



PRODUCTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES POUR LES PROJETS :
IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DÉBITS AU QUÉBEC (CQ2)
ET LA THÉMATIQUE ÉVOLUTION DU CLIMAT DU PROJET DE SOUTIEN À
INFO-CRUE

Rapport technique
Janvier 2020

PRODUCTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES POUR LES PROJETS : IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DÉBITS AU QUÉBEC (CQ2) ET LA THÉMATIQUE ÉVOLUTION DU CLIMAT DU PROJET DE SOUTIEN À INFO-CRUE

Rapport technique
Janvier 2020

ÉQUIPE DE RÉALISATION:

Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos Marco Braun, Ouranos

Titre du projet Ouranos: INFO-Crue: Amélioration du post-traitement des extrêmes

Numéro du projet Ouranos: 510035

Citation suggérée: Rondeau-Genesse, G. & Braun, M. (2020). Production des scénarios climatiques pour les projets: Impact des changements climatiques sur les débits au Québec (cQ2) et la thématique Évolution du climat du projet de Soutien à INFO-Crue. Rapport présenté par Ouranos. Montréal. 14 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.

TABLE DES MATIÈRES

1.1	Notions de base	1
2.1	Simulations disponibles	3
2.2	Méthodologie	6
2.2. pré	.1 Différences avec la méthodologie utilisée pour produire les scénarios fournis pou cédente de cQ2	•
2.2	.2 Domaine spatial, extraction des simulations et analyse des données brutes	8
2.2	.3 Observations interpolées sur grille et précipitations extrêmes	8
2.2	.4 Interpolation spatiale	10
2.2	.5 Post-traitement	11
2.3	Citation des scénarios climatiques fournis	13
Annexe	I. Analyse des données brutes	16
Annexe	II. Correction des précipitations extrêmes – Texte de la proposition de projet	23
Annexe	III. Correction des précipitations extrêmes – Grille observée	27
Annexe	IV. Interpolation spatiale	31
Annexe '	V. Analyse des données post-traitées	36

LISTE DES FIGURES

Figu	re 1.	Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios	
	d'émis	sions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses	
	indique	e le nombre de simulations climatiques utilisées (Knutti & Sedláček, 2012)	2
Figu	re 2.	Territoire extrait pour a) les simulations globales et b) les simulations régionales	8
Figu	re 3.	Distribution spatiale des trois paramètres GEV (Perreault et al., 2017)	.10
Figu	re 4.	Exemple typique de l'ajustement des précipitations extrêmes de la grille RNCan par la	
	métho	de <i>peaks over threshold</i> . Le point rouge correspond au 95 ^e centile des précipitations plus	
	grande	s que 1 mm.	. 10
Figu	re 5.	Pixels manquants dans la grille RNCan-Livneh	.16
Figu	re 6.	a) Précipitation annuelle moyenne de la période 1995-2008 selon la grille PSCv2 du	
	MELCC	, b) précipitation annuelle moyenne de l'année 2005 selon la grille RNCan et c) selon la	
	grille D	aymet de la NASA	. 17
Figu	re 7.	(a) Précipitation journalière de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon la grille RNCan	
	et (b)	série temporelle pour un des pixels situés dans la zone où la valeur aberrante a été	
	identif	iée	
_	re 8.	Pixel manquant dans ClimEx après post-traitement	
_	re 9.	Pixels d'eau dans les données de RegCM4-NAM44	
_	re 10.	Pixels manquants dans la grille de RegCM4-NAM22	.19
Figu	re 11.	Exemple de « lignes préférentielles » a) le 1 ^{er} janvier 2075 dans ClimEx kdb et b) dans	
	•	ipitation maximale de la simulation ClimEx kda entre 1971 et 2000.	.20
Figu	re 12.	Exemple de précipitations très intenses dans (a-b) ClimEx KDL en période future, (c-d)	
		KDL en période historique et (e-f) CanESM2-CanRCM4-NAM22 en climat futur	.21
Figu	re 13.	Schématisation des deux méthodes actuelles de post-traitement des données	
		ques. La méthode proposée cherche à retirer les étapes en rouge et à les remplacer par	2.0
		pes en vert	.26
Figu	re 14.	Précipitation maximale de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon a) la grille RNCan	20
-:	•	grille ajustée	.30
Figu	re 15.	Comparaison de l'impact des techniques d'interpolation spatiale sur les températures	22
F:~	•	aitées, pour un pas de temps donné.	.33
rigu	re 16.	Comparaison de l'impact des techniques d'interpolation spatiale sur les températures aitées, pour un pas de temps donné.	24
Eigu	•	Précipitation maximale de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon différentes	. 34
rigu	re 17.	ations spatiales : 0.11°, 0.22°, 0.44°, 0.75°, 1.25° x 1.875°, 1.125°, 2°, 2.8°, 3.44° x 3.75°	2 [
Eia	aggreg re 18.	Correction des biais dans les températures : évaluation sur la période historique 1971-	. ၁၁
rigu	2000	37	

Figure 19.	Correction des biais dans les précipitations : évaluation sur la période historique 1971-					
2000	40					
Figure 20.	Correction des biais dans les précipitations extrêmes : évaluation sur la période					
historiqu	e 1971-2000	.43				
Figure 21.	Précipitation maximale sur la période historique 1971-2000 pour une diversité de					
modèles	46					

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Simulations régionales disponibles pour le projet (En rouge : simulations qui n'ont pas	
été reter	nues, même si les données existent)	4
Tableau 2.	Simulations globales disponibles pour le projet (En rouge : simulations qui n'ont pas	
été reter	nues, même si les données existent)	5
Tableau 3.	Description de la méthodologie employée	7
Tableau 4.	Comparaison des précipitations extrêmes entre la grille RNCan, la grille RNCan ajustée	
et la dist	ribution de Pareto généralisée théorique	. 28
Tableau 5.	Comparaison des précipitations extrêmes (périodes de retour) entre la grille RNCan,	
la grille R	NCan ajustée et la distribution GEV théorique	. 29

1. CONTEXTE

La collaboration cQ2 vise à accroître les connaissances sur l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie (Q) au Québec. Cette collaboration regroupe les grands acteurs du domaine de l'eau de la province, avec pour objectif de favoriser la discussion sur les meilleures pratiques de modélisation hydrologique et de diffuser un message concerté à propos de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie du Québec. Les partenaires du projet sont : Ouranos, un consortium d'étude sur les changements climatiques, Hydro-Québec, le principal producteur d'hydroélectricité de la province, la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique (DEHA), une unité administrative du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) chargée de gérer le régime hydrique du Québec méridional, et Rio Tinto, un producteur d'aluminium qui possède des barrages hydroélectriques dans la région de Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les phases 1 et 2 du projet ont visé la mise en commun des expertises, l'implantation de plateformes de modélisation aptes à produire des scénarios hydroclimatiques et l'homogénéisation des données climatiques. La phase 3, amorcée en 2016, vise à explorer les horizons rapprochés et distants, tels 2030 et 2080, à raffiner les données historiques de référence, notamment dans le nord du Québec, et à améliorer la modélisation de l'impact des changements climatiques sur les extrêmes hydrologiques tels que les crues et les étiages sévères.

Des nouveaux scénarios climatiques pour les températures minimales et maximales et pour les précipitations ont été produits en mars 2019 sur l'ensemble du Québec. Ces scénarios appuieront entre autre les travaux de la DEHA dans le projet INFO-Crue et dans l'élaboration de l'édition 2020 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2013, 2015; DEH, 2018a, 2018b). Dans le cadre de la collaboration cQ2, ces scénarios seront également fournis à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) et à Rio Tinto, ainsi qu'à tout autre projet qui voudrait avoir accès à ces données.

Ce document décrit la méthode de correction des biais appliquée pour produire les scénarios climatiques, illustre le processus de validation et indique certains commentaires concernant les scénarios climatiques fournis.

1.1 NOTIONS DE BASE

Un excellent document de vulgarisation sur la science du climat et sur la production de scénarios climatiques est le Guide sur les scénarios climatiques (2017), disponible à l'adresse suivante : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/GuideScenarios2017_FR.pdf. La section actuelle introduit certains concept-clés, mais il est fortement recommandé d'aller consulter le guide.

En travaillant avec les données sortant des modèles climatiques, trois types d'incertitudes doivent être pris en compte pour estimer l'impact des changements climatiques, soient l'évolution dans le temps des émissions de gaz à effet de serre (GES), la nature chaotique des phénomènes atmosphériques et les

erreurs structurales des modèles eux-mêmes, dues à des limitations d'échelle et/ou à des imperfections dans les algorithmes représentant les interactions entre l'atmosphère, l'eau (océans et eau douce), la cryosphère (neige et glace), les sols et la biosphère. Ces erreurs structurales se traduisent entre autre par une sensibilité différente des modèles climatiques face à une même quantité d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

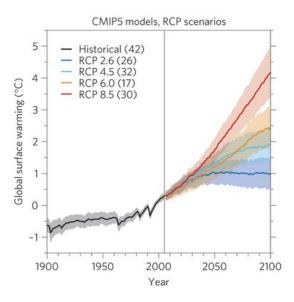


Figure 1. Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses indique le nombre de simulations climatiques utilisées (Knutti & Sedláček, 2012).

Afin d'explorer l'impact du premier type d'incertitude, des scénarios standards d'émissions futures de GES ont été développés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans le 5^e Rapport d'évaluation du GIEC (AR5), ces scénarios sont appelés « *Representative Concentration Pathways* » (RCP) et représentent le forçage radiatif futur découlant de diverses hypothèses socio-économiques et politiques plausibles. Ils sont illustrés à la Figure 1 par les lignes de différentes couleurs. Ces scénarios vont d'une réduction drastique et rapide des émissions de GES (RCP2.6) à une progression constante des émissions tout au long du siècle (RCP8.5). La Figure 1 représente l'évolution probable des températures selon ces différents RCP.

Afin de prendre en compte l'incertitude des hypothèses concernant les émissions de GES futures et leur impact sur le climat, il est recommandé d'utiliser plusieurs RCPs. Les plus communément utilisés sont les RCP4.5 et 8.5, qui correspondent respectivement à une baisse des émissions mondiales de GES à partir de 2040 (scénario « modéré ») et à une progression constante des émissions tout au long du siècle (scénario « maintien du statu quo »).

Les autres types d'incertitude, soient la variabilité naturelle du climat et les erreurs structurales des modèles, sont traités de plusieurs manières. Premièrement, il est recommandé de toujours utiliser plus

qu'un seul modèle climatique. Cela permet non seulement de compenser les erreurs et imperfections des modèles en créant un ensemble plus robuste, mais cela prend également mieux en compte la variabilité naturelle du climat qui existe dans chaque simulation. Le réchauffement illustré à la Figure 1, par exemple, est le résultat d'une trentaine de simulations (zones ombragées). Finalement, toujours dans le but de limiter l'influence de la variabilité naturelle du climat sur les résultats, il est recommandé de calculer les statistiques et les probabilités sur des périodes assez longues, soit minimalement 20 à 30 ans.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 SIMULATIONS DISPONIBLES

L'ensemble des simulations globales et régionales disponibles pour le Québec en date du 1^{er} février 2019 ont été extraites. Les simulations globales proviennent du *Fifth Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5; Taylor et al. (2011)). Seuls les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) 4.5 et 8.5 ont été retenus, puisqu'ils sont utilisés pour la grande majorité des simulations disponibles. Les simulations produites avec les RCP2.6 et 6.0 ont donc été écartées, pour l'instant. Les simulations régionales, quant à elles, proviennent du domaine nord-américain du *COordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX-NA; Mearns et al., (2017)). Des simulations du CRCM5 réalisées à Ouranos ont également été traitées. Celles-ci ne se retrouvent pas toutes dans l'ensemble CORDEX-NA, mais sont considérées comme si cela était le cas. Finalement, les cinquante membres du grand ensemble ClimEx ont été fournis (Leduc et al., 2019, www.climex-project.org). L'ensemble ClimEx a été créé en pilotant le modèle régional CRCM5 avec les 50 membres du grand ensemble CanESM2 (Sigmond & Fyfe, 2016). Les Tableaux 1 et 2 présentent la liste de modèles et le nombre de simulations disponibles.

Tableau 1. Simulations régionales disponibles pour le projet (En rouge : simulations qui n'ont pas été retenues, même si les données existent)

Centre de modélisation	Modèle régional	Pilote	Nombre de membres		Résolution de la grille atmosphérique (degrés)	
			RCP4.5	RCP8.5	Latitude & Longitude	
		CanESM2	1	1	0.44	
Université du Québec à Montréal (UQÀM)	CRCM5	MPI-ESM-LR	1		0.44	
		MPI-ESM-MR	1	1	0.44	
		CanESM2		50	0.11	
		Callesiviz	1	5	0.22	
Ouranos	CRCM5	MPI-ESM-LR	1	1	0.22	
		CNRM-CM5	1	1	0.22	
		GFDL-ESM2M	1	1	0.22	
Swedish Meteorological and Hydrological	DCA4	CanESM2	1	1	0.44	
Institute (SMHI)	RCA4	EC-EARTH	1	1	0.44	
	RegCM4	HadGEM2-ES		1	0.22	
				1	0.44	
Iowa State University (ISU) National Center for Atmospheric Research		MPI-ESM-LR		1	0.22	
(NCAR)				1	0.44	
		GFDL-ESM2M		1	0.22	
				1	0.44	
		HadGEM2-ES		1	0.22	
		HaugeW2-E3		1	0.44	
University of Arizona (UoA)		MPI-ESM-LR		1	0.22	
National Center for Atmospheric Research (NCAR)		IVIF I-LSIVI-LIX		1	0.44	
		GFDL-ESM2M		1	0.22	
				1	0.44	
Canadian Centre for Climate Modelling and	CanRCM4	CanESM2	1	1	0.22	
Analysis (CCCma)		CallESIVIZ	1	1	0.44	
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	EC-EARTH	1	1	0.44	
		12	19 <mark>(27)</mark> + 50			

Tableau 2. Simulations globales disponibles pour le projet (En rouge : simulations qui n'ont pas été retenues, même si les données existent)

Centre de modélisation	Modèle	Nombre de membres RCP2.6 RCP4.5 RCP6.0 RCP8.5			Résolution de la grille atmosphérique (degrés) Latitude Longitude		
Commonwealth Scientific and Industrial Research	ACCESS1.0	-	1	-	1	1.25	1.875
Organisation / Bureau of Meteorology (CSIRO- BOM)	ACCESS1.3	-	1	-	1	1.25	1.875
Beijing Climate Center, China Meteorological	bcc-csm1.1	1	1	1	1	2.7906	2.8125
Administration (BCC)	bcc-csm1.1(m)	1	1	1	1	2.7906	2.8125
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	1	1	-	1	2.7906	2.8125
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	5	5	-	5	2.7906	2.8125
	CMCC-CESM	-	-	-	1	3.4431	3.75
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CM	-	1	-	1	0.7484	0.75
climatic (civice)	CMCC-CMS	-	1	-	1	3.7111	3.75
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	-	1	-	1	1.4008	1.40625
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3.6.0	-	10	-	10	1.8653	1.875
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Tsinghua University (LASG- CESS)	FGOALS-g2	-	1	-	1	2.7906	2.8125
	GFDL-CM3	-	3	-	1	2	2.5
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	GFDL-ESM2G	-	1	-	1	2.0225	2
GFDL)	GFDL-ESM2M	-	1	-	1	2.0225	2
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA	GISS-E2-H	-	1	-	-	2	2.5
GISS)	GISS-E2-R	-	2	-	-	2	2.5
Institute for Numerical Mathematics (INM)	inm-cm4	-	1	-	1	1.5	2
	IPSL-CM5A-LR	-	4	-	4	1.8947	3.75
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-MR	_	1	-	1	1.2676	2.5
	IPSL-CM5B-LR	-	1	-	1	1.8947	3.75
Atmosphere and Ocean Research Institute (The	MIROC-ESM	1	1	1	1	2.7906	2.8125
University of Tokyo) / National Institute for	MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	2.7906	2.8125
Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC5	3	3	3	3	1.4008	1.40625
	MPI-ESM-LR	-	3	-	3	1.8653	1.875
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-MR	_	3	-	1	1.8653	1.875
	MRI-CGCM3	1	1	1	1	1.12148	1.125
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-ESM1	-	-	-	1	1.12148	1.125
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	1	1	1	1	1.8947	2.5
	Total	0 (15)	52	0 (9)	47		

Dans le Tableau 1, certaines simulations ont été indiquées en rouge. Il s'agit de simulations qui n'ont pas été retenues, même si les données existent. Dans le cas du modèle RegCM4 piloté par HadGEM2-ES, la raison du retrait est l'utilisation d'un calendrier de 360 jours (12 x 30 jours) qui n'est pas compatible avec HYDROTEL et la plupart des modèles hydrologiques. Des ajustements substantiels devraient être apportés à cette simulation avant son inclusion dans l'ensemble, soit l'ajout de tous les 31 du mois, ainsi que le retrait des 29 et 30 février. Or, aucun standard n'existe pour la correction de ce type de calendrier et, compte tenu du nombre relativement élevé de jours à modifier (9 jours/année), il y a un risque raisonnable de modifier les statistiques de la simulation. Dans le cas du modèle régional WRF, toutes les simulations disponibles ont été retirées. En raison d'erreurs lors de l'enregistrement des sorties du modèle, les variables tasmin et tasmax ont plusieurs jours où toutes les tuiles sont égales à 0°K. Ces jours pourraient être indiqués comme manquants où remplis par interpolation des jours précédents et suivants, mais pour l'instant il a été décidé d'attendre et de voir si de nouvelles simulations seront réalisées. La liste complète des jours manquants dans WRF est disponible à l'adresse suivante : https://nacordex.org/missing-data.

2.2 MÉTHODOLOGIE

2.2.1 DIFFÉRENCES AVEC LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR PRODUIRE LES SCÉNARIOS FOURNIS POUR LA PHASE PRÉCÉDENTE DE CQ2

Il existe quelques différences entre la méthodologie employée pour produire les scénarios actuels et la méthodologie qui avait été employée lors de la phase précédente de cQ2. Une description sommaire des différences entre les deux ensembles est fournie au Tableau 3, tandis que les détails sont fournis plus loin dans ce rapport.

Tableau 3. Description de la méthodologie employée

Caractéristique	Scénarios précédents	Scénarios actuels	Y a-t-il une différence ?				
Observations et simulations							
	Grille RNCan	Grille RNCan					
Observations		(Températures)	Non (Températures)				
Obscivations	drine mycan	Grille RNCan modifiée	Oui (Précipitations)				
		(Précipitations)					
		CMIP5 (99)					
Simulations	CMIP5 (98)	NA-CORDEX (31)	Oui				
		ClimEx (50)					
Domaine spatial	Québec hydrologique	Québec hydrologique +	Oui				
Domaine Spatial	Quebec flyarologique	Labrador (régionaux)	Out				
Résolution temporelle	Journalier	Journalier	Non				
	1971-1994, 1997-2002	1971-1994, 1997-2002					
Années de référence	(OBS)	(OBS)	Non				
	1971-2000 (SIM)	1971-2000 (SIM)					
Années futures	1955-2100 en continu	1955-2100 en continu	Non				
	Post-tr	aitement					
	Observations agrégées à	Observations agrégées à					
Interpolation spatiale	l'échelle des simulations	l'échelle des simulations	Non				
	(moyenne des OBS)	(moyenne des OBS)					
	Polynôme de 3 ^e degré	D. I 2					
Retrait de la tendance	appliqué sur l'ensemble	Polynôme de 3 ^e degré	Oui				
	des données	appliqué mensuellement					
		Correction des biais par					
		quantiles (Températures					
Méthode de post-	Correction des biais par	et précipitations) +	Non (Températures)				
traitement	quantiles	Correction paramétrique	Oui (Précipitations)				
		des valeurs extrêmes					
		(Précipitations)					
		Plusieurs fonctions de					
Post-traitement multi-	Une seule fonction de	transfert (v1.0)	Oui (v1.0) – sauf ClimEx				
membres	transfert	Une seule fonction de	Non (v1.1)				
		transfert (v1.1)					

2.2.2 DOMAINE SPATIAL, EXTRACTION DES SIMULATIONS ET ANALYSE DES DONNÉES BRUTES

Les données ont été produites pour l'ensemble du « Québec hydrologique », ce qui signifie que les bassins versants qui s'étendent en Ontario ou aux États-Unis ont été inclus dans leur totalité. Toutefois, ce « Québec hydrologique » n'inclut pas les Grands-Lacs, malgré leur rôle dans les débits du fleuve Saint-Laurent. Pour les modèles régionaux, le territoire couvert par le Labrador a également été extrait dans sa totalité. Une zone tampon a été inclue autour du domaine. La Figure 2 illustre le territoire extrait.

Afin d'alléger le texte, des détails sur l'extraction, ainsi que certains avertissements quant aux données brutes, sont fournis à l'Annexe I.

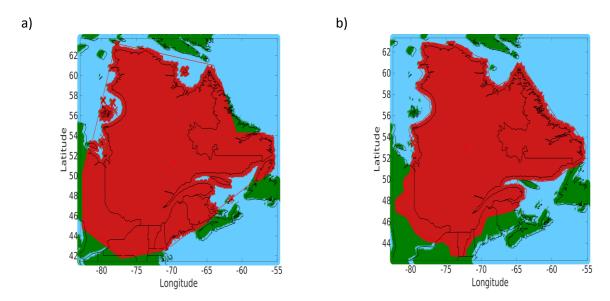


Figure 2. Territoire extrait pour a) les simulations globales et b) les simulations régionales.

2.2.3 OBSERVATIONS INTERPOLÉES SUR GRILLE ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

Des données de référence sont nécessaires afin de corriger le biais des simulations climatiques. Comme l'ajout de simulations régionales risquait de modifier sensiblement les conclusions quant à l'impact des changements climatiques sur les débits au Québec, par rapport aux phases précédentes de la collaboration cQ2, il a été décidé de ne pas changer le jeu de données de référence malgré ses problèmes connus au nord de 50° de latitude. Le jeu de données de référence correspond donc aux données observées interpolées sur une grille de 10x10 km, produit par Ressources naturelles Canada (NRCan Canada Daily; Hutchinson et al., 2009; McKenney et al., 2011), ci-après nommée « grille RNCan ». Pour la section américaine du domaine, le jeu de données produit par Livneh et al. (2013) a été utilisé.

Une limitation des données interpolées sur grille par « *thin-plate smoothing splines* », comme c'est le cas pour la grille RNCan, est qu'elles écrasent les précipitations extrêmes qui sont enregistrées aux stations météorologiques. Ces jeux de données doivent donc être utilisés avec prudence pour les applications qui

s'intéressent aux précipitations maximales (Hutchinson et al., 2009). Cela n'était pas un enjeu lors de la phase précédente de cQ2, en raison notamment de la résolution spatiale grossière des données CMIP5. Or, cette limitation complique le post-traitement des précipitations de CORDEX-NA et de ClimEx. En effet, la grille RNCan affiche rarement une précipitation de plus de 60 mm, alors que plusieurs tuiles de simulations issues de CORDEX et de ClimEx ont des précipitations maximales de l'ordre de 100 mm. La solution pour cet enjeu a été de « corriger » la queue de distribution des précipitations de la grille RNCan. Afin d'alléger le texte, les détails sur la méthodologie sont fournis aux Annexes II et III. Les principales étapes réalisées sont les suivantes :

- Calcul d'une loi d'extremum généralisée (Generalized Extreme Value distribution, GEV) à toutes les stations d'Environnement Canada situées au Québec, en Ontario et dans les provinces Maritimes. Ce travail a été réalisé par Perreault, Jalbert & Guay (2017) préalablement au projet. Les stations appartenant à Rio Tinto ont été exclues (voir Annexe I).
- 2. Interpolation des paramètres de forme (ξ), d'échelle (σ) et de localisation (μ) calculés aux stations vers une grille à 0.11°. Ce travail a également été accompli par Perreault, Jalbert, & Guay, (2017) et par Jalbert, Perreault, & Genest (2019). L'interpolation des paramètres de la GEV (Figure 3), plutôt que les précipitations elles-mêmes, permet de facilement calculer des récurrences de précipitations extrêmes en tout point de la grille. L'interpolation utilise deux simulations du CRCM5, un modèle physique, comme variable explicative (Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec (CROQ), https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/FicheBiner 2016 FR.pdf).
- 3. Transformation des paramètres de la GEV vers les paramètres de la méthode de dépassement de seuil (*Peaks Over Threshold*, POT). La méthode POT a l'avantage de prendre en compte toutes les précipitations dépassant un certain seuil, alors qu'une GEV ne considère qu'un seul extrême à chaque année. Comme le but est de corriger la queue de distribution des précipitations de la grille RNCan, la méthode POT est donc préférable. À chaque point de grille, la POT intègre directement deux des trois paramètres de la GEV, soient la forme et la localisation. Le paramètre d'échelle de la POT, quant à lui, peut être calculé à partir du paramètre d'échelle de la GEV et d'un certain seuil de précipitation. Dans le cadre du projet, le seuil utilisé a été le 95° percentile des précipitations RNCan plus grandes que 1 mm.
- **4. Ajustement de la queue de distribution des précipitations RNCan.** Pour un point de grille donné, toutes les données dépassant le seuil du 95^e percentile de précipitation sont remplacées par une valeur théorique provenant des paramètres POT du point de grille (Figure 4).

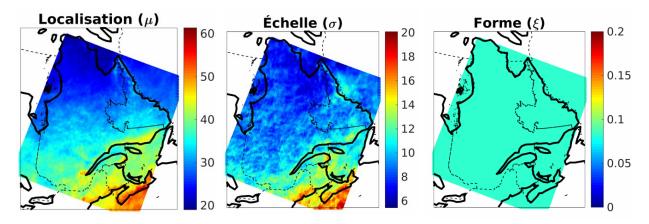


Figure 3. Distribution spatiale des trois paramètres GEV (Perreault et al., 2017)

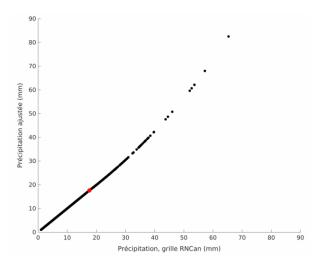


Figure 4. Exemple typique de l'ajustement des précipitations extrêmes de la grille RNCan par la méthode *peaks* over threshold. Le point rouge correspond au 95^e centile des précipitations plus grandes que 1 mm.

2.2.4 INTERPOLATION SPATIALE

Tel qu'il l'a été fait dans les phases précédentes du jeu de données de cQ2, ce sont les observations qui sont agrégées à l'échelle des simulations, plutôt que le contraire (méthode A2S – observations averaged to the simulation grid). Selon l'application qui est faite des données, il peut être préférable d'effectuer une mise à l'échelle supplémentaire des données cQ2, par exemple pour éviter qu'une seule tuile CMIP5 couvre l'ensemble du domaine.

Une discussion sur ce choix méthodologique se trouve à l'Annexe IV.

2.2.5 POST-TRAITEMENT

2.2.5.1 Retrait de la tendance

Afin de calculer des propriétés statistiques robustes lors du processus de post-traitement, il est nécessaire de temporairement retirer la tendance des données climatiques. Dans la version précédente du jeu de données, la tendance était calculée sur toute la période (1950-2100) à l'aide d'un polynôme de 3^e degré. Or, cette méthodologie ne prend pas en compte les différences saisonnières qui pourraient exister dans les tendances. La solution à ce problème est de calculer la tendance à chaque itération de la fenêtre mobile (Section 2.2.5.2). Des essais préliminaires ont toutefois permis de conclure que cette meilleure prise en compte des tendances représentait un coût substantiel au temps de calcul requis pour le post-traitement. Pour cette raison, la tendance est plutôt calculée mensuellement. Ce compromis offre une prise en compte des tendances qui est pratiquement identique à la fenêtre mobile, mais sans ajouter de temps de calcul.

Avertissement: La tendance pour les précipitations, sur 150 ans, est de l'ordre de quelques millimètres. Or, le retrait de cette tendance pose problème pour les petites valeurs, puisque les journées de faible précipitation au début de la série voient leurs valeurs pratiquement doubler (1.5 mm devient 2.5 mm, par exemple), tandis que les journées de faible précipitation à la fin de la série risquent de devenir négatives (0.5 mm devient -1.1 mm, par exemple). Lorsque le post-traitement est terminé et que la tendance doit être réintroduite dans la série de données, le problème contraire survient. Pour cette raison, toutes les précipitations plus faibles que la « valeur la plus négative lorsque l'on retire la tendance » sont rétablies à leur valeur précédente. Par exemple si, après le retrait de la tendance, la valeur la plus négative de la série est de -3.2 mm, alors toutes les valeurs de moins de 3.2 mm seront rétablies à leur valeur d'origine.

2.2.5.2 Fenêtre mobile

Il n'y a aucun changement dans la fenêtre mobile par rapport à la phase précédente de cQ2. Chaque jour de l'année est post-traité indépendamment et la fonction de transfert est bâtie à partir d'une fenêtre de +/- 15 jours autour de la date d'intérêt. Par exemple, pour post-traiter le 16 janvier, la fonction de transfert sera bâtie à partir de toutes les valeurs entre le 1^{er} janvier et le 31 janvier.

2.2.5.3 Post-traitement

Outre le retrait mensuel de la tendance décrit à la Section 2.2.5.1, il n'y a aucun changement dans la méthode de post traitement des températures par rapport à la phase précédente de cQ2. Il s'agit d'un post-traitement par quantiles (Gennaretti, Sangelantoni, & Grenier, 2015; Mpelasoka & Chiew, 2009) où 50 classes sont utilisées pour construire la fonction de transfert (additive). Lorsque plusieurs réalisations existent pour un même modèle, toutes les simulations sont combinées et une seule fonction de transfert est calculée. Cela est réalisé afin de maintenir la variabilité naturelle des simulations multi-membres, tout en corrigeant le biais associé au modèle (Chen et al., 2019).

Les années 1971-2000 sont utilisées comme période de référence pour les simulations, tandis que les années 1971-1994 et 1997-2002 sont utilisées pour les observations, en raison des problèmes discutés à l'Annexe I. Les données corrigées sont produites sur toute la période disponible, soit 1955-2100.

Pour les précipitations, un premier post-traitement est effectué en utilisant la même méthodologie qu'avec les températures, mais avec une fonction de transfert multiplicative plutôt qu'additive. Une nouveauté, par rapport à la phase précédente de cQ2, est qu'un post-traitement paramétrique supplémentaire est appliqué aux précipitations les plus élevées. Une publication sur la méthodologie employée est en cours d'écriture. Entre temps, voici les principales étapes :

- Post-traitement par quantiles de l'ensemble de la série 1955-2100. Cette étape correspond à ce qui était fait précédemment, mais utilise comme référence les précipitations de la grille RNCan corrigée décrite à la Section 2.2.3.
- 2. Établissement d'une fenêtre mobile. Des travaux sont en cours afin d'instaurer une temporalité dans les paramètres de la GEV, ce qui pourrait permettre à la méthode de correction paramétrique des extrêmes (étape 3) de prendre en compte explicitement l'évolution future de la fréquence et de l'intensité des précipitations en raison des changements climatiques. Toutefois, comme ces travaux ne sont pas encore complétés, la solution a plutôt été de répéter l'étape 3 en utilisant une fenêtre mobile de 40 ans plutôt que toute la série 1955-2100.

3. Correction paramétrique des extrêmes.

- a. Les paramètres de la distribution de Pareto généralisée (ξ, σ, seuil) sont calculés pour les données observées (OBS), pour les données brutes simulées en période de référence (REF) et pour les données brutes simulées dans la fenêtre mobile (FUT). Le seuil de précipitation nécessaire à cette distribution est une moyenne des 95^e percentiles de OBS et REF, où toutes les précipitations de moins de 1 mm sont exclues.
- b. Pour les séries OBS, REF et FUT, à partir de leurs paramètres respectifs calculés à l'étape précédente, trois fonctions de distribution cumulative sont calculées : P(x)_{OBS}, P(x)_{REF et} P(x)_{FUT}. Les 80 valeurs les plus élevées de FUT, ainsi que leur probabilité P(x)_{FUT}, sont identifiées.
- c. Le biais de la simulation est calculé en comparant les précipitations extrêmes de la période de référence avec des précipitations extrêmes théoriques provenant d'une distribution de Pareto généralisée inverse générée à partir des probabilités $P(x)_{REF}$, mais des paramètres observés K_{OBS} et σ_{OBS} . Le résultat est une fonction de transfert non pas associée aux valeurs ou aux quantiles, mais à la probabilité P(x).
- d. Afin de limiter tout décrochage de la fonction de transfert, les facteurs de correction sont limités par le domaine commun entre $P(x)_{OBS}$ et $P(x)_{REF}$. Toute valeur située en-dehors de ce domaine commun est corrigée par le dernier facteur de correction.
- e. La fonction de transfert « biais vs. P(x) » est utilisée afin de corriger les 80 valeurs extrêmes de la série FUT en fonction de leur récurrence $P(x)_{FUT}$. Ici aussi, la fonction de transfert est limitée au domaine commun afin d'éviter tout décrochage.

4. Transition entre la correction par quantiles et la correction paramétrique. Afin d'éviter un saut entre les données corrigées par quantiles et la correction paramétrique des extrêmes, une fonction de transition est nécessaire. Plusieurs alternatives ont été explorées. La solution la plus intéressante est une transition linéaire qui fait varier le poids entre les deux méthodes sur le premier quart de l'étendue corrigée. Par exemple, si les extrêmes corrigés varient de 32 à 150 mm, la transition sera appliquée avec un poids linéaire entre 32 et 62 mm.

Davantage de détails sur cette méthodologie sont fournis aux Annexes II, III et V. Une analyse des données post-traitées est également disponible à l'Annexe V.

2.3 CITATION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES FOURNIS

Pour tout rapport, article scientifique et présentation où les scénarios climatiques seront utilisés, Ouranos devra être cité et remercié pour la production des scénarios climatiques. Les centres climatiques ayant fourni des données devront également être remerciés et cités selon les instructions suivantes :

- Pour CMIP5, les indications se trouvent sur les sites web suivants : https://cmip.llnl.gov/cmip5/cmip5 references.html
- Pour les modèles CORDEX-NA, les indications se trouvent sur les sites web suivants: https://na-cordex.org/terms-use et https://na-cordex.org/dataset-citation
- Pour le CRCM5-Ouranos, suivre les conditions d'utilisation qui auront été fournies avec les données et ce rapport.

3. RÉFÉRENCES

- CEHQ. (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec.
- CEHQ. (2015). Atlas hydroclimatique du Québec méridional Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec.
- Chen, J., Brissette, F. P., Zhang, X. J., Chen, H., Guo, S., & Zhao, Y. (2019). Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology. *Climatic Change*, 153(3), 361-377. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02393-x
- DEH. (2018a). Atlas hydroclimatique du Québec méridional, Édition 2018. *Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec*. Repéré à https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/CruesPrintanieres/Q1max2P.htm

- DEH. (2018b). Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Québec : Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., & Grenier, P. (2015). Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. https://doi.org/10.1002/2015JD023890
- Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., & Papadopol, P. (2009). Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. https://doi.org/10.1175/2008JAMC1979.1
- Jalbert, J., Perreault, L., & Genest, C. (2019). Interpolation of precipitation extremes for the construction of intensity-duration-frequency curves across a large domain from sparse observations. *submitted*.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*. https://doi.org/10.1038/nclimate1716
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.-L., Ludwig, R., Brietzke, G. B., ... Scinocca, J. (2019). ClimEx project: a 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 663-693. https://doi.org/10.1175/jamc-d-18-0021.1
- Livneh, B., Rosenberg, E. a., Lin, C., Nijssen, B., Mishra, V., Andreadis, K. M., ... Lettenmaier, D. P. (2013). A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States: Update and extensions. *Journal of Climate*, *26*(23), 9384-9392. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00508.1
- Maurer, E. P., Ficklin, D. L., & Wang, W. (2016). Technical Note: The impact of spatial scale in bias correction of climate model output for hydrologic impact studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 685-696. https://doi.org/10.5194/hess-20-685-2016
- McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Campbell, K. B., ... Owen, T. W. (2011). Customized Spatial Climate Models for North America. *Bulletin of American Meteorological Society-BAMS*, 1612-1622.
- Mearns, L., McGinnis, S., Korytina, D., Arritt, R. W., Biner, S., Bukovsky, M. S., ... Gutowski, W. J. (2017). The NA-CORDEX dataset, version 1.0. *NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO*.
- Mpelasoka, F. S., & Chiew, F. H. S. (2009). Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. *Journal of Hydrometeorology*. https://doi.org/10.1175/2009JHM1045.1
- Perreault, L., Jalbert, J., & Guay, F. (2017). Estimation des précipitations extrêmes aux postes de transformation exploités par Hydro-Québec. Dans *Symposium Ouranos 2017*.
- Sigmond, M., & Fyfe, J. C. (2016). Tropical Pacific impacts on cooling North American winters. *Nature Climate Change*. https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3069
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2011). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Wessel, P., & Smith, W. H. F. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 101(B4), 8741-8743.

ANNEXE I. ANALYSE DES DONNÉES BRUTES

1. Données observées

1.1 Comme des jeux de données différents ont été utilisés pour les territoires canadiens et américains, il existe un effet de frontière qui peut parfois être très apparent dans les données journalières observées. Cet effet demeure visible, mais de manière beaucoup plus estompée, dans les données ClimEx post-traitées. Il n'est pas apparent pas dans les données CORDEX-NA ou CMIP5, en raison de leur résolution spatiale plus grossière.

1.2 À la frontière, il existe quelques pixels où les données sont manquantes

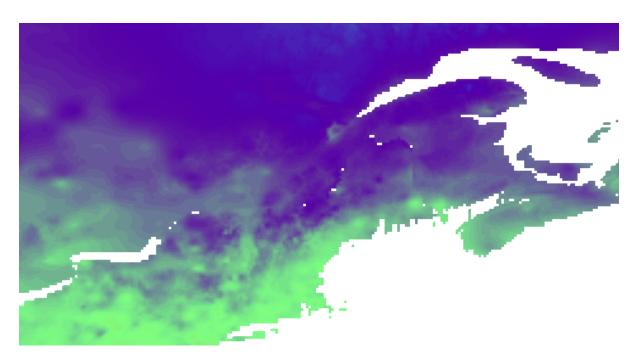


Figure 5. Pixels manquants dans la grille RNCan-Livneh.

1.3 Les années 1995 et 1996 ont été exclues des données observées en raison de précipitations erronées dans la région entre le lac Saint-Jean et le complexe de la Manicouagan (Figure 6). Récemment, une investigation a permis de confirmer que les artéfacts visibles dans la Figure 6 sont dus à une mauvaise interprétation des données brutes des pluviomètres à pesée Belfort 6071 P déployés par Rio Tinto entre 1985 et 2009 et fournies au MELCC et à Environnement Canada dans les environs de l'année 2013. Comme ces données erronées se retrouvent maintenant dans le jeu de données officielles d'Environnement et Changement climatique Canada, il n'existe pas, en date du mois de novembre 2019, de données interpolées sur grille qui soient exemptes de cette erreur. Des travaux sont en cours au MELCC et à RNCan pour corriger leurs données sur grille, et ce problème devrait idéalement être absent des prochains jeux

de données. Cette investigation a également permis de démontrer que les données erronées s'étendent au-delà des années 1995 et 1996 identifiées dans les phases précédentes de cQ2.

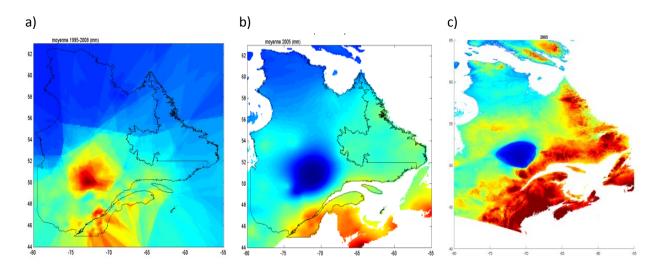


Figure 6. a) Précipitation annuelle moyenne de la période 1995-2008 selon la grille PSCv2 du MELCC, b) précipitation annuelle moyenne de l'année 2005 selon la grille RNCan et c) selon la grille Daymet de la NASA.

1.4 Outre les années 1995 et 1996, une précipitation aberrante a été découverte en décembre 1993 au Labrador (Figure 7). Cette donnée aberrante n'apparaît pas dans les données aux stations, ce qui signifie qu'il s'agit probablement d'une erreur d'interpolation. Elle est d'ailleurs absente de la nouvelle version de la grille RNCan.

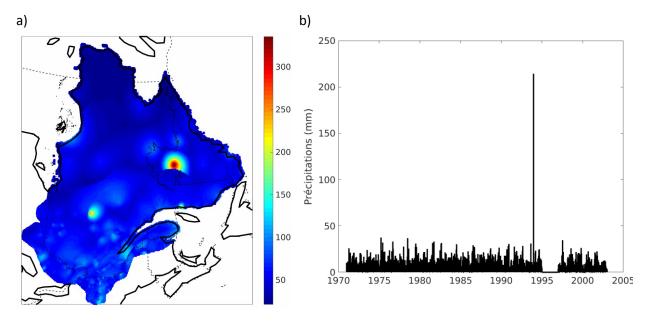


Figure 7. (a) Précipitation journalière de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon la grille RNCan et (b) série temporelle pour un des pixels situés dans la zone où la valeur aberrante a été identifiée.

2. Données simulées

2.1 Tel qu'indiqué précédemment, il existe quelques pixels observés où les données sont manquantes. Cela n'est habituellement pas un problème, puisque les données observées sont agrégées vers la grille des simulations, ce qui fait que ces pixels manquants se font moyenner avec les pixels voisins. Toutefois, avec la résolution élevée de ClimEx, il existe un pixel manquant dans la région de Cornwall, Ontario. Cela est illustré à la Figure 8. Aucun pixel n'est manquant avec les autres jeux de données.

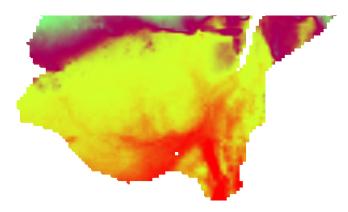


Figure 8. Pixel manquant dans ClimEx après post-traitement.

2.2 Compte-tenu de la résolution spatiale plus fine des modèles régionaux, plusieurs lacs sont visibles au Québec, dont le lac Saint-Jean et certains réservoirs hydroélectriques d'Hydro-Québec. Les simulations régionales produites avec le CRCM5 à Ouranos ont notamment une discrétisation explicite de plusieurs réservoirs hydroélectriques, où ces tuiles sont considérées comme étant complètement couvertes d'eau. Ces tuiles sont toutefois d'intérêt pour la modélisation hydrologique, et ne doivent pas être exclues. Dans le cas des simulations produites à Ouranos, la variable lakeFrac (fraction de lacs) a été utilisée afin d'identifier et d'inclure ces lacs. Toutefois, trois tuiles situées dans la région des réservoirs La Grande sont identifiées par erreur comme étant des tuiles océaniques plutôt que des lacs (Anne Frigon, Ouranos, conversation personnelle). Elles ont tout de même été extraites, afin qu'il n'y ait pas de pixel manquant dans les scénarios climatiques. Dans le cas des simulations de NA-CORDEX, la variable lakeFrac n'est pas disponible et même la variable sftlf (fraction mer-terre) n'était pas disponible pour certains modèles. Ainsi, tous les pixels situés à l'intérieur des côtes ont donc été sélectionnés. Les côtes ont été définies à l'aide de la base de données GSHHG (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database, https://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/), développée et maintenue par l'Université d'Hawaii et le NOAA Geosciences Lab (Wessel & Smith, 1996). Cela signifie que parfois, certains pixels correspondant à de l'océan peuvent avoir été extraits par erreur (Figure 9).

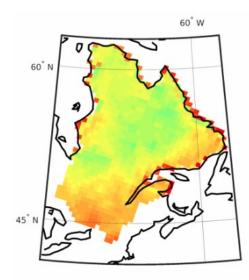


Figure 9. Pixels d'eau dans les données de RegCM4-NAM44.

2.3 Il manque 2 à 3 points de grille au Labrador avec le modèle RegCM4 à 0.22° de résolution, selon le pilote utilisé. Il est probable qu'il s'agisse du lac Melville, qui aurait pu être identifié comme une grille d'océan par l'équipe de modélisation.

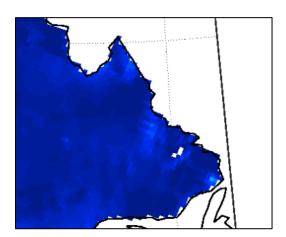


Figure 10. Pixels manquants dans la grille de RegCM4-NAM22.

- **2.4** L'altitude des tuiles n'est pas disponible pour les modèles faisant partie de l'ensemble NA-CORDEX, sauf pour les simulations réalisées à Ouranos.
- **2.5** Les simulations ClimEx se terminent le 31 décembre 2099 pour les précipitations, mais le 30 décembre 2099 pour les températures.
- **2.6** Des lignes préférentielles de précipitation ont été identifiées dans les données des modèles régionaux en analysant les données au pas de temps journalier. Ces lignes apparaissent également lorsque l'on isole

la précipitation maximale sur le domaine (Figure 11b). Une analyse rapide par l'équipe SAC d'Ouranos semble indiquer que ces artéfacts ne sont pas uniques à ClimEx (on les voit aussi dans CanRCM4, par exemple), mais qu'ils deviennent plus apparents lorsque l'échelle spatiale est plus fine. Pour l'instant, malgré l'apparence inusitée de ces précipitations, elles ne sont pas considérées aberrantes.

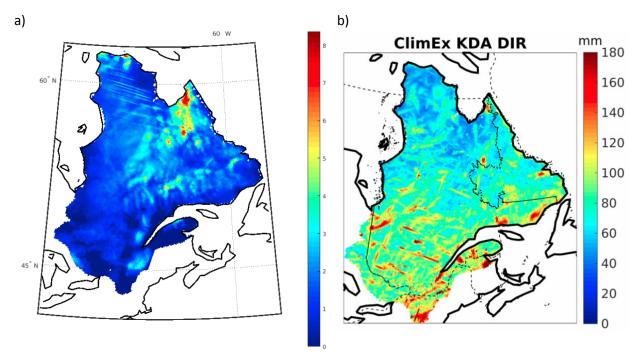


Figure 11. Exemple de « lignes préférentielles » a) le 1^{er} janvier 2075 dans ClimEx kdb et b) dans la précipitation maximale de la simulation ClimEx kda entre 1971 et 2000.

2.7 Des précipitations très intenses (> 200 mm) ont été identifiées dans plusieurs simulations brutes. Trois exemples sont illustrés à la Figure 12.

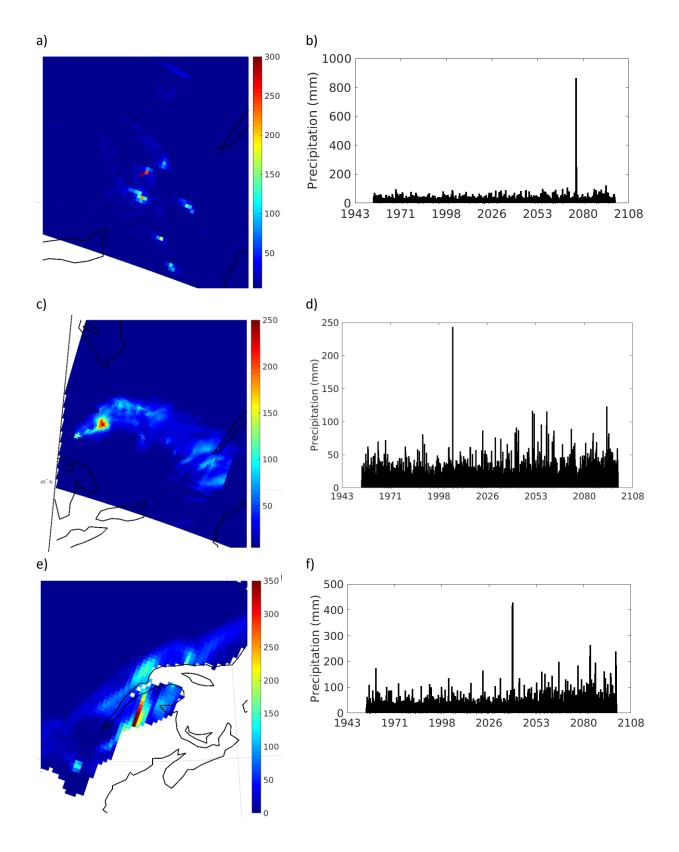


Figure 12. Exemple de précipitations très intenses dans (a-b) ClimEx KDL en période future, (c-d) ClimEx KDL en période historique et (e-f) CanESM2-CanRCM4-NAM22 en climat futur.

Certains cas, tel qu'illustré à la Figure 12a, correspondent à un phénomène surnommé « *grid-point storm* » qui se produit lorsque le schéma convectif n'est pas assez efficace pour éliminer l'instabilité. Dans ces situations, l'instabilité est éliminée par le schéma de précipitation à grande échelle, ce qui crée des valeurs aberrantes. Environnement et Changements climatiques Canada (ECCC) utilise plutôt le terme de « fontaine infinie ». Dans les autres cas, tel qu'aux Figure 12c et 12e, le schéma de précipitation demeure plausible, même si les valeurs elles-mêmes sont potentiellement biaisées (tel que 450 mm à la Figure 12c). Pour l'instant, aucun post-traitement spécifique n'a été fait sur ces données, puisqu'il s'agit d'une problématique relativement nouvelle qui n'avait pas été détectée lors de la production des scénarios climatiques. Ces valeurs ont donc fait l'objet d'un post-traitement paramétrique, au même titre que les autres précipitations élevées, et sont donc présentes dans les scénarios climatiques post-traités.

Une analyse a été effectuée afin de répertorier toutes les précipitations de plus de 200 mm dans les données brutes. Il n'existe pas de standard pour différencier un « *grid-point storm* » d'un tempête particulièrement intense. Pour l'instant, ces « *grid-point storm* » ont été définis comme une tuile ayant 200 mm et plus, mais où il n'existe aucune précipitation d'au moins 100 mm sur les tuiles avoisinantes.

CMIP5: Il existe des précipitations de 200 mm et plus dans 8 simulations, mais seul IPSL-CM5A-MR-RCP8.5 a un « *grid-point storm* ».

CORDEX: Il existe des précipitations de 200 mm et plus dans 13 simulations, mais seul CanESM2-CanRCM4-NAM22 (pour les deux RCP) a quelques « *grid-point storms* ». De manière générale, les précipitations dans CanRCM4-NAM22 sont très intenses en comparaison aux autres simulations. Pour le RCP4.5, ce modèle affiche 946 occasions où une tuile dépasse 200 mm. Pour le RCP8.5, cela survient à 1822 occasions. Ce chiffre (1822) est près de 12 fois le maximum trouvé dans les autres simulations CORDEX-NA (155) et plus de 3 fois le maximum trouvé dans ClimEx (529).

MRCC5: Les précipitations élevées se trouvent principalement dans les simulations pilotées par CanESM2 (entre 9 et 58 occasions). Le seul « *grid-point storm* » est dans la simulation pilotée par GFDL-ESM-2M avec le RCP8.5.

ClimEx: En moyenne, un membre de ClimEx dépasse 200 mm à 360 occasions et possède 22 « *grid-point storms* », sur environ 13 000 tuiles et 52 925 pas de temps. Le nombre minimal de pixels de tempête intenses est de 260 (KDQ) et le maximum est de 529 (KEV). Le nombre minimal de « *grid-point storms* » est de 14 (KDT) et le nombre maximal est de 50 (KDC).

ANNEXE II. CORRECTION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES – TEXTE DE LA PROPOSITION DE PROJET

Le projet gouvernemental Info-Crue, sous la responsabilité du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), vise à outiller le Québec par rapport aux risques d'inondations. Ouranos a reçu une subvention pour réaliser de la recherche et du développement en soutien direct à Info-Crue sous différents volets. L'un de ces volets porte sur l'évolution du climat en lien avec la cartographie des zones inondables. Le plan de travail de ce volet (actuellement en développement) prévoit répondre à l'un des besoins court terme de la DEH, soit d'obtenir des scénarios climatiques solides scientifiquement et adaptés à la production de scénarios de projections de crues de récurrence 2, 20 et 100 ans en période de référence et en période future (2030, 2050 2080). Ces scénarios devront être compatibles avec la structure de modélisation de l'Atlas hydroclimatique de la DEH, car il est prévu que la version 2020 de cet atlas soit développée pour servir directement au besoin d'Info-Crue.

Or, Ouranos travaille depuis maintenant plusieurs années avec la Direction de l'expertise hydrique du MDDELCC (DEH), avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) et avec Rio Tinto (RT) sur l'élaboration de scénarios climatiques utiles à la modélisation hydrologique (projet 400009 - cQ2). Un important livrable de ce projet est d'ailleurs l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, produit par la DEH et dont la dernière édition a été publiée en 2018. Cet Atlas est basé sur l'ensemble CMIP5, un ensemble de modèles climatiques à faible résolution spatiale (~100 à 350 km de résolution). En raison de diverses limitations méthodologiques et statistiques (faible résolution spatiale, faible nombre de réalisations pour un même modèle, courtes séries observées avec peu de valeurs extrêmes), l'Atlas se limite aux crues de récurrence 20 ans.

Afin de quantifier l'effet des changements climatiques sur les petits bassins versants, sur les crues estivales causées par des précipitations extrêmes, et sur les crues de récurrence 100 ans, l'édition 2020 de l'Atlas intégrera trois nouveaux jeux de données de modèles régionaux du climat (MRC), soient le MRCC5 d'Ouranos, l'ensemble NA-CORDEX et l'ensemble ClimEx. Ces modèles possèdent une résolution spatiale plus fine (~12 à 50 km) et une paramétrisation interne capable d'inférer des phénomènes convectifs tels que les forts orages d'été (Whan et Zwiers, 2016). Ces fortes précipitations dans les modèles apportent toutefois des problématiques supplémentaires quant à la création de scénarios climatiques. En effet, la correction par quantiles (Mpelasoka et Chiew, 2009; Gennaretti et al., 2015) utilisée dans le Groupe Scénarios et services climatiques est une technique qui demande des observations de qualité et en grand nombre sur tout le territoire et sur toutes les plages de valeurs. Cela est un problème pour les précipitations extrêmes, puisque les grilles d'observations interpolées ne représentent pas adéquatement les valeurs extrêmes et que les stations d'observation qui seraient plus adéquates pour fournir cette information n'ont pas une couverture spatiale très dense. De plus, la correction par quantiles performe moins bien pour les queues de distribution, puisque les valeurs extrêmes sont rares (par définition), ce qui signifie que la fonction de transfert utilisée par cette méthodologie est bâtie à partir d'un faible nombre de données, ce qui en augmente l'incertitude. Cet enjeu était moins critique lors des éditions précédentes de l'Atlas, puisque l'ensemble CMIP5 n'est pas conçu pour étudier les précipitations extrêmes, mais il s'agit d'une limitation importante si l'on veut exploiter les ensembles NA-CORDEX, MRCC5 et ClimEx à leur plein potentiel.

L'étude des événements rares requiert l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes, une branche active et en pleine effervescence de la statistique. Le but du projet consistera donc à développer une méthode de post-traitement des précipitations extrêmes simulées basée sur la théorie des valeurs extrêmes, qui est spécialement adaptée pour estimer la probabilité d'occurrence et l'intensité des événements à la source des catastrophes. L'estimation des précipitations extrêmes nécessite toutefois des observations de qualité. Certaines stations du réseau de stations pluviométriques canadien ne se qualifient pas pour les calculs. Cette contrainte, en plus de la faible densité initiale du réseau de stations pluviométriques canadien, fait en sorte que les observations pour les extrêmes sont disponibles à très peu d'endroits. Dans le nord du Québec, par exemple, il n'est pas rare que la station pluviométrique la plus proche se situe à plusieurs centaines de kilomètres du centre d'une tuile d'un modèle de climat. Une comparaison directe ou une interpolation simple entre les stations a pour effet de négliger l'hétérogénéité spatiale des précipitations extrêmes.

Plusieurs initiatives universitaires ayant pour but d'interpoler les précipitations extrêmes au Canada ont été développées au cours des dernières années. Une initiative pilotée par le professeur Slobodan Simonovic (Simonovic et al., 2016) de l'Université Western Ontario et de l'Institute for Catastrophic Loss Reduction a permis d'interpoler les précipitations extrêmes sur tout le territoire canadien. La méthode utilise les réanalyses NARR et ERA-Interim comme variable explicative pour interpoler les paramètres des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) des précipitations. Une autre approche, pilotée par le professeur Eric Soulis (Soulis et al., 2015) de l'Université Waterloo, consiste également à interpoler les courbes IDF dans le sud de l'Ontario. Les paramètres des courbes IDF ont par la suite été interpolés en utilisant comme variables explicatives la latitude, la longitude, l'élévation, la distance au lac Ontario et la pente de la courbe IDF locale. Notons que l'interpolation spatiale des courbes IDF des approches décrites ne s'effectue pas en adéquation avec la théorie des valeurs extrêmes.

Le programme pancanadien FloodNet étudie les inondations et plusieurs des projets utilisent les précipitations extrêmes. Jusqu'à maintenant, il ne semble pas y avoir une méthode privilégiée au sein de FloodNet pour obtenir une couverture complète du territoire. La méthodologie d'analyse fréquentielle régionale (Hosking & Wallis, 1997) est notamment utilisée (Nguyen et Nguyen, 2016). Cette approche permet de partager l'information d'une station à l'autre pour améliorer l'estimation des paramètres en supposant que des régions homogènes existent pour les précipitations extrêmes. Une telle hypothèse est difficile à vérifier et si elle s'avère invalide, l'incertitude sera sous-estimée. Notons que la méthodologie d'analyse fréquentielle régionale peut être adaptée pour interpoler les précipitations extrêmes aux sites non observés. Cependant, la région homogène dans laquelle se retrouve le site non observé doit être stipulée, ce qui risque de grandement sous-estimer l'incertitude.

De façon générale, les méthodes statistiques usuelles ne s'appliquent pas au contexte des valeurs rares où il est souvent nécessaire d'extrapoler à des quantiles correspondant à des périodes de retour excédant l'étendue des observations. Il faut plutôt employer les méthodes et les résultats de la théorie de valeurs extrêmes afin d'estimer adéquatement les précipitations extrêmes et leurs incertitudes aux stations. D'autre part, l'interpolation des valeurs extrêmes par des méthodes non spécifiques à celles-ci peut donner des résultats hasardeux. Notons également qu'aucune des initiatives pour interpoler les courbes énoncées précédemment n'a été développée dans le cadre formel de la théorie des valeurs extrêmes.

La spatialisation de la théorie des valeurs extrêmes constitue actuellement un domaine de recherche en pleine effervescence. Pour la modélisation conjointe des précipitations extrêmes d'un ensemble de stations, deux approches retiennent l'attention. Il s'agit des modèles hiérarchiques bayésiens appliqués à la théorie des valeurs extrêmes et des processus max-stables. Selon Davison et al. (2012) et Sebille et al. (2016), les modèles hiérarchiques

bayésiens constituent les approches les plus appropriées pour l'interpolation des quantiles d'ordre élevé. De plus, ceux-ci sont plus robustes que les processus max-stables pour l'interpolation (Sebille et al., 2017).

La première étape du projet proposé consiste à interpoler les caractéristiques des précipitations extrêmes sur tout le Québec. Ces travaux ont déjà été entamés par Jonathan Jalbert et Luc Perreault au cours des dernières années (présentation au Symposium Ouranos par Perreault et al., 2017; article soumis 2018). La méthodologie est développée dans le cadre formel de la théorie des valeurs extrêmes afin d'obtenir des estimations fiables. De plus, les incertitudes reliées à l'interpolation peuvent être quantifiées. L'interpolation des caractéristiques des précipitations extrêmes s'effectue par un modèle hiérarchique bayésien. Au premier niveau de la hiérarchie, la loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) est utilisée pour modéliser les maxima annuels observés aux stations. Au second niveau, les paramètres de la loi GEV constituent un champ aléatoire spatial. Rappelons que l'interpolation des valeurs extrêmes à l'aide d'un tel modèle hiérarchique est probablement la meilleure méthode parmi celles s'inscrivant dans le cadre de la théorie des valeurs extrêmes pour l'interpolation des extrêmes (Davison et al., 2012 ; Sebille et al., 2016 ; Sebille et al., 2017). Les précipitations extrêmes au Canada n'ont jamais été interpolées à l'aide d'un tel modèle hiérarchique.

Afin d'améliorer l'interpolation dans les régions où peu de stations pluviométriques sont disponibles, des variables explicatives pour les paramètres de la loi GEV sont introduites au second niveau du modèle hiérarchique. En remplacement des variables caractéristiques telles la longitude, la latitude, l'élévation et la distance à la mer dans l'approche proposée par Soulis et coll. (2015), une reconstruction météorologique historique par un modèle numérique de climat est utilisée, en l'occurrence la simulation CROQ produite par Ouranos. Une telle reconstruction est obtenue en pilotant un modèle numérique de climat avec les conditions observées. La simulation obtenue est physiquement cohérente sur le territoire, ce qui fait en sorte que l'information aux sites sans station pluviométrique est de nature physique. Cette reconstruction constitue donc une source d'information de choix pour compenser la faible densité des observations dans la plupart des régions du Québec.

L'interpolation des précipitations extrêmes en utilisant une telle reconstruction du climat n'a jamais été faite auparavant. Une approche similaire a néanmoins déjà été proposée pour introduire les sorties des modèles de prévisions météorologiques comme variables explicatives dans le but d'améliorer l'interpolation des précipitations extrêmes en Norvège (Dyrrdal et al., 2015). Toutefois, le modèle statistique envisagé dans le cadre de la présente proposition est différent de celui proposé par Dyrrdal et al. (2015). Pour faciliter l'estimation des paramètres de la deuxième couche du modèle hiérarchique bayésien, Dyrrdal et al. (2015) ont ajouté un terme d'erreur non structuré. Bien que l'ajout d'un tel terme facilite l'estimation de certains paramètres, il rend le modèle non identifiable. Par conséquent, certains des paramètres ne sont pas estimés, mais stipulés, ce qui rend le modèle statistique moins robuste et conduit à une sous-estimation de l'incertitude sur les courbes. Nous proposerons plutôt un modèle identifiable qui permettra d'introduire une reconstruction de la météorologie comme variable explicative.

Les précipitations simulées lors de la reconstruction de la météorologie par le modèle de climat sont disponibles sur une grille régulière. Il est possible de tirer profit de cette structure en modélisant les paramètres de la loi GEV au deuxième niveau du modèle hiérarchique bayésien par un champ de Markov. Cela permettra une estimation rapide et précise en raison des excellentes propriétés computationnelles des champs de Markov ainsi qu'une correspondance directe entre la variable explicative et les paramètres.

Une deuxième étape utilisera les informations décrites ci-dessus et les intégrera dans la méthode « mixte » de correction par quantiles, développée à Ouranos (Roy et al., 2018). La méthode mixte consiste à corriger les biais en combinant deux approches différentes, soit la méthode empirique quantile-quantile (Mpelasoka et Chiew, 2009) et

une distribution de Pareto Généralisée (DPG) pour la modélisation de la queue de distribution (Roy et al. 2018). Cette méthode est une variante de l'approche suggérée par Gutjahr et Henemann (2013). La différence avec la méthode de Gutjahr et Henemann (2013) est la mixité d'une approche empirique et paramétrique, contrairement à Gutjahr et Heinemann (2013) qui utilise exclusivement des méthodes paramétriques pour l'ensemble de la distribution de précipitation.

La modélisation de la queue de distribution se fait avec la méthode par dépassement de seuil (Coles, 2001). Le seuil utilisé (P) est le 95e centile de la précipitation supérieure à 1 mm. La règle employée pour la correction des extrêmes par l'approche DPG équivaut à environ deux extrêmes annuels (par ex. si nous corrigeons 30 ans de données, seulement les 60 plus grandes valeurs de la simulation sont corrigées). D'un point de vue plus technique, les paramètres de la DPG sont estimés pour la simulation et la référence. Pour corriger une valeur quotidienne x identifiée comme extrême, on estime le quantile de cette valeur dans la DPG. Ce quantile est ensuite retraduit dans l'espace des paramètres de la DGP de référence, selon la formule suivante :

$$y = F_{ref,DPG}^{-1}(F_{sim,DPG}(x))$$

Où $F_{sim,DPG}$ est la fonction de répartition de la DPG de la simulation et $F_{ref,DPG}^{-1}$ est la fonction de répartition inverse (i.e. fonction quantile) de la DPG de la référence.

Puisque le projet proposé se base sur des méthodes qui sont déjà en cours de développement, nous sommes confiants que les améliorations du post-traitement des extrêmes pourront s'effectuer dans l'échéancier serré imposé par la DEH. Les besoins d'Info-Crue impliquent que les scénarios climatiques soient prêts pour mars 2019.

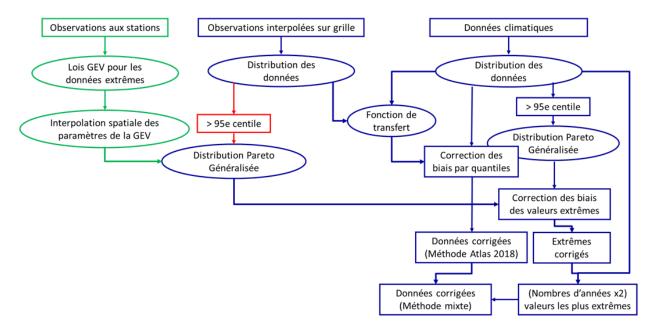


Figure 13. Schématisation des deux méthodes actuelles de post-traitement des données climatiques. La méthode proposée cherche à retirer les étapes en rouge et à les remplacer par les étapes en vert.

ANNEXE III. CORRECTION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES – GRILLE OBSERVÉE

Les Tableaux 4 et 5 comparent la grille RNCan et la grille ajustée par rapport au résultat théorique calculé à partir des paramètres de GEV provenant de Jalbert et al. (2019). Le Tableau 4 présente les résultats sous la forme de la probabilité P(x) calculée par la distribution de Pareto généralisée, tandis que le Tableau 5 présente plutôt les résultats sous la forme de périodes de retour. Dans tous les cas, la période étudiée est celle utilisée pour le post-traitement, soit [1971-1994 et 1997-2002]. Noter que pour le Tableau 4, la couleur blanche indique des points de grille où aucune précipitation assez intense (par exemple, P(x) = 0.99) n'existe dans les données.

On remarque que les résultats de la grille RNCan sont fortement influencés par la présence de stations. Des cercles apparaissent en région nordique et, même dans le sud du Québec, un point de grille situé entre deux stations peut avoir une précipitation maximale de 50 à 70 mm plus faible que les points de grille où l'on retrouve des stations. Cela est particulièrement visible dans le Tableau 5. D'ailleurs, tel que démontré par la colonne « A-C », les précipitations extrêmes de la grille RNCan sont presque systématiquement sous-estimées par rapport aux valeurs théoriques.

La performance de la grille ajustée, quant à elle, dépend fortement du métrique utilisé. Avec la méthode POT, les extrêmes correspondent exactement aux valeurs théoriques, à quelques exceptions près. Les quelques régions où les résultats sont plus mitigés sont discutées dans les Avertissements ci-dessous, mais correspondent généralement à des endroits où la confiance dans la distribution observée est plus faible.

Lorsque l'on compare les périodes de retour de la grille ajustée avec les valeurs théoriques, les résultats sont un peu plus mitigés. Cela s'explique en partie par le fait que le calcul des extrêmes par GEV ne considère que la valeur la plus élevée de l'année, tandis que la méthode POT corrige toute la série de données, peu importe si plusieurs extrêmes surviennent la même année. Il était donc peu probable que la technique utilisée pour corriger la queue de distribution des données observées réussisse à parfaitement reproduire les statistiques de récurrence des précipitations extrêmes. De plus, les GEV théoriques ont été calculées à partir de toute la série disponible (1950-2017), tandis que la grille RNCan a seulement été corrigée pour la période de post-traitement. Certaines précipitations intenses, tel que 1996 ou 2011, sont donc absentes de cette sélection.

Tableau 4. Comparaison des précipitations extrêmes entre la grille RNCan, la grille RNCan ajustée et la distribution de Pareto généralisée théorique

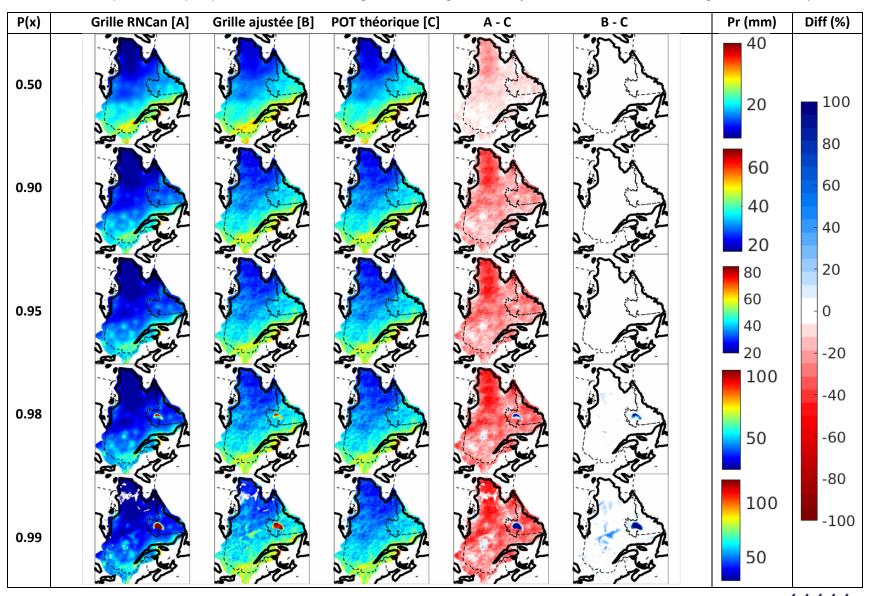
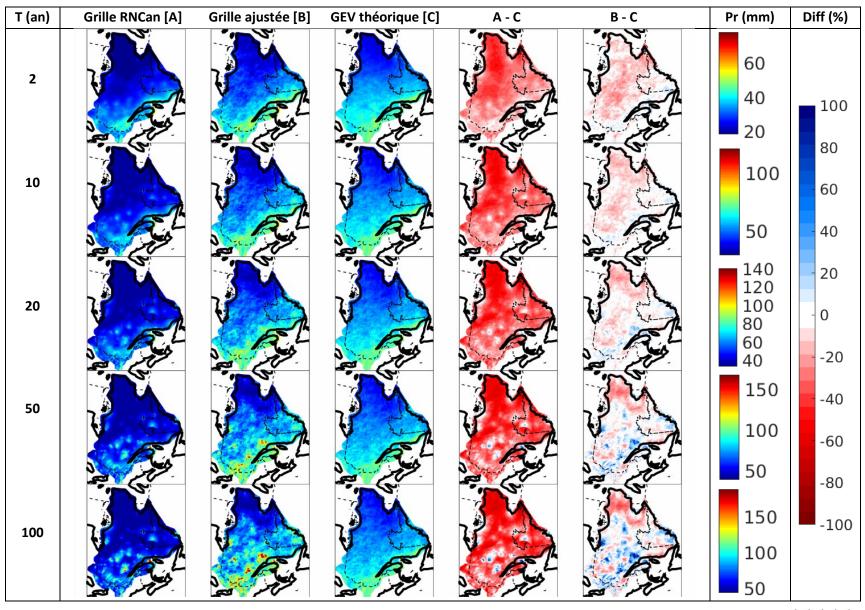


Tableau 5. Comparaison des précipitations extrêmes (périodes de retour) entre la grille RNCan, la grille RNCan ajustée et la distribution GEV théorique



Avertissements

- 1. Tel qu'indiqué à l'Annexe I, une précipitation aberrante a été découverte en décembre 1993 au Labrador. Cette donnée aberrante n'apparaît pas dans les données aux stations, ce qui signifie que les paramètres de GEV ne sont pas affectés. Cela influence toutefois la distribution de Pareto généralisée, puisque la probabilité de cet évènement est infinie (P(x)_{OBS} = 1). Même si elle est moins élevée que dans la grille RNCan, la valeur corrigée demeure donc anormale. Heureusement, comme il s'agit d'une seule valeur de probabilité infinie, l'impact sur le post-traitement semble avoir été minime.
- 2. La correction de la grille RNCan vise seulement à modifier les valeurs dans la queue de distribution. Cela signifie que s'il existe des artéfacts dans la grille originale, ceux-ci risquent d'exister dans la grille ajustée. Outre la précipitation discutée au point précédent, la Figure 14a permet d'identifier un certain nombre de patrons spatiaux anormaux. Dans presque tous les cas, ces patrons se retrouvent dans la Figure 14b. Cette transposition des artéfacts est également apparente dans les Tableaux 4 et 5, et souligne l'importance, dans une prochaine itération des travaux, de trouver une méthodologie qui permettrait de s'affranchir complètement des extrêmes sur grille.

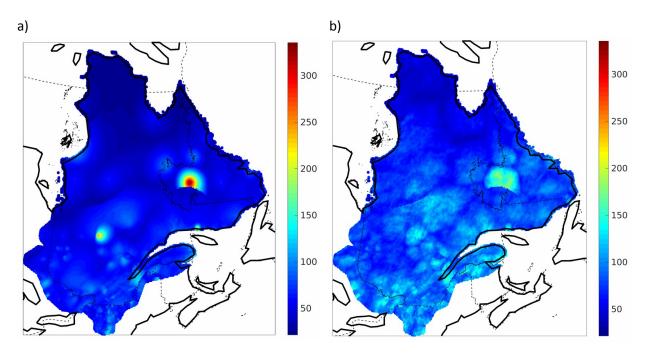


Figure 14. Précipitation maximale de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon a) la grille RNCan et b) la grille ajustée.

ANNEXE IV. INTERPOLATION SPATIALE

Quelques comparaisons ont été effectuées entre la méthode A2S (Observations averaged to the simulation grid), utilisée dans les phases précédentes de cQ2, et les alternatives possibles. Notamment, une des limitations importantes de la méthode A2S est que les scénarios sont créés à l'échelle des simulations. Pour certains bassins versants, notamment avec les données CMIP5, cela signifie qu'il n'existe qu'un seul pixel dans le domaine, voire aucun. D'un autre côté, lorsque les modèles globaux sont interpolés vers une grille tel que la grille RNCan, le « bond » peut être très grand (par exemple, passer d'une résolution de 250 km à 10 km) et l'information ajoutée est purement statistique. Un modèle global interpolé à une plus fine échelle spatiale ne sera pas plus capable de représenter les phénomènes orageux en été, par exemple. Certaines études voient même une dégradation de la modélisation hydrologique lorsque l'interpolation spatiale franchit la limite (autour de 50 km de résolution) où les phénomènes physiques en jeu ne sont plus les mêmes (Maurer, Ficklin, & Wang, 2016). Noter que les tests ont été effectués en utilisant une grille à 10 km de résolution. Tel qu'indiqué dans Maurer et al. (2016), il existe peut-être une résolution « idéale » à laquelle interpoler.

Trois méthodes d'interpolation ont été analysées, en plus de la méthode A2S: N2O (Nearest simulation grid cell interpolated to the observation grid), L2O (Linear interpolation of the simulation grid cells towards the observation grid) et C2O (Cubic interpolation of the simulation grid cells towards the observation grid). Dans tous les cas, le bassin versant de la rivière Ashuapmushuan a servi de banc d'essai. Les Figures 15 et 16 présentent l'impact de ces techniques sur les données post-traitées.

Voici les principales conclusions :

N2O: La valeur ajoutée par rapport à la méthode A2S semble négligeable pour les modèles dont la résolution est de 0.22° et moins, mais le nombre de pixels est beaucoup plus élevé (près de trois fois plus de pixels par rapport à la grille de ClimEx). À des résolutions de 0.44° et plus, des artéfacts importants commencent à être observés à la frontière entre les tuiles. Cette méthode ne semble donc pas recommandable.

L2O et C2O - MRCs: À l'échelle de ClimEx, ces méthodes d'interpolation triplent le nombre de tuiles, mais n'apportent pratiquement aucun changement aux valeurs. Il serait donc difficile de justifier le coût de calcul supplémentaire. Un argument pourrait être fait pour les modèles CORDEX à 0.44° de résolution pour les précipitations, mais sinon, les conclusions sont les mêmes pour CORDEX. La résolution spatiale des modèles régionaux apporte une information spatialisée qui est probablement suffisante pour la modélisation hydrologique.

L2O et C2O - MCGs : Les températures sont importantes en hydrologie, pour que la fonte de la neige survienne au bon moment dans le bassin versant. Avec la méthode A2S, la faible résolution spatiale ne

permet souvent pas de représenter un bon gradient nord-sud. Les méthodes L2O et C2O pourraient être une réponse à cette limitation, même si l'information ajoutée par ces techniques est une représentation statistique de la grille observée, plutôt qu'une représentation des conditions météorologiques simulées par le modèle. Pour les précipitations, les résultats sont un peu plus mitigés. Il n'est pas possible d'ajouter de l'information physique aux simulations (par exemple, une cellule orageuse à l'intérieur du pixel). Les méthodes L2O et C2O ne font donc qu'ajouter de la « texture », qui correspond aux statistiques de la grille observée. La méthode C2O serait probablement préférable par rapport à L2O, puisque cette méthode conserve un peu plus l'information des tuiles d'origine.

Conclusions: La méthode C2O pourrait avoir un certain potentiel pour améliorer les scénarios climatiques produits pour les modèles globaux, mais des essais accompagnés d'une modélisation hydrologique seraient nécessaires pour confirmer cette affirmation. Compte tenu de l'effort significatif que cela représenterait pour CMIP5, et compte tenu de l'effort de travail que requiert le post-traitement de ClimEx, il a pour l'instant été décidé de maintenir l'usage de la méthode A2S.

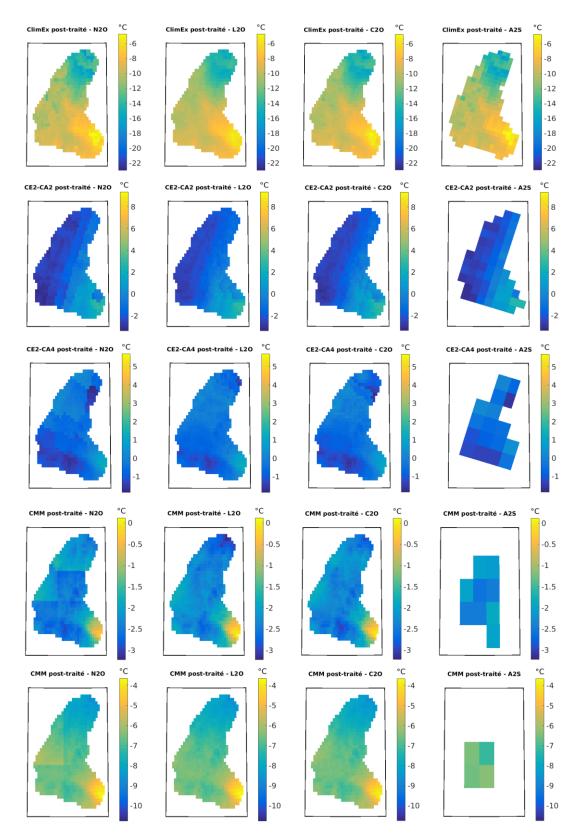


Figure 15. Comparaison de l'impact des techniques d'interpolation spatiale sur les températures post-traitées, pour un pas de temps donné.

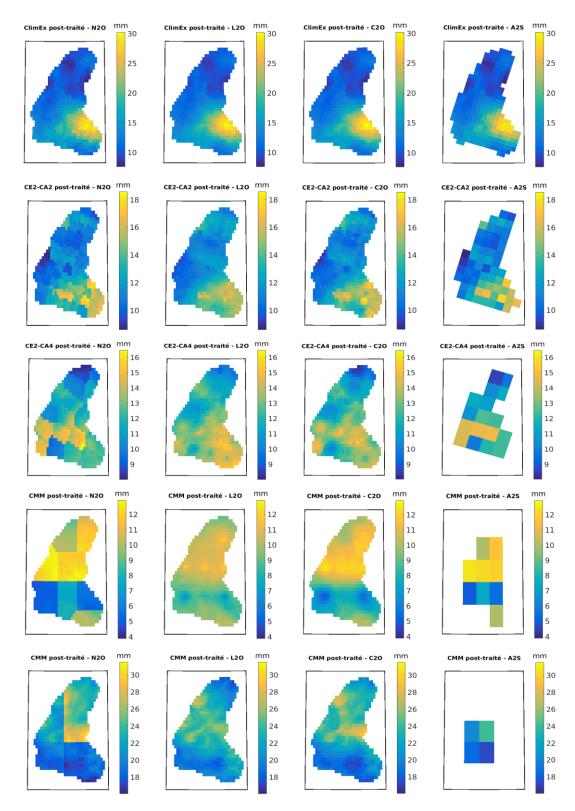


Figure 16. Comparaison de l'impact des techniques d'interpolation spatiale sur les températures post-traitées, pour un pas de temps donné.

Interpolation des précipitations extrêmes

La Figure 17 illustre la précipitation maximale (1971-2002) de la grille observée, en fonction de la résolution spatiale. Cela permet d'illustrer l'impact de l'agrégation et, surtout, de valider que la précipitation maximale diminue bel et bien lorsque la résolution devient plus grossière.

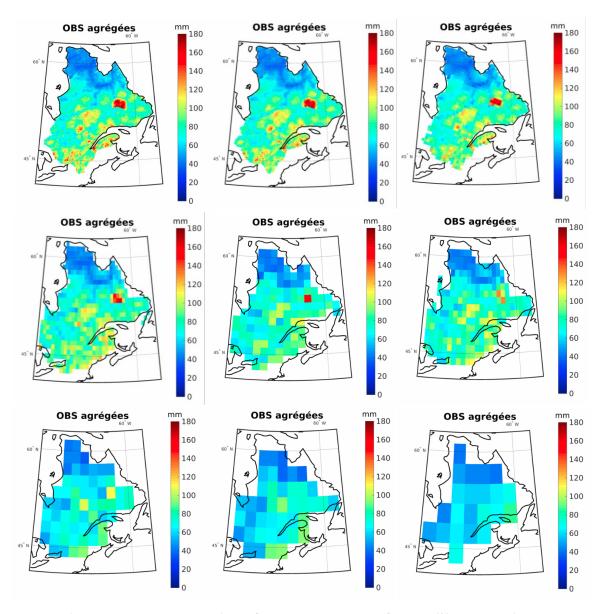


Figure 17. Précipitation maximale de la période [1971-1994 + 1997-2002] selon différentes aggrégations spatiales : 0.11°, 0.22°, 0.44°, 0.75°, 1.25° x 1.875°, 1.125°, 2°, 2.8°, 3.44° x 3.75°.

ANNEXE V. ANALYSE DES DONNÉES POST-TRAITÉES

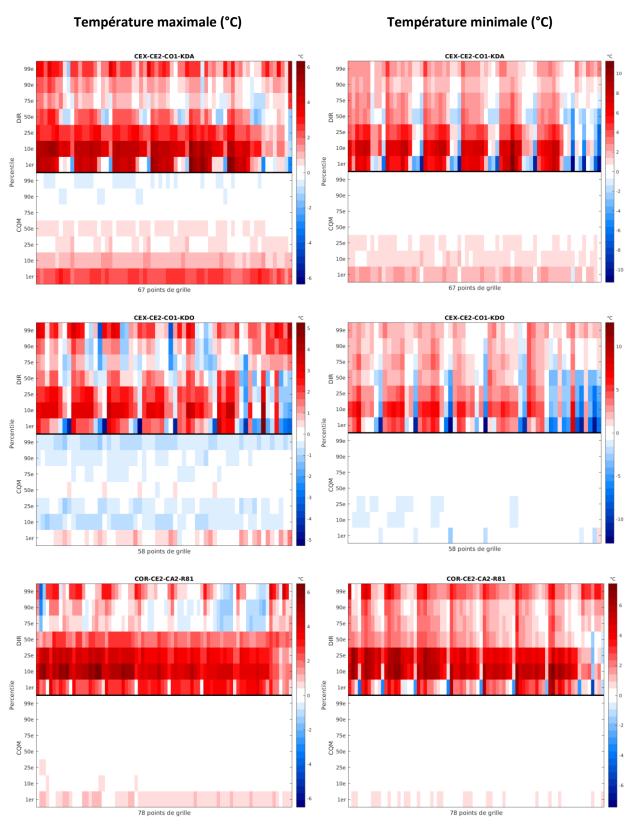
Correction des biais dans les températures : Période historique 1971-2000

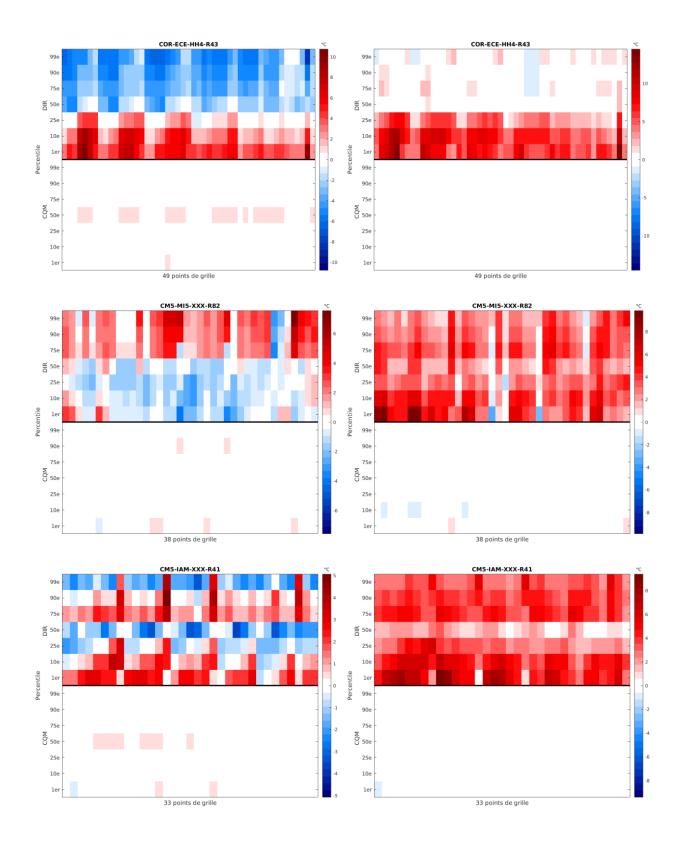
Interprétation des cartes de chaleur :

- Chaque colonne représente un point de grille pris au hasard dans le domaine
- La moitié supérieure du graphique (DIR) illustre le biais (en °C) des données brutes pour différents percentiles de la série 1971-2000.
- La moitié inférieure du graphique (CQM) illustre le biais (en °C) des données post-traitées pour différents percentiles de la série 1971-2000.

- À cause de la construction d'une seule fonction de transfert pour les 50 membres de ClimEx, il demeure un biais dans les données post-traitées. Cela est voulu, et signifie que certains membres de ClimEx seront plus chauds ou plus froids que les données observées en raison de la variabilité naturelle de l'ensemble.
- Des conclusions similaires peuvent être attendues pour les autres modèles ayant eu un posttraitement multi-membres (CanESM2, CSIRO-Mk6, etc.).
- Dans tous les autres cas, le post-traitement corrige correctement les biais des simulations.

Figure 18. Correction des biais dans les températures : évaluation sur la période historique 1971-2000





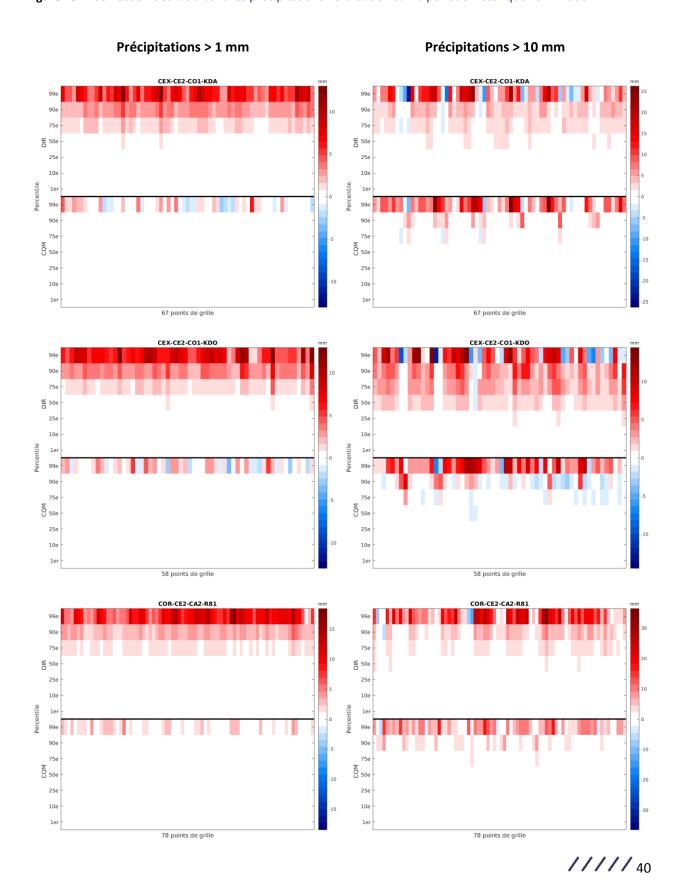
Correction des biais dans les précipitations : Période historique 1971-2000

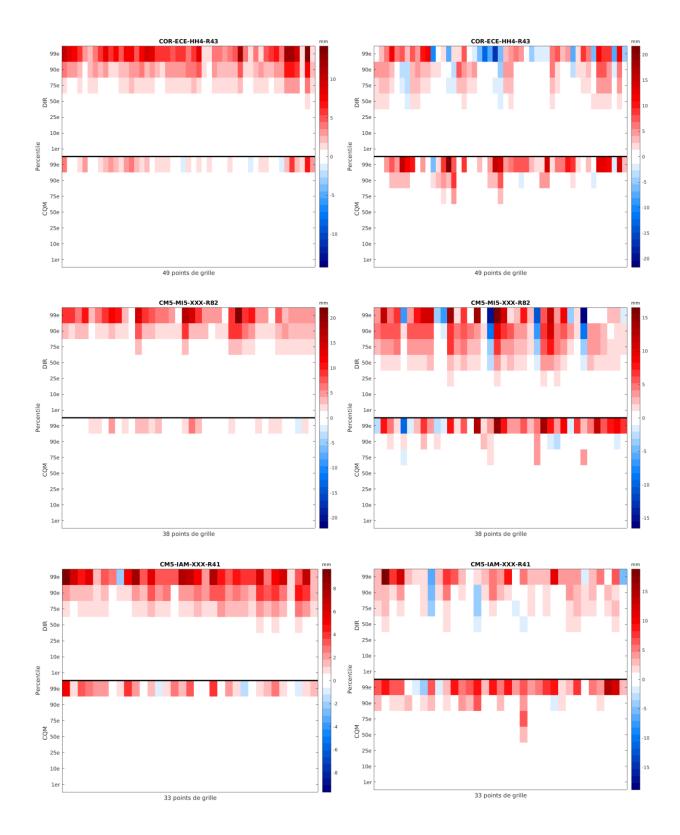
Interprétation des cartes de chaleur :

- Chaque colonne représente un point de grille pris au hasard dans le domaine
- La moitié supérieure du graphique (DIR) illustre le biais (en mm) des données brutes pour différents percentiles de la série 1971-2000.
- La moitié inférieure du graphique (CQM) illustre le biais (en mm) des données post-traitées pour différents percentiles de la série 1971-2000.

- Il y a peu de différence entre la correction multi-membres (ClimEx) et les autres simulations.
- Le post-traitement réduit systématiquement les biais, mais il demeure des différences pour les valeurs les plus élevées. Cela est probablement dû au fait que comme le post-traitement est paramétrique, les valeurs post-traitées ne sont pas bornées par la valeur maximale observée, mais plutôt par une distribution statistique. Ainsi, si une valeur de récurrence 150 ans a eu lieu sur un pixel, mais que la valeur observée maximale correspond à une récurrence de 65 ans, alors la valeur corrigée demeurera supérieure à l'observé. Cette situation serait interprétée comme un biais positif dans la carte de chaleur.
- L'évaluation pour les quantiles les plus élevés est effectuée à la section suivante.

Figure 19. Correction des biais dans les précipitations : évaluation sur la période historique 1971-2000





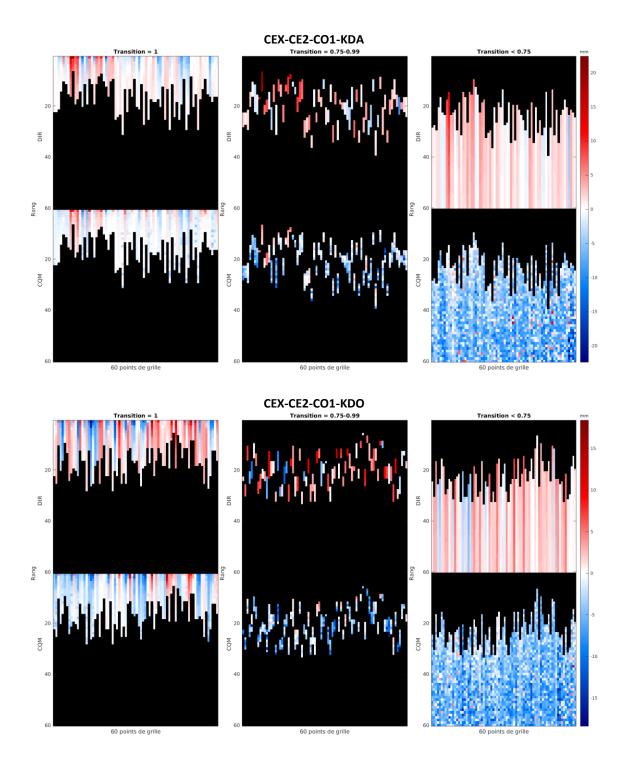
Correction des biais dans les précipitations maximales : Période historique 1971-2000

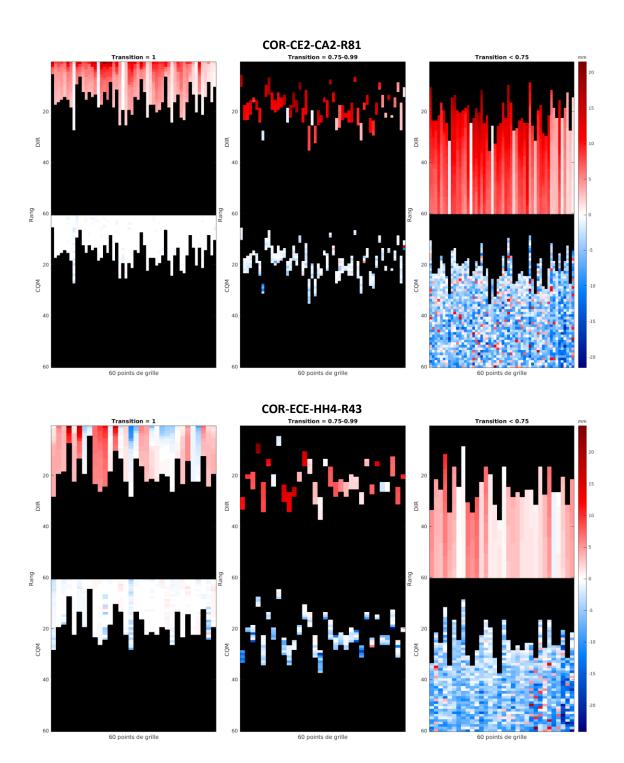
Interprétation des cartes de chaleur :

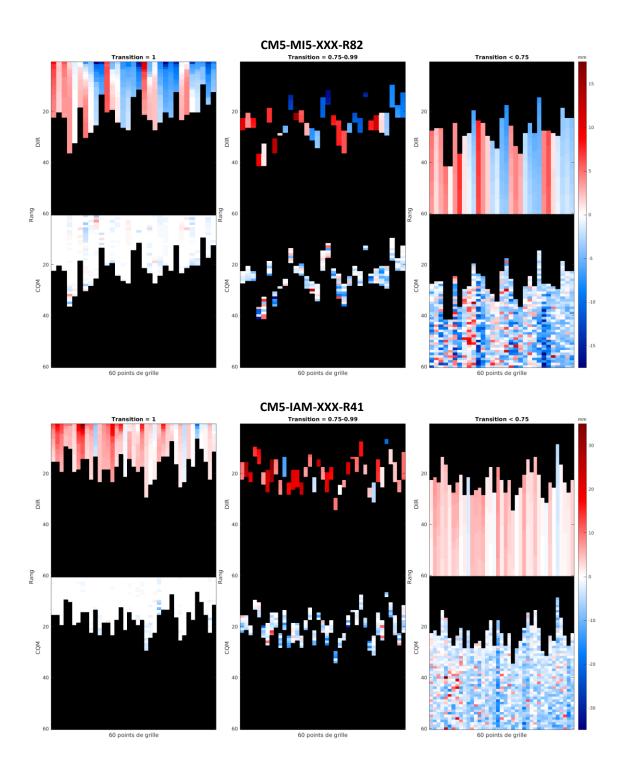
- Chaque colonne représente un point de grille pris au hasard dans le domaine
- Pour un point de grille donné, les 60 valeurs les plus élevées de la période historique 1971-2000 ont été sélectionnées et classées selon leur rang (axe des Y).
- Le biais est calculé par rapport à la distribution de Pareto généralisée théorique.
- Tel que décrit dans la Section 2.2.5.3, transition linéaire est utilisée entre le post-traitement par quantiles et le post-traitement paramétrique. Afin de distinguer la source des biais potentiels, trois cartes de chaleur ont été produites en fonction du poids associé à cette transition.
- La moitié supérieure du graphique (DIR) illustre la différence (en mm) entre les précipitations extrêmes brutes et la valeur théorique qui devrait leur être assignée selon une distribution de Pareto généralisée.
- La moitié inférieure du graphique (CQM) illustre la différence (en mm) entre les précipitations extrêmes post-traitées et la valeur théorique qui devrait leur être assignée selon une distribution de Pareto généralisée.

- À cause de la construction d'une seule fonction de transfert pour les 50 membres de ClimEx, il demeure un biais dans les données post-traitées. Cela est voulu, et signifie que certains membres de ClimEx auront des précipitations extrêmes plus ou moins intenses que les données observées en raison de la variabilité naturelle.
- Des conclusions similaires peuvent être attendues pour les autres modèles ayant eu un posttraitement multi-membres (CanESM2, CSIRO-Mk6, etc.).
- Dans les autres cas, le biais est nul ou pratiquement nul pour les précipitations les plus intenses, mais ce biais augmente lorsque l'on donne plus de poids aux données corrigées par quantiles (poids de la fonction de transition). Cela était attendu, et représente un compromis réalisé afin qu'il n'y ait pas de saut ou de données manquantes dans la distribution des précipitations.

Figure 20. Correction des biais dans les précipitations extrêmes : évaluation sur la période historique 1971-2000







Correction des biais dans les précipitations maximales : Période historique 1971-2000

Interprétation des cartes :

• Il s'agit ici d'une comparaison de la précipitation maximale de la période 1971-2000 pour les données brutes (DIR), pour les données post-traitées (CQX) et pour les données observées (OBS)

- De manière générale, les valeurs maximales dans ClimEx semblent peu affectées par le posttraitement paramétrique pendant la période historique.
- Pour les autres simulations, le post-traitement va parfois diminuer les valeurs extrêmes, comme c'est le cas pour CE2-CA2, et va parfois les augmenter, comme c'est le cas pour CN5-CO2.

Figure 21. Précipitation maximale sur la période historique 1971-2000 pour une diversité de modèles

