



VALIDATION ET INTERPRÉTATION DU RUISSELLEMENT PRODUIT PAR MRCC5

Rapport de stage Août 2018

VALIDATION ET INTERPRÉTATION DU RUISSELLEMENT PRODUIT PAR MRCC5

Rapport de stage Août 2018

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Zackary Flansberry, Ouranos Biljana Music, Ouranos Sébastien Biner, Ouranos Catherine Guay, Institut de recherche d'Hydro-Québec

Titre du projet [Ouranos]: Validation de l'écoulement simulé par le MRCC5 dans le cadre du projet « Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec (CROQ) ».

Numéro du projet [Ouranos]: 350013 (CROQ)

Citation suggérée : Flansberry, Z., Music B., Biner S., Guay C. (2018). *VALIDATION ET INTERPRÉTATION DU RUISSELLEMENT PRODUIT PAR MRCC5*. Rapport présenté à Ouranos. Montréal. Ouranos, Équipe Simulations et analyses climatiques. [80] p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mes superviseurs Biljana Music et Sébastien Biner pour m'avoir donné l'opportunité d'étudier un tout nouveau champ de recherche cet été, ainsi que pour l'encadrement et toutes les ressources qui auront permis d'extraire un maximum d'information de ce stage. Je vous suis redevable pour votre intérêt soutenu tout au cours du stage et pour l'équilibre de direction et de liberté de recherche dont j'ai pu profiter

Beaucoup d'autres acteurs auront gracieusement offert leur aide à un niveau surprenant. Je pense en particulier à Catherine Guay (de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec) pour avoir participé aux rencontres et pour son soutien théorique et technique s'étendant jusqu'à l'écriture de ce rapport. J'aimerais aussi remercier Hélène Côté pour l'extraction intensive de données et pour ses scripts personnalisés, Richard Harvey pour avoir aidé à interpréter le comportement du sol, et Anne Frigon pour les idées et la direction apportées à la mi-stage.

J'aimerais aussi remercier mon ami Gabriel Martine, de McGill, qui m'a longuement écouté parler des aspects techniques de mon travail et qui a contribué ses idées.

Les données du MRCC5 ont été générées et fournies par Ouranos. Les calculs du MRCC5 ont été effectués sur le supercalculateur guillimin de l'Université McGill, sous la gouverne de Calcul Québec et Calcul Canada. L'exploitation de ce supercalculateur est financée par la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), le Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI), et le Fonds de recherche du Québec — Nature et technologies (FRQ-NT).



RÉSUMÉ

Le développement de modèles climatiques régionaux requiert toujours une phase de validation des diverses variables produites par le modèle afin de vérifier si leurs valeurs et statistiques correspondent bel et bien au portrait observé. Cette validation débute généralement par des variables plus fondamentales telles que la température ou les précipitations; une fois que les statistiques de celles-ci sont bien vérifiées, on peut se pencher sur d'autres variables et analyses afin de mieux évaluer la capacité du modèle à bien reproduire les interactions entre les différentes composantes du système climatique.

L'une des variables d'intérêt ruissellement, qui représente la quantité d'eau liquide s'écoulant en surface (ruissellement de surface) ou au travers du sol (ruissellement de sous-surface ou drainage) jusqu'à la sortie d'un bassin versant. Sa dynamique résulte de l'interaction entre plusieurs variables climatiques et propriétés géophysiques du bassin : en effet, les niveaux de précipitations, l'évapotranspiration, la végétation et les propriétés thermiques et hydrologiques du sol auront tous une influence importante sur son comportement.

Ce rapport s'est penché sur la validation et l'interprétation du ruissellement produit par le **Modèle régional canadien du climat** dans sa cinquième et plus récente itération **(MRCC5)**. Ce modèle est développé par le Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale (ESCER) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) avec la collaboration d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC).

Afin d'assurer la validation, ce rapport a cherché à combler les objectifs suivants :

- Comparer quantitativement les ruissellements simulés aux observations du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ¹) sur vingt bassins versants à l'échelle de la province;
- Interpréter la dynamique de ruissellement simulée en la corrélant au comportement des autres variables produites par le MRCC5;
- Quantifier l'influence des paramètres de simulation (tels que la résolution de la grille);
- Étudier les changements dans la dynamique de ruissellement d'ici 2100.

¹ Le CEHQ est maintenant nommé la **Direction de l'expertise hydrique (DEH)**. Ce rapport utilise l'ancienne dénomination.

Les résultats de notre analyse démontrent que les ruissellements produits par le MRCC5 sont systématiquement surestimés face à ceux des observations. Dans le cas d'une simulation (**bbr**, MRCC5 piloté par la réanalyse ERAint75) centrée sur le Québec (domaine QC) à une résolution angulaire de 0.11°, une surestimation globale de 21% a été observée. Cette surestimation est relativement uniforme à l'échelle de la province. La variabilité interannuelle du ruissellement du modèle est semblable à celle des observations pour tous les bassins. La surestimation du ruissellement global des simulations diminue de 6% en passant à une résolution moins fine de 0.22° (ou plus), et d'un autre 4.5% en simulant sur le domaine de l'Amérique du Nord entière (AMNO). Cela dit, aucune conclusion qualitative importante ne dépend des paramètres de simulation.

Les simulations MRCC5 ont une forte séparation du ruissellement de surface et de sous-surface; durant la période de fonte, les bassins définis par le ruissellement de surface ont un pic de ruissellement printanier devancé d'une quarantaine de jours face à ceux définis par le ruissellement de sous-surface, ce qui ne correspond pas aux observations. Le mode de ruissellement privilégié au moment de la fonte est défini par la composition du sol – un sol riche en sable conduit mieux l'eau, ce qui promeut l'infiltration dans le sol et donc le ruissellement de sous-surface.

Pour étudier les effets des changements climatiques sur le ruissellement, nous avons finalement utilisé une simulation pilotée par le modèle climatique global CanESM2 avec le scénario de concentration de CO₂ RCP 8.5 pour maximiser l'effet qualitatif des changements climatiques sur la dynamique de ruissellement d'ici 2100. Deux effets principaux sont observés : d'abord, une diminution de l'importance du pic printanier vu la diminution de la quantité de neige; puis, une augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol durant l'hiver vu la diminution du gel du sol, ce qui mène à une forte diminution du ruissellement de surface.

Afin d'améliorer les performances du modèle, trois pistes sont possibles :

- 1. L'amélioration de la modélisation physique de l'infiltration de l'eau dans le sol;
- 2. L'amélioration de la base de données géophysiques décrivant la composition du sol;
- 3. L'intégration d'un modèle de routage approprié aux bassins versants à l'étude.

TABLE DES MATIÈRES

1.		Intro	oduct	ion	1
2.		Con	texte	et objectifs	3
3.		Mét	hodo	logie	5
4.		Port	rait n	nétéorologique des bassins	7
5. CE	ΞH	Com Q	nparai	son du ruissellement produit par les simulations MRCC5 avec les mesures quotidiennes	3 du 10
	5.	1	Anal	yse du ruissellement moyen	. 10
	5.	2	Varia	abilité interannuelle	.11
		5.2.	1	Écart-type interannuel	. 12
		5.2.	2	Corrélation des profils interannuels simulés et observés	. 14
		5.2.	3	Comparaison avec le MRCC4	. 15
	5.	3	Dyna	amique saisonnière du ruissellement	. 17
		5.3.	1	Moment du Pic printanier	. 18
	5.	4	Réca	pitulatif	. 20
6.		Inte	rpréta	ation physique de la dynamique du ruissellement simulé par MRCC5	.21
	6.	1	Deux	composantes de ruissellement	.21
	6.	2	Mod	e de ruissellement privilégié : Étude du cas Rimouski vs Dumoine	.24
		6.2.	1	Schéma de surface du sol : CLASS	. 25
	6.	3	Corr	élation avec les champs géophysiques	.26
	6.	4	Mod	élisation de la conductivité hydraulique et du ruissellement dans CLASS 3.5	. 29
		6.4.	1	Niveau moyen du stockage d'eau dans le sol	.30
	6.	5	Diffé	rences entre les notions de ruissellement observé et simulé	.31
		6.5.	1	Routage	.31
		6.5.	2	Modélisation du ruissellement hypodermique	.33
	6.	6	Synt	hèse : regard sur quelques régions et rapport avec les observations	.35
		6.6.	1	Bas Saint-Laurent (bassins 1-2-3-4-5)	. 35
		6.6.	2	Outaouais (bassins 7-8)	.36
		6.6.	3	Grand Nord (bassins 17-19-20)	. 37
		6.6.	4	Mistassini (bassin 12)	. 38
	6.	7	Réca	pitulatif	. 39
7.		Effe	t des	paramètres de simulation sur la dynamique de ruissellement	.40
	7.	1	Date	de départ et pilotage spectral	.40

7.1.	1 Ruissellement global	40
7.1.	2 Variabilité interannuelle	41
7.1.	.3 Dynamique saisonnière	43
7.1.	.4 Récapitulatif	45
7.2	Résolution de la grille de simulation	46
7.2.	1 Ruissellement moyen	47
7.2.	2 Variabilité interannuelle	49
7.2.	.3 Dynamique saisonnière	50
7.2.	.4 Récapitulatif	52
7.3	Domaine de simulation	53
7.3.	1 Ruissellement moyen	54
7.3.	2 Variabilité interannuelle	55
7.3.	.3 Dynamique saisonnière	56
7.3.	.4 Récapitulatif	57
7.4	Synthèse de l'effet des paramètres de simulation	58
8. Proj	jections de l'influence des changements climatiques sur la dynamique de ruissellement	59
8.1	Portrait des changements climatiques	60
8.2	Réduction de l'importance relative du pic printanier	64
8.3	Réduction du ruissellement de surface	66
8.4	Devancement du pic printanier	69
8.5	Synthèse – Bas Saint-Laurent, Outaouais, Grand Nord	71
8.5.	.1 Outaouais (bassins 7-8)	71
8.5.	.2 Grand Nord (bassins 17-19-20)	72
8.5.	.3 Bas Saint-Laurent (bassins 1-2-3-4)	73
8.6	Cohérence des différents modèles de circulation générale	74
9. Con	nclusion	77
Référenc	ces	79
Annexe l	I. Comparaison du ruissellement simulé par MRCC5 avec celui de la réanalyse ERAint75	81
I.1.	Ruissellement moyen	81
1.2.	Variabilité interannuelle	82
1.3.	Dynamique saisonnière	84
1.4.	Récapitulatif	85
Annexe l	II. Profils interannuels et annuels du ruissellement sur la période 1980-2014	86
Annexe l	III. Évolution des profils annuels des variables simulées sous MRCC5-CanESM2 R	CP8.5
		96

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle de l'eau simplifié montrant la relation entre les précipitations, l'évaporation et le ruissellement	1
Figure 2. Illustration des vingt bassins versants à l'étude dans ce rapport	3
Figure 3. Précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre) dérivées des observations de la Climatic Research Unit (CRU) sur la période 1980-2014	7
Figure 4. Précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre), moyenne de l'accumulation maximale annuelle de neige à la surface et moyenne de l'évaporation simulées par MBCC5 dans la simulation bbr durant la période 1980-2014	3
Figure 5. Différence entre les précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre) obtenues au travers de la simulation MRCC5 bbr et des observations du Climate Research Unit (CRU) sur la période de 1980-2014	9
Figure 6. Ruissellement moyen simulé et observé pour les vingt bassins durant la période de 1980- 2014 et rapport entre les simulations et les observations	1
Figure 7. Profil interannuel simulé et observé du ruissellement moyen des bassins 10 (Sainte- Anne) et 20 (À la Baleine)	2
Figure 8. Écart-type (std) et coefficient de variation (CV) des distributions interannuelles du	
ruissellement moyen simulé et observé des les vingt bassins durant la période de 1980-20141	3
Figure 9. Erreur moyenne quadratique centrée (EMQC) et coefficient de corrélation de Pearson	
(R) entre les distributions simulées et observées du ruissellement moyen annuel des les vingt	
bassins durant la période de 1980-2014 14	1
Figure 10. Coefficient de corrélation de Pearson (R) entre les distributions de ruissellement moyen simulées et observées de bassins versants étudiés dans le cadre de la validation de MRCC4, en fonction de la différence entre les écarts-type des ruissellements annuels des distributions simulées et observées. Tiré de [8]	
Figure 11 Freur movenne quadratique centrée (FOMC) entre les distributions de ruissellement	J
moyen simulées et observées de bassins versants étudiés dans le cadre de la validation de MRCC4 (gauche) et de la validation de MRCC (droite), en fonction de la différence entre les ruissellements moyens des distributions simulées et observées. Graphique de gauche tiré de [8]. 16	
Figure 12. Profil annuel moyenné sur la période 1980-2014 du ruissellement simulé et observé	
des bassins 2 (Cascapédia), 7 (Dumoine), 12 (Mistassini) et 19 (George)	7
Figure 13.Moment du pic printanier moyen simulé et observé pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014 et rapport entre les simulations et les observations.	9
Figure 14. Illustration des pics printaniers doublés des profils de ruissellement annuel simulés	~
 Ges bassins 11 (Ashuapmushuan), 12 (Mistassini) et 16 (Broadback)	۶ ۲

Figure 16. Hauteur moyenne du pic de ruissellement de surface (mrros) et de ruissellement	
hypodermique (mrroh) simulés sur les vingt bassins dans la simulation MRCC5 bbu sur la	
période de 1980-2014, ainsi que la différence entre les deux hauteurs et le biais entre les	
moments du pic printaniers simulés et observés23	3
Figure 17. Profil annuel du ruissellement, bilan hydrique et profil de température moyens des	
bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine) obtenus au travers de la simulation MRCC5 bbu	1
Figure 18. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du sol des bassins 4 (Rimouski) et	
7 (Dumoine) pour l'année 2006 de la simulation MRCC5 bbu	ŝ
Figure 19.Fraction moyenne de sable et d'argile des vingt bassins à l'étude telle que définie dans	
la simulation bbu , ainsi que la profondeur de l'écorce terrestre et la différence entre la hauteur	
des pics simulés de ruissellement de surface et de ruissellement hypodermique de chacun des	
bassins. 27	
Figure 20. Illustration des concepts liés à la réponse à un influx d'eau liquide d'un sol saturé en	
eau près de sa surface	3
Figure 21. Quantité d'eau totale et fraction volumétrique d'eau solide dans les couches du sol	
individuelles des bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine) pour l'année 2006, telles que simulées	
dans la simulation MRCC5 bbu 29)
Figure 22. Illustration de la densité d'eau stockée dans le sol en fonction de la fraction de sable	
pour chacun des bassins)
Figure 23. Profil de ruissellement du bassin 4 (Rimouski) durant l'année 2000, tel qu'obtenu au	
travers de la simulation MRCC5 bbu	Ĺ
Figure 24.Influence du routage sur le profil de ruissellement du bassin 4 (Rimouski) simulé par	
la simulation bbu durant l'année 2000, et illustration de l'effet des différents paramètres de	
routage 32	
Figure 25. Réponse de la fraction volumétrique d'eau des les couches individuelles du sol des	
bassins 4 et 7 à un même événement de précipitations fortes, et illustration du délai dans le	
moment du pic de la fraction volumétrique d'eau lors de la percolation vers les couches	
profondes pour trois événements similaires	ŧ
Figure 26. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 1 (Matapedia) pour	_
l'annee 2000 de la simulation MRCC5)
Figure 27. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 8 (Coulonge) pour	_
i annee 1981 de la simulation MIRCC5 bbu	כ
Figure 28. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 20 (A la Baleine) pour	-
Figure 20. Drofil du missellement et des veriebles d'hudrologie du bessin 12 (Mistessini) pour	1
Figure 29. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 12 (Mistassini) pour	2
i annee 2013 de la simulation MIRCC5 bbu	5
Figure 30. Difference entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbq ,	1
bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la periode 1980-2014	Ł
rigure 31. Difference entre les écaris-type des ruissellements annuels obtenus au travers des	
simulations bbq , bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la periode	`
1980-2014	-
Figure 32. Correlation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des	`
simulations bbq , bbs et bbt avec ceux de la simulation bbr sur la periode 1980-201443	5
rigure 55. Correlation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des	,
simulations bbq, bbr, bbs et bbt avec ceux des observations du CEHQ	ز
Figure 54. Difference entre les volumes de pics printaniers obtenus au travers des simulations	^
bbq, bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la periode 1980-201444	ł

Figure 35.	Différence entre les moments des pics printaniers obtenus au travers des simulations
bbq, bbs	et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation sur la période 1980-201445
Figure 36.	Représentation visuelle des tuiles de simulation contenues dans chacun des bassins
pour les	résolutions de 0.11° (vert) et 0.44° (rouge)46
Figure 37.	Différence entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbr,
bbu et b	bv avec ceux obtenus au travers des observations du CEHQ47
Figure 38.	Différence entre les niveaux de précipitations moyens des simulations bbu et bbv avec
ceux de l	a simulation bbr , et différence entre les profils annuels moyens de précipitations et de
ruisseller	ment des simulations bbu et bbv avec ceux de la simulation bbr
Figure 39.	Différence entre les écarts-type des ruissellements annuels obtenus au travers des
simulatio	ons bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr
Figure 40.	Correlation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des
simulatio	ons bbr, bbu et bbv
Figure 41.	Correlation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des
simulatio	ons bbr, bbu et bbv avec ceux des observations du CEHQ50
Figure 42.	Différence entre les volumes de pics printaniers moyens obtenus au travers des
simulatio	ons bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr
Figure 43.	Difference entre les moments de pic printanier moyens obtenus au travers des
simulatio	ons bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr
Figure 44.	Illustration des domaines de simulation QC (pointille) et AMNO (figure entiere)
Figure 45.	Difference entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbu et
DDW	54 Différence entre les présinitations movemes obtenues au travers des simulations blu
Figure 46.	Différence entre les précipitations moyennes obtenues au travers des simulations bbu
et bbw , o	et uniference entre les proms annuels moyennes de precipitations et de ruissemement
Cierce 47	Différence entre les écarts type des ruissellements annuels obtenus au travers des
rigure 47.	Difference entre les écaris-type des ruissellements annuels obtenus au travers des
Figure /8	Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des
simulatic	correlation entre les profils de raissellement interaindels des bassins individuels des
Figure 49	Différence entre les volumes de nic printanier moyens obtenus au travers des
simulatic	binerence entre les volumes de ple printamer moyens obtenus du travers des
Figure 50	Différence entre les moments de nic printanier movens obtenus au travers des
simulatic	binerence entre les moments de ple printainer moyens obtenus du travers des ons bbu et bbw et au travers des observations du CEHO
Figure 51.	Température movenne des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation
subséque	ente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle gu'obtenue au travers d'une
simulatio	on MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanFSM2
Figure 52.	Niveaux de précipitations movens des bassins durant la période de 1980-2009 et
augment	ration subséguente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle gu'obtenue au travers
d'une sir	nulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2
Figure 53.	Niveau d'évaporation des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation
subséque	ente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle gu'obtenue au travers d'une
simulatic	on MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2
Figure 54.	Niveau de ruissellement moyen des bassins durant la période de 1980-2009 et
augment	ation subséquente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle qu'obtenue au travers
d'une sir	nulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM263
Figure 55.	Maximum annuel moyen de l'accumulation de neige à la surface des bassins durant
les pério	des de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 tel qu'obtenu au
travers d	l'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM264
d'une sin Figure 55. les pério travers d	nulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM263 Maximum annuel moyen de l'accumulation de neige à la surface des bassins durant des de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 tel qu'obtenu au l'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM264

Figure 56. Fraction du ruissellement contenue dans le pic printanier durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......65 Figure 57. Maximum annuel moyen de glace dans le sol durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 tel qu'obtenu au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......66 Figure 58. Estimation du maximum annuel moyen de la fraction de glace dans la première couche du sol par rapport au niveau de saturation durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......67 Figure 59. Estimation du minimum annuel moyen du facteur fice régissant la conductivité hydraulique de la première couche du sol durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le Figure 60. Fraction du ruissellement de surface par rapport au ruissellement total durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au Figure 61. Moment du pic printanier durant la période de 1980-2009 et changement subséquent en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 tel qu'obtenu au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......70 Figure 62. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 7 (Dumoine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......71 Figure 63. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 20 (À la Baleine) entre les périodes de 1980-2009. de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2......72 Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du Figure 64. sol ciblées et de température pour le bassin 4 (Rimouski) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2.....73 Figure 65. Évolution des températures et du bilan hydrique des différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les vingt bassins......74 Figure 66. Évolution du maximum annuel moyen d'accumulation de neige à la surface et de la proportion du ruissellement contenue durant le pic printanier pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont Évolution du maximum annuel de fraction de glace dans la première couche du sol Figure 67. par rapport au niveau de saturation et de la fraction de surface du ruissellement total pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les Figure 68. Évolution du moment du pic printanier pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont soumises à

Figure 69. ERAinter	Ruissellement moyen obtenu au travers de la simulation bbr et de la réanalyse im75 pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014, et différence avec les	
observat	ions du CEHQ	82
Figure 70.	Écarts-type des distributions de ruissellements moyens annuels obtenues au travers	
de la sim	ulation bbr et de la réanalyse ERAinterim75 pour les vingt bassins durant la période de	
1980-202	14, et différence avec les observations du CEHQ	83
Figure 71.	Corrélation des distributions de ruissellements moyens annuels obtenues au travers	
de la sim	ulation bbr et de la réanalyse ERAinterim75 pour les vingt bassins durant la période de	
1980-20	14	84
Figure 72.	Profils de ruissellement obtenus au travers de la simulation bbr , de la réanalyse	
FRAint7	5 et des observations du CEHO pour les bassins 3 (Matane, en 1998), 7 (Dumoine, en	
1999) et	20 (À la Baleine, 1998)	85
Figure 73	Ruissellement annuel moven et profil annuel moven du ruissellement du bassin 1	50
(Mataná	dia) sur la nériode 1980-2014 nour la simulation bbr les observations du CEHO et la	
róanalyc	o EDAint7E	06
Figure 74	Puiscellement annual moven at profil annual moven du ruiscellement du bassin 2	50
rigule 74.	Kuissellement annuel moyen et prom annuel moyen du fuissellement du bassin 2	
(Cascape rápnalus	cula) sur la periode 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CERQ et la	06
reanalys	e EKAINU/5	50
Figure 75.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 3	
(Matane) sur la periode 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	~-
reanalys	e ERAInt /5	37
Figure 76.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 4	
(Rimousl	ki) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	37
Figure 77.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 5	
(Château	uguay) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	88
Figure 78.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 6 (Au	
Saumon)) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	88
Figure 79.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 7	
(Dumoin	e) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	89
Figure 80.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 8	
(Coulong	ge) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	89
Figure 81.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 9	
(Batiscar	n) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalys	e ERAint75	90
Figure 82.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 10	
(Sainte-A	Anne) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
, réanalvs	e ERAint75	90
Figure 83.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 11	
(Ashuani	mushuan) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr . les observations du CFHO	
et la réa	nalvse ERAint75	91
Figure 84.	Ruissellement annuel moven et profil annuel moven du ruissellement du bassin 12	
(Mistassi	ini) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHO et la	
réanalys	e FRAint75	91
. canary 5		

Figure 85. (Moisie)	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 13 sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalyse	e ERAint75	92
Figure 86.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 14	
(Romaine	e) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	
réanalyse	e ERAint75	92
Figure 87.	Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 15	
(Harricar	na) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr , les observations du CEHQ et la	93
Eiguro 99	Puiscellement annual moven et profil annual moven du ruiscellement du bassin 16	55
(Broadba	raisseilement annuel moyen et prom annuel moyen du russeilement du bassin 10 pck) sur la période 1980-2014 pour la simulation bhr , les observations du CEHO et la	
réanalyse	$\simeq FRAint75$	93
Figure 80	Ruissellement annuel moven et profil annuel moven du ruissellement du bassin 17	55
(Grande	Rivière de la Baleine) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr les observations	
	et la réapalyce EPAint75	01
	Puiscellement annual moven at profil annual moven du ruiscellement du bassin 18	94
(Eastmai	n) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr les observations du CEHO et la	
réanalyse		٩ı
Figure 91	Ruissellement annuel moven et profil annuel moven du ruissellement du bassin 19	94
(George)	sur la nériode 1980-2014 pour la simulation bbr les observations du CEHO et la	
(George)	Sur la periode 1960-2014 pour la sindiation bbi , les observations du CENQ et la	05
Eiguro 02	Puiscellement appuel moven et profil appuel moven du ruiscellement du bassin 18 (λ	95
la Balein	e) sur la période 1980-2014 pour la simulation bbr les observations du CEHO et la	
réanalyse		92
Figure 93	Évolution des profils de ruissellement du bilan bydrique, de variables d'hydrologie du	55
sol ciblée	evolution des proms de ruissenement, du blian nyunque, de vanables d'hyurologie du	
2010-203	A de 2010-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5	
nilotée n	ar le modèle MRCC5-CanESM2	96
Figure 94	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du	
sol ciblée	es et de température pour le bassin 2 (Cascapédia) entre les périodes de 1980-2009, de	
2010-202	Re de 20/0-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5	
nilotée n	ar le modèle MRCC5-CanESM2	97
Figure 95	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du	
sol ciblée	es et de température pour le bassin 3 (Matane) entre les périodes de 1980-2009 de	
2010-202	Re 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5	
nilotée n	ar le modèle MRCC5-CanFSM2	98
Figure 96	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du	50
sol ciblée	es et de température nour le bassin 4 (Rimouski) entre les nériodes de 1980-2009 de	
2010-202	39 de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5	
nilotée n	ar le modèle MRCC5-CanFSM2	99
Figure 97	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du	
sol ciblée	es et de température pour le bassin 5 (Châteauguay) entre les périodes de 1980-2009	
de 2010-	-2039 de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation	
MRCC5 n	pilotée par le modèle MRCC5-CapESM2	100
Figure 98	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du	100
sol ciblée	es et de température nour le bassin 4 (Au Saumon) entre les nériodes de 1980-2009 de	
2010-202	39 de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5	
nilotée n	ar le modèle MRCC5-CanESM2	101
p		

Figur	e 99.	Évolution de	s profils	de ruis	sellem	ent, di	u bilan l	hydric	jue, de	variat	oles d'l	nydro	logie	du	
9	sol ciblée	s et de temp	érature	pour le	bassir	า 7 (Dเ	imoine) entr	e les p	ériode	s de 1	980-2	.009,	de	
	2010-203	9, de 2040-20	069 et de	2070-	2099 t	elle qu	'obten	ue au	traver	s d'une	e simu	lation	MRC	C5	
1	pilotée pa	ar le modèle l	MRCC5-0	CanESN	/2										102
'	'	4													

Figure	e 111.	Évolution	des prof	ils de r	uissellen	nent, du	bilan hy	/drique,	de var	iables d	d'hydi	rologie	
C	du sol ciblée	es et de te	mpératu	ire poi	ur le bass	sin 19 (G	ieorge)	entre le	s pério	des de	1980)-2009,	
C	de 2010-203	39, de 204	10-2069	et de	2070-20	99 telle	qu'obte	nue au	traver	s d'une	e simu	ulation	
ſ	MRCC5 pilot	ée par le r	nodèle I	MRCC5	-CanESM	12							. 114
		z '											

Figure 112.	Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie	
du sol	ciblées et de température pour le bassin 20 (À la Baleine) entre les périodes de 1980-	
2009,	de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une	
simula	ition MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Liste des variables de simulation utiliséesxv
Tableau 2.	Liste des simulations utilisées dans ce rapportxv
Tableau 3.	Liste des scripts Python utilisés pour générer les résultats et figures finaux du rapport xvi
Tableau 4.	Présentation des vingt bassins versants à l'étude dans ce rapport4
Tableau 5.	Années de validité des données observatoires de la CEHQ sur la période de 1980-2014 6

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Tableau 1. Liste des variables de simulation utilisées

Nom	Description	Unités
bedrock	Profondeur de la croûte terrestre	m
clay	Fraction volumétrique d'argile dans le sol	m³/m³
evspsbl	Flux d'évaporation dans l'atmosphère	mm/j
mrlsl	Fraction volumétrique d'eau totale dans chacune des 17 couches du sol	m³/m³
mrfsl	Fraction volumétrique d'eau solide dans chacune des 17 couches du sol	m³/m³
mrfso	Quantité totale d'eau glacée dans le sol	kg/m ²
mrro	Ruissellement total	mm/j
mrroh	Ruissellement hypodermique	mm/j
mrros	Ruissellement de surface	mm/j
mrso	Quantité totale d'eau (toutes formes) dans le sol	kg/m²
pr	Précipitations (toutes formes)	mm/j
prsn	Précipitations (solides)	mm/j
sand	Fraction volumétrique de sable dans le sol	m³/m³
snw	Équivalent en eau de neige	kg/m ²
tas	Température à 2 m au-dessus de la surface	С
tasmax	Température journalière maximale à 2 m au-dessus de la surface	С
tasmin	Température journalière minimale à 2 m au-dessus de la surface	С

Tableau 2.	Liste	des	simulations	utilisées	dans	ce	rapport

Nom	Domaine	Résolution (degrés)	Pilote	Pilotage spectral	Fichier géophys.	Période (aaaamm)
bbq	QC	0.11	ERAint75	PS3	GEO1	197902-201412
bbr	QC	0.11	ERAint75	-	GEO1	197901-201612
bbs	QC	0.11	ERAint75	-	GEO1	197902-201412
bbt	QC	0.11	ERAint75	PS3	GEO1	197901-201412
bbu	QC	0.22	ERAint75	-	GEO4	197901-201412
bbv	QC	0.44	ERAint75	-	GEO4	197901-201412
bbw	AMNO	0.22	ERAint75	PS3	GEO4	197901-201412
bby	AMNO	0.22	MRCC5-CanESM2	PS3	GEO4	195001-200512
bbz	AMNO	0.22	MRCC5-CanESM2	PS3	GEO4	200601-210012
bcc	AMNO	0.22	CNRM-CM5	PS3	GEO4	195001-200512
bcd	AMNO	0.22	CNRM-CM5	PS3	GEO4	200601-210012
bcg	AMNO	0.22	MPI-ESM-LR	PS3	GEO4	195001-200512
bch	AMNO	0.22	MPI-ESM-LR	PS3	GEO4	200601-210012
bcj	AMNO	0.22	GFDL-ESM2M	PS3	GEO4	195001-200512
bck	AMNO	0.22	GFDL-ESM2M	PS3	GEO4	200601-210012

LISTE ET DESCRIPTION DES SCRIPTS PYTHON

Cette section comprend tous les scripts Python utilisés afin de générer les données et les figures de ce rapport. Tous les scripts sont contenus dans le dossier /neree/fzackary/exec/Python Scripts.

Toute l'importation et l'exportation de données brutes est assurée par le script io_basins.py . Parmi ses fonctions, on retrouve :

- L'importation d'une base de données d'information sur les vingt bassins (load basins info(), etc.);
- L'importation des masques définissant les tuiles contenues dans chacun des vingt bassins pour la grille de simulation donnée (load masks all(), etc.);
- L'importation des données observatoires et le calcul de leur valeur moyenne sur chacun des vingt bassins pour chaque pas de temps (load mean deh data(), load cru data(), etc);
- L'importation des sorties de simulation et le calcul de leur valeur moyenne sur chacun des vingt bassins pour chaque pas de temps (load_mean_sim_data(), load_mean_daily_sim_data(), etc);
- L'application du schéma de routage HSAMI sur le ruissellement simulé (apply_hsami_routing(), etc.)

Toutes les figures sont générées à partir de fonctions de base matplotlib et basemap. Certaines fonctions générant des cartes standardisées sont retrouvées dans plot basins.py.

Toutes les données sont enregistrées dans le répertoire /exec/fzackary/Data. Les données quotidiennes contiennent daily dans le nom de fichier; toutes les autres données sont stockées sur une base mensuelle. L'importation des données est standardisée de sorte à produire un objet nparray aux dimensions (20 bassins, *m* années, *n* jours/mois). Les unités des différentes variables sont aussi standardisées qu'importe la source de données (voir le Tableau 1).

Chaque section du rapport calcule les statistiques associées aux simulations et observations dans un même script, et produit les figures dans un autre script. La liste complète de ces scripts peut être retrouvée dans le Tableau 3. Des scripts préliminaires peuvent être retrouvés dans le sous-dossier archive.

Sections	Script statistiques	Script figures
4, 5, Annexe II	bbr_vs_CEHQ_stats.py	bbr_vs_CEHQ_figures.py
6	bbu_stats.py	physical_interpretation_figures.py
7.1	bbqbbrbbsbbt_stats.py	bbqbbrbbsbbt_figures.py
7.2	bbrbbubbv_stats.py	bbrbbubbv_figures.py
7.3	bbubbw_stats.py	bbubbw_figures.py
8, Annexe III	climatechange_dailystats.py	climchange_figures.py
Annexe I	eracomp_stats.py	eracomp_figures.py

Tableau 3. Liste des scripts Python utilisés pour générer les résultats et figures finaux du rapport

1. INTRODUCTION

Afin d'adéquatement affronter les problématiques qui nous seront posées par les changements climatiques, il est d'une importance cruciale d'être en mesure de quantifier les modifications qu'ils engendreront dans le comportement des différentes composantes du système climatique. Cette tâche complexe implique la connaissance individuelle d'une multitude de systèmes (atmosphériques et hydrologiques, pour en nommer quelques-uns) ainsi que la compréhension des interactions entre eux. À partir des lois physiques régissant ces interactions, les **modèles climatiques** s'acquittent de ce travail en calculant numériquement l'évolution des variables climatiques sur une région géographique ciblée.

Si l'on cherche souvent à projeter les changements climatiques à l'échelle globale au travers de **modèles** de circulation générale, qui simulent l'ensemble de la planète, cette approche n'est pas la mieux adaptée à une analyse plus locale des projections. En outre, si l'on veut capturer des phénomènes de fine échelle spatiale, une simulation globale demanderait une résolution telle qu'un coût informatique prohibitif y serait associé. De plus, certaines régions peuvent demander une considération plus poussée et spécifique de certains phénomènes y étant particuliers.

Ce sont ces considérations qui ont engendré le développement du **Modèle régional canadien du climat (MRCC)**, qui en est à une cinquième itération (**MRCC5**) intégrant entre autres un paramétrage physique plus adéquat aux simulations climatiques à très haute résolution. Le MRCC5 [1,2] a été développé par le Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale (ESCER) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) avec la collaboration d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC).

Évidemment, tout nouveau modèle demande une rigoureuse validation et interprétation des résultats qu'il produit. Vu la forte complexité inhérente aux modèles climatiques, cette analyse est habituellement faite sur des variables individuelles. Une validation détaillée des précipitations produites par MRCC5 à l'échelle du Québec a déjà été réalisée[3]; dans le cadre de ce présent ouvrage, on se concentre plutôt sur le **ruissellement** produit par le modèle.



Figure 1. Cycle de l'eau simplifié montrant la relation entre les précipitations, l'évaporation et le ruissellement

Le ruissellement représente localement la quantité d'eau liquide s'écoulant latéralement, tel qu'illustré dans la Figure 1. À une correction près (la variation dans la quantité d'eau stockée dans le sol dS/dt est approximativement nulle sur de longues périodes), il est défini comme étant la différence entre les niveaux de précipitation P et d'évaporation E:

$$R(+dS/dt) = P - E$$

Cet écoulement comprend une composante de **surface** ainsi qu'une composante **hypodermique** ou **soussurface**; la première comprend l'eau s'écoulant dans les rivières en plus de celle s'écoulant sur le sol, tandis que la seconde s'écoule à même le sol via les nappes d'eau souterraines. Les deux composantes de cet écoulement se dirigent jusqu'à l'exutoire d'un bassin versant, où l'on a alors une mesure du ruissellement total.

Dans le MRCC5, la région simulée est divisée en tuiles, dans lesquelles les deux composantes du ruissellement sont calculées à chaque intervalle de temps simulé. Le ruissellement de surface est représenté par la quantité d'eau qui ne s'infiltre pas dans le sol, tandis que le ruissellement de soussurface est représenté par la quantité d'eau s'écoulant au bas de la couche la plus profonde du sol (après s'être infiltrée à la surface du sol et avoir percolé jusqu'au fond). On appelle parfois ce deuxième processus le **drainage**. Les différentes tuiles ne communiquent aucunement entre elles, en ce sens, qu'il n'y a pas de transfert d'eau d'une tuile à l'autre.

Le ruissellement est une variable climatique importante puisque sa dynamique est un résultat de l'interaction entre plusieurs variables plus fondamentales; elle dépend en particulier des précipitations et du comportement hydrologique et thermodynamique du sol. Elle prend aussi compte du comportement de ces systèmes sur une certaine étendue spatio-temporelle contrairement à certaines variables plus ponctuelles. Pour ces raisons, on dit parfois qu'elle est un intégrateur du climat.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La validation du ruissellement produit par le MRCC5 sera ici présentée en se penchant sur vingt bassins versants dans l'ensemble de la province, identifiés dans la Figure 2 et décrits dans le Tableau 4. Les bassins ont été choisis de sorte à en avoir deux par région hydrique du Québec afin d'avoir un portrait représentatif de l'étendue géographique de la province; au sein d'une même région hydrique, ils ont été sélectionnés en fonction de la qualité des mesures quotidiennes du ruissellement du **Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)**² [4].



Figure 2. Illustration des vingt bassins versants à l'étude dans ce rapport

² Le CEHQ est maintenant nommé la **Direction de l'expertise hydrique (DEH)**. Ce rapport utilise l'ancienne dénomination. Les données sont disponibles publiquement au travers de [4]

		e Nom	Currentiaia	Nombre de tuiles				
No.	Code		Superficie	0.11°	0.22°	0.22	0.44°	
			(KM)	QC	QC	AMNO	QC	
1	011509	Matapédia	2748	20	4	4	1	
2	011003	Cascapédia	1679	14	2	3	0	
3	021601	Matane	1644	9	4	3	1	
4	022003	Rimouski	1600	12	3	3	1	
5	030905	Châteauguay	2493	17	4	4	1	
6	030282	Au Saumon	739	5	2	1	1	
7	041902	Dumoine	3726	24	6	6	1	
8	041301	Coulonge	5143	34	8	9	1	
9	050304	Batiscan	4500	29	9	8	3	
10	050408	Sainte-Anne	1547	13	2	2	0	
11	061901	Ashuapmushuan	15487	107	26	25	8	
12	062102	Mistassini	9652	62	16	17	4	
13	072301	Moisie	18983	129	33	31	8	
14	073801	Romaine	13106	87	23	22	7	
15	080101	Harricana	3660	26	6	6	1	
16	080809	Broadback	9780	65	18	15	5	
17	093801	Grande rivière de la Baleine	34057	230	57	60	14	
18	090613	Eastmain	21325	145	37	34	9	
19	104803	George	23926	163	37	38	9	
20	104001	À la Baleine	29723	205	51	51	12	

 Tableau 4.
 Présentation des vingt bassins versants à l'étude dans ce rapport

C'est d'abord en comparant directement les sorties de simulation avec ces mesures que le modèle sera validé sur la période de 1980 à 2014. On se penchera premièrement sur les moyennes annuelles et leur variabilité, puis sur la dynamique mensuelle et quotidienne du ruissellement. Par la suite, les divergences qui sont observées entre les simulations et les observations feront l'objet d'une interprétation physique faite au travers d'une analyse des autres variables climatiques calculées par MRCC5. L'effet de paramètres de simulation tels que la résolution de la grille de calcul et le domaine géographique simulé sera ensuite quantifié avant de conclure avec une analyse de l'influence des changements climatiques sur la dynamique du ruissellement pour la période de 1950 à 2100.

3. MÉTHODOLOGIE

Le ruissellement de chacun des bassins versants étudiés dans le cadre de ce rapport fait l'objet de mesures quotidiennes recueillies par le **Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)** qui sont publiquement disponibles sur leur site internet [4]. Il est obtenu en mesurant le débit à l'exutoire des bassins, puis en appliquant des corrections dues à un couvert de glace en hiver, entre autres effets.

Les mesures du CEHQ sont exprimées en tant qu'un volume d'eau sortant du bassin versant par unité de temps (unités m³/s). Quoiqu'assez intuitive, cette mesure dépend de l'aire du bassin versant et empêche donc une comparaison directe entre les bassins. Ce rapport utilise donc plutôt la lame d'eau équivalente pour le bassin versant, c'est-à-dire la descente du niveau d'eau du bassin versant par unité de temps due au ruissellement (exprimée en mm/j), obtenue en divisant le débit par l'aire du bassin versant. En revanche, les simulations du MRCC5 expriment le ruissellement comme une masse d'eau évacuée par unité de temps sur une certaine aire (unités kg/(m² s)). En utilisant la densité de l'eau pour convertir cette masse en volume, on en revient à la lame d'eau par tuile.

Les simulations MRCC5 sont effectuées sur un certain domaine géographique qu'on divise en tuiles d'une étendue longitudinale et latitudinale variable. Afin d'obtenir un ruissellement (ou quelque autre variable climatique) moyenné sur un certain bassin versant, des masques sont générés afin d'isoler les tuiles y étant contenues, après quoi la moyenne est calculée sur ces tuiles. Ce n'est qu'après le calcul de cette moyenne que la comparaison est possible avec les observations, qui représentent elles-mêmes une mesure globale sur l'ensemble du bassin versant. D'une simulation à l'autre, la grille diffère; il faut donc approcher la comparaison entre les résultats de différentes simulations avec délicatesse à ce niveau.

Puisque le modèle MRCC5 est régional plutôt que global, on doit y supplémenter des conditions aux limites latérales afin d'assurer un échange avec le domaine externe nécessaire pour reproduire les flux météorologiques. Ces données supplémentées sont dites **pilotes**. Dans ce rapport, le pilote utilisé sera la réanalyse **ERAInt75** [5], sauf pour le cas de l'analyse des changements climatiques où l'on utilisera les sorties de modèles de circulation générale en l'absence d'observations.

La comparaison des simulations et des observations est nominalement effectuée sur la période de 1980 à 2014. Cela dit, tous les bassins versants à l'étude n'ont pas des données valides sur l'ensemble de cette période. Ces données manquantes invalident les moyennes prises sur certaines périodes. Dans l'entièreté de ce rapport, une moyenne mensuelle n'est considérée valide **seulement** que si le mois comprend au minimum 20 jours de données quotidiennes valides; une moyenne annuelle n'est considérée valide **seulement** que si l'année contient 12 mois de données valides. Les années valides résultantes sont tabulées dans le Tableau 5. Toute comparaison directe entre les sorties du MRCC5 et les données du CEHQ est faite en ne prenant compte que ces mois et années valides dans les simulations afin d'éviter un biais dû à la présence possible d'extrêmes dans les périodes invalidées.

Les calculs MRCC5 ont été effectués sur le supercalculateur Guillimin de l'Université McGill, sous la gouverne de Calcul Québec et Calcul Canada. L'exploitation de ce supercalculateur est financée par la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI), et le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQ-NT).

No.	Code	Nom	Années valides	Nombre d'années valides
1	011509	Matapédia	1998-2006, 2009-2014	15
2	011003	Cascapédia	1980-2005, 2007, 2009-2014	33
3	021601	Matane	1980-2014	35
4	022003	Rimouski	1980-1995, 1997-2014	34
5	030905	Châteauguay	1980-2003, 2005-2014	34
6	030282	Au Saumon	1980-2008, 2011-2014	33
7	041902	Dumoine	1980-2014	35
8	041301	Coulonge	1980-1992, 1994-1995	15
9	050304	Batiscan	1980-2014	35
10	050408	Sainte-Anne	1980-2014	35
11	061901	Ashuapmushuan	1980-2014	35
12	062102	Mistassini	1980-2008, 2011-2014	33
13	072301	Moisie	1980-1998, 2001-2005, 2007-2014	32
14	073801	Romaine	1980-2006, 2008-2013	33
15	080101	Harricana	1980-1997, 2000-2014	33
16	080809	Broadback	1981-1999, 2001-2003, 2009-2010,	26
			2013-2014	
17	093801	Grande rivière de la Baleine	1980-1991, 1993-2002, 2009-2015	28
18	090613	Eastmain	1980-1994, 1996-2003	23
19	104803	George	1980-1987, 1989, 1991-1994, 1996,	20
			2009-2014	
20	104001	À la Baleine	1980-1998, 2009-2014	25

 Tableau 5.
 Années de validité des données observatoires de la CEHQ sur la période de 1980-2014

4. PORTRAIT MÉTÉOROLOGIQUE DES BASSINS

Le ruissellement dépend fortement des variables météorologiques de base telles que les précipitations et la température des bassins au cours de l'année. On fera donc référence à celles-ci dans l'analyse des bassins individuels tout au cours du rapport.



Figure 3. Précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre) dérivées des observations de la Climatic Research Unit (CRU) sur la période 1980-2014

En guise de référence, les observations du **Climatic Research Unit (CRU)** [6] en ce qui a trait aux précipitations moyennes (**pr**) et aux températures moyennes globales (**tas**), hivernales (janvier-février-mars, **tas JFM**) et estivales (juillet-août-septembre, **tas JAS**) sont illustrées dans la Figure 3.

On y ajoute dans la Figure 4 leur équivalent calculé à partir de la simulation **bbr**. La figure inclut aussi la densité de neige maximale à la surface (**snw**, obtenue après un moyennage de données quotidiennes entre 1980 et 2014) et le débit d'évaporation moyen (**evap**).



Figure 4. Précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre), moyenne de l'accumulation maximale annuelle de neige à la surface et moyenne de l'évaporation simulées par MRCC5 dans la simulation **bbr** durant la période 1980-2014



Figure 5. Différence entre les précipitations moyennes, températures moyennes de l'air près de la surface et températures moyennes hivernales (janvier-février-mars) et estivales (juillet-août-septembre) obtenues au travers de la simulation MRCC5 **bbr** et des observations du Climate Research Unit (CRU) sur la période de 1980-2014

La Figure 5 illustre la différence entre la simulation et les données observatoires du CRU. Elle montre que les précipitations simulées sont systématiquement surestimées par rapport aux observations du CRU (0.62 mm/j ou +23%), et qu'elles le sont particulièrement au Sud-Ouest de la province.

Les températures moyennes diffèrent de seulement 0.1°C, mais les simulations ont en moyenne un hiver plus froid de 0.4°C et un été plus chaud de 0.6°C. Les bassins du Sud ont une différence de plus en plus positive.

5. COMPARAISON DU RUISSELLEMENT PRODUIT PAR LES SIMULATIONS MRCC5 AVEC LES MESURES QUOTIDIENNES DU CEHQ

L'analyse du ruissellement produit par MRCC5 sur les 20 bassins versants à l'étude débute par sa comparaison avec les débits mesurés par le CEHQ sur la période de 1980 à 2014³. La simulation choisie afin d'établir la comparaison est **bbr**; celle-ci est effectuée sur le domaine QC avec une grille de 300x300 points lui conférant une haute résolution de 0.11°. Le nombre de tuiles contenues dans chaque bassin peut être retrouvé dans le Tableau 4.

5.1 ANALYSE DU RUISSELLEMENT MOYEN

Il convient de débuter la comparaison en gardant d'abord un regard d'ensemble. La Figure 6 illustre le ruissellement moyen de chacun des bassins pour la simulation **bbr** et les observations du CEHQ; elle montre aussi la différence entre les deux ainsi que leur rapport.

On constate immédiatement que le ruissellement simulé est plus élevé que celui observé. Les moyennes globales du ruissellement sont respectivement de 2.08 mm/j et 1.72 mm/j, ce qui représente une surestimation de 21% des données de simulation. La surestimation globale découle en partie des précipitations plus élevée dans les simulations par rapport aux observations (+0.62 mm/j ou +23%, tel que vu à la Figure 5); on ne peut toutefois pas faire une équivalence quantitative entre les deux surestimations vu les sources de données différentes et les difficultés inhérentes à la mesure des précipitations. Les écarts-type des deux distributions sont de 0.39 mm/j et 0.38 mm/j, démontrant une variabilité spatiale similaire du ruissellement moyen.

Les rapports entre les ruissellements simulés et observés ne démontrent pas de tendance géographique évidente. Les données de **bbr** sont systématiquement plus élevées qu'importe la position ou l'étendue du bassin versant (d'au moins 4%). Cela dit, on constate en particulier que les deux bassins de l'Outaouais (7-8) surestiment le ruissellement de manière plus sévère que le reste de la province – on a +59% tandis qu'aucun autre bassin ne dépasse +34%. Cette différence extrême résulte en partie de la surestimation des précipitations au Sud-Ouest dans les simulations (voir la Figure 5). Partout, les bassins d'une même région hydrique semblent généralement avoir un rapport similaire, ce qui suggère une spécificité géographique qui dépend de paramètres autres que simplement la latitude.

Les extrêmes sont en général adéquatement reproduits par la simulation. Le bassin versant 10 (Sainte-Anne) présente de loin le ruissellement le plus élevé dans la simulation et les observations, avec respectivement 3.34 mm/j et 2.75 mm/j. Ces deux valeurs sont 61% et 60% (1.26 mm/j et 1.03 mm/j) audessus de la moyenne des distributions individuelles, ce qui démontre donc un accord quantitatif. Ce résultat s'explique par les précipitations 1.20 mm/j plus fortes que la moyenne provinciale sur ce bassin

³La simulation débute en 1979; elle a été écourtée d'une année à des fins de comparaison plus directe avec les simulations **bbq**, **bbs** et **bbt** au Chapitre 3, ainsi que pour assurer que les variables de sol en arrivent à un équilibre hydrologique après avoir évolué à partir des conditions initiales.

selon les observations du CRU (voir la Figure 5). On constate aussi que 5 des 6 bassins ayant les ruissellements les plus faibles sont les mêmes (5-7-15-17-20), tout comme 3 des 4 ayant les ruissellements les plus élevés (3-6-10).



Figure 6. Ruissellement moyen simulé et observé pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014 et rapport entre les simulations et les observations

5.2 VARIABILITÉ INTERANNUELLE

Si le portrait général du ruissellement moyen est relativement bien préservé par la simulation **bbr** en comparaison aux observations, cette mesure néglige entièrement le comportement interannuel du ruissellement. La Figure 7 montre deux de profils de la moyenne annuelle du ruissellement; un premier sur un bassin du Sud à fort ruissellement (10, Sainte-Anne), et un deuxième sur un bassin du Grand Nord (20, À la Baleine) où l'on note aussi la présence d'années d'observations invalides qui ne sont pas considérées dans l'analyse. Les profils annuels et mensuels simulés et observés de tous les bassins versants sont inclus dans l'Annexe II.



Figure 7. Profil interannuel simulé et observé du ruissellement moyen des bassins 10 (Sainte-Anne) et 20 (À la Baleine)

5.2.1 ÉCART-TYPE INTERANNUEL

Afin d'établir si le niveau de variation interannuelle du ruissellement simulé de chaque bassin versant correspond bien à celui du ruissellement observé, on calcule l'écart-type des moyennes annuelles ainsi que le coefficient de variation (CV), défini comme le rapport de l'écart-type et de la moyenne d'une distribution. Ces deux valeurs sont illustrées dans la Figure 8.

La moyenne sur les 20 bassins versants des écarts-type interannuels de la simulation **bbr** est de 0.28 mm/j, tandis que celle des observations est de 0.25 mm/j, soit une différence de 12%. La moyenne correspondante des CV est de 0.14 pour les simulations et de 0.15 pour les observations. Physiquement, il convient de se demander laquelle des deux mesures est la plus juste : si l'on peut s'attendre à ce que les variations soient proportionnelles au niveau moyen de ruissellement, le CV est probablement une meilleure mesure comparative; si les variations en sont indépendantes, l'écart-type est plus juste. Dans le cas des observations, l'écart-type interannuel est fortement corrélé à la moyenne (R=0.74), ce qui pourrait impliquer le premier cas. Qu'importe la mesure, on peut affirmer avoir un écart quantitatif sous les 15%.

L'écart-type sur les 20 bassins des distributions d'écarts-types interannuels est de 0.05 mm/j pour **bbr** et de 0.07 mm/j pour les observations, soit un écart de -22%. La variabilité interannuelle est donc plus spatialement homogène dans les simulations.

Le profil spatial de ces deux mesures ne démontre pas d'écart systématique entre les simulations et les observations. En général, les bassins autour du Saint-Laurent démontrent davantage de variation dans les deux cas, tandis que ceux du Nord ont des variations plus faibles. Les différences les plus significatives entre les simulations et les observations se retrouvent dans les bassins versants 7-11-12-15, qui se retrouvent tous au Sud-Ouest et qui ont tous des écarts-types simulés plus grands. L'étendue des différences est de -19% (bassin 6) à +50% (bassin 7).



Figure 8. Écart-type (std) et coefficient de variation (CV) des distributions interannuelles du ruissellement moyen simulé et observé des les vingt bassins durant la période de 1980-2014

5.2.2 CORRÉLATION DES PROFILS INTERANNUELS SIMULÉS ET OBSERVÉS

Puisque la simulation **bbr** est pilotée par des réanalyses, on peut s'attendre à une certaine cohérence au niveau de la variation du ruissellement d'année en année des simulations et des observations. Au-delà de la simple concordance de l'étendue des variations interannuelles, on peut donc étudier la corrélation entre les profils interannuels simulés et observés des bassins versants individuels. À cette fin, les deux mesures les plus communes sont l'erreur moyenne quadratique (EMQ, *root-mean-square difference*) et le coefficient de corrélation de Pearson R. Afin d'écarter la contribution des moyennes différentes du ruissellement des bassins versants individuels, on utilise plutôt l'erreur moyenne quadratique *centrée* (EMQC) définie comme suit:

$$EMQC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[(sim_i - \overline{sim}) - (obs_i - \overline{obs}) \right]^2}$$
$$EMQC = \sqrt{\sigma_{sim}^2 + \sigma_{obs}^2 - 2\sigma_{sim}\sigma_{obs}R}$$

où *sim*_i et *obs*_i sont les ruissellements moyens simulés et observés de la *i*ème année des distributions (*n* années au total), *sim* et *obs* sont les moyennes des distributions et σ_{sim} et σ_{obs} leur écart-type. Tel qu'aperçu dans la deuxième équation, l'EMQC donne un portrait des écarts-types des distributions individuelles ainsi que du niveau de corrélation entre elles.



Figure 9. Erreur moyenne quadratique centrée (EMQC) et coefficient de corrélation de Pearson (R) entre les distributions simulées et observées du ruissellement moyen annuel des les vingt bassins durant la période de 1980-2014.

La Figure 9 illustre l'EMQC et le coefficient de corrélation de Pearson entre les distributions des ruissellements annuels moyens des simulations et des observations. Le coefficient de corrélation de Pearson est en moyenne de 0.62, indiquant une corrélation forte entre les profils interannuels simulés et observés. Les bassins 6-7-15 (tous au Sud-Ouest) sont les seuls ayant R<0.5, le seuil d'une corrélation forte; la corrélation minimale est de R=0.45. Autrement, les bassins 2-4-12-13-14-18 ont tous R>0.7 et

sont généralement situés davantage à l'Est. Il est difficile d'établir une tendance claire dans le profil spatial, mais il semble que les bassins plus centraux ont une corrélation plus forte – l'interprétation de ce phénomène demanderait une étude approfondie.

5.2.3 COMPARAISON AVEC LE MRCC4

Si la corrélation est forte, il vaut de se demander si elle fait meilleure figure que dans le cas de la version précédente du modèle (MRCC4 [7]); le coefficient de corrélation obtenu au travers d'une étude similaire faite sur 21 bassins à l'échelle du Québec entre 1961 et 1999 avec MRCC4 est donc présenté dans la Figure 10 (tirée de [8]). Les résultats de MRCC4 sont étudiés sur deux domaines différents (QC, qui est borné autour du Québec, et AMNO, qui englobe l'Amérique du Nord) et en pilotant les simulations à l'aide de deux réanalyses (ERA40 [5] et NRA40 [9]). Le cas de QC ERA se rapproche le plus de la simulation **bbr**. On y voit que pour QC ERA, certains bassins y atteignent un niveau plus élevé de corrélation (jusqu'à R=0.84), mais que certains se retrouvent aussi bas que R=0.25. MRCC5 semble donc être plus constant à l'échelle de la province.



Figure 10. Coefficient de corrélation de Pearson (R) entre les distributions de ruissellement moyen simulées et observées de bassins versants étudiés dans le cadre de la validation de MRCC4, en fonction de la différence entre les écarts-type des ruissellements annuels des distributions simulées et observées. Tiré de [8].

On poursuit la comparaison en analysant l'EMQC de la Figure 9; dans le cas de MRCC5, l'EMQC signifie que sur un bassin versant individuel, l'écart entre le ruissellement simulé sur une année donnée (moins sa moyenne globale) et le ruissellement observé sur cet même année (moins sa moyenne globale) est de 0.22 mm/j. Il est toutefois difficile de quantifier à quel point cette valeur est performante; afin d'en avoir une meilleure idée, on compare à nouveau aux résultats de l'étude sur MRCC4 dans la Figure 11.



Figure 11. Erreur moyenne quadratique centrée (EQMC) entre les distributions de ruissellement moyen simulées et observées de bassins versants étudiés dans le cadre de la validation de MRCC4 (gauche) et de la validation de MRCC (droite), en fonction de la différence entre les ruissellements moyens des distributions simulées et observées. Graphique de gauche tiré de [8].

La figure montre d'abord que dans le cas du MRCC5, il n'y a pas de corrélation entre le biais des moyennes et l'EQMC. Ensuite, elle démontre que, pour un même domaine et une même réanalyse, MRCC5 produit une plus grande étendue de biais de moyennes que MRCC4 (0.62 mm/j vs. 0.45 mm/j, soit +38%) – de même pour l'étendue des EQMC (0.26 mm/j vs. 0.15 mm/j, soit +73%). La moyenne des EQMC n'est pas indiquée pour MRCC4 QC ERA, mais semble être entre 0.17 mm/j et 0.20 mm/j, de sorte que la moyenne sur **bbr** est plus élevée à 0.22 mm/j, sans l'être drastiquement.

Il faut noter aussi que puisque l'EQMC dépend de la justesse de la mesure observée, l'utilisation de bassins versants différents dans les deux études et de sources de données différentes peut influencer la comparaison des corrélations. Il est aussi important de préciser que les bassins choisis pour l'étude validant MRCC4 sont beaucoup plus grands, ce qui peut créer un resserrement des données dû à un moyennage sur de grandes surfaces. Le plus grand EQMC sur MRCC5 est celui du bassin 6, de loin le plus petit, et la tendance se maintient assez bien puisque les bassins du Nord ont un EQMC généralement bas. Considérant ces précisions, il est difficile d'établir si MRCC5 fait meilleure ou pire figure – seulement que les chiffres ne sont pas drastiquement différents.

On remarque aussi au travers de la Figure 11 que le biais des moyennes passe de valeurs presque systématiquement négatives pour MRCC4 (environ -0.2 mm/j pour QC ERA) à des valeurs systématiquement positives pour MRCC5 (+0.36 mm/j tel que calculé plus tôt). Il est encore une fois difficile d'établir si cette différence fait du MRCC5 un modèle climatique plus ou moins performant face à son prédécesseur au niveau de la modélisation du ruissellement.

5.3 DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DU RUISSELLEMENT

On se penche maintenant sur la dynamique saisonnière du ruissellement, qui fera office de la performance du MRCC5 en termes de reproduction de cette variable sur des laps de temps courts. Au niveau méthodologique, cette section utilisera pour l'analyse la moyenne sur l'ensemble des années valides des ruissellements quotidiens pour les bassins versants individuels.

Il faut noter que la validité de la comparaison directe entre les simulations et les observations est limitée lorsqu'on parle d'échelles temporelles aussi courtes : effectivement, puisque les simulations modélisent le ruissellement de manière indépendante sur les différentes tuiles (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de transfert d'eau entre les tuiles voisines), on néglige complètement les changements dans le comportement du ruissellement dus au transit de l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Afin d'intégrer ces effets pour permettre une comparaison plus juste avec les observations, on applique généralement des modèles de **routage** aux sorties de simulation. Cette technique n'est pas utilisée dans cette section du rapport, de sorte que les résultats doivent être interprétés à titre indicatif; cela dit, la section 6.5.1 montrera que les corrections apportées par le routage, qui sera alors mieux décrit, ne changent pas les conclusions qualitatives tirées de l'analyse de la dynamique saisonnière du ruissellement brut produit par MRCC5.

La Figure 12 illustre quelques exemples de profils quotidiens moyennés qui démontrent l'étendue des situations rencontrées à l'échelle de la province. Dans l'ensemble, le portrait est toujours similaire : on a un ruissellement minimal durant l'hiver dû au gel et à la neige, qui se traduit en un fort pic au printemps qui laisse place à un ruissellement relativement constant jusqu'au regel à la fin automne.



Figure 12. Profil annuel moyenné sur la période 1980-2014 du ruissellement simulé et observé des bassins 2 (Cascapédia), 7 (Dumoine), 12 (Mistassini) et 19 (George)

Si les simulations et observations reproduisent les deux ce portait qualitatif, on a tout de même des divergences quantitatives à plusieurs niveaux. Dans ces quatre profils, on observe entre autres :

- Un pic printanier significativement en avance dans Cascapédia;
- Un pic printanier significativement plus faible dans Cascapédia;
- Un pic printanier significativement plus fort dans Dumoine;
- Un pic printanier en retard dans Dumoine;
- Deux pics dans Mistassini de part et d'autre du pic observé;
- Une absence presque totale de ruissellement simulé durant l'hiver dans George;
- Davantage de bruit dans les données simulées, surtout durant l'hiver.

De ces différences, seule la première et la dernière pourraient potentiellement être expliquées par le routage (qui apporte nécessairement des délais dans le ruissellement simulé), de sorte que les autres sont dues à des lacunes soit au niveau de la modélisation physique de l'hydrologie de MRCC5 ou à une représentation erronée de paramètres invariants des bassins (tels que la texture du sol).

5.3.1 MOMENT DU PIC PRINTANIER

Afin d'avoir une idée du comportement du pic printanier de chacun des bassins, on illustre son avance ou son retard face au pic observé dans la Figure 13. Notons encore une fois que cette comparaison est faite à titre indicatif en l'absence de routage et vise à comparer les bassins entre eux plutôt qu'à établir une correspondance avec les observations. Le pic est obtenu après avoir appliqué une fenêtre mobile de 5 jours sur le profil annuel moyenné du ruissellement de chacun des bassins, question de limiter l'effet de données extrêmes.

Dans les observations, le moment du pic est pratiquement parfaitement corrélé avec la latitude des bassins (R=0.95). Il n'en est pas de même pour les simulations (R=0.72), où le pic arrive en moyenne cinq jours plus tôt. Cela dit, l'étendue des résultats est très similaire – on passe du jour 89 (bassin 6) au jour 160 (bassins 16-19-20) dans les simulations, et du jour 89 (bassin 5) au jour 162 (bassin 19) dans les observations.

De manière plus importante, on constate en regardant le profil de la différence entre les simulations et les observations qu'elle est régionalement définie; c'est-à-dire que les bassins géographiquement très rapprochés ont tendance à avoir un même biais. On note :

- Les quatre bassins du Bas Saint-Laurent (1-2-3-4), où le pic simulé a entre 11 et 17 jours d'avance sur le pic observé;
- Les bassins 7-8, où elle a 4 et 8 jours de retard;
- Les bassins 9-10, où elle a 15 et 9 jours de retard;
- Les bassins 13-14, où elle a 6 et 8 jours d'avance;
- Les bassins 17-18, où elle a 21 et 17 jours d'avance;
- Les bassins 19-20, où elle a 3 et 2 jours d'avance.

Ces valeurs proches démontrent une corrélation du timing du pic avec la région hydrique au-delà de la simple position latitudinale des bassins.


Figure 13. Moment du pic printanier moyen simulé et observé pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014 et rapport entre les simulations et les observations.

Un phénomène qui n'est pas relevé par cette mesure est celui du pic printanier double des bassins 11-12-16-18 autour du lac Mistassini. Les profils des bassins 11-12-16 sont illustrés dans la figure Figure 14.



Figure 14. Illustration des pics printaniers doublés des profils de ruissellement annuel simulés des bassins 11 (Ashuapmushuan), 12 (Mistassini) et 16 (Broadback)

Cette différence est le portrait le plus marquant de la divergence entre le comportement du ruissellement simulé par MRCC5 et le ruissellement observé par le CEHQ; elle sera expliquée en profondeur au prochain chapitre.

5.4 RÉCAPITULATIF

La comparaison des ruissellements de la simulation **bbr** (domaine QC, résolution 0.11°, pilotées par la réanalyse ERAint75) avec ceux des observations du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) démontre que les ruissellements simulés sont globalement surestimés de 21%. Toutefois, la variabilité inter-bassin est quantitativement conservée, ainsi que les extrêmes.

La variabilité interannuelle est généralement capturée par le modèle; au niveau des bassins individuels, l'écart-type de la distribution des ruissellements annuels moyens se situe entre -19% et +50% de l'écart-type de la distribution observée, avec une moyenne de +12%. Au-delà de l'écart-type, la majorité de ces distributions simulées sont relativement bien corrélées avec leur analogue observé, franchissant tous R>0.4.

En comparaison avec MRCC4, on a un biais positif (+21%) au niveau des moyennes globales plutôt qu'un biais négatif (-12%). La corrélation interannuelle semble être en moyenne plus forte, ou du moins plus constante dans MRCC5.

La dynamique saisonnière du ruissellement démontre des divergences avec celle des observations qui vont au-delà de différences dans la définition du ruissellement observé et simulé (qui néglige le transit de l'eau jusqu'à l'exutoire des bassins). Si l'on observe toujours un pic de ruissellement au moment du printemps en raison de la fonte des neiges, le moment du pic est en particulier parfois en avance et parfois en retard sur celui des observations de jusqu'à vingt jours; qui plus est, l'écart semble être assez constant sur les bassins d'une même région géographique.

Aucune des différences entre les observations et les simulations relevées dans le chapitre ne démontre une forte tendance systématique simplement due à la latitude ou la longitude des bassins.

6. INTERPRÉTATION PHYSIQUE DE LA DYNAMIQUE DU RUISSELLEMENT SIMULÉ PAR MRCC5

Le premier chapitre aura montré que les principales divergences du ruissellement produit par MRCC5 par rapport aux observations se retrouvent non pas au niveau des moyennes annuelles du ruissellement, de leurs statistiques interannuelles et de leur profil spatial; en effet, elles se retrouvent plutôt dans son comportement saisonnier, donc dans la manière dont ce ruissellement annuel est distribué dans l'année. À se référer à la Figure 12, on constate la variété des écarts : certains pics printaniers sont en avance, certains sont en retard; certains bassins ont deux pics et certains ont beaucoup de pics ponctuels en hiver qu'on ne retrouve pas dans les observations. Si certains de ces écarts pourraient être le résultat de l'absence d'une modélisation du transit de l'eau des différentes tuiles jusqu'à l'exutoire des bassins versants, certains autres (en particulier le retard de certains pics face aux observations) ne pourraient être réconciliés par cette modélisation.

Ce deuxième chapitre cherchera donc à expliquer ces divergences en se penchant sur la physique du MRCC5; on étudiera les interactions du ruissellement avec une variété d'autres variables climatiques afin d'interpréter les biais systématiques qui en découlent. On isolera d'abord les composantes (de surface et hypodermique) du ruissellement, dont les différences de comportement influencent fortement le profil du pic printanier, puis on fera état de ce qui cause un biais vers l'une ou l'autre de ces composantes.

Pour ce faire, on utilisera dans ce chapitre la simulation **bbu**, identique à la simulation **bbr** du premier chapitre sauf pour sa résolution moindre (grille de 160x160 correspondant à une résolution angulaire de 0.22°) et son fichier géophysique légèrement différent par rapport à la superficie de certains lacs (une différence peu significative). La période de simulation et le pilote sont les mêmes et on ne considère à nouveau que les années considérées valides sur les bassins individuels. Cette simulation a été choisie en raison de la disponibilité de davantage de variables pouvant faciliter l'interprétation de la dynamique de ruissellement. Le chapitre 3 fera état des effets quantitatifs suffisamment minimes de la diminution de la résolution pour que les conclusions demeurent valides d'une simulation à l'autre.

6.1 DEUX COMPOSANTES DE RUISSELLEMENT

Le ruissellement simulé se manifeste en deux modes coexistants : l'eau qui s'accumule à un certain endroit peut s'évacuer soit **en surface**, soit en profondeur après s'être infiltrée dans le sol dans un processus dit **hypodermique**. Ces deux modes ont une dynamique différente vu le transit au travers du sol qui associé au ruissellement hypodermique. Dans les simulations du MRCC5, le ruissellement total est la somme de ces deux composantes:

mrro (total) = mrros (surface) + mrroh (hypodermique)

Une variété de variables climatiques et géologiques peuvent privilégier l'un ou l'autre des modes de ruissellement. La Figure 15 montre le profil annuel du ruissellement (moyenné sur l'ensemble des années valides) sur trois des bassins versants étudiés, auquel on ajoute individuellement le ruissellement de surface et hypodermique. On y voit d'abord un cas où le pic est presque entièrement déterminé par le

ruissellement de surface; puis, un cas où il est presque entièrement déterminé par le ruissellement hypodermique; finalement, un cas où on a une coexistence à presque 50/50 des deux modes, ce qui engendre le double pic printanier rapporté au dernier chapitre, présent dans les quatre bassins autour du lac Mistassini (11-12-16-18).



Figure 15. Profil annuel du ruissellement simulé et observé des bassins 1 (Matapédia), 7 (Dumoine) et 12 (Mistassini), et illustration des composantes de surface (rouge) et hypodermique (bleu) du ruissellement simulé

On y constate d'ailleurs que les pics associés aux deux modes sont séparés dans le temps; effectivement, l'écart est d'environ 50 jours dans le cas des bassins Matapédia et Mistassini. Il est donc probable que les divergences régionales dans le moment du pic printanier soient intimement liées au mode de ruissellement privilégiées. Pour vérifier cette hypothèse, la Figure 16 illustre quatre variables :

- La hauteur du pic de ruissellement de surface, obtenu après avoir appliqué une fenêtre mobile de cinq jours pour limiter l'influence de données extrêmes;
- La hauteur du pic de ruissellement hypodermique, obtenu de la même manière;
- La différence entre ces deux hauteurs;
- Le différence entre le jour de pic de ruissellement total simulé et observé.



Figure 16. Hauteur moyenne du pic de ruissellement de surface (mrros) et de ruissellement hypodermique (mrroh) simulés sur les vingt bassins dans la simulation MRCC5 **bbu** sur la période de 1980-2014, ainsi que la différence entre les deux hauteurs et le biais entre les moments du pic printaniers simulés et observés

Cette figure montre d'abord que globalement, le pic de ruissellement de surface est en moyenne plus élevé que celui de ruissellement hypodermique de 1.73 mm/j. Les bassins d'une même région ont tendance à avoir des hauteurs de pics similaires pour les deux modes, comme en font foi les bassins 1-2-3-4 du Bas St-Laurent, les bassins 7-8 de l'Outaouais et les bassins 19-20 du Grand Nord, en particulier.

Treize bassins ont un pic dominé par le ruissellement de surface, tandis que sept sont dominés par le ruissellement hypodermique. Comme on peut le constater à partir des deux sous-figures du bas, ces 13 bassins sont aussi les 13 bassins pour lesquels le pic simulé est en avance du pic observé, tandis que les 7

autres sont les 7 bassins pour lesquels le pic simulé est en retard par rapport au pic observé. Il est donc évident que le mode de ruissellement privilégié au moment de la fonte a une forte influence sur son timing. Considérant la force de la corrélation et la présence de phénomènes simulés comme le double pic autour du Lac Matapédia, qui n'a pas d'analogue dans les observations, on pourrait même s'imaginer que cette influence est trop forte.

6.2 MODE DE RUISSELLEMENT PRIVILÉGIÉ : ÉTUDE DU CAS RIMOUSKI VS DUMOINE

Si cette analyse des deux modes de ruissellement permet de comprendre pourquoi le moment du pic printanier des bassins dépend de plus que de sa latitude (puisque la latitude définit largement le profil de température, qui définit le déclenchement de la fonte), elle laisse ouverte la question sur la préconisation d'un certain mode versus l'autre au moment de la fonte.

Afin d'étudier cette question en profondeur, la province du Québec nous donne heureusement deux bassins similaires à plusieurs niveaux, mais dont les modes de ruissellement sont diamétralement opposés. On parle ici des bassins Rimouski (4), dans le Bas Saint-Laurent, et Dumoine (7), en Outaouais, dont les profils moyennés de ruissellement (mrro/mrros/mrroh), de précipitations totales (pr) et solides (prsn), d'évaporation (evap) et de température quotidienne moyenne / maximale / minimale à la surface (tas/tasmax/tasmin) sont illustrés dans la Figure 17. À noter que la sous-figure centrale est d'abord passée dans une fenêtre mobile de 10 jours pour améliorer la visibilité.



Figure 17. Profil annuel du ruissellement, bilan hydrique et profil de température moyens des bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine) obtenus au travers de la simulation MRCC5 bbu

Tel que la figure l'illustre, ces deux bassins sont quantitativement semblables :

- Les précipitations moyennes sont de respectivement 3.39 mm/j et 3.31 mm/j;
- Les précipitations solides annuelles sont de 401 mm et 310 mm;
- Les ruissellements moyens sont de 1.99 mm/j et de 1.79 mm/j;
- L'évaporation est relativement similaire, à 1.29 mm/j et 1.49 mm/j;
- Les latitudes moyennes sont similaires à 48.2° et 46.9°;
- Les températures moyennes sont de 3.3°C et 3.8°C. Après avoir passé les profils de température dans une fenêtre mobile de 10 jours, on a des minimums de -13.3°C et -13.7°C et des maximums de 18.5°C et de 19.0°C.

Pourtant, en dépit de ces similarités quantitatives (hormis la quantité de précipitations solides qui diffère d'environ 25%), le pic de Rimouski est à peu près entièrement défini par le ruissellement de surface tandis que celui de Dumoine est à peu près entièrement défini par le ruissellement hypodermique, comme le démontrent les sous-figures de gauche de la Figure 17.

6.2.1 SCHÉMA DE SURFACE DU SOL : CLASS

En supposant que les divergences dans les variables climatiques illustrées sont trop faibles pour créer une différence de comportement aussi drastique, on en arrive à la conclusion qu'elles doivent être en grande partie entraînées par un système qui n'a pas été considéré jusqu'ici : le sol, et, en particulier, sa dynamique de stockage de l'eau.

MRCC5 modélise les processus hydrologiques et thermiques du sol au travers du **Canadian LAnd Surface Scheme (CLASS)** [10,11] dans sa version 3.5°C. Pour toutes les simulations étudiées dans le cadre de ce rapport, ce schéma de surface divise le sol en 17 couches d'épaisseur variable (0.1 m, 0.2 m, 0.3 m pour les premières couches, 1.0 m, 3.0 m, 5.0 m pour les trois dernières, 15.0 m au total) qui ont chacune leurs propres propriétés matérielles (selon le type de sol) et physiques (température, humidité, etc.). Le schéma calcule les transferts hydrologiques et thermodynamiques entre les diverses couches en prenant compte des influx d'eau à la surface; on note entre autres qu'il modélise des phénomènes tels que les changements de conductivité hydraulique en fonction de l'humidité et le niveau de gel du sol.

Afin d'illustrer la dynamique de stockage d'eau dans le sol, la Figure 18 montre pour les deux bassins la quantité d'eau totale et gelée y étant emmagasinées (**mrso/mrfso**), la fraction volumétrique d'eau totale et gelée de la première couche du sol (**mrlsl[0]** et **mrfsl[0]**) ainsi que la quantité de neige à la surface (**snw**). À noter que ces variables sont illustrées pour l'année 2006 seulement, puisque le moyennage empêche l'interprétation juste des résultats. [VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES PROFILS]

Dans le cas des deux bassins, la dynamique des variables est plutôt similaire. En hiver, on a une augmentation attendue de **mrfso** accompagnée d'une diminution de **mrso** (visiblement due au ruissellement hypodermique). Lorsqu'il y a fonte des neiges et de glace dans le sol (diminution de **snw** et de **mrfso**), on constate une augmentation de **mrso**, qui se remet à diminuer pendant l'été avant de regrimper en automne.



Figure 18. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du sol des bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine) pour l'année 2006 de la simulation MRCC5 bbu

À se concentrer sur la première couche du sol, on constate que les deux atteignent un plateau au niveau de la fraction volumétrique d'eau en hiver. Ce plateau doit vraisemblablement correspondre au point de saturation en humidité du sol; il en va de même pour la quantité d'eau glacée, qui ne grimpe toutefois pas tout à fait à la même valeur. Comme on peut le constater pour Dumoine, l'atteinte de ces niveaux de saturation n'implique pas du ruissellement de surface: on en déduit que l'infiltration de l'eau dans le sol doit alors demeurer possible dans une certaine mesure, davantage dans ce bassin que dans Rimouski.

6.3 CORRÉLATION AVEC LES CHAMPS GÉOPHYSIQUES

Afin d'éclairer cette différence au niveau de la capacité d'infiltration de l'eau, on doit se pencher sur les variables géophysiques associées à la simulation. Chaque tuile de la grille voit la structure et la composition de son sol être décrites par multiples données définies au préalable des simulations, dont certaines ont une forte influence sur son comportement hydrologique. Dans notre cas, on étudie d'abord la fraction de sable (**sand**) et d'argile (**clay**) dans le sol, qui sont illustrés dans la Figure 19. La profondeur de l'écorce terrestre (**bedrock**) et la différence entre les hauteurs des pics de ruissellement de surface (**mrros**) et de ruissellement hypodermique (**mrroh**) sont aussi illustrées.



Figure 19. Fraction moyenne de sable et d'argile des vingt bassins à l'étude telle que définie dans la simulation **bbu**, ainsi que la profondeur de l'écorce terrestre et la différence entre la hauteur des pics simulés de ruissellement de surface et de ruissellement hypodermique de chacun des bassins.

Si l'on poursuit notre étude de cas en se concentrant sur les bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine), on constate qu'ils correspondent à deux extrêmes provinciaux au niveau de la fraction de sable dans le sol (respectivement 29% et 88%) et de la fraction d'argile dans le sol (respectivement 47% et 4%). En fait, les bassins 1-2-3-4-6, qui ont les niveaux de sable/argile les plus faibles/élevées de la province, sont tous dominés par le ruissellement de surface au moment de la fonte. De même, les bassins 7-8-9-10, qui ont la quantité de sable/argile la plus forte/faible de la distribution, sont les quatre bassins les plus dominés par le ruissellement hypodermique au moment de la fonte.

L'hypothèse qui en découle naturellement est reliée à la conductivité hydraulique de ces deux compositions du sol. L'argile est un matériau à forte porosité, ce qui signifie qu'il peut contenir beaucoup d'eau; cela dit, les pores sont petits et détachés, ce qui fait en sorte que sa conductivité est basse [12] et qu'il prend donc plus longtemps pour y faire traverser une certaine quantité d'eau. Par contraste, le sable a une porosité plus faible, mais des pores plus grands et rattachés qui favorisent le transit rapide de l'eau.



Figure 20. Illustration des concepts liés à la réponse à un influx d'eau liquide d'un sol saturé en eau près de sa surface.

Lorsque les premières couches du sol sont à saturation d'eau et que l'on a un influx d'eau liquide à la surface (soit par fonte de la neige ou par précipitation liquide), on a deux possibilités :

- L'influx est plus lent que le transit de l'eau des couches saturées vers les couches inférieures insaturées, de sorte que l'influx s'infiltre entièrement dans le sol pour devenir du ruissellement hypodermique;
- L'influx est plus rapide que le transit de l'eau des couches saturées vers les couches inférieures insaturées, de sorte que l'influx ne peut infiltrer le sol et devient du ruissellement de surface.

Un sol plus sablonneux et plus conducteur favorise donc la première option, tandis qu'un sol plus argileux favorise la seconde. Il semble d'ailleurs y exister une très forte coupure entre les deux cas qui fait en sorte qu'on ne superpose presque jamais les deux modes de ruissellement.

La Figure 21, où l'on illustre pour l'année 2006 la quantité d'eau totale et la fraction volumétrique de glace dans chacune des six premières couches des bassins 4 et 7, démontre un accord qualitatif avec cette hypothèse. Jusqu'au jour 90, les niveaux d'eau stockée dans les couches 2 à 6 de Rimouski changent lentement, la première couche étant saturée. Dans Dumoine, on observe par contraste des sauts beaucoup plus rapides; en particulier, la couche 3 gagne 25 kg d'eau en deux jours près du jour 65, une situation qu'on ne retrouve jamais dans Rimouski qu'importe l'année. Puisque les profils de précipitation sont relativement similaires entre les deux bassins pour une même année, on en déduit que la conductivité hydraulique de Dumoine est effectivement plus élevée à saturation égale.



Figure 21. Quantité d'eau totale et fraction volumétrique d'eau solide dans les couches du sol individuelles des bassins 4 (Rimouski) et 7 (Dumoine) pour l'année 2006, telles que simulées dans la simulation MRCC5 bbu.

6.4 MODÉLISATION DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE ET DU RUISSELLEMENT DANS CLASS 3.5

Il en convient de se pencher sur la modélisation mathématique de la conductivité hydraulique. Dans CLASS 3.5, l'équation régissant la conductivité du sol en fonction de sa fraction d'eau et de glace est la suivante [13] :

$$k = f_{ice} k_{sat} \cdot \left(\frac{\theta_{liq}}{\theta_{sat}}\right)^{2b+3} \qquad f_{ice} = \left[1 - \min\left(1.0, \frac{\theta_{ice}}{\theta_{sat}}\right)\right]^2$$
où

Équation 1. Définition de la conductivité hydraulique utilisée dans CLASS 3.5

Dans cette équation, k_{sat} est la conductivité du matériau à saturation et $\theta_{liq} / \theta_{ice} / \theta_{sat}$ sont les fractions d'eau liquide / solide / à saturation dans le sol. On constate que le facteur f_{ice} diminue de manière monotone en fonction de la fraction de glace dans le sol; en fait, lorsqu'elle en arrive au point de

saturation, on a $f_{ice} = 0$, ce qui préviendrait la moindre conductivité hydraulique⁴. Les sorties de simulation démontrent que la fraction de glace atteint au maximum ~90% de celle d'eau pour les deux bassins à l'étude (les seuls bassins se détachant significativement de cette valeur sont les bassins du Grand Nord à 93% et 94%, ainsi que le bassin 5 à 52% vu ses températures élevées); la conductivité de la première couche est donc réduite jusqu'à environ (1-0.9)^2 = 1% de sa valeur à saturation.

Ces valeurs étant similaires, la différence en revient pratiquement exclusivement à la conductivité à saturation k_{sat} des différents matériaux. Celle de l'argile est en fait plusieurs ordres de grandeur plus faible que celle du sable [12], au point où l'on peut supposer que le transfert d'eau au travers de l'argile est négligeable. Si l'on suppose que le transit est fait uniquement au travers du sable, on aurait alors avoir une conductivité trois fois plus élevée dans Dumoine que dans Rimouski lorsque la quantité d'eau et de glace en sont à saturation; c'est-à-dire que puisque le transfert d'eau d'une couche à l'autre est par définition proportionnel à la conductivité [15], il en prendrait alors un débit de précipitations et de fonte des neiges trois fois plus fort pour commencer à avoir du ruissellement de surface.

6.4.1 NIVEAU MOYEN DU STOCKAGE D'EAU DANS LE SOL

Considérant que les niveaux de précipitations entre les différents bassins sont du même ordre de grandeur (voir la Figure 4) et que tous les bassins ont une composition du sol qui leur permet de contenir une quantité similaire d'eau (entre 38% et 45% de fraction volumétrique), on peut s'attendre à ce que la conductivité hydraulique de leurs couches en profondeur s'équilibre à un niveau semblable : si cela n'était pas le cas, les bassins plus sablonneux se videraient de toute leur eau et/ou les bassins moins sablonneux verraient toutes leurs couches se remplir à saturation. Puisque la composition du sol différente mène à une conductivité maximale k_{sat} différente (voir l'Équation 1), cela se traduit en une quantité d'eau stockée plus élevée dans les bassins moins sablonneux de sorte à compenser pour leur k_{sat} plus bas avec un $\theta_{liq}/\theta_{sat}$ plus élevé.



Figure 22. Illustration de la densité d'eau stockée dans le sol en fonction de la fraction de sable pour chacun des bassins

⁴ Il est à noter que cette modélisation est aujourd'hui considérée grossière puisque la conductivité est généralement toujours possible dans la glace vu sa porosité et l'effet capillaire. Les plus récentes versions de CLASS (qui n'ont à ce jour pas été intégrées dans le MRCC5) traitent le problème de manière plus sophistiquée, de sorte que l'on a une conductivité résiduelle d'environ 0.05 k_{sat} même à saturation en gel [13,14].

Si l'on suppose que la conductivité hydraulique augmente de manière monotone en fonction de la quantité de sable, on devrait avoir une décroissance correspondante de la quantité moyenne d'eau stockée dans l'ensemble du sol. La Figure 22 montre la densité d'eau stockée dans le sol pour chacun des bassins; on observe effectivement une forte corrélation linéaire (R=-0.93) qui illustre la validité qualitative de l'interprétation physique.

Tel qu'attendu, les cinq bassins stockant le plus d'eau sont les bassins 1-2-3-4-5 dans la section la plus argileuse de la province; ceux stockant le moins d'eau sont les bassins 7-8 en Outaouais. Au premier ordre, il est donc possible d'avoir une idée du niveau de sable du sol simplement en observant le niveau d'eau stockée dans ses couches plus profondes. Il faut noter que les bassins 19-20 ont été exclus en raison de leurs valeurs extrêmes résultant de leur sol très peu profond.

6.5 DIFFÉRENCES ENTRE LES NOTIONS DE RUISSELLEMENT OBSERVÉ ET SIMULÉ

Si l'interprétation développée dans les sections précédentes a une cohérence interne, il faut tout de même l'utiliser avec délicatesse au moment de la comparaison avec les observations. Dans le chapitre 1, on a considéré que les ruissellements simulés et observés étaient directement comparables après les avoir convertis aux mêmes unités. Puisque le ruissellement simulé est calculé sur une base complètement indépendante de tuile en tuile, ce qui néglige l'influence du transit de l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin versant sur son comportement, la comparaison directe n'est pas scientifiquement valide. Cette section traitera de l'effet de cette différence fondamentale et de son influence sur les conclusions.

6.5.1 ROUTAGE

La Figure 23, qui compare le ruissellement de Rimouski durant l'année 2000 (ainsi que ses deux composantes) contre les observations, illustre une différence importante dans leur dynamique quotidienne. En effet, on observe plusieurs pics ponctuels de ruissellement de surface dans les simulations, tandis que les observations ont un profil beaucoup plus fluide.

Cette différence n'est pas nécessairement indicatrice d'une faille dans le ruissellement simulé. La mesure du ruissellement du CEHQ est faite de manière ponctuelle à l'exutoire, tandis que le ruissellement de surface simulé est évacué de chaque tuile individuelle à chaque pas de temps – de manière immédiate, donc.



Figure 23. Profil de ruissellement du bassin 4 (Rimouski) durant l'année 2000, tel qu'obtenu au travers de la simulation MRCC5 bbu.

Afin de mieux représenter la situation, on introduit le concept de **routage**, où l'on utilise une modélisation mathématique pour reproduire l'effet de l'acheminement du ruissellement jusqu'à l'exutoire. Dans notre cas, la modélisation est du routage est fournie par Hydro-Québec au travers du modèle HSAMI, qui utilise cinq paramètres calibrés individuellement pour chacun des bassins à l'étude. Du point de vue mathématique, l'influx de ruissellement de surface est distribué sur une certaine période de temps en en faisant une convolution avec un hydrogramme unitaire généré par une fonction gamma, tandis que le ruissellement hypodermique utilise un modèle de réservoir intermédiaire plus complexe. Le lecteur est encouragé à consulter les références [16,17] pour avoir davantage de détails sur la procédure.

La Figure 24 ajoute le ruissellement routé au profil du bassin 4 (Rimouski) durant l'année 2000. La première sous-figure utilise les paramètres calibrés fournis par Hydro-Québec; on observe alors que les pics de ruissellement se rapprochent davantage de la forme des pics du ruissellement observé. Toutefois, le délai induit dans le profil général est très faible – les pics se déplacent de deux jours, au mieux, ce qui ne comble pas la différence de plus de dix jours dans le timing des pics printaniers que l'on observe pour plusieurs bassins.



Figure 24. Influence du routage sur le profil de ruissellement du bassin 4 (Rimouski) simulé par la simulation **bbu** durant l'année 2000, et illustration de l'effet des différents paramètres de routage

On peut alors adapter les paramètres du routage afin de vérifier si les divergences ne seraient pas dues à une calibration inappropriée. La deuxième sous-figure ajoute quatre courbes où l'on a fait passer les paramètres pertinents au ruissellement de surface à des valeurs extrêmes en appliquant un facteur de 10 ou 1/10. La division par 10 semble surtout éliminer l'effet du routage, tandis que la multiplication adoucit davantage les courbes, mais pas à un point où l'on ajoute un délai significatif. Puisque (par exemple) le ruissellement simulé des bassins 1 à 4 est systématiquement en avance de quelques semaines sur les observations, il est clair que l'absence de routage n'est pas la seule source de divergences entre le timing des pics printaniers simulés et observés.

La troisième sous-figure module les trois paramètres du ruissellement hypodermique de manière similaire; on constate effectivement que l'effet est surtout sur le pic de ruissellement hypodermique près du jour 150. Les changements font bouger le pic d'une dizaine de jours au mieux, ce qui n'élimine pas la séparation entre les pics de ruissellement de surface et de ruissellement hypodermique que l'on observe dans plusieurs bassins; en fait, puisque le routage ralentit davantage le transit du ruissellement hypodermique, il accentue la séparation temporelle entre les pics des deux modes.

En somme, même si le routage permet une comparaison fondamentalement plus juste des simulations et des observations, il ne change pas le portrait qualitatif des problèmes précédemment identifiés dans le comportement du ruissellement simulé, de sorte que les conclusions tirées jusqu'ici demeurent valides.

6.5.2 MODÉLISATION DU RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE

En plus de son schéma de routage plus riche incluant un réservoir intermédiaire, le ruissellement hypodermique simulé a son lot de complexités au niveau de sa définition même. Dans la modélisation de CLASS, il correspond à la quantité d'eau s'évacuant du bas de la dernière couche du sol avant la croûte terrestre. En vérité, le phénomène de ruissellement sous-surface est plus complexe et peut se faire à davantage de niveaux que celui de la croûte terrestre; qui plus est, la modélisation actuelle dépend fortement d'une modélisation quantitativement appropriée de la conductivité hydraulique dans les différentes couches du sol. On peut d'ailleurs noter l'une des limitations importantes de la modélisation actuelle du sol : le fichier géophysique utilisé dans les simulations du MRCC5 représente les 17 couches du sol de chaque tuile par une composition homogène, quand il est possible qu'un changement de composition modifie la dynamique du ruissellement hypodermique de manière majeure.

La Figure 25 montre l'effet d'un même évènement de précipitations fortes sur la fraction volumétrique d'eau des couches individuelles du sol des bassins 4 et 7, de la couche de surface jusqu'à la croûte terrestre. On constate dans les deux cas que l'eau prend un certain temps pour percoler jusqu'au fond, et que le pic s'adoucit. Dans les deux cas, la percolation de l'eau jusqu'à la croûte terrestre prend une dizaine de jours. Le bas de la figure montre la différence entre la position du pic pour une certaine couche et la troisième couche pour trois évènements de précipitation ciblés pour leur clarté. Dépendamment de l'évènement, il en prend entre 7 et 16 jours pour en arriver au fond à partir de la troisième couche.



Figure 25. Réponse de la fraction volumétrique d'eau des les couches individuelles du sol des bassins 4 et 7 à un même évènement de précipitations fortes, et illustration du délai dans le moment du pic de la fraction volumétrique d'eau lors de la percolation vers les couches profondes pour trois évènements similaires.

On constate aussi que malgré la différence de composition du sol, il n'y existe pas de différence systématique évidente entre les temps de transit. Cela s'explique encore une fois par l'équilibre au niveau de la conductivité hydraulique qu'on doit mathématiquement retrouver entre les différents bassins étant donné leurs niveaux de précipitation et porosités similaires (voir la Section 6.4.1). La fraction volumétrique d'eau des couches profondes (proportionnelle à $\theta_{Iiq}/\theta_{sat}$), s'adapte pour créer un équilibre entre l'influx et l'efflux d'eau dans ses couches.

6.6 SYNTHÈSE : REGARD SUR QUELQUES RÉGIONS ET RAPPORT AVEC LES OBSERVATIONS

Afin de synthétiser l'information de ce chapitre, on se penche d'abord sur le comportement spécifique des bassins du Bas Saint-Laurent, de l'Outaouais et du Grand Nord. Les autres régions ont une dynamique intermédiaire qui peut être entièrement expliquée à partir des conclusions obtenues sur ces trois régions ciblées. Afin d'en avoir un exemple, on inclut donc une analyse du bassin 12 (Mistassini).



6.6.1 BAS SAINT-LAURENT (BASSINS 1-2-3-4-5)

Figure 26. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 1 (Matapédia) pour l'année 2000 de la simulation MRCC5

Ces bassins sont bien représentés par le portrait dessiné par Rimouski plus tôt dans le chapitre. Ils sont dans la région ayant la plus forte concentration d'argile de la province (voir la Figure 19) et de fortes précipitations qui résultent en la plus grande accumulation de neige au Québec(voir la Figure 4). Ces deux facteurs font en sorte que l'eau de fonte est abondante et ne peut pas s'infiltrer dans le sol à faible conductivité hydraulique. En somme, on a un pic printanier simulé fortement dominé par le ruissellement de surface (voir la Figure 16) qui a une avance de 25 jours relativement à celui des autres bassins plus sablonneux situés à la même latitude (7-8-9-10).

Les observations ont plusieurs pics d'une durée de quelques jours qu'on associerait généralement au ruissellement de surface. Ceux-ci sont aussi présents dans les observations durant l'été et l'automne (quoiqu'avec une fréquence et une amplitude réduites), contrairement aux simulations. Il est donc possible que le ruissellement de surface soit sous-représenté durant les saisons chaudes dans le MRCC5.

6.6.2 OUTAOUAIS (BASSINS 7-8)



Figure 27. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 8 (Coulonge) pour l'année 1981 de la simulation MRCC5 bbu

Ces bassins sont bien représentés par le portrait dessiné par Dumoine plus tôt dans le chapitre. Ils sont dans la région ayant la plus forte concentration de sable de la province (voir la Figure 19), ce qui maximise la conductivité hydraulique du sol. Cela fait en sorte que le ruissellement est fortement biaisé vers un mode hypodermique; le ruissellement de surface n'est présent pratiquement que lorsque le sol est gelé à saturation et qu'on a un évènement de fonte des neiges ou de précipitations liquides extrêmes.

Le pic printanier arrive en moyenne avec une dizaine de jours de retard face aux observations, une différence irréconciliable par quelque modèle de routage que ce soit puisque ces modèles induisent nécessairement un délai dans le ruissellement simulé. Le profil des observations est beaucoup plus adouci que celui des bassins du Bas Saint-Laurent. Il est possible que cette différence soit due autant à la plus grande superficie des bassins qu'à la prédominance du ruissellement hypodermique que suggère les simulations.

6.6.3 GRAND NORD (BASSINS 17-19-20)



Figure 28. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 20 (À la Baleine) pour l'année 2009 de la simulation MRCC5 **bbu**

Les bassins du Grand Nord ont des températures telles que la quasi-totalité des précipitations entre les mois d'octobre (jour 300) et avril (jour 120) sont solides. Dans le cas de la majorité des bassins, il ne pourrait donc y avoir que du ruissellement hypodermique. Cela dit, ces deux bassins n'ont pas de ruissellement *du tout* durant cette période. C'est que la croûte terrestre est beaucoup plus saillante qu'ailleurs au Grand Nord (respectivement 0.85 m, 0.39 m et 0.10 m de profondeur, contre >2 m partout ailleurs; voir la Figure 19), de sorte que *l'entièreté* du sol est gelée à saturation. Il en découle donc que très peu, voire pas d'eau coule de la couche inférieure pour devenir du ruissellement hypodermique, surtout puisque le sol a une quantité de sable / d'argile plus faible / forte que la moyenne de la province.

Durant la fonte des neiges, on a donc d'abord du ruissellement de surface. Une fois que le sol dégèle, sa conductivité augmente très rapidement, laissant place à l'infiltration qui crée du ruissellement hypodermique. Il est à noter que l'on voit ici des pics ponctuels de ruissellement hypodermique qui ne sont pas présents ailleurs; en effet, puisque le sol n'a que quelques couches d'épaisseur, on n'a pas l'effet adoucissant du transit de l'eau sur une plus grande profondeur. Il n'y a d'ailleurs généralement qu'une seule journée de délai entre les précipitations et le ruissellement hypodermique qui en résulte pour les mêmes raisons.

Il est à noter qu'en comparaison aux résultats de simulation (même après routage) et en dépit de la prédominance du ruissellement de surface, le profil des observations est très adouci, sans pics ponctuels – possiblement en raison de la grande étendue des bassins.

6.6.4 MISTASSINI (BASSIN 12)



Figure 29. Profil du ruissellement et des variables d'hydrologie du bassin 12 (Mistassini) pour l'année 2013 de la simulation MRCC5 bbu

Le bassin Mistassini est un bassin très moyen à l'échelle de la province, ce qui est en partie un résultat de sa position géographique assez centrale : en effet, comparativement à la médiane provinciale, on a des décalages de seulement +4.2% au niveau du ruissellement, -1.8% au niveau des précipitations, -0.4°C au niveau de la température moyenne, +3.8% au niveau de la fraction de sable et -2.4% au niveau de la quantité d'argile.

Il est donc assez naturel que son ruissellement soit un cas intermédiaire de ceux des trois régions vues plus haut. Les deux modes de ruissellement sont très présents et séparés par quelques dizaines de jours, créant le pic printanier double détaillé au premier chapitre. Le ruissellement de surface arrête aussitôt que le sol dégèle; il prend ensuite un certain temps avant que l'infiltration se rende jusqu'à la croûte terrestre pour se traduire en du ruissellement hypodermique.

En pratique, le pic des observations se situe dans le trou entre les deux modes. Il convient donc d'exprimer des doutes face à la validité de la forte séparation entre les deux, qui n'est qu'accrue par le routage vu le délai plus grand que cette procédure impose sur le ruissellement hypodermique. Lorsque l'on considère en plus la présence de pics dans les observations durant l'été et l'automne, que l'on associerait à du ruissellement de surface, il convient de se demander s'il ne devrait pas y avoir davantage d'équilibre entre les deux modes tout au long de l'année.

6.7 RÉCAPITULATIF

Ce chapitre aura interprété la dynamique saisonnière du ruissellement des différents bassins en la reliant aux autres variables simulées par le MRCC5, en particulier celles relatives à l'hydrologie du sol. Il a d'abord été démontré qu'il y existe une forte séparation temporelle entre le ruissellement de surface et le ruissellement hypodermique simulés, au point où il n'y a que très peu de coexistence entre les deux modes. La Figure 16 a d'ailleurs démontré que cette séparation influence la dynamique printanière de manière cruciale; les pics printaniers définis par le ruissellement de surface sont constamment devancés par rapport à ceux définies par le ruissellement hypodermique.

On a ensuite montré que le mode de ruissellement d'un bassin au moment du pic est déterminé par la composition de son sol. À l'hiver, tous les bassins de la province voient environ 90% de l'eau contenue dans la première couche de leur sol (10°Cm de profondeur à partir de la surface) geler, ce qui limite très fortement l'infiltration de l'eau liquide à la surface. Dans les sols faibles en sable / forts en argile, cette diminution est suffisante pour que l'eau de fonte des neiges n'ait généralement pas l'occasion de pénétrer le sol, ce qui se traduit en du ruissellement de surface. Dans les sols plus forts en sable / faibles en argile, la diminution n'est souvent pas suffisante pour observer ce phénomène et on a donc du ruissellement hypodermique. À l'été, tous les bassins de la province n'ont que du ruissellement hypodermique ou presque en vertu de la conductivité hydraulique élevée du sol.

La forte séparation des deux modes de ruissellement est probablement extrême face à la réalité; en particulier, le retard des pics printaniers des bassins dominés par le ruissellement hypodermique face aux observations est un écart systématique qui ne peut être résolu par des modèles de routage. Les observations montrent aussi des pics de ruissellement durant l'été qu'on apparenterait davantage à du ruissellement de surface, qui ne sont pourtant pas présents dans les simulations. De plus, cette séparation engendre parfois deux pics printaniers distincts correspondant aux deux différents modes, dont l'écart ne ferait qu'augmenter en réponse au routage. Afin de représenter le ruissellement de manière plus réaliste, le MRCC5 devra donc se pencher davantage sur le comportement de l'infiltration de l'eau du sol, particulièrement durant la période de dégel.

7. EFFET DES PARAMÈTRES DE SIMULATION SUR LA DYNAMIQUE DE RUISSELLEMENT

Les paramètres de départ des simulations exercent une influence sur leurs sorties d'une manière qui est importante de quantifier pour compléter la validation du modèle. Ce chapitre caractérisera l'impact de la date de départ des simulations, de la présence ou pas du pilotage spectral (une technique mathématique qui sera alors décrite), de la résolution de la grille de simulation ainsi que du domaine de simulation.

Dans l'entièreté de ce chapitre, l'analyse ne sera faite que sur les années d'observation valides (voir le Tableau 5) afin de permettre une comparaison directe avec les résultats des autres chapitres du rapport.

7.1 DATE DE DÉPART ET PILOTAGE SPECTRAL

Il est coutume de faire plusieurs simulations ne différant que par des dates de départ décalées au moment de la validation d'un modèle climatique. Puisque les simulations sont pilotées par la même réanalyse (ERAint75), la variation dans les résultats donne une idée du niveau de variabilité interne du modèle, soit toute variabilité n'étant pas due aux différentes conditions de simulation. On anticipe dans un modèle établi que celle-ci soit faible [18].

Du même coup, on étudie dans cette section l'influence du **pilotage spectral**. Cette technique mathématique force les données à correspondre davantage aux variations de longue échelle des données pilotes afin de mieux reproduire les effets climatiques d'échelle continentale. Son influence devrait être quantitativement similaire à celle de la date de départ.

Cette analyse utilise quatre simulations faites sur le domaine QC avec une résolution de 0.11° : **bbr** et **bbt** débutent en janvier 1979, tandis que **bbq** et **bbr** débutent un mois plus tard, en février 1979; la paire **bbr-bbs** n'est pas soumise au pilotage spectral, contrairement à la paire **bbq-bbt**.

7.1.1 RUISSELLEMENT GLOBAL

On se penche d'abord sur les changements dans les ruissellements moyens des bassins. La Figure 30 démontre que les différences sont faibles; en effet, les moyennes globales prises sur les vingt bassins diffèrent au plus de 0.01 mm/j (0.5%) et l'écart quadratique moyen entre les distributions des différentes simulations est d'au plus 0.036 mm/j (1.7%). Cette dernière valeur est une bonne indication de la variabilité interne du modèle.

Il semble y exister quelques tendances spatiales mineures. Les simulations **bbq** et **bbt** ont davantage de ruissellement dans les bassins 1-2-3-4, tandis que **bbr** a davantage de ruissellement au Sud-Ouest. Ces différences atteignent au plus 0.1 mm/j et représentent même dans le cas le plus extrême moins de 5% du ruissellement du bassin spécifique.



Figure 30. Différence entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbq, bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la période 1980-2014

7.1.2 VARIABILITÉ INTERANNUELLE

On utilise encore une fois l'écart-type des distributions de ruissellement annuel moyen de chaque bassin pour avoir une idée de leur variabilité interannuelle. La moyenne de ces écarts-types sur tous les bassins sont similaires dans les 0.001 mm/j (0.3%) et l'écart quadratique moyen entre les distributions des différentes simulations est d'au plus 0.034 mm/j (1.6%). Ces chiffres correspondent donc aux attentes vu ceux obtenus pour les ruissellements moyens.

Il est intéressant de constater que l'écart quadratique moyen est plus faible pour les combinaisons - et - (où l'on a au *maximum* 0.24 mm/j) que pour les autres combinaisons (où l'on a au *minimum* 0.30 mm/j). Il est donc possible que le pilotage spectral affecte légèrement (~20%) les profils de variabilité interannuelle des bassins.



Figure 31. Différence entre les écarts-type des ruissellements annuels obtenus au travers des simulations bbq, bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la période 1980-2014

La Figure 32 démontre qu'on a aussi une forte corrélation entre les profils interannuels; en effet, tous les profils sur tous les bassins sont corrélés avec R>0.8 pour toutes les combinaisons possibles de simulations. Il est intéressant de noter que la corrélation a tendance à augmenter en allant vers le Nord – possiblement en raison de la variabilité interannuelle plus faible de ces bassins.

La corrélation moyenne est particulièrement forte pour la paire **bbq-bbt** (0.92) comparativement à toutes les autres paires (0.86, 0.86, 0.87, 0.87, 0.88). Le pilotage spectral semble donc améliorer la justesse de la variabilité interne au niveau des profils interannuels.



Figure 32. Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des simulations bbq, bbs et bbt avec ceux de la simulation bbr sur la période 1980-2014

Il est aussi intéressant de considérer lesquelles de ces simulations sont les mieux corrélées avec les observations; on illustre cette idée dans la Figure 33. Tel qu'attendu, les corrélations sont beaucoup moins fortes qu'entre les simulations elles-mêmes. Puisque les coefficients de corrélation moyens sont de 0.61, 0.62, 0.61 et 0.63, il ne semble pas que le pilotage spectral ait une influence plus grande que la variabilité interne à ce niveau.



Figure 33. Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des simulations bbq, bbr, bbs et bbt avec ceux des observations du CEHQ

7.1.3 DYNAMIQUE SAISONNIÈRE

On se penche finalement sur la dynamique saisonnière des différentes simulations. Au cours de ce chapitre, on utilisera deux mesures comparatives :

 Le volume du pic printanier, défini comme la somme du ruissellement sur trois mois englobant le pic (mars à mai pour les bassins 1 à 10 et avril à juin pour les bassins 11 à 20, par recommandation de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec); Le moment du pic printanier, défini comme le jour du maximum de ruissellement du profil annuel moyenné (passé au travers d'une fenêtre mobile de 5 jours pour limiter l'influence des données extrêmes).

Les volumes sont illustrés dans la Figure 34. Les moyennes globales des différentes simulations se situent dans les 1.2 mm (0.4%) tandis que l'écart moyen quadratique (EMQ) entre les distributions est d'au maximum 3.7 mm (1.1%). Ce sont encore une fois des chiffres en accord avec ceux des mesures précédentes.

Il semble de nouveau y avoir quelques tendances systématiques, telles qu'illustrés par la quatrième sousfigure. Les simulations soumises au pilotage spectral ont un volume de pic printanier systématiquement plus élevé (jusqu'à 2.4%) dans les bassins 1-2-3-4-13-14, à l'est. Comme au niveau de la variabilité interannuelle, l'influence du pilotage spectrale semble être surtout localisée dans cette région.



Figure 34. Différence entre les volumes de pics printaniers obtenus au travers des simulations bbq, bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr sur la période 1980-2014

Au niveau du moment du pic printanier, toutes les moyennes globales entrent à l'intérieur du jour 124. On observe quelques différences allant jusqu'à huit jours, mais la majorité des différences sont nulles (65%) et l'écart-type est de moins de 3 jours. Étant donné que le moment précis du pic ne demande qu'une seule journée extrême pour différer de potentiellement beaucoup, on en déduit qu'il n'y existe pas de différence particulièrement significative entre les simulations décelable par cette mesure.



Figure 35. Différence entre les moments des pics printaniers obtenus au travers des simulations bbq, bbs et bbt avec ceux obtenus au travers de la simulation sur la période 1980-2014

7.1.4 RÉCAPITULATIF

Au niveau de toutes les statistiques explorées, l'influence quantitative de la date de départ et du pilotage spectral sur les moyennes globales (donc prises sur tous les bassins sur toute la longueur de la simulation) est sous la barre du 0.5%. Sur les bassins individuels, même les différences les plus extrêmes ne franchissent pas 5%. En plus des moyennes, les profils interannuels sont aussi reproduits; non seulement retrouve-t-on des écarts-type similaires, mais les profils interannuels des bassins individuels corrèlent tous avec R>0.8 pour toutes les combinaisons de simulations.

Le pilotage spectral semble surtout avoir une influence sur les bassins de l'Est (1-2-3-4-13-14) et au niveau des profils interannuels des différentes simulations, qui semblent mieux corréler en sa présence (R=0.92 contre R<0.88). Dans toutes les simulations, la moyenne de la corrélation entre les profils interannuels simulés et observés des bassins individuels est entre 0.61 et 0.63, de sorte qu'il n'y a pas d'amélioration évidente provenant du pilotage spectral en cette matière.

7.2 RÉSOLUTION DE LA GRILLE DE SIMULATION

S'il est bien entendu toujours fondamentalement plus valide de faire des simulations sur des grilles à résolution plus fine, il est évident que l'augmentation de la résolution demande une puissance informatique accrue ainsi qu'une base de données observatoires plus développée. Il est donc intéressant d'étudier l'impact quantitatif d'une grille moins fine sur le ruissellement.

On utilise dans cette section trois simulations (**bbr**, **bbu**, **bbv**) identiques sauf pour leur résolution, qui passe de 0.11° à 0.22° à 0.44°⁵. À noter que les simulations **bbr** et **bbu** ont été les simulations utilisées exclusivement pour les analyses respectives des chapitres 1 et 2. Sur nos bassins, l'effet se reflète aussi sur le nombre de tuiles contenues dans chaque bassin (voir le Tableau 4); ceci est t illustré dans la Figure 36, qui représente ces tuiles pour les vingt bassins pour les résolutions de 0.11° et 0.44°. Aucune tuile n'est contenue dans les bassins 2 et 10, qui sont donc exclus des analyses comparatives.



Figure 36. Représentation visuelle des tuiles de simulation contenues dans chacun des bassins pour les résolutions de 0.11° (vert) et 0.44° (rouge)

⁵ On a en fait aussi de mineures différences au niveau du fichier géophysique en ce qui a trait à la superficie de certains lacs.

7.2.1 RUISSELLEMENT MOYEN

On amorce à nouveau l'analyse par une comparaison des ruissellements moyens des bassins individuels, qui sont illustrés dans la Figure 37. La moyenne change significativement entre **bbr** et **bbu**, diminuant de 0.12 mm/j (6%). Toutefois, elle ne change pas davantage entre **bbu** et **bbv**, qui diffèrent de <0.4%. À observer le portrait spatial, ces différences semblent plutôt généralisées et sans tendance géographique claire, avec l'exception du bassin 5 dont le ruissellement est significativement plus élevé dans **bbr** (+35% et +24% par rapport aux deux autres simulations).

La dernière sous-figure montre la différence entre les ruissellements moyens de chacune de ces simulations avec les observations. En général, le rapprochement des points pour chaque bassin montre que le profil des différences est assez bien conservé hormis pour le bassin 5.



Figure 37. Différence entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbr, bbu et bbv avec ceux obtenus au travers des observations du CEHQ

Les simulations à plus faible résolution se rapprochent davantage du ruissellement moyen global des observations (surestimation de +16% pour **bbu** et **bbv**, contre +23% pour **bbr**). Il convient de se demander ce qui engendre cette différence. La Figure 38 montre que celle-ci est fortement corrélée avec les niveaux de précipitations des différentes simulations. En effet, la simulation **bbt** a des précipitations moyennes respectivement 0.11 mm/j et 0.14 mm/j plus élevées que dans **bbu** et **bbv**, ce qui correspond à peu près aux différences dans les ruissellements moyens. Qui plus est, le profil spatial des différences de précipitations et de ruissellement sont très similaires; on a en fait une corrélation entre les deux différences de R=0.87 (paire **bbr-bbu**) et de R=0.90 (paire **bbr-bbv**).



Figure 38. Différence entre les niveaux de précipitations moyens des simulations **bbu** et **bbv** avec ceux de la simulation **bbr**, et différence entre les profils annuels moyens de précipitations et de ruissellement des simulations **bbu** et **bbv** avec ceux de la simulation **bbr**

Le bas de la figure illustre le profil de la différence entre les niveaux de précipitations et de ruissellement des simulations au cours de l'année, obtenu en appliquant une fenêtre mobile de 10 jours à la moyenne quotidienne des précipitations sur les 18 bassins valides dans toutes les simulations. On y constate que les précipitations et ruissellements sont relativement similaires entre les jours 300 et 100, soit tout au cours de l'hiver (on observe quand même des niveaux un peu plus élevés dans **bbv**) - on a une différence moyenne de respectivement 0.0% (0.00 mm/j) et 2.1% (0.06 mm/j) au niveau des précipitations et de

-1.8% (-0.02 mm/j) et 3.3% (0.05 mm/j) au niveau du ruissellement dans bbu et bbv par rapport à bbr.

Toutefois, entre les jours 100 et 300, on a en moyenne respectivement 4.7% (-0.18 mm/j) et 7.7% (-0.29 mm/j) moins de précipitations et 6.4% (-0.16 mm/j) et 9.3% (-0.23 mm/j) moins de ruissellement dans **bbu** et **bbv** par rapport à **bbr**. Le MRCC5 est déjà reconnu pour surestimer les précipitations convectives à haute résolution; considérant l'effet qui en découle sur le ruissellement, il est possible que la simulation **bbu** soit en fait un portrait plus représentatif de la réalité en dépit de sa grille moins fine.

7.2.2 VARIABILITÉ INTERANNUELLE

La Figure 39 montre la différence entre les écarts-types des profils de ruissellement annuel moyen des différentes simulations. Les moyennes globales sont assez rapprochées à 0.28 mm/j, 0.27 mm/j et 0.31 mm/j, et n'ont pas le même biais entre **bbr** et les simulations moins fines qu'on retrouve au niveau du ruissellement global. Cette différence de 13% est tout de même beaucoup plus grande que celle obtenue par variabilité interne du modèle (0.3%) tel que détaillée à la section 3.1.

Il ne semble pas non plus avoir de tendance géographique systématique, et les différences avec les écartstype observés de la dernière sous-figure semblent garder un profil relativement similaire.



Figure 39. Différence entre les écarts-type des ruissellements annuels obtenus au travers des simulations bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr

La Figure 40 montre les corrélations entre les profils interannuels des différentes simulations pour chacun des bassins. On y constate que les bassins 8 et 15 ont des corrélations systématiquement plus faibles; les deux sont situés tout à l'Ouest de la province. Autrement, la corrélation moyenne est de R=0.75 pour la paire **bbr-bbu**, de R=0.72 pour la paire **bbr-bbv** et de R=0.77 pour la paire **bbu-bbv**. Sur les années valides de simulation, un test z de Fisher (avec un niveau significatif de 5%) démontre que seuls les bassins 1 et 8 ont une différence de corrélation statistiquement significative.



Figure 40. Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des simulations bbr, bbu et bbv

La Figure 41 montre ces mêmes corrélations interannuelles, mais avec les observations. En moyenne, la simulation **bbr** est la mieux corrélée, avec R=0.61; toutefois, **bbu** et **bbv** ont R=0.53 et R=0.59 en dépit d'un bassin 8 significativement moins bien corrélé. En fait, le test z de Fisher démontre que la différence entre les niveaux de corrélation est statistiquement significative qu'au niveau de ce bassin.



Figure 41. Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des simulations bbr, bbu et bbv avec ceux des observations du CEHQ

7.2.3 DYNAMIQUE SAISONNIÈRE

Les différences entre les volumes des pics printaniers de chacune des simulations sont montrées dans la Figure 42. La simulation **bbr** produit des volumes environ 10 mm plus élevés que les autres simulations, une augmentation de ~3%; il est normal que celle-ci soit plus faible que celle du ruissellement total (6%) considérant que la différence est surtout au niveau des précipitations estivales. Les simulations **bbu** et **bbv** sont plus similaires, différant d'environ 1%. Tel que vu dans la dernière sous-figure, la différence entre

les simulations est généralement bien moindre que celle entre les simulations et les observations. Encore une fois, seul le bassin 5 démontre une différence plus significative.



Figure 42. Différence entre les volumes de pics printaniers moyens obtenus au travers des simulations bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr

Le moment des pics printaniers, illustrés dans la Figure 43, sont eux-mêmes similaires - ils différent généralement par moins que dix jours et sans biais systématique évident. On note des différences allant jusqu'à plus de quarante jours dans les bassins autour du Lac Mistassini; par inspection visuelle, on constate qu'elles sont dues aux pics doubles émanant des deux modes de ruissellement. Les deux pics, séparés par jusqu'à 60 jours, sont proches en amplitude et il ne prend pas une différence de comportement énorme pour engendrer le choix de l'un ou de l'autre. Les autres bassins sont plus rapprochés d'une simulation à l'autre - on a un écart-type de 3.1 jours entre les simulations **bbr** et **bbu** sur les bassins restants, ce qui n'est pas significativement plus élevé que la variabilité interne étudiée dans la section 3.1.



Figure 43. Différence entre les moments de pic printanier moyens obtenus au travers des simulations bbu et bbv avec ceux obtenus au travers de la simulation bbr

7.2.4 RÉCAPITULATIF

Les différentes résolutions ont surtout un impact au niveau du ruissellement estival parce que le MRCC5 a tendance à surestimer les précipitations convectives. Si les résolutions de 0.22° (**bbu**) et 0.44° (**bbv**) sont similaires à tous les niveaux, celle de 0.11° (**bbr**) a un ruissellement global plus élevé de 0.12 mm/j (6%). Cette différence, approximativement égale à l'augmentation des précipitations, est la plus significative entre les simulations.

Il n'y existe pas de tendance systématique au point de vue spatial, sauf pour le bassin 5, tout au Sud, qui a un comportement très différent dans **bbr**. Cela est dû à une surestimation des précipitations particulièrement élevée au Sud ainsi qu'à un schéma de surface entièrement différent au niveau de ce bassin, ce qui pourrait être dû soit aux différentes tuiles incluses dans les diverses simulations ou au fichier géophysique légèrement différent de **bbu** et **bbv**. Il faut aussi noter que la variabilité interannuelle du bassin 8 est significativement mieux corrélée avec celle des observations pour **bbr**; le seul bassin pour lequel c'est le cas.

En termes de variation interannuelle, les simulations corrèlent similairement entre elles (R=~0.75) et avec les observations (R=~0.6) – aucune d'entre elles ne se détache significativement du lot. La moyenne des écarts-type des ruissellements annuels des bassins individuels sont aussi d'accord à l'intérieur de 13% pour les différentes simulations.

Les pics printaniers sont plus volumineux de 10 mm (3%) dans **bbr**. Autrement, les moments des pics sont similaires dans l'optique de notre mesure susceptible à l'influence des extrêmes et de la séparation des deux modes de ruissellement.

7.3 DOMAINE DE SIMULATION

On se penche finalement sur l'influence du choix de domaine de simulation. Les précédentes analyses ont toutes été faites sur le domaine **QC**, illustré en pointillé dans la Figure 44; on comparera ici la simulation **bbu** avec une simulation (**bbw**) ne différant que par l'utilisation du domaine **AMNO**, qui prend l'ensemble de la figure. Fondamentalement, le comportement des 20 bassins à l'étude sera moins directement influencé par les données pilotes de la réanalyse ERA dans le domaine AMNO et dépendra plutôt de la réponse simulée des régions environnantes.



Figure 44. Illustration des domaines de simulation QC (pointillé) et AMNO (figure entière)

7.3.1 RUISSELLEMENT MOYEN

La différence entre le ruissellement moyen des deux simulations est illustré dans la Figure 45. La simulation **bbu** a en moyenne 0.09 mm/j (4.5%) plus de ruissellement que la simulation **bbw**. On constate que le portait est assez constant à l'échelle de la province entière; en dehors du bassin 5 qui se détache à nouveau complètement du reste (+0.39 mm/j), tous les bassins ont une différence sous la barre du 0.25 mm/j (11%). Ces deux simulations utilisent le même fichier géophysique, donc il est probable que la différence dans la modélisation de sol du bassin 5 soit due à un changement abrupt de sa composition au sein du bassin, et que les différentes grilles en capturent des sections différentes.

Le ruissellement plus faible de **bbw** rapproche la simulation encore davantage des observations – la surestimation du ruissellement est maintenant de 0.18 mm/j (10%). La différence entre les deux simulations est généralement moins significative que celle entre les simulations et observations; les écarts quadratiques moyens sont de 0.16 mm/j pour la paire **bbu-bbw** et de 0.25 mm/j pour la paire **bbw-**CEHQ.



Figure 45. Différence entre les ruissellements moyens obtenus au travers des simulations bbu et bbw

Afin d'élucider la différence entre les simulations, on illustre dans la Figure 46 les différences dans leurs précipitations moyennes et dans leurs précipitations quotidiennes (moyennées sur tous les bassins et soumises à une fenêtre mobile de 10 jours). On constate que la diminution du ruissellement dans **bbr** est quantitativement attribuable aux précipitations en moyenne plus élevées de 0.10 mm/j dans **bbu**; cette diminution est d'ailleurs assez constante à l'échelle provinciale, ayant un écart-type de 0.07 mm/j. De plus, le portrait quotidien ne révèle pas de différences systématiques à l'échelle saisonnière. Le changement dans le niveau de ruissellement est d'ailleurs fortement corrélé à celui des précipitations – davantage au printemps puisque l'on a davantage de ruissellement de surface, dont la réponse aux précipitations est plus immédiate.


Figure 46. Différence entre les précipitations moyennes obtenues au travers des simulations bbu et bbw, et différence entre les profils annuels moyennés de précipitations et de ruissellement de ces simulations

7.3.2 VARIABILITÉ INTERANNUELLE

La différence entre les écarts-type des distributions de ruissellements annuels moyens sur chacun des bassins est illustrée dans la Figure 47. La moyenne des deux distributions est assez similaire, à respectivement 0.28 mm/j et 0.29 mm/j pour **bbu** et **bbw**, mais on constate une possible tendance spatiale : les bassins en périphérie semblent avoir en général une variabilité interne plus élevée dans **bbw**. Il est possible que cela soit dû au fait qu'ils sont moins directement dirigés par la réanalyse par rapport à **bbu**.



Figure 47. Différence entre les écarts-type des ruissellements annuels obtenus au travers des simulations bbu et bbw

Au niveau des corrélations moyennes entre les différentes simulations et les observations, illustrées à la Figure 48, on a R=0.51 pour la paire **bbu-bbw**, R=0.54 pour la paire **bbu-**CEHQ et 0.44 pour la paire **bbw**-CEHQ. Il semble donc que le domaine plus grand réduise la corrélation interannuelle, ce qui est attendu considérant que la grille est moins liée aux conditions latérales pilotes. À observer la figure, il semble que cette réduction est commune à tous les bassins sauf pour la paire 16-17. Dans tous les cas, la corrélation est systématiquement réduite dans les bassins 6,8 et 15, tous en périphérie au Sud-Ouest.



Figure 48. Corrélation entre les profils de ruissellement interannuels des bassins individuels des simulations bbr, bbu et bbv avec ceux des observations du CEHQ

7.3.3 DYNAMIQUE SAISONNIÈRE

La différence entre les volumes des pics printaniers simulés et observés est illustrée dans la Figure 49. La moyenne est plus élevée de 4% dans **bbu**, ce qui correspond quantitativement à l'augmentation du ruissellement global de 4.5%. Ce résultat est attendu en vertu de l'absence de divergences saisonnières dans le niveau de ruissellement. On constate aussi que les différences entre les simulations sont beaucoup plus faibles que celles entre les simulations et les observations, et que le portrait spatial est bien conservé (hormis le bassin 5).



Figure 49. Différence entre les volumes de pic printanier moyens obtenus au travers des simulations bbu et bbw et au travers des observations du CEHQ

Au niveau du moment des pics printaniers, on a aussi un portrait assez similaire. Outre le bassin 15 (où l'on a une différence de 38 jours induite par un double-pic), tous les moments de pic printanier différent au plus de 11 jours et on a un écart-type de 4.8 jours. Cet écart-type plus élevé que pour le changement des autres paramètres (pour lesquels il se situait autour des 3 jours), mais toujours beaucoup plus faible que l'écart-type de 14.5 jours qu'on retrouve entre les simulations individuelles et les observations. Les conclusions qualitatives ne changent donc pas.



Figure 50. Différence entre les moments de pic printanier moyens obtenus au travers des simulations bbu et bbw et au travers des observations du CEHQ

7.3.4 RÉCAPITULATIF

À l'instar de la réduction de la résolution, le passage vers le domaine AMNO réduit le ruissellement global de 4.5%. Si cette différence est de nouveau attribuable aux changements dans les précipitations, ceux-ci sont toutefois constants à l'échelle saisonnière.

Les deux simulations ont la même variabilité interannuelle que celles de toutes les autres simulations étudiées. Toutefois, il semble que le plus grand domaine réduise la corrélation interannuelle moyenne avec les observations (R=0.44 contre R>0.55), ce qui est probablement attribuable au fait que les bassins soient moins directement affectés par les données pilotes (qui sont basées sur des observations).

Le comportement des pic printaniers est qualitativement conservé pour tous les bassins sauf le bassin 5, dont la modélisation du sol est significativement différente (probablement en raison des différentes grilles).

7.4 SYNTHÈSE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES DE SIMULATION

L'influence des paramètres de simulation sur les ruissellements globaux est quantitativement de :

- +/- 0.5% pour la date de départ;
- +/- 0.5% pour l'ajout du pilotage spectral;
- -6% pour une diminution de résolution de 0.11° à 0.22° (environ nulle pour le passage de 0.22° à 0.44°);
- -4.5% pour le passage du domaine QC au domaine AMNO

En somme, même en combinant tous les facteurs, les simulations sont globalement plus ruisselantes que les observations d'au moins 10% (0.18 mm/j), et de jusqu'à 21% (0.36 mm/j). La différence entre les simulations est les observations est donc systématique et au plus égale à celle entre les simulations les plus extrêmes (**bbr** et **bbw**).

Si l'on va au-delà du portrait global en considérant les bassins individuels, on constate une forte différence dans le comportement du bassin 5 dans les simulations faites sur le domaine QC à résolution de 0.22° et 0.44° par rapport aux autres simulations. Celle-ci est attribuée aux différentes grilles des simulations; il est probable que dans le cas de ces deux simulations, les tuiles contenues dans le bassin 5 correspondent à un sol différent de celui capturé dans les autres simulations.

La moyenne de l'écart-type de la distribution de ruissellements annuels moyens des bassins est conservé, étant toujours entre 0.27 mm/j et 0.31 mm/j, ce qui est toujours légèrement plus élevé que le 0.25 mm/j des observations. Dans presque tous les cas, la corrélation moyenne entre les profils interannuels simulés et observés des bassins individuels est entre R=0.53 et R=0.63. Les simulations faites sur le domaine QC avec une résolution de 0.11° sont les seules à franchir R=0.6; la simulation **bbw** faite sur le domaine AMNO est la seule à avoir une corrélation moyenne significativement plus faible avec R=0.44, ce qui est attendu considérant qu'on est moins influencé par les données pilotes de la réanalyse.

Du point de vue quotidien et saisonnier, on constate une réduction systématique dans les précipitations estivales lorsque l'on réduit la résolution de 0.11° à 0.22° et au-delà. La surestimation des précipitations convectives à fine résolution est un problème connu du MRCC5. C'est ici la seule différence plus fondamentale qui ait été constatée. Les paramètres de simulation ne changent donc pas les conclusions auxquelles on est arrivé dans les derniers chapitres.

8. PROJECTIONS DE L'INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA DYNAMIQUE DE RUISSELLEMENT

Maintenant que la dynamique du ruissellement du MRCC5 est bien comprise et établie, on peut l'utiliser au-delà de la période de validation pour établir des projections sur l'influence des changements climatiques sur le ruissellement simulé à l'échelle de la province.

En portant les résultats vers le futur, on ne peut évidemment plus utiliser les données pilotes de la réanalyse ERAint75; les conditions latérales supplémentées au modèle sont en fait les données simulées par des modèles de circulation générale traitant l'influence de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère sur le climat. Dans notre cas, quatre modèles sont utilisés comme pilotes aux simulations du MRCC5 pour analyser les modifications dans le comportement du ruissellement sur nos vingt bassins versants d'ici 2100: le Canadian Earth System Model (MRCC5-CanESM2) [19], le Max-Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM) [20], le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model (CNRM-CM5) [22]. Les quatre modèles obtiennent leurs données en considérant le même scénario du «pire cas» pour la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, soit Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP 8.5) [23], qui suppose que la concentration augmentera tout au long du 21ème siècle.

Le MRCC5-CanESM2 a la sensibilité climatique la plus extrême (c'est-à-dire le changement de température globale le plus élevé en réponse au doublage de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère comparativement à l'époque pré-industrielle) et est donc choisi pour illustrer les conséquences qualitatives des changements climatiques de manière plus évidente (sans être nécessairement plus valide que les autres modèles). L'analyse sera faite en moyennant les données sur des tranches de trente ans (1980-2009, 2010-2039, 2040-2069, 2070-2099) question d'avoir un moyennage suffisant pour limiter l'influence de données extrêmes sur les conclusions.

8.1 PORTRAIT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

On débute notre analyse en considérant les changements dans les variables météorologiques fondamentales. La Figure 51 montre les températures moyennes de chacun des bassins versants sur la période de 1980-2009 ainsi que l'augmentation subséquente de température en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 par rapport à cette période. En 2010-2039, la température moyenne augmente de 1.9°C; en 2040-2069, de 3.9°C; en 2070-2099, de 6.6°C, démontrant une accélération du phénomène. La température augmente davantage au Nord (~9°C) qu'au Sud (~5°C); l'étendue des températures moyennes passe de -6°C à 10°C en 1980-2009 à 3°C à 15°C en 2070-2099.



Figure 51. Température moyenne des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation subséquente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Un portrait similaire des précipitations est illustré à la Figure 52; avec le modèle MRCC5-CanESM2, les précipitations augmentent systématiquement à l'échelle de la province, jusqu'à +0.51 mm/j (+15%) en 2070-2099. Encore une fois, le Nord subit les augmentations les plus drastiques (+0.8 mm/j ou >30% pour les bassins 19-20) tandis que celles du Sud sont les plus faibles (+0.25 mm/j ou 7% pour le bassin 5). L'augmentation globale semble relativement linéaire au fil des années.



Figure 52. Niveaux de précipitations moyens des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation subséquente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Afin d'avoir tous les éléments du bilan hydrique avant l'analyse du ruissellement, on étudie finalement le portrait évolutif de l'évaporation dans la Figure 53. On semble dans ce cas observer une augmentation assez constante à l'échelle de la province entière pour chacune des périodes considérées; en effet, l'écart-type de l'augmentation en 2070-2099 par rapport à 1980-2009 est de seulement 0.01 mm/j. Comparativement aux changements dans les autres variables, l'influence spatiale de l'évaporation peut essentiellement être considérée comme spatialement homogène.



Figure 53. Niveau d'évaporation des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation subséquente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Le reste du bilan hydrique étant pris en compte, on peut finalement se pencher sur l'évolution du ruissellement lui-même, illustrée dans la Figure 54. Les changements dans le ruissellement sont plus faibles que ceux des précipitations étant donné l'augmentation de l'évaporation. Du point de vue spatial, on retrouve encore une fois une augmentation plus drastique au Nord (+0.47 mm/j ou +30% pour le bassin 20 en 2070-2099), tandis que le changement est presque nul dans plusieurs bassins du Sud (moins de +0.1 mm/j pour les bassins 4-5-6-7-8-15).



Figure 54. Niveau de ruissellement moyen des bassins durant la période de 1980-2009 et augmentation subséquente en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

8.2 RÉDUCTION DE L'IMPORTANCE RELATIVE DU PIC PRINTANIER

Au niveau des moyennes annuelles, il semble donc que l'on observe surtout des tendances latitudinales simples dans les précipitations, les températures et, ultimement, le ruissellement, où l'influence des changements climatiques est même à peu près nulle au Sud.

Cela dit, avec les augmentations drastiques de température, on peut s'attendre à des changements importants dans la dynamique saisonnière du ruissellement. La conséquence la plus immédiate des changements de température est au niveau des précipitations solides. La moyenne de l'accumulation annuelle maximale de neige à la surface est illustrée dans la Figure 55 pour les quatre périodes ciblées. Dans ce cas, la réduction a un portrait spatial plus complexe : les bassins 1-2-3 du Bas St-Laurent voient l'accumulation annuelle maximale diminuer de plus de 135 kg/m^2 en 2070-2099 et se retrouvent dans les bassins les moins enneigés de la province. Les bassins 1 à 10 ont tous une réduction de plus de 70%, tandis que celle des bassins 17-19-20 est de moins de 20%.



Figure 55. Maximum annuel moyen de l'accumulation de neige à la surface des bassins durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 tel qu'obtenu au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Puisque la fonte des neiges est généralement équivalente à une période de précipitations denses et fortes en ce qui a trait au ruissellement, on peut s'attendre à ce que la réduction de la quantité de neige réduise aussi l'importance du pic printanier en distribuant l'influx d'eau liquide durant l'hiver. Afin d'illustrer ce phénomène, la Figure 56 montre le rapport entre le volume du pic printanier du ruissellement et le ruissellement total pour chacune des périodes étudiées. Le rapport a été préféré au volume brut vu l'augmentation du ruissellement moyen à l'échelle de la province.



Figure 56. Fraction du ruissellement contenue dans le pic printanier durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

La moyenne globale de ce rapport diminue constamment d'une période à l'autre, passant de 0.43 en 1980-2009 à 0.36 en 2070-2099. En l'absence totale de pic printanier, on s'attendrait à une valeur avoisinant 0.25 puisque le calcul inclut un guart des mois de l'année. En 2070-2099, le rapport descend jusqu'à 0.30 pour les bassins 12-15-16, indiquant que le pic est encore présent, mais nettement réduit par rapport à 1980-2009 où le rapport est au minimum de 0.35 pour les bassins 13-16. Il faut noter qu'on a aussi une réduction du volume lui-même pour 17 des 20 bassins.

8.3 RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT DE SURFACE

La seconde et plus conséquente influence des changements climatiques sur la dynamique de ruissellement se retrouve au niveau de la diminution du gel du sol. On se rappelle que la conductivité hydraulique de la première couche est le facteur le plus déterminant du mode de ruissellement au moment de la fonte: une première couche ayant une faible conductivité hydraulique mènera à du ruissellement de surface durant la fonte puisque l'eau liquide ne peut s'y infiltrer, tandis qu'une conductivité élevée permet l'infiltration et mène à du ruissellement hypodermique. On se rappelle aussi que dans la modélisation de CLASS, la conductivité hydraulique diminue en fonction de la quantité de glace dans le sol; un sol davantage gelé promeut donc le ruissellement de surface.

La Figure 57 montre la moyenne annuelle de la quantité maximale d'eau gelée dans le sol sur les quatre périodes visées. On constate que le changement est drastique; on passe d'en moyenne 115 kg/m² en 1980-2009 à 30 kg/m² en 2070-2099, une réduction de 74%. Les bassins 1 à 10 se retrouvent à avoir moins de 25 kg/m² de glace au total tandis qu'ils atteignaient tous 50 kg/m² en 1980-2009. Les bassins du Nord sont moins affectés en raison de l'augmentation des précipitations et du fait que la température demeure confortablement sous zéro durant l'hiver en dépit de l'augmentation de température.



Figure 57. Maximum annuel moyen de glace dans le sol durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 tel qu'obtenu au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

C'est surtout lorsque l'on commence à diminuer sous cette barre des 50 kg/m2 que cela devient un facteur déterminant pour le ruissellement; en effet, c'est à ce moment que l'on commence à avoir une première couche du sol qui n'est plus complètement gelée. Afin d'en avoir une meilleure impression quantitative, on estime la fraction de glace maximale $\theta_{ice}/\theta_{sat}$ dans la première couche en prenant le rapport entre la quantité de glace maximale ($\sim \theta_{ice}$) et la quantité d'eau totale maximale ($\sim \theta_{sat}$). Les résultats sont illustrés dans la Figure 58; en 2070-2099, $\theta_{ice}/\theta_{sat}$ se retrouve aussi basse que 0.07 (bassins 5-6) tandis que sa valeur ne descendait pas sous 0.84 (bassin 5) en 1980-2009. En fait, seuls les bassins 13-14 se retrouvent audessus de cette valeur en 2070-2099, atteignant 0.89 et 0.87.



Figure 58. Estimation du maximum annuel moyen de la fraction de glace dans la première couche du sol par rapport au niveau de saturation durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

L'impact sur la conductivité du sol est encore plus flagrant vu sa forme fonctionnelle quadratique: pour illustrer cette idée, la Figure 59 montre la valeur de f_{ice} correspondant à celles de $\theta_{ice}/\theta_{sat}$. En 1980-2009, la conductivité hydraulique descend sous 1.5% de sa valeur à saturation dans le cas de tous les bassins sauf pour la paire 5-17 (2.5% et 3.5%). En 2070-2099, elle ne descend pas sous la barre du 10%. La valeur

moyenne de f_{ice} passe en moyenne de 0.01 à 0.34, ce qui représente un sol 34 fois plus conducteur au moment pic de glaciation du sol.



Figure 59. Estimation du minimum annuel moyen du facteur f_{ice} régissant la conductivité hydraulique de la première couche du sol durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Au chapitre 2, on avait noté que la différence de conductivité hydraulique hivernale entre les bassins Rimouski et Dumoine, dont les pics printaniers respectifs étaient presque entièrement définis par le ruissellement de surface et hypodermique, n'était qu'un facteur d'environ 3. On peut donc s'attendre à ce que le ruissellement de surface disparaisse presque entièrement. La Figure 60, qui montre le rapport entre le ruissellement de surface et le ruissellement total de chacun des bassins pour chacune des périodes, appuie cette hypothèse. Effectivement, en 2070-2099, le ruissellement de surface ne représente en moyenne que 9% du ruissellement total, contre 27% en 1980-2009. Pour les bassins du Bas St-Laurent (1-2-3-4), on passe même de plus de 30% à moins de 5%; on n'atteint 10% que pour les 6 bassins les plus au Nord, alors que 17 bassins étaient au-dessus de cette valeur en 1980-2009.



Figure 60. Fraction du ruissellement de surface par rapport au ruissellement total durant les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

8.4 DEVANCEMENT DU PIC PRINTANIER

Un dernier effet notable est celui du devancement du pic printanier en raison de la température plus élevée. Le moment du pic pour chacune des périodes étudiées est illustré dans la Figure 61. En 2070-2099, le pic arrive environ deux semaines plus tôt qu'en 1980-2009, en moyenne. Ce résultat peut être considéré bas en regardant le changement dans les profils de température des bassins individuels (voir l'Annexe III) puisqu'on passe au-dessus de la barre du 0°C plus rapidement par une trentaine de jours. En pratique, on voit qu'il y a effectivement une trentaine de jours de devancement au Grand Nord et au Sud-Ouest. Le mode de ruissellement définissant le pic printanier n'est pas énormément modifié par les changements climatiques dans ces bassins, tandis que les autres sont significativement portés vers le ruissellement hypodermique; compte tenu que le ruissellement hypodermique retarde le pic, ce passage compense en partie pour le devancement dû à la fonte plus rapide. Pour les bassins du Bas Saint-Laurent (1-2-3-4), le changement est seulement entre 3 et 10 jours.



Figure 61. Moment du pic printanier durant la période de 1980-2009 et changement subséquent en 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 tel qu'obtenu au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

Il faut d'ailleurs noter que les bassins autour du Lac Mistassini ont encore une fois de fortes variations dans le moment du pic printanier en raison des pics doubles engendrés par les deux modes de ruissellement.

8.5 SYNTHÈSE – BAS SAINT-LAURENT, OUTAOUAIS, GRAND NORD

Afin de synthétiser l'information de ce chapitre, on se penche en plus de profondeur sur le cas des trois régions décrites en davantage de détail au chapitre 2, soit le Bas St-Laurent, l'Outaouais et le Grand Nord.

8.5.1 OUTAOUAIS (BASSINS 7-8)

On explore d'abord la situation en Outaouais, qui est représenté dans la Figure 62 par le bassin 7 (Dumoine). On se rappelle que ce bassin était, en vertu de son sol sablonneux très conducteur, presque entièrement défini par le ruissellement hypodermique. En progressant vers 2070-2099, le ruissellement augmente de plus en plus durant les les jours 1-100 puisque les températures accrues remplacent une partie des précipitations solides par des précipitations liquides (en plus d'avoir une fonte des neiges plus hâtive). En revanche, le pic printanier devient de moins en moins élevé et recule progressivement d'une dizaine de jours. Le ruissellement durant la période chaude est plus similaire, quoique les précipitations estivales réduites semblent avoir une influence sur le ruissellement. Le ruissellement de surface, déjà minime, semble diminuer encore davantage.



Figure 62. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 7 (Dumoine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

8.5.2 GRAND NORD (BASSINS 17-19-20)

Le Grand Nord est représenté dans la Figure 63 par le bassin 20 (À la Baleine). On observe surtout un recul progressif du pic printanier d'une vingtaine de jours vu l'augmentation des températures et la fonte des neiges plus rapide qui en découle. En automne, le ruissellement s'estompe de plus en plus tard puisque le sol tarde à geler à nouveau. La fraction de ruissellement de surface diminue peu à peu durant la fonte, mais demeure majoritaire par rapport au ruissellement hypodermique puisque le gel du sol demeure significatif.



Figure 63. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 20 (À la Baleine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2.

8.5.3 BAS SAINT-LAURENT (BASSINS 1-2-3-4)

Le Bas St-Laurent est représenté dans la Figure 64 par le bassin 4 (Rimouski). Ces bassins très argileux ont la conductivité hydraulique la plus basse de la province et leur ruissellement était donc presque entièrement en surface durant la période hivernale. En progressant vers 2070-2099, c'est de moins en moins le cas : puisque la fraction gelée de la première couche du sol diminue, l'infiltration est de plus en plus possible durant l'hiver, ce qui réduit le ruissellement de surface. Le moment du pic printanier change à peine puisque le devancement de la fonte des neiges est compensé par la lenteur du ruissellement hypodermique par rapport au ruissellement de surface. On a donc un pic printanier moins fort mais plus étendu.



Figure 64. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 4 (Rimouski) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

8.6 COHÉRENCE DES DIFFÉRENTS MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE

Il est important de s'assurer que les conclusions tirées à partir des dernières sections s'appliquent à tous les modèles de circulation générale pilotant le MRCC5. Afin de démontrer la cohérence entre les quatre modèles, cette section illustrera la progression de la moyenne globale de variables ciblées sur l'étendue temporelle des simulations (après être passées dans une fenêtre mobile de trente ans).

La Figure 65 illustre d'abord le portrait météorologique et hydrique des quatre simulations. On constate que MRCC5-CanESM2 est de loin le plus chaud et le plus pluvieux des modèles; cela dit, la progression des quatre variables ciblées (la température, les précipitations, l'évaporation et le ruissellement) est à la hausse dans tous les cas. La hausse de température entre 1980-2009 et 2070-2099 reste entre 4.6°C (GFDL-ESM2M) et 6.6°C (MRCC5-CanESM2) et, ultimement, le bilan hydrique résulte en une augmentation du ruissellement de respectivement 0.23 mm/j, 0.25 mm/j, 0.41 mm/j et 0.27 mm/j pour MRCC5-CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR et GFDL-ESM2M sur cette même période.



Figure 65. Évolution des températures et du bilan hydrique des différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les vingt bassins.

À partir d'ici, on vérifie les trois effets des changements climatiques sur la dynamique saisonnière du ruissellement. La Figure 66 illustre d'abord entre le rapport du volume de ruissellement contenu durant le pic printanier et le volume de ruissellement total ainsi que la diminution de la quantité de neige à la surface.



Figure 66. Évolution du maximum annuel moyen d'accumulation de neige à la surface et de la proportion du ruissellement contenue durant le pic printanier pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les vingt bassins.

Si l'accumulation de neige à la surface décroît effectivement dans toutes les simulations, la conclusion tirée par rapport à la réduction du volume printanier est moins évidente, et on voit même un accroissement de l'importance du volume de ruissellement contenu dans le pic printanier pour deux des modèles entre 2060 et 2080 Durant les vingt dernières années, on a décroissance au niveau des quatre simulations – il est possible que MRCC5-CanESM2 n'ait qu'une longueur d'avance en vertu de sa température plus élevée même au départ de la simulation, mais la conclusion est encore plus difficile à établir lorsque l'on considère que le pic recule avec l'augmentation de température (voir la fin de cette section).

Par contraste, les effets de la diminution de la quantité de glace dans le sol sont sans équivoque. On constate dans la Figure 67 que toutes les simulations voient la fraction maximale de glace dans la première couche du sol ($\theta_{ice}/\theta_{sat}$) diminuer; en réponse, cela résulte dans les quatre cas en une diminution du rapport de ruissellement de surface au ruissellement total. L'effet est beaucoup plus extrême dans MRCC5-CanESM2 en raison de sa longueur d'avance en termes d'augmentation de la température, mais on voit tout de même une accélération dans le dégel moyen de la première couche des simulations CNRM-CM5 et MPI-ESM-LR.



Figure 67. Évolution du maximum annuel de fraction de glace dans la première couche du sol par rapport au niveau de saturation et de la fraction de surface du ruissellement total pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les vingt bassins

Finalement, la Figure 68 illustre le moment moyen du pic printanier moyenné sur les vingt bassins. On observe un devancement dans toutes les simulations. Vu les sauts ponctuels de 40 jours que l'on constate dans le moment du pic printanier de certains bassins en raison des deux pics liés aux deux modes de ruissellement, on se limite à l'analyse de l'effet qualitatif.



Figure 68. Évolution du moment du pic printanier pour les différents GCM entre 1980 et 2100. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans. Les variables sont soumises à une fenêtre mobile de trente ans et sont moyennées sur les vingt bassins.

Avec l'exception possible de la diminution de l'importance du pic printanier, on constate donc que les conclusions tirées dans ce chapitre sont cohérentes pour les quatre modèles de circulation générale. Si le modèle MRCC5-CanESM2 crée des résultats plus extrêmes, on peut tout de même s'attendre à ce que les autres simulations en reproduisent les effets quelques décennies plus tard, lorsque leurs températures auront rattrapé celles que MRCC5-CanESM2 atteint en 2100.

9. CONCLUSION

Ce rapport aura d'abord fait une comparaison du ruissellement produit par le Modèle régional canadien du climat, cinquième édition (MRCC5) avec les données observatoires du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Il en aura découlé qu'au niveau des moyennes annuelles, les différentes simulations faites avec le modèle reproduisent adéquatement les tendances géographiques de la province, mais avec un biais positif moyen entre +10% et +23% par rapport aux observations. Les profils spatiaux, en particulier en ce qui a trait aux bassins extrêmes, sont bien reproduits du point de vue quantitatif. Au niveau des moyennes de ruissellement des bassins individuels, on a une variabilité interne du modèle d'au plus 5% (et généralement sous 2%). Le biais global entre les simulations diminue de 6% lorsque l'on réduit la résolution de 0.11° à 0.22°, et d'un autre 4.5% lorsque l'on passe du domaine QC au domaine AMNO. Dans les deux cas, la différence est attribuable aux changements dans les précipitations.

Du point de vue de la variabilité interannuelle du ruissellement des bassins, les statistiques du MRCC5 reproduisent similairement celles des observations – on a un biais moyen d'environ +10% au niveau de l'écart-type des ruissellements annuels des bassins. Au-delà de la simple variabilité de ces ruissellements annuels, la corrélation entre leurs profils simulés et observés est généralement forte et atteint une moyenne de R=0.6 sur les vingt bassins pour la majorité des simulations. Celle-ci ne diminue significativement que dans les simulations faites sur le domaine AMNO, beaucoup plus grand – on a alors R=0.44.

Le chapitre 2 aura démontré qu'il n'y existe que très peu de coexistence entre le ruissellement de surface et le ruissellement hypodermique, et que, particulièrement, le mode de ruissellement préconisé au moment de la fonte des neiges dicte le comportement du pic printanier du ruissellement. Il a été déterminé que les bassins à sol sablonneux (donc à haute conductivité hydraulique) permettent généralement l'infiltration de l'eau dans le sol même au courant de l'hiver, ce qui mène à du ruissellement hypodermique dont la dynamique lente mène à un pic printanier retardé. En revanche, les sols plus argileux / moins sablonneux ont une conductivité réduite qui empêche l'infiltration et crée du ruissellement de surface dont la dynamique rapide mène à un pic printanier plus hâtif. Certains bassins intermédiaires voient même le mode de ruissellement changer au milieu de la fonte, ce qui crée deux pics séparés d'une quarantaine de jours.

En connaissance de ces particularités du modèle, on a finalement étudié l'effet des changements climatiques sur le comportement du ruissellement en utilisant les données du modèle climatique global MRCC5-CanESM2 comme pilote avec le scénario d'augmentation du niveau de CO₂ dans l'atmosphère RCP 8.5 (ces deux choix résultent en des changements extrêmes). Les précipitations sont accrues d'environ +0.8 mm/j en 2100 par rapport à 2010 au Nord de la province et d'environ 0.2 mm/j au Sud. Ce changement se traduit en une augmentation du ruissellement de 0.5 mm/j au Nord et 0.0 mm/j au Sud (~0.2 mm/j), et donc une augmentation du ruissellement de 0.5 mm/j au Nord et 0.0 mm/j au Sud (~0.2 mm/j en moyenne),

Deux effets majeurs des changements climatiques affectent la dynamique saisonnière du ruissellement. D'abord, la diminution de la quantité de neige mène à des pics printaniers moins significatifs – environ 43% du ruissellement est concentré durant le pic en 2010, contre 36% en 2100. Deuxièmement, la diminution du niveau de gel dans le sol fait en sorte que sa conductivité devient beaucoup plus élevée durant la période hivernale. L'infiltration de l'eau de fonte est donc possible dans une bien plus grande mesure, au point où le ruissellement de surface disparaît à peu près entièrement dans les bassins du Sud d'ici 2100.

Les prochaines pistes à entrevoir pour l'amélioration des résultats produits par le modèle sont au niveau fondamental : il semble surtout qu'il faudra étudier en davantage de profondeur le réalisme physique de la ségrégation presque parfaite du ruissellement de surface et du ruissellement hypodermique. Une fois ce problème bien compris, il est recommandable de se pencher sur la représentation de la variabilité spatiale du sol de manière plus complète; présentement, celle-ci est homogène de la surface jusqu'à la croûte terrestre, une caractérisation grossière qui a un fort impact sur le comportement du ruissellement hypodermique. Finalement, il sera nécessaire d'inclure un schéma de routage approprié à l'analyse complète afin d'établir de comparaisons plus justes entre les simulations et les observations, ou même afin de faire des prédictions par rapport aux niveau de ruissellement.



RÉFÉRENCES

[1] Laprise, R., Hernández-Díaz, L., Tete, K., Sushama, L., Šeparović, L., Martynov, A., ... & Valin, M. (2013). Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). Climate Dynamics, 41(11-12), 3219-3246.

[2] Šeparović, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., ... & Valin, M. (2013). Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. Climate Dynamics, 41(11-12), 3167-3201.

[3] Maryam Takhsha. (2017). Evaluation of CRCM5 simulations for the CROQ project (Climat reconstruit à Ouranos sur le Québec). Ouranos, Groupe Simulations et analyses climatiques. Rapport de stage, novembre 2017, 63 p.

[4] Centre d'expertise hydrique du Québec. Historique des niveaux et des débits de différentes stations hydrométriques. https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/default.asp

[5] Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the royal meteorological society, 137(656), 553-597.

[6] Climatic Research Unit (CRU) – UEA. Data. http://www.cru.uea.ac.uk/data

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

[8] Music, B., Frigon, A., Slivitzky, M., Musy, A., Caya, D., & Roy, R. (2009). Runoff modelling within the Canadian Regional Climate Model (CRCM): analysis over the Quebec/Labrador watersheds. IAHS publication, 333, 183.

[9] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40year reanalysis project. Bulletin of the American meteorological Society, 77(3), 437-472.

[10] Verseghy, D. L. (1991). CLASS—A Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model. International Journal of Climatology, 11(2), 111-133.

[11] Verseghy, D. L., McFarlane, N. A., & Lazare, M. (1993). CLASS—A Canadian land surface scheme for GCMs, II. Vegetation model and coupled runs. International Journal of Climatology, 13(4), 347-370.

[12] StructX. Hydraulic Conductivity Ranges of Various Soil Types. http://structx.com/Soil_Properties_007.html

[13] Ganji, A., Sushama, L., Verseghy, D., & Harvey, R. (2017). On improving cold region hydrological processes in the Canadian Land Surface Scheme. Theoretical and Applied Climatology, 127(1-2), 45-59.

[14] Niu, G. Y., & Yang, Z. L. (2006). Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. Journal of Hydrometeorology, 7(5), 937-952.

[15] Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.

[16] Mockus, V. (1964). Part 630 Hydrology – Chapter 16 Hydrographs. National Engineering Handbook.

[17] Vincent Fortin (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Institut de recherche d'Hydro-Québec. Rapport interne.

[18] de Elía, R., Caya, D., Côté, H., Frigon, A., Biner, S., Giguère, M., ... & Plummer, D. (2008). Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate. *Climate Dynamics*, *30*(2-3), 113-132.

[19] von Salzen, K., Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Li, J., Cole, J. N., Plummer, D., ... & Solheim, L. (2013). The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes. Atmosphere-Ocean, 51(1), 104-125.

[20] Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., ... & Brokopf, R. (2013). Atmospheric component of the MPI-M Earth system model: ECHAM6. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5(2), 146-172.

[21] Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., ... & Krasting, J. P. (2012). GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. Journal of Climate, 25(19), 6646-6665.

[22] Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., y Mélia, D. S., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., ... & Déqué, M. (2013). The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation. Climate Dynamics, 40(9-10), 2091-2121.

[23] Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., ... & Thomson, A. G. J. M. V. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic change, 109(1-2), 213.

Annexe I. COMPARAISON DU RUISSELLEMENT SIMULÉ PAR MRCC5 AVEC CELUI DE LA RÉANALYSE ERAINT75

En plus de reconstruire des variables climatiques plus communes telles que les précipitations et températures, la réanalyse ERAint75 calcule aussi beaucoup des variables moins directement mesurables ou accessibles qui ont été analysées dans le cadre des simulations. Elle reconstruit entre autres le ruissellement à la manière des simulations, c'est-à-dire sur la base des tuiles individuelles de sa grille, sans communication ou transfert entre elles, avec une composante de surface et une composante de drainage.

Cet annexe compare les ruissellements de cette réanalyse globale avec ceux de la simulation MRCC5 **bbr** sur la période de 1980-2014 question de voir si ces dernières dépeignent finalement un portrait plus juste du ruissellement au Québec en vertu d'une modélisation plus spécialisé et de son approche régionale.

Puisque ERAint75 est une réanalyse globale faite sur une grille de 480x241, sa résolution est faible et plusieurs des bassins (laissés en blanc sur les figures) ne contiennent pas une seule tuile. L'analyse se concentre donc sur tous les autres bassins.

I.1.RUISSELLEMENT MOYEN

Le ruissellement moyen des vingt bassins de la simulation **bbr** et de ERAint75 sont illustrés dans la Figure 69. Sur les bassins capturés par la réanalyse, le ruissellement global de ERAint75 (1.72 mm/j) est beaucoup plus près du ruissellement global des observations du CEHQ (1.63 mm/j) que celui de la simulation **bbr** (1.95 mm/j) l'est.

Cela dit, si l'on observe une surestimation assez constante d'un bassin à l'autre dans la simulation **bbr**, la réanalyse reproduit le portrait spatial avec une précision plus variable. Pour les bassins valides, l'écarttype des distributions de ruissellement moyen est de 0.27 mm/j pour **bbr** et les observations, mais de 0.38 mm/j pour la réanalyse, une surestimation significative de la variabilité inter-bassin. La corrélation entre les distributions simulées et observées est aussi beaucoup plus forte que celle entre les distributions observées et de réanalyse (R=0.83 contre R=0.61), ce qui indique que les spécificités régionales sont mieux reproduites dans la simulation MRCC5 en dépit de la surestimation globale accrue.

Du point de vue visuel, on note que les bassins en périphérie de la province ont généralement un ruissellement plus bas au niveau de la réanalyse; en contraste, les bassin 9-11-12, plus centraux, ont les surestimations les plus grandes par rapport au ruissellement moyen des observations.





Figure 69. Ruissellement moyen obtenu au travers de la simulation **bbr** et de la réanalyse ERAinterim75 pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014, et différence avec les observations du CEHQ

I.2. VARIABILITÉ INTERANNUELLE

Du point de vue de l'écart-type des distributions des ruissellements moyens annuels, la simulation **bbr** et la réanalyse ERAint75 correspondent à peu près également aux observations. Globalement, on observe respectivement un écart-type moyen de 0.28 mm/j, 0.27 mm/j et 0.24 mm/j, de sorte que la simulation et la réanalyse ont les deux une surestimation globale. Les écarts-type sont encore une fois mieux corrélés au niveau de la simulation qu'au niveau de la réanalyse vis-à-vis les observations (R=0.69 contre R=0.50). La Figure 70 ne semble toutefois pas illustrer de tendance géographique évidente.



Figure 70. Écarts-type des distributions de ruissellements moyens annuels obtenues au travers de la simulation **bbr** et de la réanalyse ERAinterim75 pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014, et différence avec les observations du CEHQ

La corrélation entre les profils interannuels de la simulation et de la réanalyse avec ceux des observations, qui est illustrée dans la Figure 71, est généralement plus élevée dans le cas de la simulation **bbr** (R=0.63 contre R=0.52). Cette tendance semble tenir sur l'ensemble de la province sauf pour les bassins 7 et 15 à l'extrême Ouest et le bassin 3 dans le Bas St-Laurent.



Figure 71. Corrélation des distributions de ruissellements moyens annuels obtenues au travers de la simulation **bbr** et de la réanalyse ERAinterim75 pour les vingt bassins durant la période de 1980-2014

I.3. DYNAMIQUE SAISONNIÈRE

On se penche finalement sur le comportement quotidien du ruissellement dans la réanalyse en comparaison avec celui de la simulation. Trois exemples de profils sont illustrés dans la Figure 72; on a choisi un bassin pour chacune des régions ciblées dans la synthèse de la Section 6.6, soit un bassin du Bas St-Laurent vu son sol argileux (3, Matane), un bassin de l'Outaouais (7, Dumoine) vu son sol sablonneux et un bassin du Grand Nord (20, À la Baleine) vu l'écorce terrestre saillante.

Dans les trois cas, les profils de la réanalyse comprennent des pics ponctuels qu'on associerait au ruissellement de surface dans le cas des simulations MRCC5. Ces pics arrivent en hiver et sont suivis par un pic plus étendu qu'on associerait au drainage, comme dans les simulations; cela dit, leur timing exact est sensiblement différent. Dans le cas de Matane, les pics sont plus faibles et moins fréquents; dans le cas de Dumoine, ils sont plus forts, beaucoup plus fréquents et arrivent plus tôt dans l'année; dans le cas d'À la Baleine, ils sont plus faibles, beaucoup moins fréquents et arrivent encore une fois plus tôt.

Sans routage, il est difficile de dire si la réanalyse offre un portrait plus juste que celui des simulations. Il est probable que la réanalyse utilise un modèle d'infiltration de l'eau dans le sol très différent de celui des simulations ou qu'elle utilise des paramètres géophysiques très différents pour décrire la composition du sol des bassins individuels. Une étude approfondie serait nécessaire afin de vérifier la cohérence des résultats avec les observations.



Figure 72. Profils de ruissellement obtenus au travers de la simulation bbr, de la réanalyse ERAint75 et des observations du CEHQ pour les bassins 3 (Matane, en 1998), 7 (Dumoine, en 1999) et 20 (À la Baleine, 1998)

I.4. RÉCAPITULATIF

La réanalyse ERAint75 produit des ruissellements moyens dont la valeur globale est plus rapprochée de celle des observations comparativement à celle des simulations (surestimation globale de 0.09 mm/j ou +6% plutôt que 0.23 mm/j ou 20%), mais dont le portrait spatial est moins bien reproduit. Il en va de même pour la variabilité interannuelle. Sans qu'il y ait de tendance géographique claire dans la différence, les spécificités régionales sont mieux capturées dans MRCC5.

Au point de vue saisonnier, la réanalyse se comporte de manière qualitativement similaire aux simulations, mais le comportement change significativement sur les bassins individuels; par exemple, les bassins de l'Outaouais ne sont aussi dominés par le drainage que dans MRCC5 et les bassins du Bas-St-Laurent ne sont pas aussi dominés par le ruissellement de surface. Il en demanderait une étude approfondie pour déterminer lequel des jeux de données est le plus juste vis-à-vis les observations.

//// 85

Annexe II. PROFILS INTERANNUELS ET ANNUELS DU RUISSELLEMENT SUR LA PÉRIODE 1980-2014

Cet annexe comprend les profils de la moyenne annuelle du ruissellement et le profil annuel moyen du ruissellement pour chacun des bassins sur la période 1980-2014 tel que calculé au travers des observations du CEHQ de la simulation **bbr** et de la réanalyse ERAint75. À noter que ces deux derniers jeux de données ne sont pas routés, de sorte qu'une comparaison directe du profil annuel moyen avec les observations n'est pas possible.



Figure 73. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 1 (Matapédia) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 74. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 2 (Cascapédia) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75

1111/ 86



Figure 75. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 3 (Matane) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 76. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 4 (Rimouski) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 77. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 5 (Châteauguay) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 78. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 6 (Au Saumon) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 79. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 7 (Dumoine) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 80. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 8 (Coulonge) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 81. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 9 (Batiscan) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 82. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 10 (Sainte-Anne) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75


Figure 83. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 11 (Ashuapmushuan) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 84. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 12 (Mistassini) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 85. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 13 (Moisie) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 86. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 14 (Romaine) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 87. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 15 (Harricana) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 88. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 16 (Broadback) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 89. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 17 (Grande Rivière de la Baleine) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 90. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 18 (Eastmain) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 91. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 19 (George) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75



Figure 92. Ruissellement annuel moyen et profil annuel moyen du ruissellement du bassin 18 (À la Baleine) sur la période 1980-2014 pour la simulation **bbr**, les observations du CEHQ et la réanalyse ERAint75

Annexe III. ÉVOLUTION DES PROFILS ANNUELS DES VARIABLES SIMULÉES SOUS MRCC5-CANESM2 RCP8.5

Cet annexe illustre l'évolution des profils annuels du bilan hydrique, des composantes du ruissellement, de variables hydrologiques choisies et de la température dans une simulation pilotée par MRCC5-CanESM2 avec le scénario CO₂ RCP 8.5 jusqu'en 2100. Les profils moyennés sur les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 sont illustrés pour ces variables (décrites dans le Tableau 1).



Figure 93. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 1 (Matapédia) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2

///// 96



Figure 94. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 2 (Cascapédia) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 95. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 3 (Matane) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 96. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 4 (Rimouski) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 97. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 5 (Châteauguay) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 98. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 4 (Au Saumon) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 99. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 7 (Dumoine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 100. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 8 (Coulonge) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 101. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 9 (Batiscan) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 102. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 10 (Sainte-Anne) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 103. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 11 (Ashuapmushuan) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 104. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 12 (Mistassini) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 105. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 13 (Moisie) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 106. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 14 (Romaine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 107. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 15 (Harricana) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 108. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 16 (Broadback) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 109. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 17 (Grande Rivière de la Baleine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 110. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 18 (Eastmain) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 111. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 19 (George) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2



Figure 112. Évolution des profils de ruissellement, du bilan hydrique, de variables d'hydrologie du sol ciblées et de température pour le bassin 20 (À la Baleine) entre les périodes de 1980-2009, de 2010-2039, de 2040-2069 et de 2070-2099 telle qu'obtenue au travers d'une simulation MRCC5 pilotée par le modèle MRCC5-CanESM2





550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19° ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 WWW.OURANOS.CA