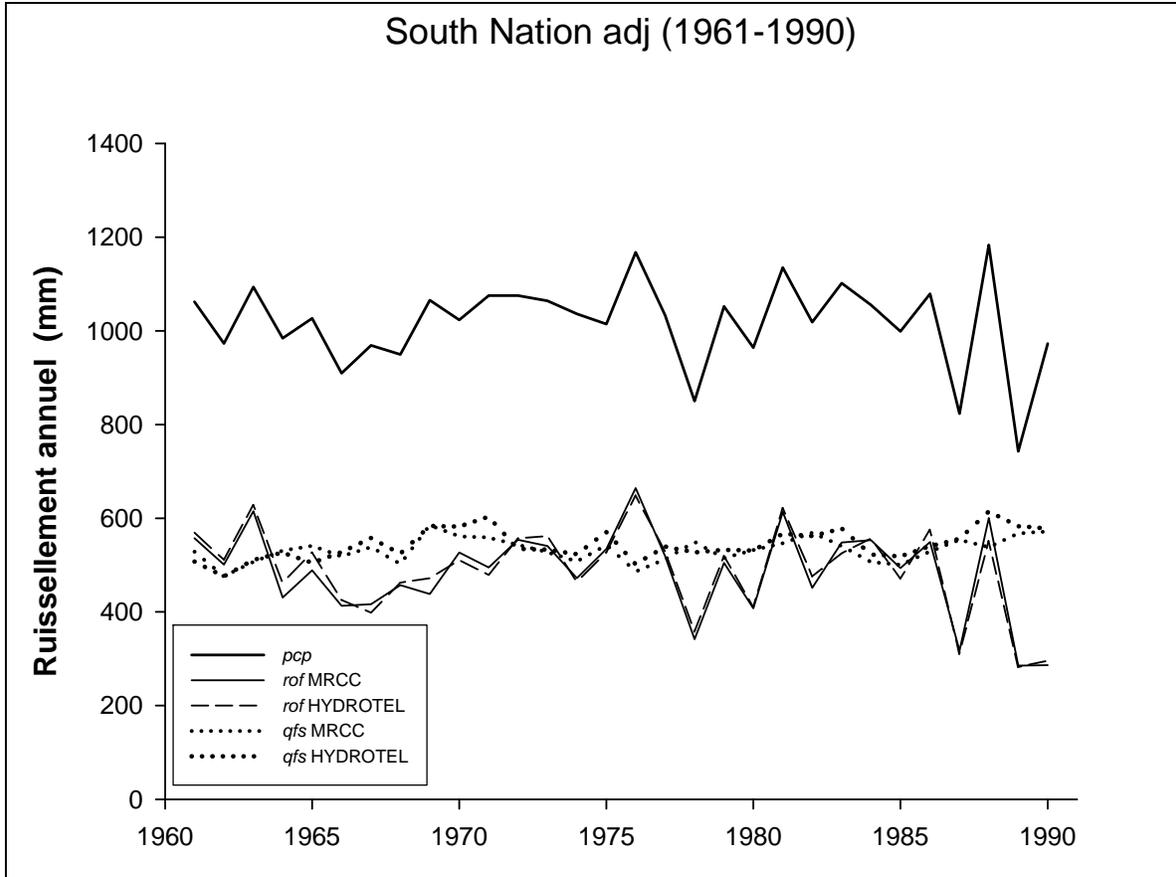


Figure 12 Comparaison du bilan hydrologique (*Pcp*, *Rof*, *Qfs*) simulé par le MRCC et HYDROTEL entre 1961 et 1990 d'après le membre *adj* de la version MRCC_4.2.0 (mm/an).

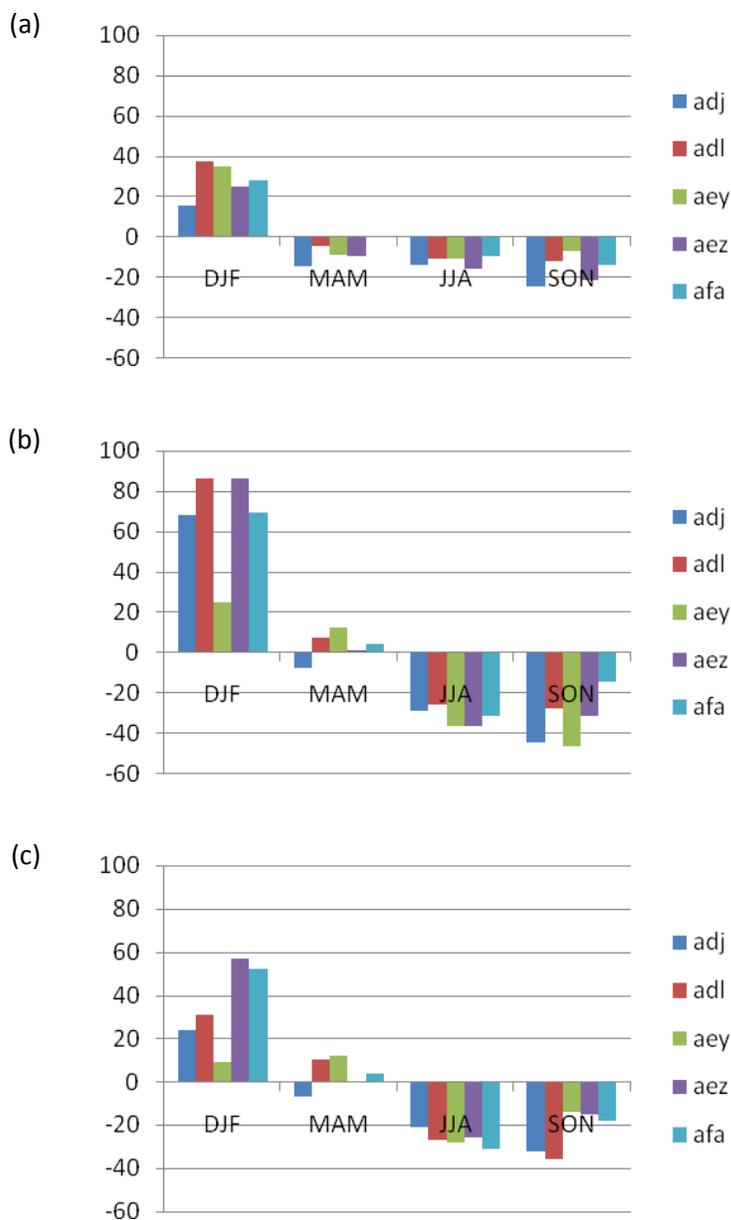


Figure 13 Évolution inter-membre de la moyenne saisonnière des débits sur 30 ans entre la période 1961-1990 et la période 2041-2070 (%). Le MRCC_4.2.0 est composé des membres *adj* et *adl* tandis que le MRCC_4.2.3 est composé des membres *aey*, *aez* et *afa*. Les mêmes comparaisons ont été effectuées sur Wilmot (a), Beaurivage (b) et South Nation (c).

Tableau 1 Données générales morphologiques et climatiques des quatre bassins versants étudiés.

	sup. (km ²)	alt. (m)	<i>Pcp.</i> 2002 (mm/an)	<i>Rof.</i> 2002 (mm/an)	stations hydro.	bassin drainé à la station (%)
Wilmot	59	0 - 80	1250	550	01CB004	76
Beaurivage	713	60 - 685	1150	580	02PJ007	98
South Nation	3708	40 - 140	800	350	02LB005	99

Superficie (sup.), altitude (alt.), Précipitations annuelles (*Pcp.*) et Ruissellement annuel (*Rof.*).

Tableau 2 Tableau 2 : Coefficients de Nash (N) et rapports débits simulés sur débits observés (R) obtenus lors des études antérieures et pour cette étude durant les périodes de calage (c) et de vérification (v). Wilmot (c) 22.07.02 - 30.09.04 ; (v) 01.05.05 – 30.09.06. Beaurivage (c) 01.10.85 – 30.09.89 ; (v) 01.10.89 – 30.09.94. South Nation (c) 01.10.95 – 30.09.01 ; (v) 01.10.01 – 30.09.05.

	Études antérieures				Cette étude			
	Nc	Rc	Nv	Rv	Nc	Rc	Nv	Rv
Wilmot	0,71	1,00	0,74	0,99	0,71	1,00	0,74	0,99
Beaurivage	0,76	0,92	0,74	0,95	0,63	1,08	0,65	1,01
South Nation	0,72	0,76	0,77	0,79	0,82	1,07	0,79	1,18

Tableau 3 GCM, Modèles GES et membres utilisés dans cette étude.

MCG	Modèles	GES	Membres
CGCM3	MRCC_4.2.0	A2	adj
CGCM3	MRCC_4.2.0	A2	adl
CGCM3	MRCC_4.2.3	A2	aez (afb)
CGCM3	MRCC_4.2.3	A2	aez (afc)
CGCM3	MRCC_4.2.3	A2	afa (afd)

Tableau 4 Test de similarité (Z_c) des données annuelles de ruissellement, de précipitation, d'évapotranspiration réelle pour les trois bassins versants en fonction de la version du MRCC et la période de simulation.

	MRCC	Passée (1961-1990)			Future (2041-2070)		
		<i>Rof</i>	<i>Pcp</i>	<i>ETR</i>	<i>Rof</i>	<i>Pcp</i>	<i>ETR</i>
Wilmot	4.2.0	0.0469	>0.05	>0.05*	NV	>0.05	>0.05*
	4.2.3	>0.05	>0.05	>0.05*	NV	>0.05	>0.05*
Beau Rivage	4.2.0	>0.05	>0.05	>0.05*	>0.05	>0.05*	>0.05*
	4.2.3	>0.05	>0.05*	>0.05*	>0.05*	>0.05	>0.05*
South Nation	4.2.0	>0.05	>0.05	>0.05*	>0.05	>0.05	>0.05*
	4.2.3	>0.05	>0.05	>0.05*	>0.05	>0.05	>0.05*

>0.05 : test vérifié avec une probabilité de similitude supérieure à 5%.

NV : les tests de Mann Kendall (tendance) et de Wald Wolfowitz (auto-corrélation) ne sont pas valides. * : le test de Z_c est réalisé sur les résidus.

Tableau 5 Débits d'été (juin à septembre) observés aux stations de référence et simulés sur les bassins de Wilmot (a), de Beaurivage (b), de South Nation (c) sur les périodes du passé (1961-1990) et du futur (2041-2070). Les stations observées sont : 01CB004 (1972-2001) pour Wilmot, 02PJ007 (1961-1990) pour Beaurivage et 02LB005 (1961-1990) pour South Nation. Les débits sont en m³/s.

		Passé			Futur		
		Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀	Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀
(a)	Observé	0,4	0,3	0,3			
	MRCC_4.2.0-adj	0,8	0,5	0,7	0,6	0,5	0,5
	MRCC_4.2.0-adl	0,8	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6
	MRCC_4.2.3-aez	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6
	MRCC_4.2.3-aez	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6
	MRCC_4.2.3-afa	0,8	0,5	0,7	0,7	0,5	0,6
		Passé			Futur		
		Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀	Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀
(b)	Observé	1,1	0,6	1,1			
	MRCC_4.2.0-adj	2,0	1,3	2,0	1,3	1,0	1,6
	MRCC_4.2.0-adl	2,0	1,4	2,1	1,5	1,0	1,5
	MRCC_4.2.3-aez	2,1	1,3	2,1	1,4	0,8	1,5
	MRCC_4.2.3-aez	2,1	1,3	2,1	1,4	0,8	1,5
	MRCC_4.2.3-afa	2,1	1,6	2,4	1,4	0,8	1,5
		Passé			Futur		
		Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀	Q ₂₋₇	Q ₁₀₋₇	Q ₅₋₃₀
(c)	Observé	1,1	0,6	1,2			
	MRCC_4.2.0-adj	7,7	5,8	7,8	5,3	4,8	5,8
	MRCC_4.2.0-adl	7,6	6,0	7,6	5,8	4,5	6,0
	MRCC_4.2.3-aez	7,5	6,5	8,4	5,7	4,8	6,5
	MRCC_4.2.3-aez	7,5	5,5	7,5	6,1	4,5	6,1
	MRCC_4.2.3-afa	8,7	5,6	7,6	5,7	4,1	5,6