

RAPPORT FINAL

Développement d'un jeu de grilles observationnelles pour effectuer le post-traitement des simulations climatiques selon la performance hydrologique

OCTOBRE 2022

Préparé pour

Ouranos

Ministère de l'environnement et de la lutte
contre les changements climatiques (MELCC)

Réalisé par

Samuel Bérubé
Annie Poulin
François Brissette
Richard Arsenault
Michel Baraër

Dans le cadre du projet INFO-Crue



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 

Table des matières

Table des matières	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux	3
Résumé	4
1. Introduction et contexte du projet	5
2. Revue de littérature	6
3. Méthodologie	10
3.1 Harmonisation	13
3.2 Grilles de températures	13
3.3 Grille de précipitations	15
3.4 Comparaison avec la méthodologie MSWEP V2	23
4. Analyse des résultats	26
4.1 Grilles des valeurs moyennes annuelles	26
4.2 Métriques de précipitations	31
4.3 Modélisation hydrologique	36
5. Discussion	40
5.1 Incertitude attribuée aux choix méthodologiques	40
5.2 Propriétés du jeu de données GRNCH-QC	41
6. Conclusion	44
Références	46
Annexes	52
Annexe 1 : Tableaux montrant les produits climatiques recensés, par catégorie	53
Annexe 2 : Localisation des stations intégrées dans les grilles de précipitation et de température GRNCH-QC	55
Annexe 3 : Cartes des températures moyennes saisonnières pour les grilles GRNCH-QC et GCQ, et les périodes P1 et P3	57

Liste des figures

Figure 3.1 Pondérations de p_{fusion} et p_{stations} (période P3) avant la production de p_{final}	22
Figure 3.2 Cartes de pondérations des différents produits intégrés dans P2	22
Figure 3.3 Cartes de pondérations des différents produits intégrés dans P3	23
Figure 3.4 Schémas de production des grilles de précipitation MSWEP V2 (gauche) et GRNCH-QC (droite). Les traits en orangé relient les étapes qui sont similaires dans les deux méthodes.	25
Figure 4.1 Températures minimales et maximales annuelles moyennes du jeu de données GRNCH-QC (°C)	27
Figure 4.2 Températures minimales et maximales annuelles moyennes de la grille GCQ (°C)	29
Figure 4.3 Précipitations annuelles moyennes de GCQ, WorldClim2.0, MSWEP V2 et GRNCH-QC (mm)	30
Figure 4.4 Localisation des stations retirées pour validation ST1 (40) et conservées ST2 (30)	32
Figure 4.5 Échantillon ST1 : Corrélacion, RMSE et ratio des écart-types pour la période P2	33
Figure 4.6 Échantillon ST1 : Corrélacion, RMSE et ratio des écart-types pour la période P3'	33
Figure 4.7 Échantillon ST2 : Corrélacion, RMSE et ratio des écart-types pour la période P3'	34
Figure 4.8 Échantillon ST1 : Métriques de précipitations pour cinq stations (P3)	35
Figure 4.9 Échantillon ST2 : Métriques de précipitations pour dix stations (P3)	36
Figure 4.10 Contours des 138 bassins retenus pour la modélisation hydrologique	37
Figure 4.11 Valeurs de KGE en calibration et validation pour la période P2	38
Figure 4.12 Valeurs de KGE en calibration et validation pour la période P3'	38
Figure 4.13 Comparaison des résultats en KGE pour MSWEP V2 et GRNCH-QC (P2)	39
Figure 4.14 Comparaison des résultats en KGE pour MSWEP V2 et GRNCH-QC (P3')	39
Figure 5.1 Démonstration de l'incertitude évaluée sur une cellule de la grille GRNCH-QC (P3)	41
Figure 5.2 Différences de KGE entre les grilles GRNCH-QC et GCQ pour GR4JCN et HMETS	43

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Description des différentes bases de données intégrées dans GRNCH-QC	12
Tableau 3.2 Paramètres ajustables de la méthodologie des températures	21
Tableau 3.3 Paramètres ajustables de la méthodologie des précipitations	21
Tableau 5.1 Itérations des paramètres m et d_{inf} pour une évaluation de l'incertitude	40
Tableau 5.2 Résumé des nombres et types de données inclus dans les grilles GRNCH-QC pour chacune des périodes P1 à P4	42

Résumé

Dans le cadre des travaux de recherche du projet INFO-Crue, l'équipe du Laboratoire HC3 (Hydrologie Climat & Changements Climatiques - ÉTS) a été mandatée pour le développement d'un jeu de grilles observationnelles de précipitations et températures. Ces grilles couvrent la période de 1970 à 2019, leur couverture spatiale s'étend sur tout le Québec à une résolution de 0,1° et les données sont disponibles sur une base journalière. L'objectif de ce projet consiste à créer une combinaison optimale, pour le Québec, des données de sources diverses (observations, réanalyses du climat et données de satellites). Le jeu de données résultant, nommé GRNCH-QC, est destiné en particulier à être utilisé pour le post-traitement des simulations climatiques.

Dans un premier temps, une revue de la littérature a permis de recenser les grilles ou bases de données récentes qui sont d'intérêt dans le cadre du présent projet. Par la suite, une méthodologie adaptée à partir des travaux de Beck et al. (2019) a été programmée dans Matlab afin de créer des grilles de températures et de précipitations sur quatre sous-périodes, établies selon la disponibilité des jeux de données intégrés aux grilles. Les sous-périodes sont les suivantes : P1 (1970 à 1980), P2 (1981 à 2000), P3 (2001 à 2017) et P4 (2018 à 2019). La méthode comporte certains paramètres dont les valeurs proposées dans ce rapport permettent de produire les meilleurs résultats (parmi les essais effectués) pour le Québec.

En comparaison avec d'autres grilles et produits climatiques récents, le jeu de données GRNCH-QC montre des résultats concluants en matière de validation aux stations, en modélisation hydrologique et selon différentes métriques de précipitations et températures.

En plus de la revue de la littérature, ce rapport présente la méthode détaillée pour la génération des grilles, une analyse des résultats des comparaisons effectuées avec d'autres jeux de données ainsi qu'une discussion sur des aspects liés à l'incertitude ainsi qu'aux avantages et limites de GRNCH-QC.

Les grilles de températures et de précipitations sont téléchargeables en format NetCDF (network Common Data Form) et seront transmises aux destinataires du projet, de même que l'ensemble des codes Matlab permettant la génération des grilles.

1. Introduction et contexte du projet

Dans la foulée des événements du printemps 2017, le gouvernement du Québec, en impliquant une diversité d'acteurs, a amorcé une réflexion sur la gestion des risques d'inondation à l'échelle de la province, et ce, dans un contexte d'évolution du climat. Cette réflexion a permis de faire plusieurs constats majeurs, dont celui du besoin d'une cartographie des zones inondables à jour et complète pour le Québec permettant une prise en compte du risque dans l'aménagement du territoire et dans la mise en œuvre de solutions d'adaptation. En réponse à ce constat, le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) en collaboration avec plusieurs partenaires met en œuvre le projet INFO-Crue, visant à :

1. Délimiter les zones inondables par une cartographie pour appuyer l'aménagement du territoire couvrant une grande partie du Québec méridional, en tenant compte des changements climatiques ;
2. Prévoir en temps réel l'étendue des inondations afin de fournir aux autorités une cartographie prévisionnelle des secteurs qui pourraient être inondés dans un horizon de quelques jours.

L'ampleur de ce projet exigeant l'implication de multiples acteurs, Ouranos a été mandaté par le MELCC pour le soutenir dans la réalisation d'INFO-Crue. De ce fait, un financement sur un horizon de cinq ans (2018-2023) a été attribué à Ouranos pour la réalisation de projets permettant de soutenir le ministère dans la conception, le développement et la mise en œuvre d'INFO-Crue. Plusieurs projets seront développés et effectués tout au long de la chaîne de calcul retenue pour effectuer la cartographie dans le but d'améliorer sa performance et la prise en compte de l'incertitude.

Les simulations de débits futurs reposent en partie sur des simulations climatiques post-traitées. Des grilles d'observations sont typiquement utilisées pour effectuer le post-traitement puisque les simulations climatiques doivent être mises à disposition indépendamment de la densité du réseau d'observations météorologiques. Pour le moment, Ouranos procède par la méthode quantile-quantile pour effectuer le post-traitement des simulations climatiques. La méthode quantile-quantile est en cours d'amélioration pour mieux représenter les extrêmes (Rondeau-Genesse & Braun, 2019). Elle sera implémentée pour effectuer la cartographie finale. Au niveau des observations, la grille observationnelle NRCan (McKenney et al., 2011) a historiquement été utilisée lors du post-traitement. Du côté de l'hydrologie, les grilles interpolées de la Direction de la qualité de l'air et du climat (DQAC, au MELCC) sont utilisées pour la calibration des modèles et la reconstruction des débits historiques. De nombreux problèmes dus à ces grilles observationnelles ont été soulevés ces dernières années, notamment une sous-estimation des extrêmes de précipitation.

Pour pallier les nombreux problèmes identifiés dans les dernières années avec la grille observationnelle NRCan, quelques solutions sont envisagées par la Direction de l'expertise

hydrique (DEH). Notamment : le post-traitement de réanalyses; la production d'un nouveau jeu de données fondé sur CaPA (Canadian Precipitation Analysis; Mahfouf et al., 2007).

Le présent projet vient en appui aux travaux menés à la DEH. L'objectif principal du projet est de produire un jeu de données météorologiques historique (1970-2018) sur grille à l'échelle journalière combinant les données de sources diverses (observations, réanalyses du climat et données de satellites). Le jeu de données résultant, nommé GRNCH-QC, est destiné en particulier à être utilisé pour le post-traitement des simulations climatiques.

Plus spécifiquement, le projet vise à :

1. Dresser une liste exhaustive des produits climatiques (des observations sur grille, des réanalyses, etc.) disponibles;
2. Proposer une approche permettant de combiner les données d'observations à celles d'une ou de plusieurs réanalyses.
3. Évaluer la performance climatique des produits mentionnés ci-dessus selon des indicateurs climatiques définis de concert avec Ouranos, la DQAC et la DEHA;
4. Évaluer la performance hydrologique des produits mentionnés ci-dessus selon des indicateurs hydrologiques définis de concert avec Ouranos et la DEHA et ce pour différents modèles hydrologiques.

L'approche proposée sera par ailleurs implantée par la DQAC pour la mise à jour de ses grilles de données.

Ainsi, un jeu de données multi-sources comprenant des grilles journalières de températures minimales et maximales et de précipitations a été créé. La méthodologie et les codes Matlab du jeu de données étant complètement ouverts, la DEH pourra d'ailleurs le bonifier / mettre à jour au fur et à mesure que des données supplémentaires seront disponibles. Ce jeu de données, nommé GRNCH-QC (GRilles Nord-américaines Climatiques par le laboratoire Hc3 – version Québec), est décrit et présenté dans le présent rapport de projet.

L'information des sections subséquentes de ce rapport suit l'organisation suivante, soit : une revue de la littérature récente pertinente; la méthodologie suivie pour la génération du jeu de données; la présentation des grilles de précipitations et de températures obtenues ainsi que leur analyse en fonction de métriques liées au climat et à la modélisation hydrologique; une discussion mettant l'accent sur les aspects liés à l'incertitude ainsi que sur les propriétés du jeu de données; une conclusion.

2. Revue de littérature

Plusieurs facteurs complexifient l'estimation des quantités de précipitations sur un territoire. Notamment, le fait que les événements de précipitations sont des phénomènes intermittents (non-continus), le fait que ces événements varient spatialement et temporellement, ainsi que la

variabilité des types de précipitations observées. De mauvaises estimations des précipitations peuvent hypothéquer la qualité des résultats obtenus en modélisation hydrologique et en prévision météorologique, en plus d'affecter différentes analyses connexes (e.g. production agricole, conception d'infrastructures, bilans hydriques, etc.).

Au fil des années, la science a permis d'établir différentes méthodes de mesure des précipitations, qu'elles soient liquides, solides ou combinées. À ce jour, les stations pluviométriques, les satellites ainsi que les radars sont les techniques les plus utilisées. Chacune comporte cependant des lacunes. Dans le cas des stations pluviométriques, le sous-captage constitue une source d'erreur majeure. Selon Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC; Wang et al., 2017), la principale source de sous-estimation des précipitations au Canada serait l'application du ratio neige-eau 10:1 aux données historiques. Avant les corrections appliquées aux stations d'ECCC, « les données brutes originales de précipitations totales [...] sous-estiment les précipitations totales de 25% pour le nord-est du Canada ». Les effets du vent représentent également une cause d'erreur pour les lectures de pluviomètres (Kochendorfer et al., 2017). De plus, il a été démontré par Mahfouf et al. (2007) que le manque de stations dans les latitudes plus au Nord compromet les estimations de précipitations pour ces régions. La grande dispersion des stations dans certaines régions ainsi que les données parfois discontinues qu'elles enregistrent sont des aspects qui requièrent des solutions modernes.

L'avènement des satellites, vers les années 1970, a donné aux météorologues une nouvelle approche pour mesurer les précipitations au sol : l'utilisation de micro-ondes passives et du rayonnement infra-rouge (IR) mesuré sur les nuages. Bien que cette lecture comporte des lacunes en conditions plus froides (Kidd & Levizzani, 2011), les satellites rendent possible l'obtention de valeurs de précipitations pour des zones où les stations sont inexistantes.

Les progrès informatiques ont également permis d'utiliser les archives pour reconstituer de manière objective les conditions météorologiques dans ce qu'on appelle des réanalyses. Ces réanalyses permettent d'obtenir un portrait du climat sur de longues périodes, normalement dans les environs de 1950 à aujourd'hui. Les principaux avantages sont que les séries de valeurs sont complètes et que la couverture spatiale est souvent globale (grille). Selon la capacité de calcul des groupes de recherche, les réanalyses peuvent être de résolutions spatiale et temporelle variées. Elles permettent généralement de recréer plusieurs dizaines d'années de températures et précipitations. Selon Essou et al. (2016), ces valeurs sont reconnues pour être une bonne alternative à utiliser comme intrant en modélisation hydrologique, dans des régions plus affectées par le manque de stations.

De plus en plus de produits de données climatiques sont des combinaisons de données de stations, satellitaires et de réanalyses, lesquelles permettent de combiner les avantages des différents types de données et d'en compenser les faiblesses. C'est justement en s'appuyant sur ce principe qu'ont été générées les grilles de GRNCH-QC.

Les sections qui suivent recensent et décrivent brièvement différentes bases de données récentes qui ont été considérées pour la production de GRNCH-QC. Des tableaux montrant une liste plus exhaustive des produits disponibles de trouvent à l'Annexe 1.

1. Stations

La base de données SCDNA, pour *Serially Complete precipitation and temperature Dataset for North America* (Tang et al., 2020), est composée de données d'observations de sources différentes : ECCC, GHCN-D, GSOD et diverses stations du Mexique. De nombreuses stations d'Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC), étalées sur le territoire du Canada, sont incorporées dans SCDNA. Les données des stations d'ECCC sont disponibles au <https://climat.meteo.gc.ca>.

Le *Global Historical Climatology Network-Daily Database Daily* (GHCN-D; Menne et al., 2012) contient des données journalières de précipitations et températures pour plus de 80 000 stations, provenant de 180 pays et territoires différents. Les données de GHCN-D sont téléchargeables sur le portail du *National Climatic Data Center* (NCDC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Le *Global Surface Summary of the Day* (GSOD) du *National Centers For Environmental Information* (NCEI) constitue une base de données qui s'étend de 1929 au présent, en considérant que les séries de valeurs de 1973 à aujourd'hui sont les plus fiables et complètes. Les quantités de précipitations (pouces), températures minimales et maximales (F), vitesses moyennes des vents (Kt) et plusieurs autres variables sont contenues dans GSOD. À titre indicatif, Tang et al. (2020) présentent le nombre de stations pour lesquelles un minimum de huit années de données sont disponibles entre 1979 et 2018, respectivement pour les données de GHCN-D, GSOD et ECCC, soient respectivement : 33 026, 4619 et 3634.

À l'échelle du Québec, le réseau de stations avec observateur du MELCC et les stations automatiques des différents partenaires (ECCC, Hydro-Québec, MELCC, MFFP, Rio Tinto, Sopfeu) du Réseau Météorologique Coopératif du Québec (RMCQ) ont permis d'introduire au Québec les valeurs de plusieurs stations non disponibles dans les autres sources. D'autres bases de données récentes sont également disponibles. Entre autres, Livneh et al. (2015), qui contient des stations réparties au Canada (latitude maximale de 53°), aux États-Unis et au Mexique, est une version sur grille qui combine les observations journalières à une résolution spatiale de 1/16° pour la période de 1950 à 2015. Ce jeu de données se démarque par ses corrections appliquées sur deux aspects importants : l'application de corrections de sous-estimations des précipitations liées aux effets orographiques qui sont généralement mal représentés et l'application de corrections pour éviter pour les discontinuités des valeurs situées à la frontière des différents pays (Mexique, États-Unis continentaux et Sud du Canada). Ces corrections permettent d'analyser les données hydrométéorologiques à de plus grandes échelles (e.g. tendances). De plus, la grille de précipitations nommée *Rainfall Estimates on a Gridded Network* (REGEN; Contractor et al., 2020) constitue une grille tirée d'observations journalières pour les années 1950 à 2016. La résolution spatiale de ce produit est de 1° x 1°.

2. Satellites

En ce qui concerne les produits satellitaires, les grilles *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS; Funk et al., 2015), *Climate Prediction Center morphing method* (CMORPH; Joyce et al., 2004) et *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis*, simplifié TMPA-3B42RT (G. Huffman, 2016), sont reconnues comme étant efficaces, et disponibles respectivement entre les latitudes 50°-50°, 60°-60° et 50°- 50°. La grille CHIRPS possède la résolution spatiale (0,05°) la plus fine parmi tous ces produits de satellites. Ses valeurs sont tirées d'observations infra-rouge mesurées sur les nuages (*Cold Cloud Duration* : CCD) et peuvent être employées tant pour des études de tendances climatiques que pour de la modélisation hydrologique. La grille CMORPH, pour sa part, est également basée sur de l'imagerie infra-rouge, combinée à des données de micro-ondes passives (*Passive Microwaves* : PMW), deux types d'observations utilisées par les satellites pour estimer les précipitations. Ce produit est disponible de 1998 à aujourd'hui, et sa résolution spatiale est de 0,07°. En matière de résolution temporelle, CMORPH contient des valeurs au 30 minutes. Le produit satellitaire TMPA-3B42RT du TRMM est disponible à une résolution de 0,25°. Finalement, le *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Cloud Classification System* (PERSIANN-CCS; Ashouri et al., 2015) est une alternative à considérer. PERSIANN est en fait une base de données multi-satellites.

L'enjeu est le suivant lorsqu'on désire incorporer des produits qui proviennent d'observations de satellites en Amérique du Nord : les couvertures temporelles sont généralement courtes (moins de 15 années) et les latitudes plus élevées sont souvent indisponibles. De plus, les grilles de CMORPH, PERSIANN et TMPA-3B42RT possèdent des lacunes lorsqu'il s'agit de quantifier les événements de grandes précipitations en régions montagneuses (Mei et al., 2014). L'avantage des produits multi-satellites est souvent la haute résolution temporelle des données. En effet, les satellites géostationnaires peuvent enregistrer des observations (e.g. précipitations) aux 15 ou 30 minutes, selon le cas.

3. Réanalyses

La réanalyse la plus récente et souvent utilisée, dernièrement, lors d'études hydrologiques ou climatiques provient du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (*EMCWF*) et se nomme ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021). Avec une résolution temporelle horaire et une résolution spatiale de 0,1°, la réanalyse atmosphérique ERA5-Land contient une panoplie de données climatiques essentielles : températures, précipitations cumulées, vitesses de vent, pressions atmosphériques, humidité relative, etc.

La réanalyse du *Climate Forecast System*, développée par le *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), est divisée en deux périodes distinctes, soient de 1979 à 2010 (CFSR; Saha et al., 2010) et de 2011 à aujourd'hui (CFSv2; Saha et al., 2014). Il s'agit en fait d'une re-prévision (*reforecast*) des données météorologiques, tout comme le *Regional Deterministic Reforecast System* (RDRS; Gasset et al., 2021), offerte à une résolution horizontale de 10 km.

Finalement, la *Japanese 55-year Reanalysis* (JRA-55; Ebita et al., 2011) de la *Japan Meteorological Agency* (JMA) est un produit de réanalyse qui s'étend de 1958 à 2013 (initialement), soit une couverture de 55 ans. Depuis, les données sont mises à jour afin de prolonger la série de valeurs jusqu'à aujourd'hui, à partir du *JMA Climate Data Assimilation System* (JCDAS). Cette réanalyse est le fruit de plusieurs études, principalement dans le but de corriger les biais des réanalyses (e.g. ERA-40 du EMCWF) et d'augmenter la résolution spatiale de celles-ci. Ces progrès permettent aujourd'hui d'utiliser JRA-55 pour des études de tendances climatiques spécifiques.

4. Grilles multi-sources

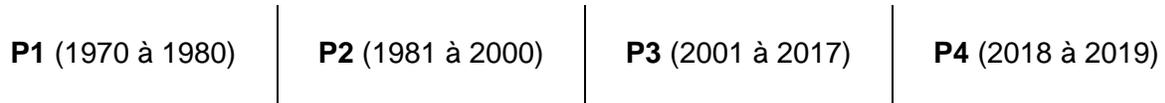
Des combinaisons de type stations-satellites (G. Huffman et al., 1995) ont déjà été produites dans le passé, tout comme des études sur l'introduction de réanalyses pour corriger les valeurs des grilles interpolées à partir de stations (Simmons et al., 2010; Q. Sun et al., 2018) ou encore sur la correction du biais des réanalyses à l'aide de données aux stations (HydroGFD3.0; Berg et al., 2021). Mais ce n'est que tout récemment que des produits multi-sources de précipitations sont en circulation. Les produits principaux qui incorporent des données de réanalyses, de satellites et de stations sont MSWEP V2 (Beck et al., 2019) et FROGS (Roca et al., 2019), qui ont des résolutions spatiales respectives de 0,25° et 0,1°. Ces produits sont globaux, donc générés en incorporant des stations de partout dans le monde. Généré encore plus récemment, le *Serially complete Earth* dataset (SC-Earth; Tang et al., 2021) fournit des précipitations, températures moyennes, écarts de températures, points de rosée et vitesses de vent pour les années 1950 à 2019, encore une fois à l'échelle du globe. Des corrections basées sur la réanalyse ERA5 (H. Hersbach, 2016) sont incluses dans cette grille, en plus des observations de GSOD et GHCN-D, qui sont fusionnées à partir de 15 stratégies différentes basées sur du *machine learning*, du *quantile mapping* et des interpolations spatiales.

3. Méthodologie

Ce chapitre présente les détails de la méthodologie utilisée pour la création du jeu de données GRNCH-QC. Tel que mentionné en introduction, il s'agit d'un jeu de données multi-sources, inspiré de MSWEP V2 mais optimisé (valeurs de paramètres) pour les données du Québec, en plus d'être généré avec des jeux de données plus récents et, parfois, propres au Québec. À partir de ce point dans le document, les expressions « jeu de données », « grilles de précipitation et de températures » et « grilles » sont utilisées de manière interchangeable, en référence au jeu de données GRNCH-QC.

Le Tableau 1 présente les différentes bases de données de températures et de précipitations intégrées dans les grilles GRNCH-QC. La provenance des bases de données y est indiquée selon la notation suivante : stations météorologiques « S », réanalyses « RA » ou produits satellitaires « SAT ». Les résolutions temporelle et spatiale de chaque jeu de données sont aussi précisées. Il était nécessaire de diviser en « périodes » la durée totale couverte par le jeu de données, puisque certains produits ont des durées incompatibles (e.g. SCDNA débute en 1979, alors que

CHIRPS débute en 1981). Afin d'éviter de juxtaposer des bases de données sur de très courtes périodes et de maximiser le nombre de produits utilisés entre 1970 et 2019, les périodes sont divisées de la façon suivante :



Dans le Tableau 1, les périodes utilisées sont présentées en rouge pour les températures et en bleu pour les précipitations. Le gris est utilisé pour les produits destinés seulement aux précipitations. Un filtre de sélection (voir l'Étape 1 de la section 3.2) est appliqué aux stations de manière indépendante pour chaque période, ce qui fait en sorte que le nombre total de stations intégrées varie pour P1, P2, P3 et P4. Il est à noter qu'en cours de projet certaines bases de données initialement identifiées ont été laissées de côté étant donné qu'elles n'apportaient aucune valeur ajoutée au jeu de données GRNCH-QC. C'est le cas, par exemple, de HydroGFD3.0 (Berg et al., 2021) qui fournit des valeurs très similaires à celles de la réanalyse ERA5, considérant par ailleurs qu'ERA5-Land fournissait de meilleurs résultats, pour le présent projet, qu'ERA5.

La méthodologie employée pour générer les températures est très similaire à celle des précipitations. Les sous-sections suivantes décrivent le processus de pondération et de fusion de toutes les bases de données. Dans le cas des précipitations, un parallèle est fait avec la procédure de MSWEP V2, telle que décrite dans Beck et al. (2019). Les Tableau 2 et Tableau 3 présentent les valeurs des paramètres utilisées pour produire respectivement les grilles de températures et de précipitations.

Tableau 1 Description des différentes bases de données intégrées dans GRNCH-QC.

Nom	Type	Résolution temporelle (période)	Résolution spatiale (couverture)	Référence	T		P	
					P1	P2	P3	P4
SCDNA Serially-Complete precipitation and temperature Dataset for North America	S	Journalier (1979-2018)	- (Am. du Nord)	Tang et al. (2020)				
ECCC Environnement et Changements Climatiques Canada	S	Journalier (1950-2018)	- (Canada)	-				
RMCQ Réseau météorologique coopératif du Québec	S	Journalier (1960-présent)	- (Québec)	-				
MELCC Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques	S	Journalier (1970-présent)	- (Québec)	-				
ERA5-Land European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Land Reanalysis 5	RA	Horaire (1950-présent)	0,1° (Monde)	Muñoz-Sabater et al. (2021)				
CFSR/CFSv2 Climate Forecast System Reanalysis (NCEP by NOAA) (tiré de de RDA-NCAR)	RA	Journalier Horaire (1979-2021)	0,5° (Monde)	Saha et al. (2014)				
RDRSv2 (P) Regional Deterministic Reforecast System (tiré de CaSPAr)	RA	Horaire (2000-2017)	10 km (Monde)	Gasset et al. (2021)				
TMPA-3B42RT (P) TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (tiré de NASA)	SAT	Tri-horaire (2000-présent)	0,25° (50°-50°)	G. J. Huffman et al. (2010)				
CHIRPSv2.0 (P) Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data	SAT	Journalier (1981-présent)	0,05° (50°-50°)	Funk et al. (2015)				
CMORPH (P) Climate Prediction Center morphing method (tiré de NCEP/NOAA)	SAT	Journalier (1998-présent)	8 km (60°-60°)	Joyce et al. (2004)				
MSWEP V2* (P) * Comparaison seulement	-	Tri-horaire (1979-2017)	0,1° (Monde)	Beck et al. (2019)				

3.1 Harmonisation

Afin de simplifier la démarche de création des grilles de températures et de précipitations, un ajustement des résolutions spatiale et temporelle des grilles intégrées doit d'abord être effectué. L'objectif étant de travailler avec des grilles qui ont toutes une résolution spatiale de $0,1^\circ$ et une résolution temporelle journalière. Spatialement, la méthode d'interpolation du plus proche voisin permet d'augmenter/réduire la définition de certains produits qui ne sont disponibles qu'à des résolutions supérieure/inférieure à $0,1^\circ$. Cette résolution est utilisée ici puisque ERA5-Land (résolution de $0,1^\circ$) est disponible sur une très longue période pour les températures et précipitations. Également, avec ce choix, seule la définition de la grille CHIRPS est diminuée. La méthode de l'interpolation cubique, aussi testée, demande un temps de calcul élevé et ne permet pas de conserver les extrêmes, ce qui est primordial pour les précipitations. Cette étape d'harmonisation est préliminaire à la méthodologie présentée dans ce rapport, en plus de permettre de comparer les produits entre eux. Pour les produits ayant un pas de temps sous-journalier, une simple agrégation des valeurs de températures (moyenne) et précipitations (somme) est appliquée. Toutes les étapes qui suivent seront effectuées à partir des grilles harmonisées.

3.2 Grilles de températures

Cette section présente la méthodologie utilisée pour produire les grilles des températures. Ces étapes sont répétées pour les températures minimales et maximales, et les températures moyennes sont ensuite calculées à partir de ces deux grilles. Au final, les réanalyses ERA5-Land et CFSR sont incorporées pour les périodes P2 à P4, alors que la réanalyse ERA5-Land est le seul produit utilisé et combiné aux stations pour P1 (voir Tableau 1). Les étapes suivantes sont en concordance avec les étapes du script MATLAB qui accompagne le projet.

1. Filtre des stations

Seules les stations ayant un minimum de deux années (2 x 365 jours) consécutives de valeurs sont utilisées*. Ce tri assure un échantillon raisonnablement fiable de valeurs pour le calcul des corrélations à chaque station. Suite à cette sélection, certaines stations choisies contiennent toujours des valeurs manquantes, mais ces valeurs sont compensées par les températures des réanalyses.

*Exception : pour la période P4, dont la durée n'est que de deux années, toutes les stations sont utilisées.

2. Attribution des poids à chaque produit intégré

Les poids attribués à chacune des grilles de températures intégrées au jeu de données sont mesurés pour chaque cellule, en fonction de la corrélation avec la station la plus rapprochée. Voici les étapes à répéter pour chaque grille, sur la totalité des stations :

- a. Extraction des températures de la station pour la plus longue série consécutive de journées (avec valeurs) ;

- b. À partir de cette série de données, calcul de la moyenne mobile sur 31 jours ;
- c. Calcul des écarts entre la série et sa moyenne mobile, pour obtenir une première série d'écarts ;
- d. Extraction des températures de la cellule la plus proche, pour la même période ;
- e. Calcul de l'écart entre les températures de cette cellule et la moyenne mobile de la station, pour obtenir une deuxième série d'écarts ;
- f. Calcul de la corrélation entre les deux séries d'écarts, puis élévation au carré pour obtenir le poids à cet endroit.

Suite à cette étape, à l'emplacement de chaque station, un poids est attribué à chacune des grilles de températures. Tout comme dans MSWEP, aucun ajustement n'a été appliqué par rapport au gradient de température qui pourrait exister entre une station et un point de grille, dont l'élévation peut varier.

3. Interpolation des poids de chaque produit intégré

Cette étape consiste à générer des cartes de pondération propres à chaque grille de températures qui est intégrée au jeu de données. Une interpolation par plus proche voisin à partir des poids calculés à chaque station (point précédent) est appliquée pour créer les cartes de pondération.

4. Fusion des grilles de températures (t_{fusion})

À partir des cartes de pondérations de l'étape précédente, les différents produits sont fusionnés en utilisant une moyenne pondérée.

Par exemple, pour les températures minimales pour une cellule et pour un jour donné :

Poids par grille (w^{ρ_i})	Température minimale (t_i)	Grille fusionnée (t_{fusion})
$w^{\rho_1} = 0,8$	$t_1 = -9^{\circ}\text{C}$	$\frac{(0,8 * -9) + (0,6 * -4)}{0,8 + 0,6}$ $= -8,29^{\circ}\text{C}$
$w^{\rho_2} = 0,6$	$t_2 = -4^{\circ}\text{C}$	

5. Interpolation des données aux stations ($t_{stations}$)

Dans le but d'incorporer les valeurs des stations à la grille fusionnée (t_{fusion}), il est nécessaire de rapporter les valeurs aux stations sur une grille appelée $t_{stations}$. Cette procédure s'effectue de la façon suivante, pour chaque cellule de la grille :

- a. Extraction des températures des cinq stations les plus près de la cellule et classement de ces stations selon leur proximité de la cellule ;
- b. Attribution d'un poids à chacune des cinq stations selon leur éloignement de la cellule (la cellule la plus près possède toujours un poids forcé à « 1 »). La formule appliquée pour les quatre autres stations est la suivante :

$$w_i = e^{(-d/d_{inf})}$$

où d est la distance de la station i (km);
 d_{inf} est le rayon d'influence des stations (établi par essais-erreurs à 45 km).
 Voir le Tableau 2 pour les paramètres de chaque période.

- c. Utilisation d'une moyenne pondérée pour obtenir les valeurs de températures de chaque cellule. Exemple des températures minimales pour un seul jour :

Poids par station (w_i)	Température minimale (t_i)	Grille des stations ($t_{stations}$)
$w_1 = 1,00$	$t_1 = -6^\circ\text{C}$	$\frac{(1,00 * -6) + (0,61 * -7) + (0,52 * -5) + (0,51 * -4) + (0,01 * -13)}{1,00 + 0,61 + 0,52 + 0,51 + 0,01}$ $= -5,68^\circ\text{C}$
$w_2 = 0,61$	$t_2 = -7^\circ\text{C}$	
$w_3 = 0,52$	$t_3 = -5^\circ\text{C}$	
$w_4 = 0,51$	$t_4 = -4^\circ\text{C}$	
$w_5 = 0,01$	$t_5 = -13^\circ\text{C}$	

6. Combinaison des stations interpolées et des grilles (t_{final})

a. Attribution du poids des stations interpolées

On crée une carte de pondération des stations, qui sera utilisée à la dernière étape de la méthodologie. Voici le calcul effectué sur chaque cellule pour obtenir les pondérations de $t_{stations}$:

$$w_{stations} = m \times e^{(-d/d_{inf})}$$

où m est un paramètre calibré pour chaque période;
 d est la distance de la station la plus près de la cellule (km);
 d_{inf} est le rayon d'influence des stations (établi à 45 km).

Voir le Tableau 2 pour les paramètres de chaque période.

b. Moyenne pondérée des deux grilles (stations et réanalyses)

Les deux grilles sont combinées grâce à une moyenne pondérée. Pour chaque cellule, le poids des stations $w_{stations}$ et la somme des poids w^g des grilles fusionnées sont utilisés. Ces poids sont d'abord rapportés en poids relatif (somme des poids = 1), puis ensuite multipliés par les valeurs respectives de températures de $t_{stations}$ et t_{fusion} . C'est cette étape qui permet d'obtenir t_{final} .

3.3 Grille de précipitations

Cette section décrit les étapes suivies pour la production de la grille des précipitations. Ces étapes sont similaires pour toutes les périodes évaluées, à l'exception de la période P1 qui ne

comporte qu'une seule réanalyse et aucun produit satellitaire. Aucune moyenne pondérée (étape 7) n'est donc effectuée entre les jeux de données pour cette période puisque seule ERA5-Land est utilisée et combinée aux stations. Aucune distinction entre les conditions chaudes et froides n'est appliquée (étape 4). Les étapes suivantes sont en concordance avec les étapes du script MATLAB, en pièce jointe de ce document.

1. Heures d'enregistrement aux stations

Certains décalages peuvent être observés entre l'heure d'enregistrement des données d'une station pluviométrique et l'heure réelle de la précipitation observée. Pour remédier à cette situation, une correction a été appliquée de façon à décaler dans la bonne direction les valeurs des stations (± 1 jour). Cette correction se base sur les valeurs horaires de la réanalyse ERA5 (H Hersbach et al., 2018), à une résolution spatiale de 30 km. La méthode suivie pour chaque station est la suivante :

- a. Extraction des données horaires de la cellule d'ERA5 à proximité de la station ;
- b. Itérations de décalages appliqués aux valeurs de la cellule :
Décalage variant de -36 heures à +36 heures. Pour chaque décalage testé, une corrélation de Spearman est calculée entre la station (données journalières) et la cellule (données horaires agrégées). Parmi les 73 décalages testés, on retient celui qui correspond à la corrélation la plus élevée. Si le décalage absolu est supérieur à 12 heures, on considère que les précipitations de cette station doivent subir un décalage de ± 1 jour. Sinon, aucun décalage. Le décalage pourrait, par exemple, être de +18 heures, ce qui signifie que la valeur est en fait enregistrée le lendemain.

Les décalages du RMCQ et MELCC sont généralement plutôt faibles puisque l'enregistrement des observations se fait dans une seule province/territoire. Toutefois, un décalage peut exister entre ces observations et les grilles de précipitations utilisées. Cette étape permet simplement d'identifier de potentielles incohérences entre les grilles incorporées et les stations quant aux quantités de pluie enregistrées quotidiennement. Les valeurs de SCDNA peuvent présenter certains décalages, souvent observés à proximité des frontières ou encore aux points médians entre des fuseaux horaires.

2. Pondération (période complète)

Pour chaque produit intégré, une valeur de pondération est calculée en se basant sur les stations. En résumé, cette pondération est égale à la corrélation du produit avec les données de stations pour des moyennes non-mobiles sur trois jours (r_{3jrs}), élevée au carré (r_{3jrs}^2). Les étapes suivies pour chaque station sont présentées ci-dessous :

- a. Extraction des données de la cellule du produit, à proximité de la station ;
- b. Ajustement des données de la station selon l'heure d'enregistrement : Si le décalage absolu est supérieur à 12 heures, on considère que les précipitations de cette station doivent subir un décalage de ± 1 jour. Sinon, aucun décalage ;
- c. Calcul des moyennes sur trois jours pour la cellule et la station ajustée ;
- d. Calcul des poids, basés sur les corrélations entre la cellule et la station (moyennes sur trois jours) :

- i. Si moins de 365 jours sont disponibles pour le calcul d'une corrélation et que le produit en est la cause, le poids est forcé à 0 (corrélation nulle entre le produit et la station) puisqu'on désire omettre volontairement le produit à cet endroit ;
- ii. Si moins de 365 jours sont disponibles pour le calcul d'une corrélation, le poids est forcé à « NaN » (impossible de la calculer) ;
*La différence entre un poids de 0 et un poids de « NaN » sera perceptible lors de l'interpolation des poids sur une carte.
- iii. Si un minimum de 365 jours consécutifs est disponible pour le calcul d'une corrélation, celle-ci est calculée entre les valeurs moyennes sur trois jours du produit et de la station. Le poids est égal à cette corrélation élevée au carré.

On obtient ainsi une valeur de pondération des produits à l'emplacement de chaque station.

2.5 Filtre des stations

Une station pour laquelle aucun produit n'obtient un poids d'au moins 0,4 est retirée des étapes suivantes (Collischonn et al., 2008). Également, d'autres critères permettent de retirer des stations présentant des valeurs erronées. Les stations sont retirées si :

- a. Elles contiennent plus de 20% de valeurs manquantes (choix méthodologique établi par essais-erreurs) ;
- b. La valeur maximale de précipitation est présente au plus trois fois (permet d'éviter les séries de données tronquées; aucune station retirée pour ce critère) ;
- c. Plus de 99,5% des jours n'ont aucune précipitation ($< 0,5$ mm/jour).

Pour chacune des trois périodes, un total de 36,77% (P1), 31,13% (P2) et 32,38% (P3) des stations ont ainsi été retirées. Les nombres de stations conservées pour chaque période sont présentés dans un tableau à l'Annexe 2.

3. Fréquence de jours humides (réanalyses)

Les réanalyses sont reconnues pour contenir des valeurs attribuées à de la bruine artificielle sur des journées où aucune pluie n'est observée (Skok et al., 2016; X. Sun & Barros, 2010; Zolina et al., 2004). Une correction a donc été appliquée aux réanalyses intégrées dans le produit final, en se basant sur les travaux de Beck et al. (2019). Cette correction est faite en deux parties. La première partie est expliquée ici et la seconde l'est à l'étape 6. Pour chaque station :

- a. Extraction des valeurs de précipitations pour le point de grille de réanalyse le plus près;
- b. Extraction des valeurs de précipitations pour la station et sélection des années où la précipitation annuelle diffère de moins de 30% par rapport à la précipitation annuelle de la grille de réanalyse ;
- c. Calcul de la moyenne annuelle du nombre de jours humides (où $P \geq 0,5$ mm ; Akinremi et al., 1999; Haylock et al., 2008) pour ces années, sur le point de grille de la réanalyse et la station. Ces moyennes sont nommées respectivement *JHgrille* et *JHstation*. En ciblant ces événements, on cherche à isoler les jours où la précipitation des réanalyses était minimale ;

- d. Calcul du biais du nombre annuel moyen de jours humides (*biaisJH*) de la réanalyse : $biaisJH = JH_{grille} / JH_{station}$
(e.g. : $120/110 = 1,09$ ou 9% « trop » de jours humides)
- e. Si le biais calculé pour cette station excède 400%, on considère que ce point ne sera pas utilisé lors de l'interpolation des biais, à l'étape 6. Ce critère sert à éviter d'interpoler les biais pour des endroits où la réanalyse et la station pourraient avoir un écart totalement aberrant. Le critère est élevé, car certaines stations peuvent présenter peu de données mais être utiles pour les valeurs sur de courtes périodes fiables, on ne doit donc pas les écarter lors de la correction des réanalyses.

4. Pondération (conditions chaudes et froides)

L'étape 2. est répétée ici en séparant les conditions froides des conditions chaudes. On obtient une pondération en conditions chaudes pour chaque produit et une pondération en conditions froides pour les réanalyses seulement. Les satellites ne sont pas incorporés dans la grille finale en conditions froides, puisque leur capacité à détecter les précipitations à basse température est limitée (Kidd & Levizzani, 2011). Un seuil de température de 5°C est établi pour distinguer les conditions froides et chaudes.

5. Cartes de pondérations et biais

L'objectif de cette étape est de convertir les valeurs ponctuelles de poids et biais calculées aux emplacements des stations en une carte qui sera utilisée dans les étapes suivantes. Chaque produit obtiendra donc une carte de pondération, deux cartes de pondération en conditions chaudes et froides (chaudes seulement pour les satellites) et, dans le cas des réanalyses, une carte de biais du nombre annuel moyen de jours humides.

Pour passer de valeurs ponctuelles aux valeurs interpolées sur une carte, on calcule pour chaque cellule de la grille une médiane des 10 stations les plus près. Cette médiane devient la valeur de la grille à cet endroit. Il s'agit de la même procédure pour les poids et les biais : la méthode d'interpolation est la même.

6. Correction des réanalyses (*biaisJH*)

La correction apportée aux données des réanalyses dépend de la carte des biais établie pour chaque réanalyse. Conceptuellement, les biais positifs des précipitations des réanalyses sont évalués entre chaque station météorologique et le point de grille de la réanalyse le plus près. Ces biais sont par la suite interpolés sur chaque point de la grille de la réanalyse. Les biais interpolés sont par la suite utilisés pour corriger le nombre de jours humides de la réanalyse. La précipitation éliminée par cette procédure est redistribuée sur les jours humides restants de telle sorte que la précipitation annuelle demeure inchangée. La procédure est itérative et permet d'éliminer les journées de bruine artificielle, une réanalyse à la fois. Les détails méthodologiques sont les suivants :

- a. Calcul de la précipitation annuelle moyenne pour chaque cellule ;
- b. Seulement pour les cellules où le *biaisJH* interpolé est supérieur à 1, on calcule le nombre total de jours humides sur la période ;

- c. Pour les mêmes cellules, on calcule le nombre « objectif » de jours humides annuels moyen, en utilisant le *biaisJH* interpolé :

$$JH_{obj} = JH_{grille} / int_biaisJH$$

- d. On utilise un incrément de d (mm) de façon itérative pour tronquer les jours où $P < d$. On applique la procédure suivante :

- i. Un total de d mm est soustrait aux précipitations de la réanalyse (les valeurs de d augmentent de 0,1 mm pour chaque itération);
- ii. On rapporte la précipitation annuelle moyenne (PAM) de la réanalyse à sa valeur initiale :

$$rescaledRA = RAcorr * (initialPAM / corrPAM)$$

- iii. On refait le calcul du *biaisJH* suite à cette itération ;
 - iv. On répète ces étapes tant que le *biaisJH* n'est pas égal au nombre objectif de jours humides annuels moyen.
- e. Finalement, on corrige la réanalyse en soustrayant la valeur de d obtenue pour chaque cellule et en réajustant à la précipitation annuelle moyenne initiale (facteur multiplicatif).

7. Fusion des grilles de réanalyses et satellites (*p_fusion*)

Toujours basée sur les cartes de pondération en conditions froides et chaudes, cette étape consiste à fusionner les produits satellites (conditions chaudes seulement) aux produits de réanalyses (conditions froides et chaudes). La méthode utilisée est une moyenne pondérée. Par exemple, pour une cellule où la température du jour est de 9°C dans la période P2 (un produit satellite et deux réanalyses), le calcul de précipitation pourrait être le suivant :

Poids par grille (w_i)	Précipitation journalière (p_i)	Grille fusionnée (p_fusion)
$w_1^g = 0,85$	$p_1 = 9,0 \text{ mm}$	$\frac{(0,85 * 9,0) + (0,63 * 8,1) + (0,59 * 9,2)}{0,85 + 0,63 + 0,59}$ $= 8,78 \text{ mm}$
$w_2^g = 0,63$	$p_2 = 8,1 \text{ mm}$	
$w_3^g = 0,59$	$p_3 = 9,2 \text{ mm}$	

8. Ajustement aux moyennes climatiques

Afin d'éviter toute forme de surestimation des précipitations annuelles moyennes (PAMs), les réanalyses sont mises à l'échelle en fonction de la moyenne climatique de WorldClim2.0 (Fick & Hijmans, 2017) avec correction de biais (Beck et al., 2020). La méthode utilisée permet de conserver la variabilité interannuelle des précipitations. Pour chaque cellule, on extrait d'abord 12 valeurs moyennes de précipitations à partir de WorldClim2.0. C'est en fait la référence. Pour chaque mois, les précipitations totales de *p_fusion* pour cette même cellule sont ensuite mises à l'échelle pour concorder avec la moyenne climatique. Voici un exemple pour le mois de janvier sur la période P3 :

1. Moyenne des 17 mois de janvier qui se trouvent dans P3 ;
2. Calcul du facteur de correction : $ref_janvier / p_fusion_janvier$;
3. Multiplication de *p_fusion* par ce facteur de correction pour corriger (hausse ou baisse) les valeurs des mois de janvier ;
4. Ces étapes sont répétées pour les 12 mois de l'année.

9. Correction finale basée sur les stations (p_{final})

Pour la dernière étape, le principe est de corriger la grille fusionnée (p_{fusion}) à partir des données des stations jugées fiables. La méthode est identique à celle des températures :

a. Interpolation des données aux stations ($p_{stations}$)

Il est nécessaire de rapporter les valeurs aux stations sur une grille de $0,1^\circ$. Cette procédure s'effectue de la façon suivante, pour chaque cellule de la grille :

- i. Extraction des précipitations des cinq stations les plus près de la cellule et classement de ces stations selon leur proximité de la cellule ;
- ii. Attribution d'un poids à chacune des cinq stations selon leur éloignement de la cellule (la cellule la plus près possède toujours un poids forcé de 1). La formule attribuée aux quatre autres stations est la suivante :

$$w_i = e^{(-d/d_{inf})}$$

où d est la distance de la station i (km)

d_{inf} est le rayon d'influence des stations (varie selon la période)

Voir le Tableau 2 pour les paramètres de chaque période

- iii. Utilisation d'une moyenne pondérée pour obtenir les précipitations de cette cellule. Exemple pour un seul jour :

Poids par station (w_i)	Précipitations (p_i)	Grille des stations ($p_{stations}$)
$w_1 = 1,00$	$p_1 = 3,0 \text{ mm}$	$\frac{(1,00 * 3,0) + (0,61 * 2,1) + (0,52 * 0,0) + (0,51 * 4,0) + (0,01 * 0,5)}{1,00 + 0,61 + 0,52 + 0,51 + 0,01}$ $= 2,39 \text{ mm}$
$w_2 = 0,61$	$p_2 = 2,1 \text{ mm}$	
$w_3 = 0,52$	$p_3 = 0,0 \text{ mm}$	
$w_4 = 0,51$	$p_4 = 4,0 \text{ mm}$	
$w_5 = 0,01$	$p_5 = 0,5 \text{ mm}$	

b. Combinaison des stations interpolées et de la grille fusionnée (p_{final})

- i. Attribution du poids des stations interpolées :

On crée une carte de pondération des stations, qui sera utilisée à la dernière étape de la méthodologie. Voici le calcul effectué sur chaque cellule pour obtenir les pondérations de $p_{stations}$:

$$w_{stations} = m \times e^{(-d/d_{inf})}$$

où m est un paramètre calibré pour chaque période
 d est la distance de la station la plus près de la cellule (km)
 d_{inf} est le rayon d'influence des stations (varie selon la période)
 Voir le Tableau 2 pour les paramètres de chaque période

- ii. Moyenne pondérée des deux grilles ($p_{stations}$ et p_{fusion}) :
 Les deux grilles sont combinées grâce à une moyenne pondérée. Pour chaque cellule, le poids des stations et la somme des poids des grilles fusionnées sont utilisés. C'est cette étape qui permet d'obtenir p_{final} .

c. Correctifs mineurs

Après vérifications sur les cartes finales de précipitations annuelles moyennes de la période P2, certaines stations qui présentent un sous-captage trop important (Wang et al., 2017) sont retirées de l'étape 9, puis l'étape est exécutée de nouveau pour cette période. La règle suivante est appliquée : toute station présentant un biais négatif supérieur à 35% par rapport à la moyenne de WorldClim2.0 corrigée sera retirée du produit final. Cette règle permet de réajuster à la hausse les cartes de précipitations annuelles moyennes.

Tableau 2 Paramètres ajustables de la méthodologie des températures

	P1	P2	P3	P4
d_{inf} (km) Rayon d'influence des stations	45	45	45	45
m (sans unité) Facteur de pondération des stations	1,3	0,2	0,2	2

Tableau 3 Paramètres ajustables de la méthodologie des précipitations

	P1	P2	P3	P4
d_{inf} (km) Rayon d'influence des stations	35	35	35	35
m (sans unité) Facteur de pondération des stations	0,3	3,2	5	5

Voici, à la Figure 1, un exemple des cartes de pondération de p_{fusion} (somme des grilles incorporées) et de $p_{stations}$ sur la période P3. On retrouve également ci-dessous les cartes de pondérations de chaque produit incorporé dans les périodes P2 et P3.

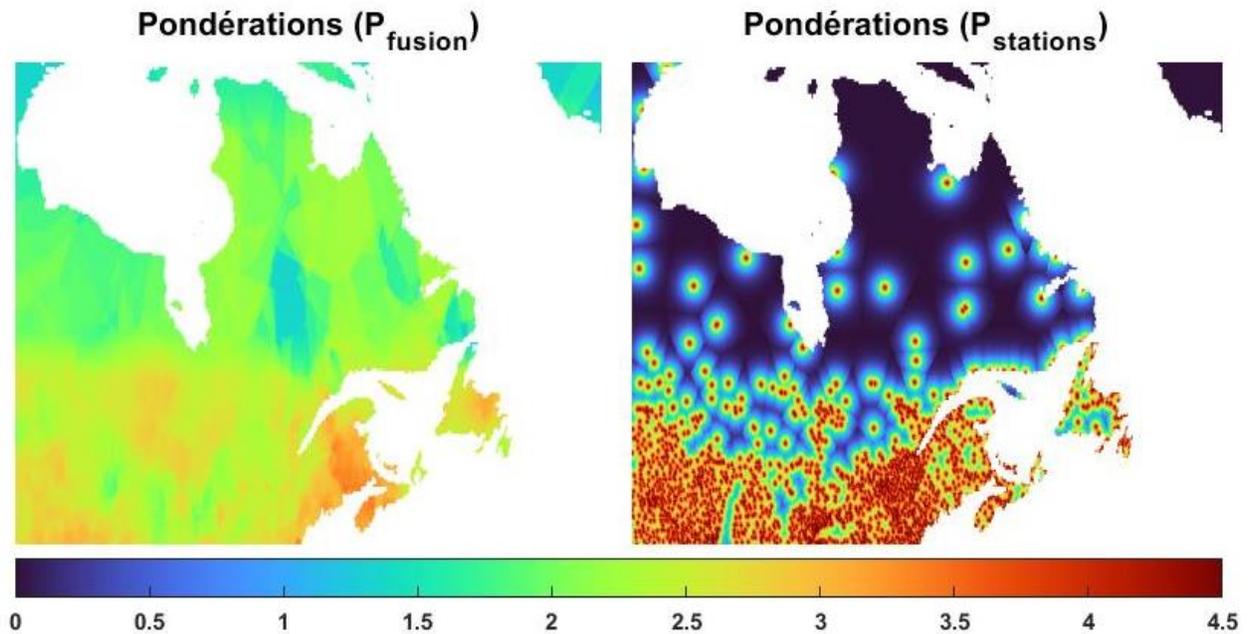


Figure 1 Pondérations de p_{fusion} et $p_{stations}$ (période P3) avant la production de p_{final}

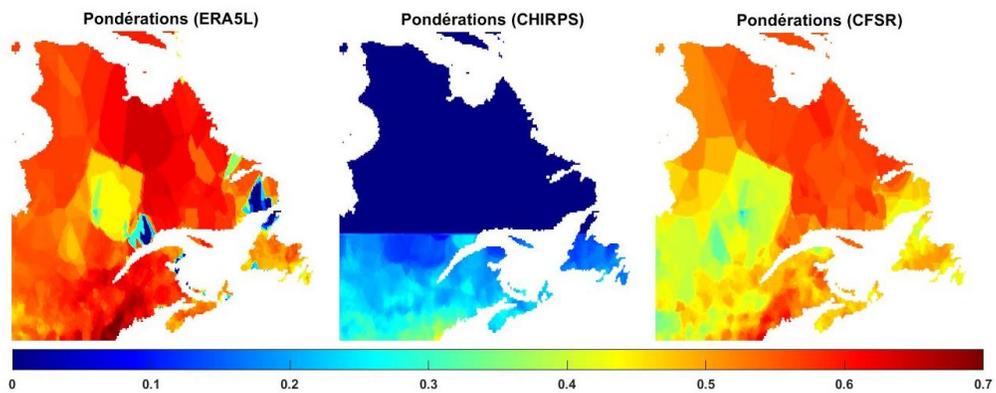


Figure 2 Cartes de pondérations des différents produits intégrés dans P2

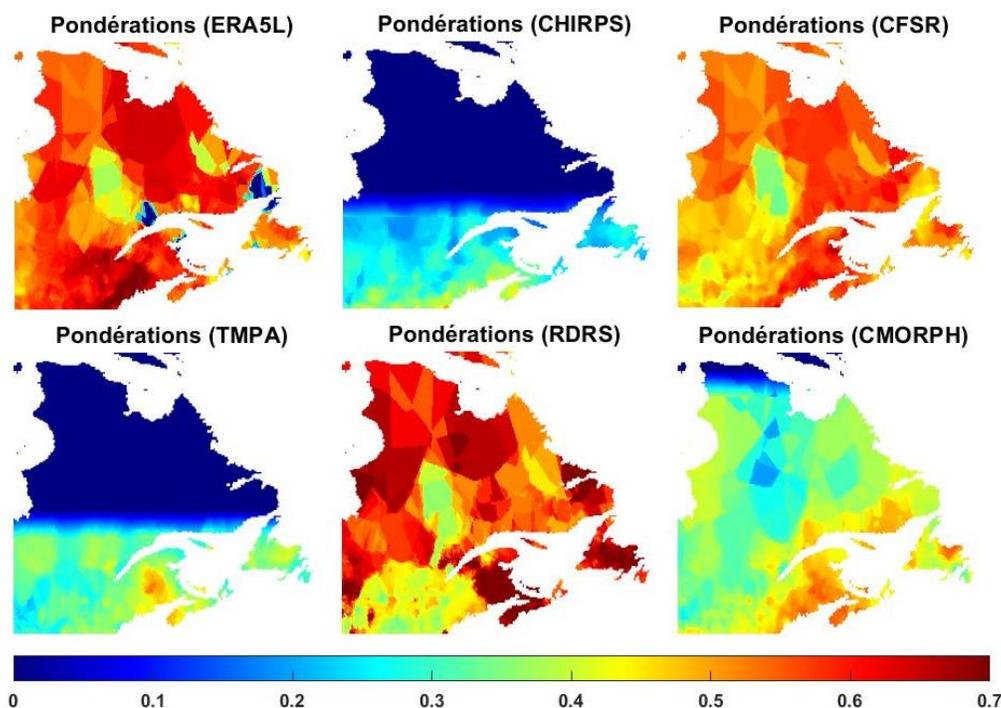


Figure 3 Cartes de pondérations des différents produits intégrés dans P3

3.4 Comparaison avec la méthodologie MSWEP V2

Étant donné que la production du jeu de données GRNCH-QC est fortement inspirée de la méthode utilisée pour produire la grille de précipitation MSWEP V2 (Beck et al., 2019), cette section établit un parallèle entre les schémas de production des deux grilles de précipitation, lesquels sont présentés à la *Figure 4*. Bien que la production de la grille GRNCH-QC demeure empreinte de la philosophie générale de la méthode de MSWEP V2, des ajustements ont été apportés afin de préciser ou ajuster certains points qui étaient moins clairement présentés par Beck et al. (2019), ou encore afin d'adapter notre méthode en fonction des jeux de données qu'elle intègre et pour le territoire du Québec. Les principales similitudes entre les deux méthodes, sont les suivantes :

1. Filtres appliqués aux stations

La façon de sélectionner les stations à inclure pour chaque période de la méthodologie est inspirée des critères appliqués dans MSWEP V2. Par exemple, le retrait des stations qui ne comportent que des zéros ou pour lesquelles aucun produit ne démontre une corrélation supérieure à 0,4 est une étape de MSWEP V2 qui est similaire à ce qui a été fait dans le présent projet.

2. Procédure pour ajuster l'heure d'enregistrement aux stations

Cette procédure est exactement identique à celle de MSWEP V2. Le test de différents décalages entre -36 heures et 36 heures permet en effet d'établir (inférer) l'heure

d'enregistrement de la station. Malgré que les stations se trouvent sur le domaine du Québec, certains décalages peuvent être observés puisque les sources varient (SCDNA, RMCQ, ECCC, etc.).

3. Pondération des produits

La méthode de calcul des poids à attribuer aux produits est identique à celle de MSWEP V2 : on évalue la corrélation (précipitations sur trois jours) entre les valeurs de la station la plus près et celles d'un produit en particulier. On élève cette corrélation au carré pour obtenir le poids correspondant et ensuite on interpole les poids sur une carte. Ces cartes de pondérations sont d'ailleurs générées de la même façon que celles de MSWEP V2.

4. Correction des réanalyses

Cette procédure est identique à celle de MSWEP V2, à l'exception du choix des réanalyses intégrées dans la grille GRNCH-QC.

5. Correction finale basée sur les stations

Seule la portion du calcul de $p_stations$ diffère légèrement de la méthodologie de MSWEP V2. En effet, la méthodologie présentée ici pondère les stations selon leur proximité pour le calcul du poids, comme dans MSWEP V2, mais aussi pour les valeurs de précipitations. En résumé : les valeurs des cinq stations les plus rapprochées de chaque point de grille sont considérées dans $p_stations$. Bien entendu, une station très éloignée de la cellule n'aura pas un grand impact sur la précipitation calculée, puisqu'il s'agit d'une moyenne pondérée et que le poids dépend de la distance, selon la formule indiquée à l'étape 9 de la méthodologie pour les précipitations. Il est à noter que, tout comme dans MSWEP, le paramètre m établi dans GRNCH-QC est le résultat d'essais et erreurs, en plus de dépendre du nombre total de produits intégrés pour chaque période. Comme MSWEP possède le même nombre de produits intégrés pour toutes les périodes, son paramètre m est constant (4).

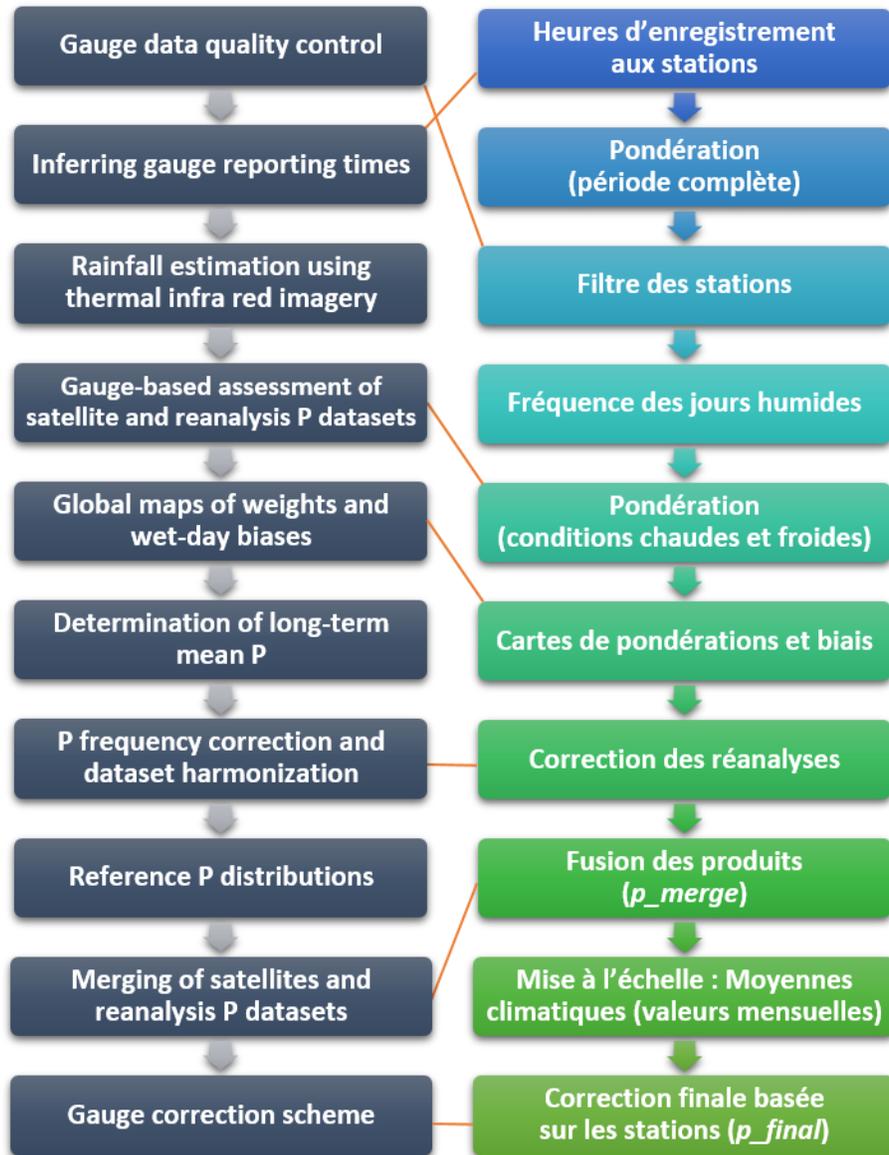


Figure 4 Schémas de production des grilles de précipitation MSWEP V2 (gauche) et GRNCH-QC (droite). Les traits en orangé relient les étapes qui sont similaires dans les deux méthodes.

4. Analyse des résultats

Cette section vise à présenter et analyser les résultats selon différentes perspectives : moyennes annuelles, métriques sur les températures et les précipitations, et modélisation hydrologique. Dans les sous-sections qui suivent, des comparaisons seront effectuées par rapport à la Grille Climatique Quotidienne (GCQ; précipitations et températures minimale et maximale journalières; Bergeron, 2016) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), par rapport à des stations du MELCC sélectionnées et par rapport aux différents produits (satellites et réanalyses) utilisés dans les grilles GRNCH-QC. Pour les précipitations en particulier, des comparaisons par rapport à WorldClim2.0 et à MSWEP V2 sont également présentées. WorldClim2.0 est utilisé à l'étape 8 de la section 3.3 alors que MSWEP V2 est le produit le plus près, méthodologiquement, du jeu de données GRNCH-QC. GCQ est générée à partir de l'interpolation des observations journalières aux stations du MELCC par la méthode du krigeage ordinaire. Le jeu de données résultant est disponible à une résolution de 0,1°.

4.1 Grilles des valeurs moyennes annuelles

La *Figure 5* montre les valeurs moyennes annuelles de températures minimales et maximales générées dans les grilles GRNCH-QC pour les périodes P1, P2 et P3. La *Figure 6* montre, à titre indicatif, les valeurs moyennes annuelles des températures minimales et maximales de GCQ pour P2 et P3. L'augmentation des températures dues au changement climatique (CC) d'origine anthropique est perceptible, surtout pour les températures minimales et pour le Nord du Québec. Cette augmentation ne peut toutefois être authentifiée par ce genre de carte, puisqu'un trop grand nombre de variable entre en jeu dans sa création (choix méthodologiques, nombre de grilles incorporées, règles de tri des stations, etc.). La période P1 montre des températures minimales plus chaudes, surtout dans la portion sud du Québec, que P2 et P3. Il peut s'agir du résultat d'une combinaison de facteurs : période plus courte (10 années), absence de CFSR et stations d'ECCC en remplacement de celles de SCDNA. Notamment, l'étude de Sabarly (2015) avait montré que les températures maximales moyennes de la réanalyse CFSR, pour la période 1979-2000, avaient tendance à être plus froides sur le Québec par rapport aux observations de la grille NRCan. Les données de CFSR font partie des combinaisons de P2, P3 et P4, mais pas de celle de P1.

En guise de comparaison, la *Figure 4.2* montre les valeurs moyennes annuelles de températures minimales et maximales pour les grilles GCQ du MELCC, pour les périodes P1, P2 et P3. L'Annexe 3 montre le détail, par saison, des valeurs moyennes de températures maximales et minimales pour les périodes P1 et P3, pour GCQ et GRNCH-QC.

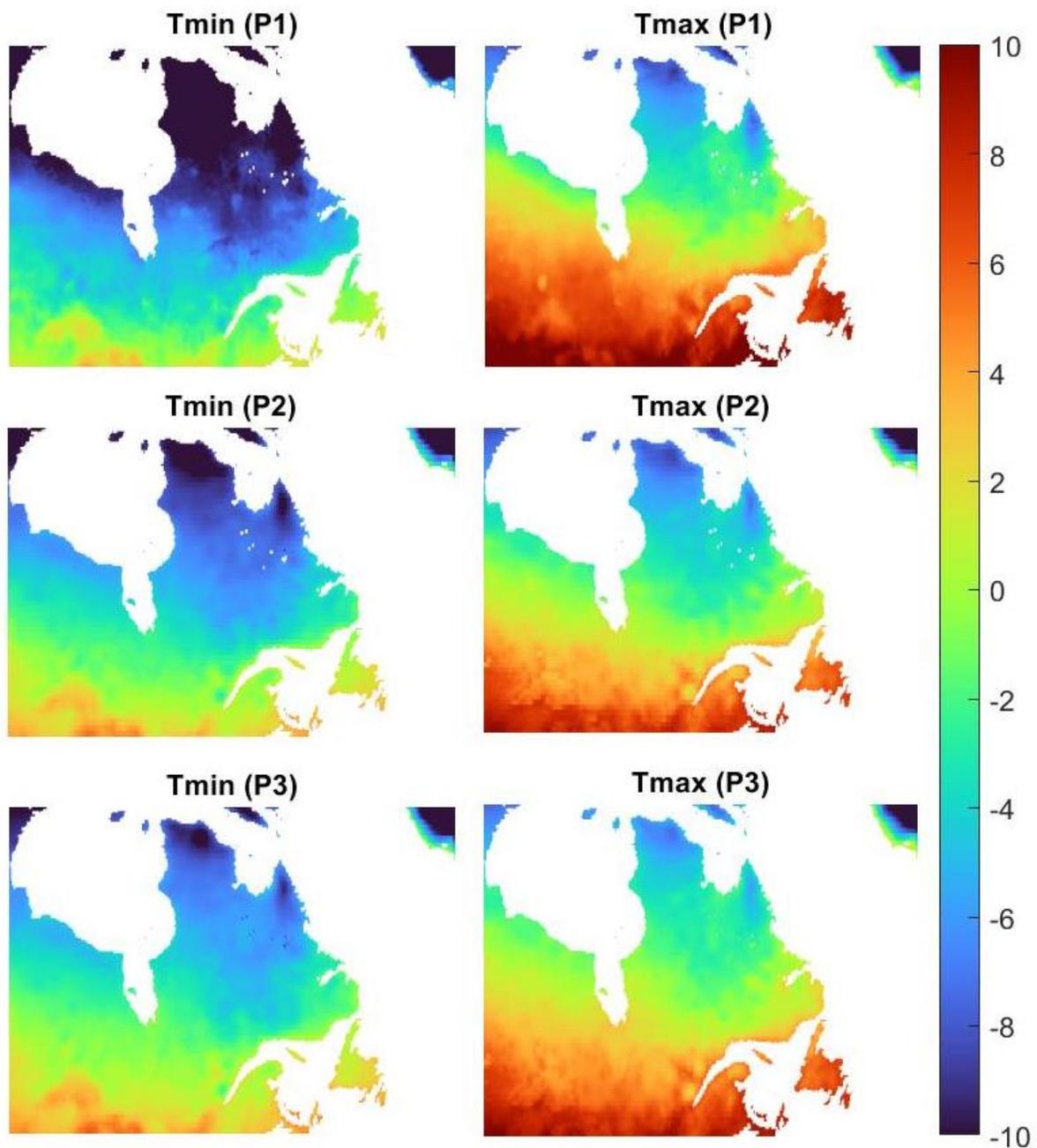


Figure 5 Températures minimales et maximales annuelles moyennes du jeu de données GRNCH-QC (°C)

La Figure 7 présente une comparaison entre les précipitations annuelles moyennes de quatre jeux de données différents : GCQ, GRNCH-QC, WorldClim2.0 et MSWEP V2. On y voit les quantités moyennes annuelles de précipitations pour les périodes P2 et P3, à une résolution spatiale de 0,1°.

Il est possible de constater que le niveau de détail de la grille GRNCH-QC est relativement élevé, tout comme celui de WorldClim2.0, qui est initialement à une résolution de 10 km. Dans les deux cas, les variations spatiales des quantités de précipitation liées aux variations de l'élévation, notamment, sont reproduites. On constate que la grille GCQ, qui est basée sur une interpolation à partir des stations du MELCC, ne couvre pas en détail toute la superficie du Québec. Entre autres, les régions plus éloignées, principalement au Nord, où les stations se font beaucoup plus rares, comportent un niveau de détail beaucoup plus faible. Dans le cas de MSWEP V2, généré à partir d'un ensemble de produits et d'une méthode dont s'inspirent les présents travaux, il est fort possible que le plus faible niveau de détail dans la variabilité spatiale des précipitations soit expliqué par la prise en compte d'un plus faible nombre de stations sur le territoire du Québec. Rappelons que le présent projet s'intéresse spécifiquement à la province de Québec alors que MSWEP V2 est un produit global. Dans l'ensemble, les quatre produits comparés semblent produire des valeurs annuelles similaires pour les zones urbanisées. Ce phénomène est dû à une plus grande disponibilité des données aux stations dans pour ces endroits. À titre d'exemple, la précipitation annuelle moyenne à Montréal se situe entre 1 100 et 1 200 mm pour tous les produits analysés, ce qui représente un écart de 9%, alors que les différences entre les produits peuvent atteindre des valeurs de 35% dans certains endroits de la province.

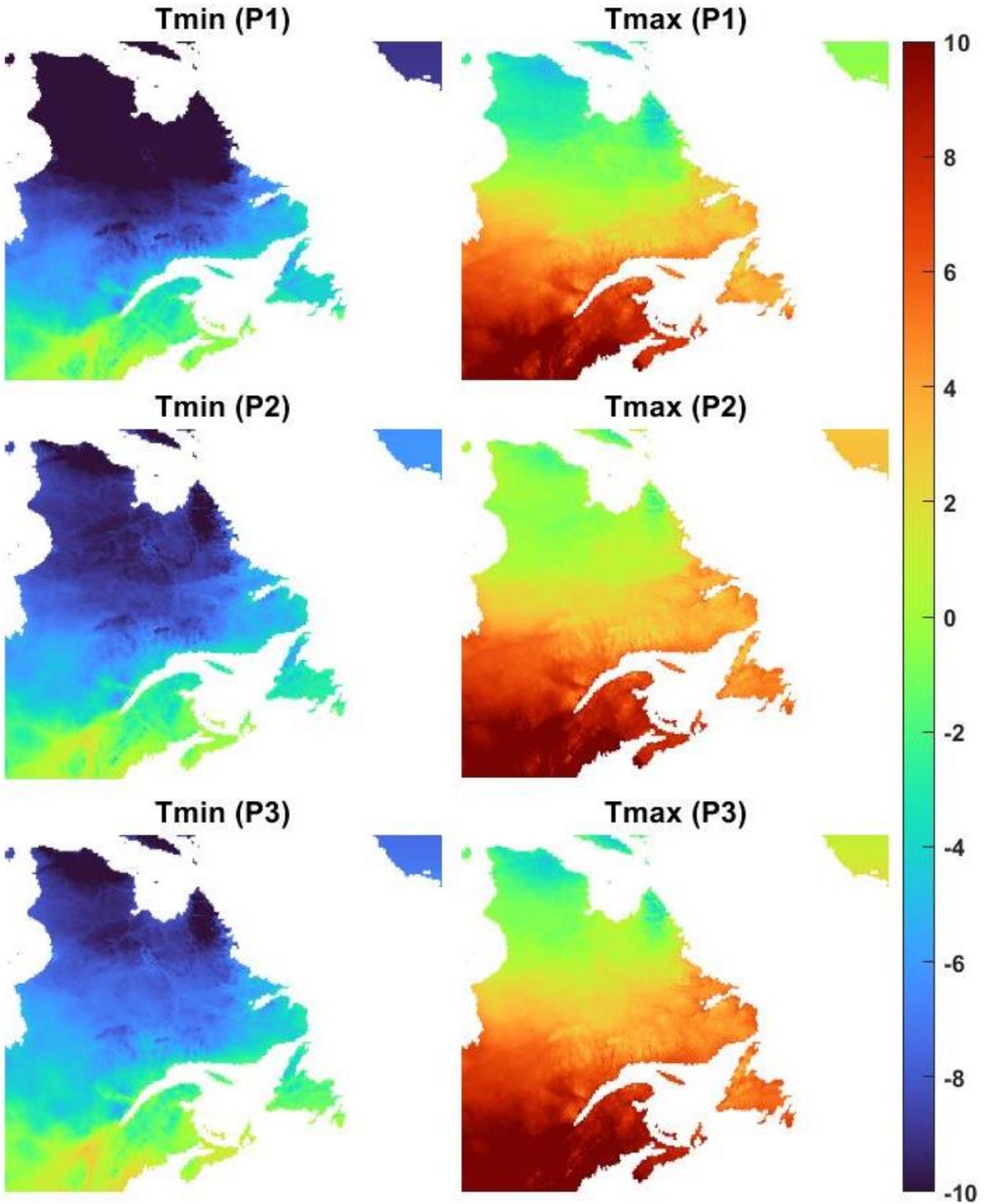


Figure 6 Températures minimales et maximales annuelles moyennes de la grille GCQ (°C)

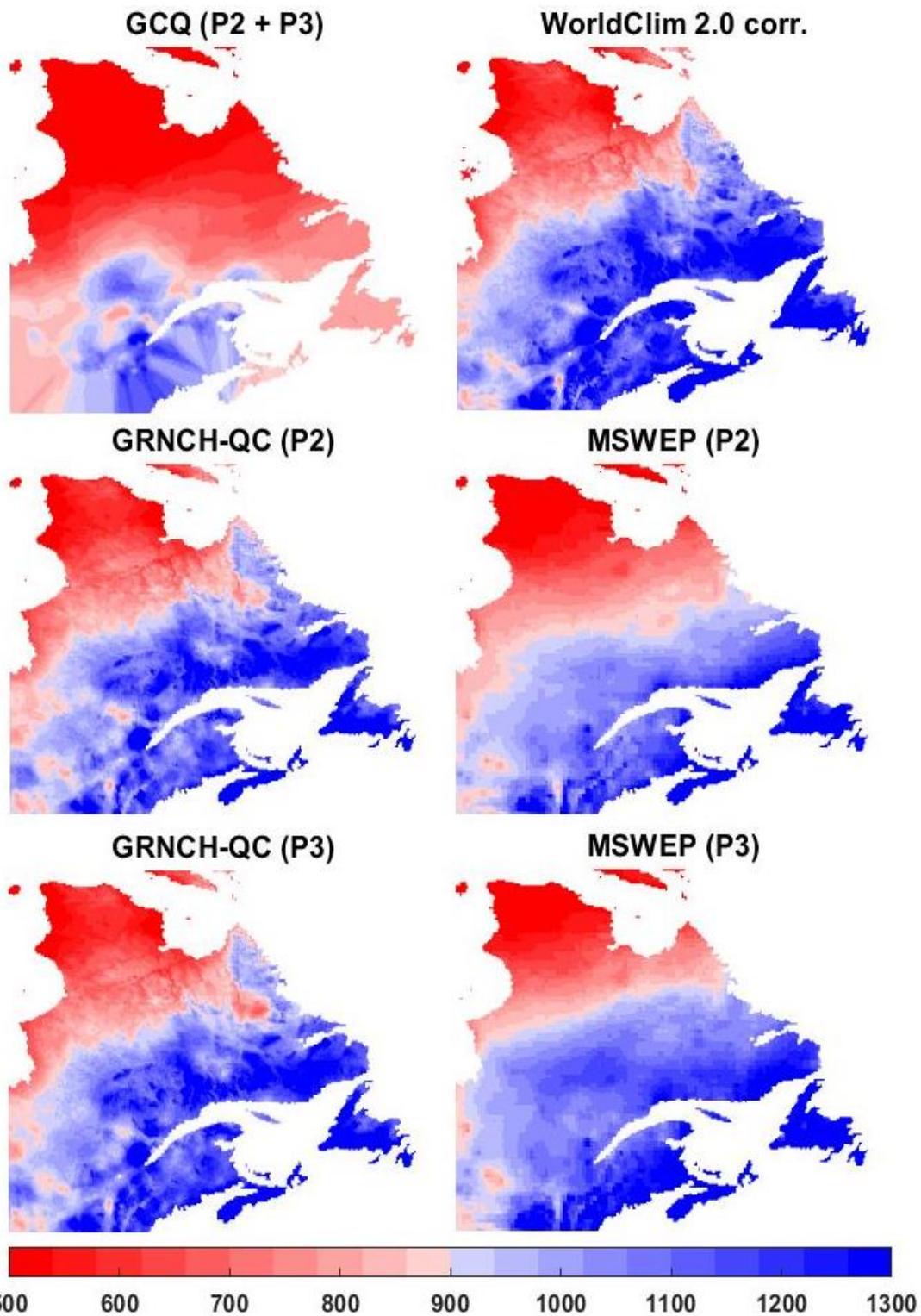


Figure 7 Précipitations annuelles moyennes de GCQ, WorldClim2.0, MSWEP V2 et GRNCH-QC (mm)

4.2 Métriques de précipitations

Plusieurs métriques de précipitations permettent d'évaluer ou de comparer des grilles de précipitations entre elles (Leung et al., 2022; O'Brien et al., 2019). Les valeurs utilisées à titre de référence pour l'évaluation de ces métriques sont tirées d'observations (stations), malgré qu'elles puissent présenter des erreurs et incertitudes : valeurs manquantes, valeurs nulles consécutives, sous-captage, etc. Pour cette raison, il est primordial de sélectionner des stations présentant des séries fiables (autant que faire se peut) à utiliser en validation. Deux échantillons de stations, nommés ST1 et ST2, sont sélectionnés pour évaluer un ensemble de métriques. La Figure 8 illustre l'emplacement des stations ST1 et ST2. Certaines stations de l'échantillon ST2 sont situées hors du Québec.

L'échantillon ST1 est composé de 40 stations, qui ont été retirées du schéma de production, pour être utilisées en guise de validation¹. L'objectif est de tester la capacité de la méthodologie à simuler les observations aux points de grilles de ces stations. La sélection des 40 stations s'appuie sur les critères suivants :

- Couverture quasi-complète des trois périodes les plus longues (P1 à P3 ; 1970 à 2017) ;
- Moins de 20% de valeurs manquantes ;
- Moins de 99,5% de zéros (pour éviter les stations remplies de zéros) ;
- La valeur maximale de précipitation est présente au plus trois fois (permet d'éviter les séries de données tronquées ; aucune station retirée pour ce critère).

L'échantillon ST2 est composé de 30 stations qui sont incluses dans le schéma de production de la grille de précipitations. Ces stations se retrouvent dans différentes régions climatiques et à différentes altitudes, ce qui permet de tracer un portrait global du jeu de données GRNCH-QC à l'échelle régionale.

La Figure 9 présente les valeurs de corrélations de Pearson, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et ratio des écart-types sur la période P2 pour les grilles de précipitations GRNCH-QC, GCQ et MSWEP V2. Ces valeurs sont obtenues en comparant les données des 40 stations de l'échantillon ST1, présenté ci-haut, avec les valeurs des points de grille correspondant à chaque station. La Figure 10 présente les résultats pour la période nommée P3' (2001 à 2015). Cette période se conforme à la période de disponibilité de MSWEP V2 (1981 à 2015), malgré que la grille GRNCH-QC s'étende jusqu'à 2019.

¹ Les 40 stations de ST1 ont été incluses dans la version finale des grilles GRNCH-QC, après que cette étape de validation ait été réalisée.

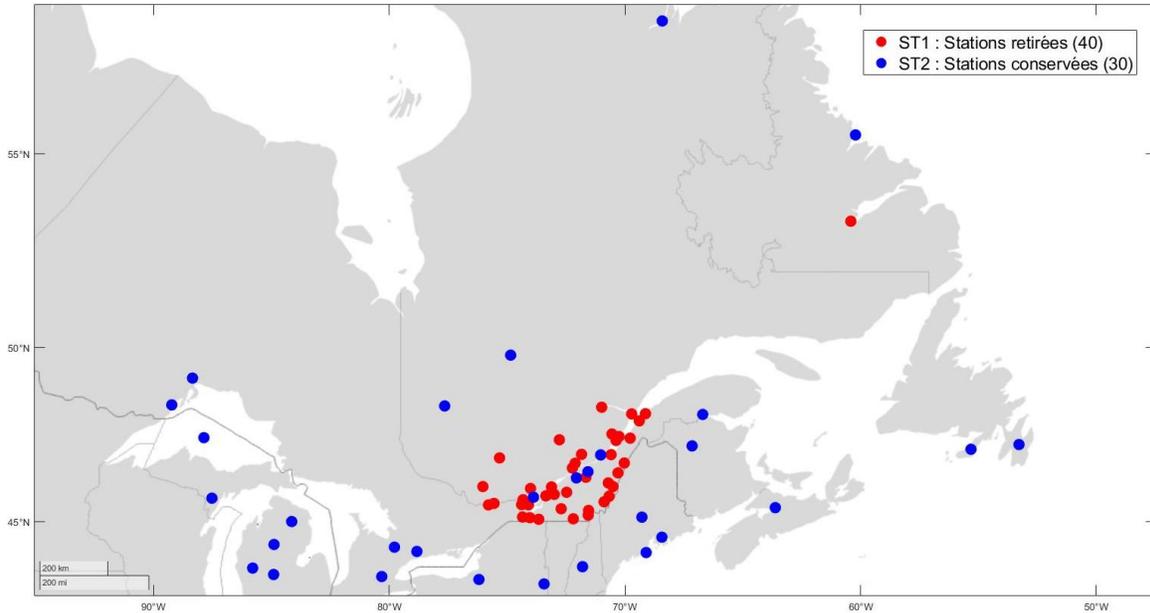


Figure 8 Localisation des stations retirées pour validation ST1 (40) et conservées ST2 (30)

Tant pour la période P2 que pour la période P3', la grille de précipitation GRNCH-QC présente des corrélations, RMSE et ratios des écarts-types, par rapport aux stations, qui sont systématiquement meilleurs que ceux de MSWEP V2. À titre comparatif, la grille GCQ, qui n'exclut pas les 40 stations, présente des performances plus élevées que celles de GRNCH-QC, ce qui est normal puisque les 40 stations sont incorporées dans cette grille.

La Figure 11 présente, sous le même format, les résultats pour les stations de l'échantillon ST2 sur la période P3'. Certaines de ces stations se situent à l'extérieur du Québec, donc la grille GCQ n'est pas incluse dans la comparaison. Cette figure permet de constater que les résultats pour la grille GRNCH-QC se comparent avantageusement à ceux de MSWEP V2. Ces résultats étaient attendus, jusqu'à un certain point, étant donné que les stations de ST2 ont été utilisées pour la génération de la grille GRNCH-QC. Dans le cas de MSWEP V2, il est impossible de savoir si ces stations sont incorporées ou non dans la génération de la grille.

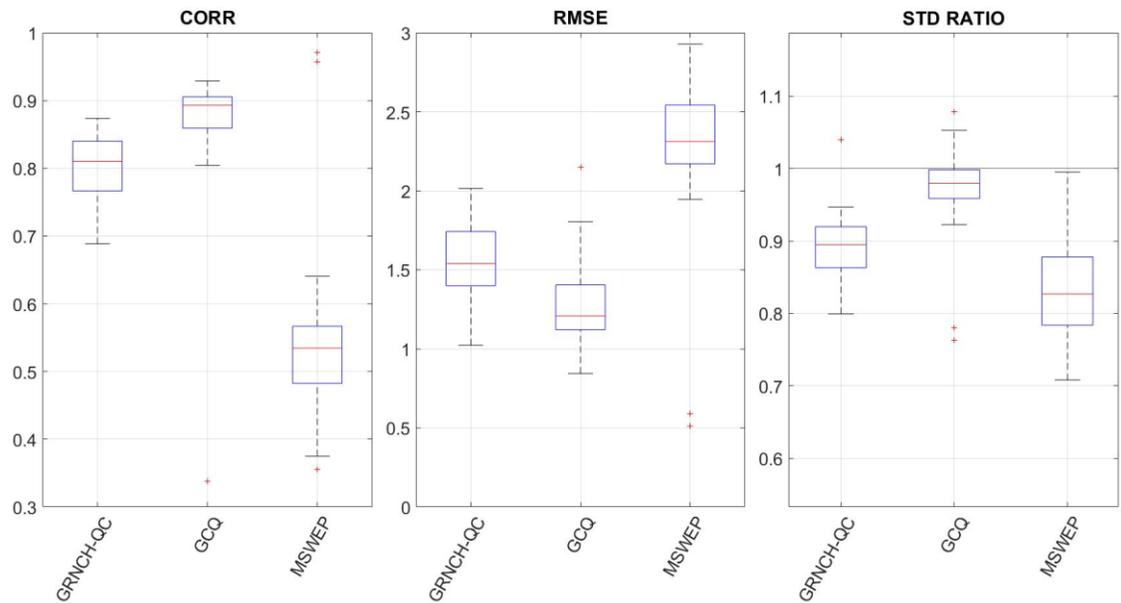


Figure 9 Échantillon ST1 : Corrélation, RMSE et ratio des écart-types pour la période P2

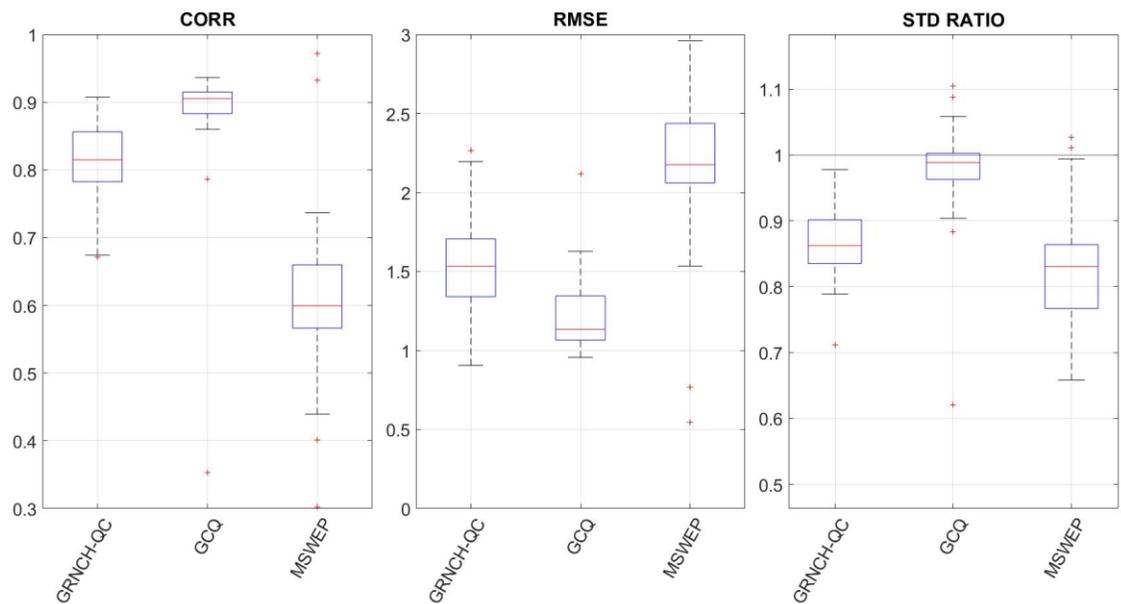


Figure 10 Échantillon ST1 : Corrélation, RMSE et ratio des écarts-types pour la période P3'

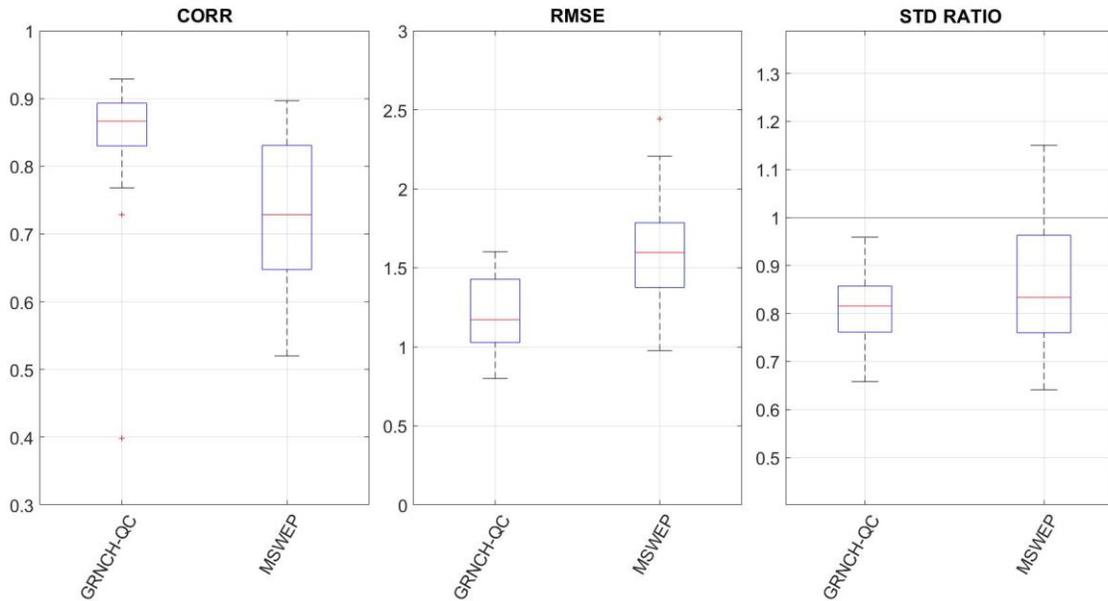


Figure 11 Échantillon ST2 : Corrélation, RMSE et ratio des écarts-types pour la période P3'

Les figures ci-dessous présentent les résultats pour un ensemble de métriques de précipitations provenant de NAC2H (Richard Arsenault et al., 2020), un jeu de données hydroclimatiques regroupant, entre autres, des valeurs corrigées de projections climatiques ainsi que des valeurs d'observations (précipitations, températures et débits), pour l'Amérique du Nord. Des comparaisons sont effectuées entre les séries journalières de précipitations de GRNCH-QC et de MSWEP V2, et celle de stations triées des échantillons ST1 (Figure 12) et ST2 (Figure 13), pour la période P3. Les stations prises en compte sont indiquées sur chacune des figures et seules les années complètes sont utilisées pour ces comparaisons. Les quatre premières métriques considérées, toujours calculées entre la série temporelle à la station et la série de la cellule correspondante de la grille GRNCH-QC ou de MSWEP V2, sont : le biais, la corrélation, le pourcentage de jours pour lequel les deux séries sont en accord à savoir qu'ils sont humides, le pourcentage de jours pour lequel les deux séries sont en désaccord (jours humides à la station, jours secs dans la grille GRNCH-QC ou dans MSWEP V2). Pour les autres métriques, les résultats sont montrés pour chacune des trois séries temporelles. Il s'agit : du nombre maximal de jours humides consécutifs ($P > 1$ mm/jour), du nombre maximal de jours secs consécutifs ($P \leq 1$ mm/jour), du nombre annuel moyen de jours pour lesquels la précipitation est de 10 mm ou plus, de la précipitation hivernale moyenne, de la précipitation estivale moyenne, de la valeur moyenne annuelle de précipitation maximale journalière et de la valeur moyenne annuelle de précipitation maximale sur trois jours consécutifs.

Les résultats des deux figures montrent que le jeu de données GRNCH-QC se compare de manière équivalente, voire souvent avantageuse, à MSWEP V2. On note, de façon générale

pour les deux grilles, une surestimation du nombre de jours humides consécutifs et (panneaux f) et dans quelques cas, une sous-estimation du nombre de jours secs consécutifs (panneaux g). Les quantités moyennes de précipitations estivales (panneaux j) et hivernales (panneaux i) sont généralement bien reproduites, à l'exception d'une surestimation en hiver par rapport aux stations 14 et 38, lesquelles montrent également un comportement plus sec que les autres (*Figure 12*). Le comportement de la station 23 (*Figure 4.9 g*) en ce qui a trait au nombre de jours secs consécutifs, est isolé. Après inspection, il s'agit d'une station qui avait effectivement passé les critères de sélection mais qui comportait deux séries de zéros de plus de 100 jours. Certains de ces zéros sont fort possiblement des valeurs manquantes mais il n'est pas possible de faire la distinction. Les valeurs provenant des deux grilles sont plutôt en accord et montrent des valeurs beaucoup plus faibles.

Pour ce qui est des précipitations plus extrêmes (panneaux h, k et l), les grilles MSWEP V2 et GRNCH-QC les sous-estiment dans certains cas et les surestiment dans d'autres, mais de façon généralement moins importante dans le cas de GRNCH-QC.

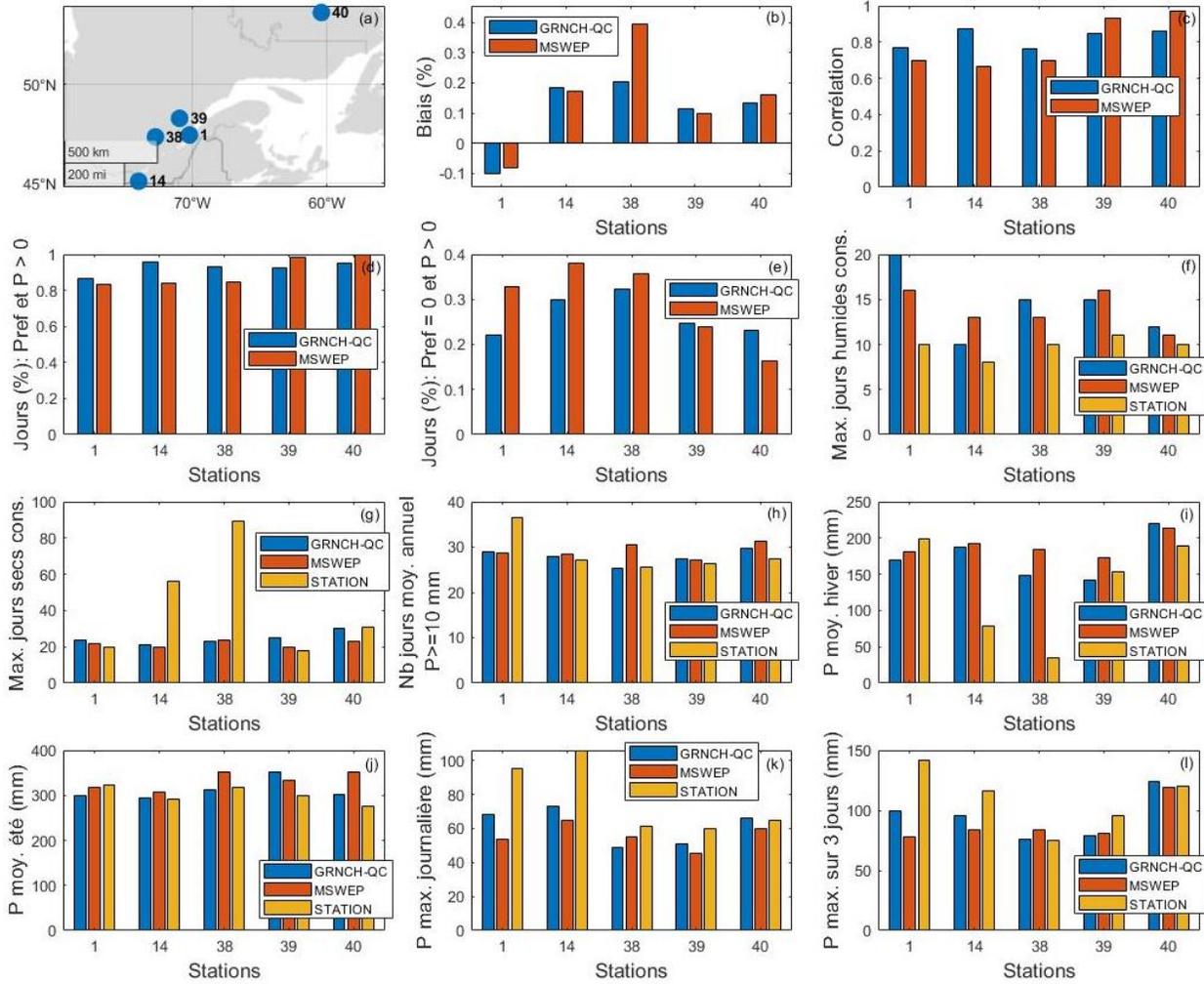


Figure 12 Échantillon ST1 : Métriques de précipitations pour cinq stations (P3)

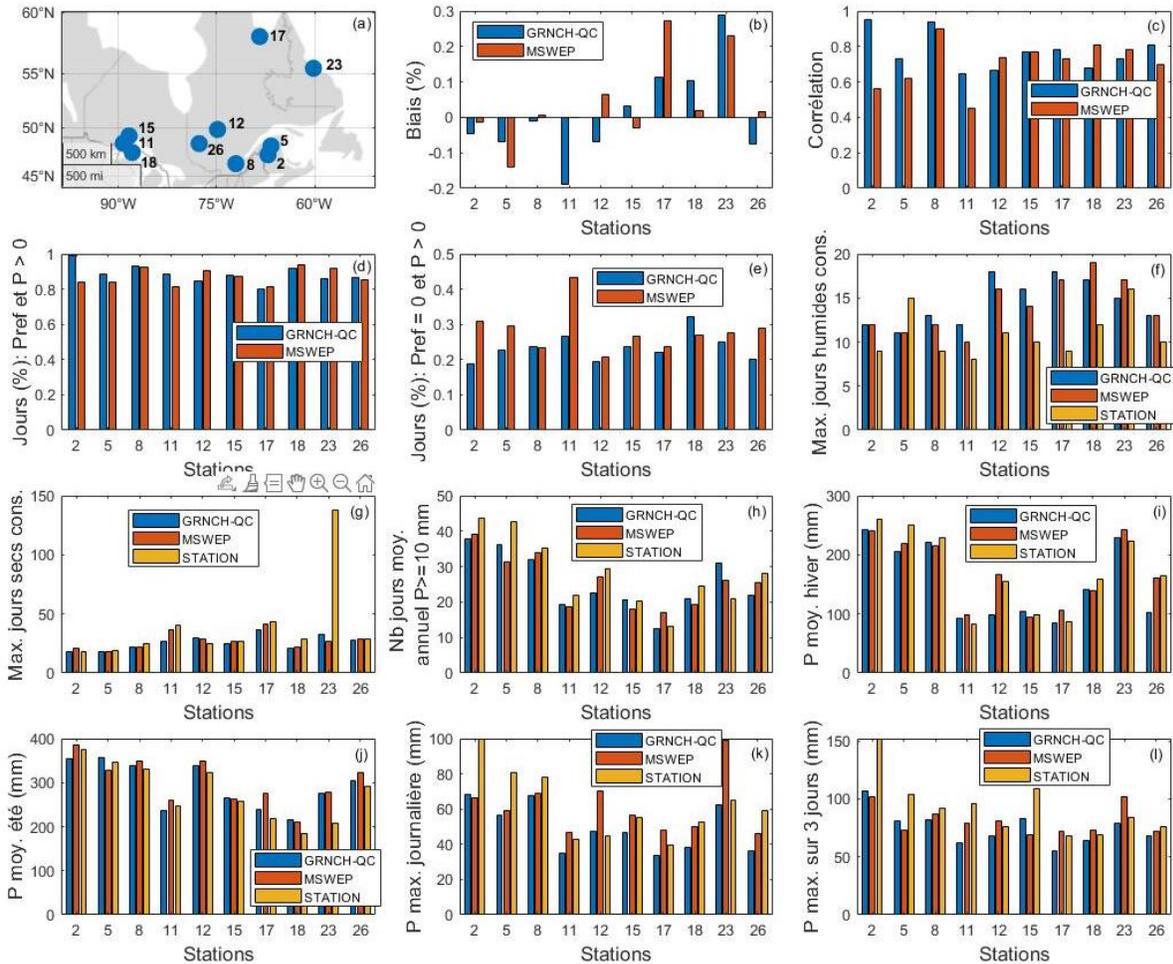


Figure 13 Échantillon ST2 : Métriques de précipitations pour dix stations (P3)

4.3 Modélisation hydrologique

Afin d'évaluer la performance de la grille de précipitations GRNCH-QC en modélisation hydrologique, celle-ci est comparée à l'ensemble des grilles de précipitations qu'elle intègre et à MSWEP V2. Un échantillon de 138 bassins versants est retenu afin d'effectuer des calibrations et validations à l'aide des différents jeux de données. Les superficies des bassins varient entre 500 et 22 275 km², avec une valeur médiane de 671 km² et un écart interquartile délimité entre 220 à 1 615 km². Les débits observés pour ces bassins proviennent de la DEH. La Figure 14 permet de localiser les bassins sélectionnés sur le territoire du Québec. Pour chacun, les valeurs journalières de températures minimales et maximales et de précipitations ont été moyennées spatialement considérant l'ensemble des stations ou des cellules des différents jeux de données se trouvant à l'intérieur du contour des bassins. Par conséquent, une seule valeur journalière est utilisée par bassin. Afin de conserver une variable de température constante et de tester l'impact de diverses estimations de précipitations, les températures de la grille

GRNCH-QC ont été combinées à chacune des grilles de précipitations incluses dans les comparaisons.

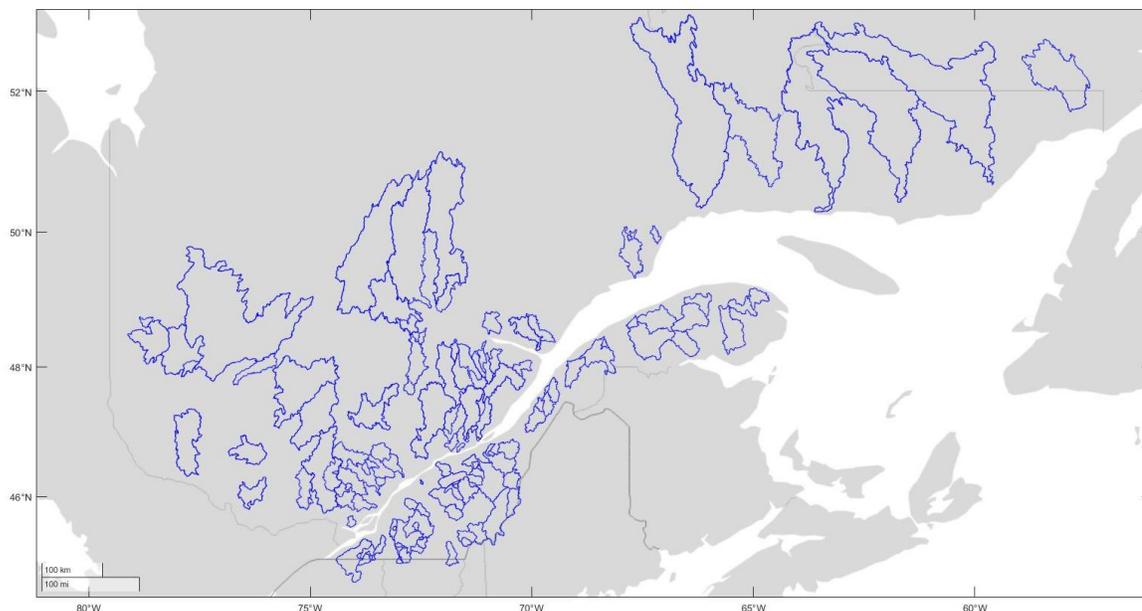


Figure 14 Contours des 138 bassins retenus pour la modélisation hydrologique

Le modèle GR4J (Coron et al., 2017) couplé au module de neige CemaNeige (Valéry, 2010) et à la formulation d'ETP de Oudin et al. (2005), ainsi que le modèle hydrologique HMETs (Arsenault, 2017) ont été utilisés pour effectuer les calibrations et validations. Ce sont deux modèles pluie-débit conceptuels globaux qui ont été utilisés à plusieurs reprises dans le cadre de nombreuses études sur des territoires diversifiés (Andréassian et al., 2009; Perrin et al., 2001). L'algorithme CMA-ES (Hansen & Ostermeier, 1996), dont l'efficacité a été démontrée par Arsenault et al. (2014), a été utilisé pour les calibrations. Les calibrations ont été effectuées sur les années paires des périodes P2 et P3', alors que les années impaires ont servi lors des validations pour ces deux mêmes périodes.

Les valeurs de KGE (Gupta et al., 2009) pour toutes les grilles incluses dans le jeu de données GRNCH-QC, pour la période P2, sont montrées à la Figure 15, alors que les résultats pour la période P3' sont présentés à la Figure 16. Sur ces deux figures, les graphiques du haut et du bas représentent respectivement les résultats pour les modèles HMETs et GR4J-CemaNeige (ci-après nommé GR4JCN). Les distributions de valeurs dans la portion de gauche résultent de la calibration, alors que celles de droite résultent de la validation. On remarque que les valeurs de KGE en validation pour GRNCH-QC sont comparables à celles obtenues avec les grilles GCQ et MSWEP V2. Les écarts de KGE peuvent être attribués à divers facteurs, notamment : l'équifinalité, la variabilité dans la performance des modèles en fonction des conditions

géographiques et hydroclimatiques, et la compensation (simplification conceptuelle) des phénomènes physiques par les paramètres des modèles. Ceci dit, le jeu de données GRNCH-QC demeure dans le peloton de tête et se compare avantageusement à chacune des grilles de précipitations qu'il intègre pour chacune des périodes P2 et P3', qu'il s'agisse des valeurs médianes ou des écarts interquartiles.

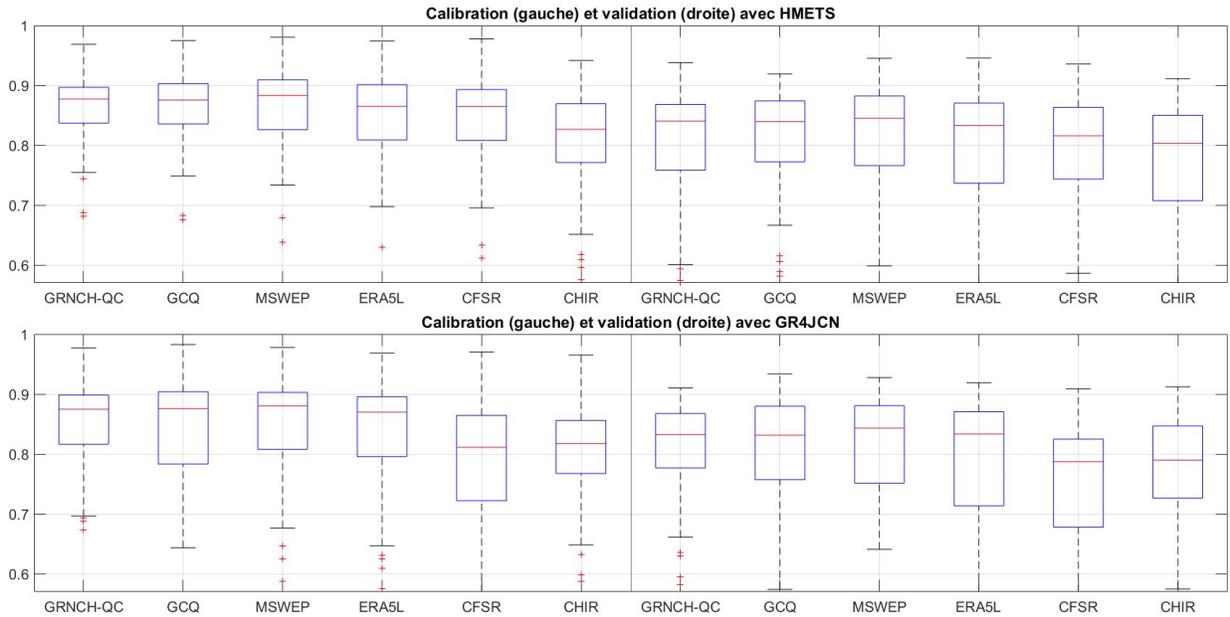


Figure 15 Valeurs de KGE en calibration et validation pour la période P2

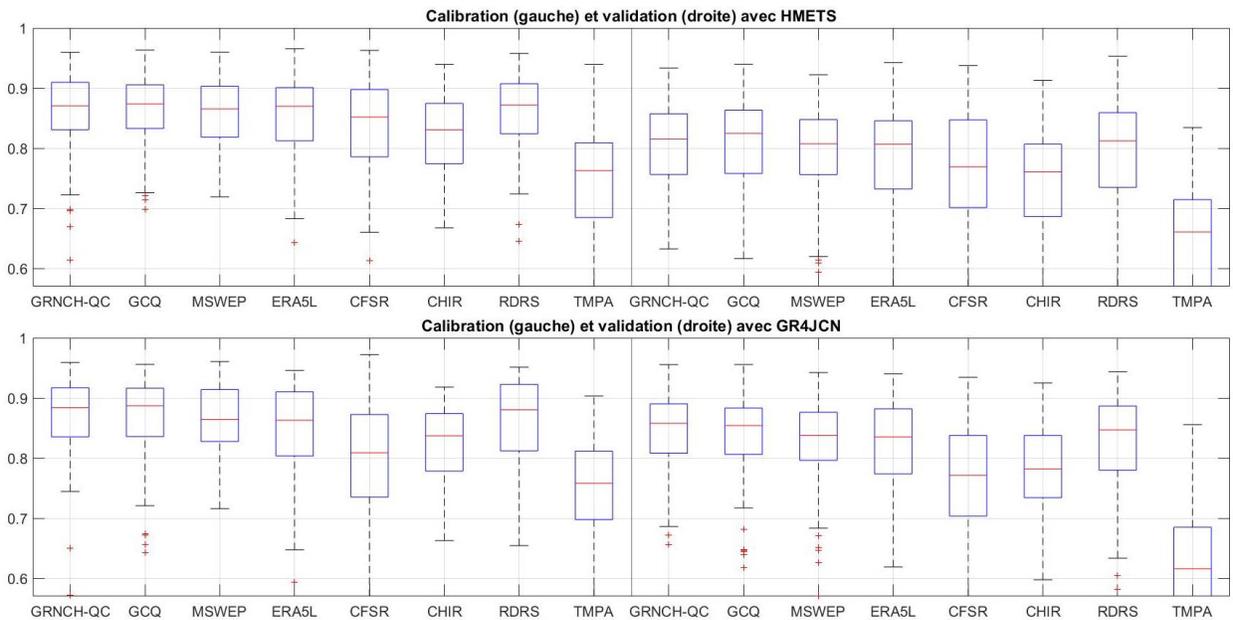


Figure 16 Valeurs de KGE en calibration et validation pour la période P3'

Des nuages de points présentant les résultats obtenus avec MSWEP V2 (axe Y) et GRNCH-QC (axe X) pour les différents bassins sont présentés à la *Figure 17* pour la période P2 et à la *Figure 18* pour la période P3'. Ces deux figures montrent les résultats suivants, lisibles de gauche à droite, du haut vers le bas : calibration avec GR4JCN, calibration avec HMETS, validation avec GR4JCN et validation avec HMETS. Le trait oblique sur chacun de ces graphiques représente les valeurs associées à la pente 1:1. Un point situé sous ce trait est un indicateur que la grille GRNCH-QC a généré un KGE supérieur à celui obtenu avec MSWEP V2. On observe que les écarts entre les KGE de MSWEP V2 et GRNCH-QC sont relativement faibles, dans les environs de 0,05.

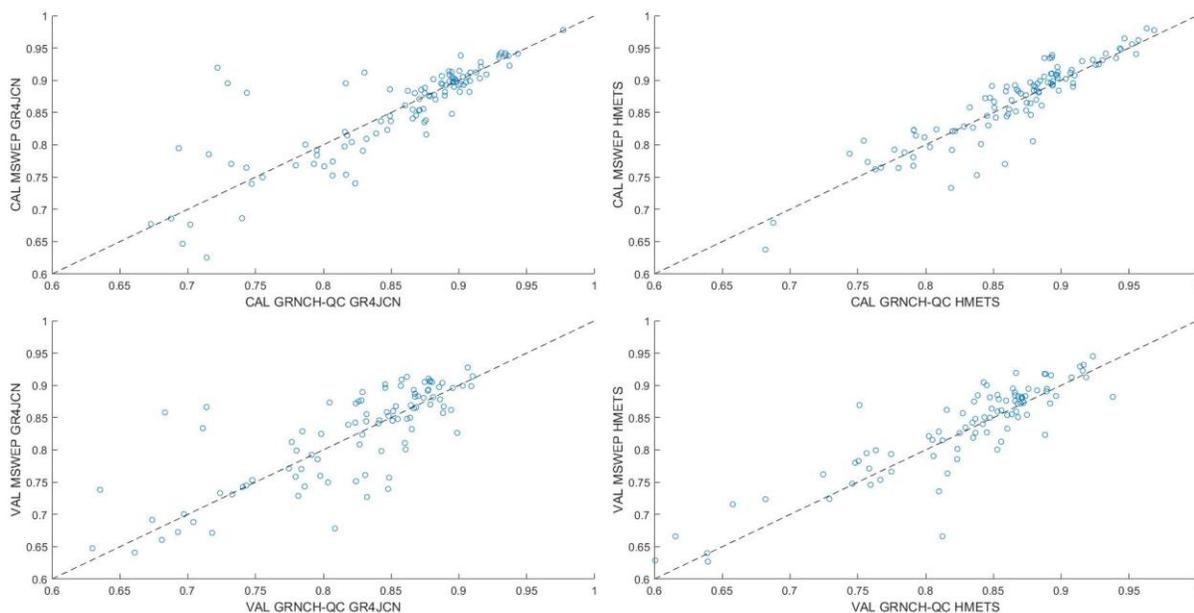


Figure 17 Comparaison des résultats en KGE pour MSWEP V2 et GRNCH-QC (P2)

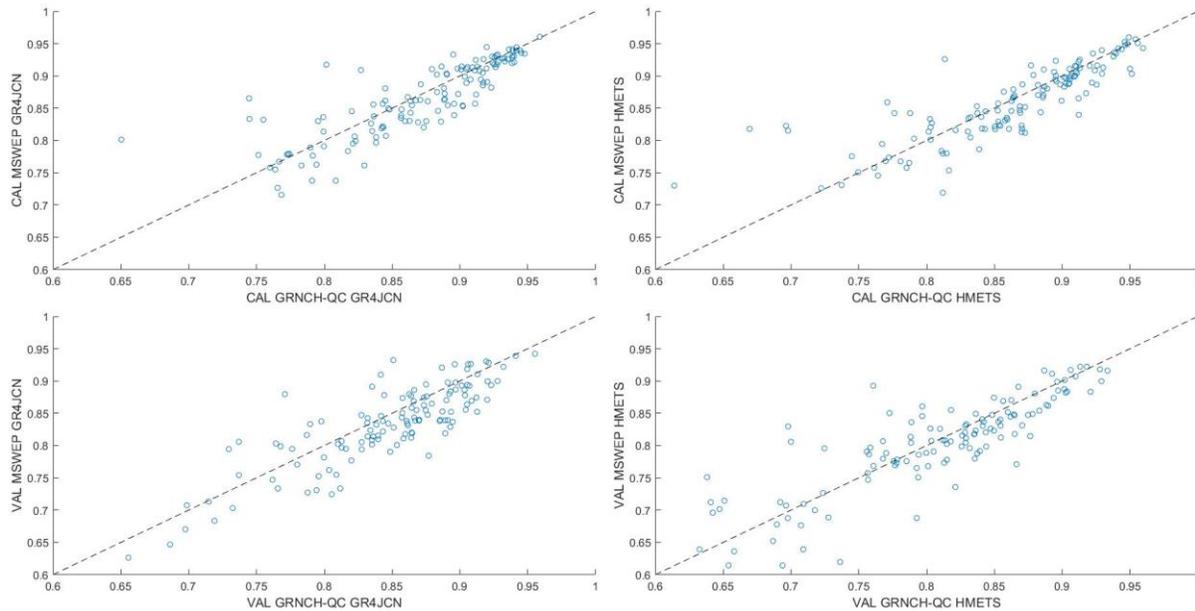


Figure 18 Comparaison des résultats en KGE pour MSWEP V2 et GRNCH-QC (P3')

5. Discussion

5.1 Incertitude attribuée aux choix méthodologiques

Certains choix méthodologiques basés sur la littérature ont un impact direct sur les précipitations estimées par la grille GRNCH-QC. Pour évaluer l'incertitude attribuée à ces choix, une variété de grilles a été produite, avec pour objectif de tester l'influence des deux paramètres (m et d_{inf} , section 3.3) les plus importants sur les quantités de précipitations simulées sur chaque point de grille. Ultiment, cette méthode permet d'obtenir une grille d'incertitude, qui correspond en quelque sorte à l'étendu des valeurs possibles, basées sur les deux choix de paramètres.

Une valeur d'incertitude est calculée de façon journalière, sur chacun des points de grille. Pour la période P3, les itérations présentées au *Tableau 4* sont appliquées à la méthodologie des précipitations, pour obtenir un total de 17 grilles différentes (16 itérations + 1 grille originale). C'est à partir de ces grilles que l'incertitude est calculée. L'incertitude évaluée correspond à l'écart-type de toutes les valeurs obtenues suite aux itérations.

Tableau 4 Itérations des paramètres m et d_{inf} pour une évaluation de l'incertitude

	Valeurs de m	Valeurs de d_{inf} (km)
	5 – 0,8	4,2
	5 – 0,5	4,5
	original	5
	5 + 0,5	5,5
	5 + 0,8	5,8

La Figure 19 montre un exemple de résultats obtenus pour l'incertitude attribuée aux paramètres m et d_{inf} . On peut y observer que l'incertitude n'est pas proportionnelle à la quantité de précipitations estimée. Par exemple, on peut voir que certains jours où la précipitation est relativement élevée, l'incertitude est plutôt faible, de l'ordre du millimètre, et vice-versa.

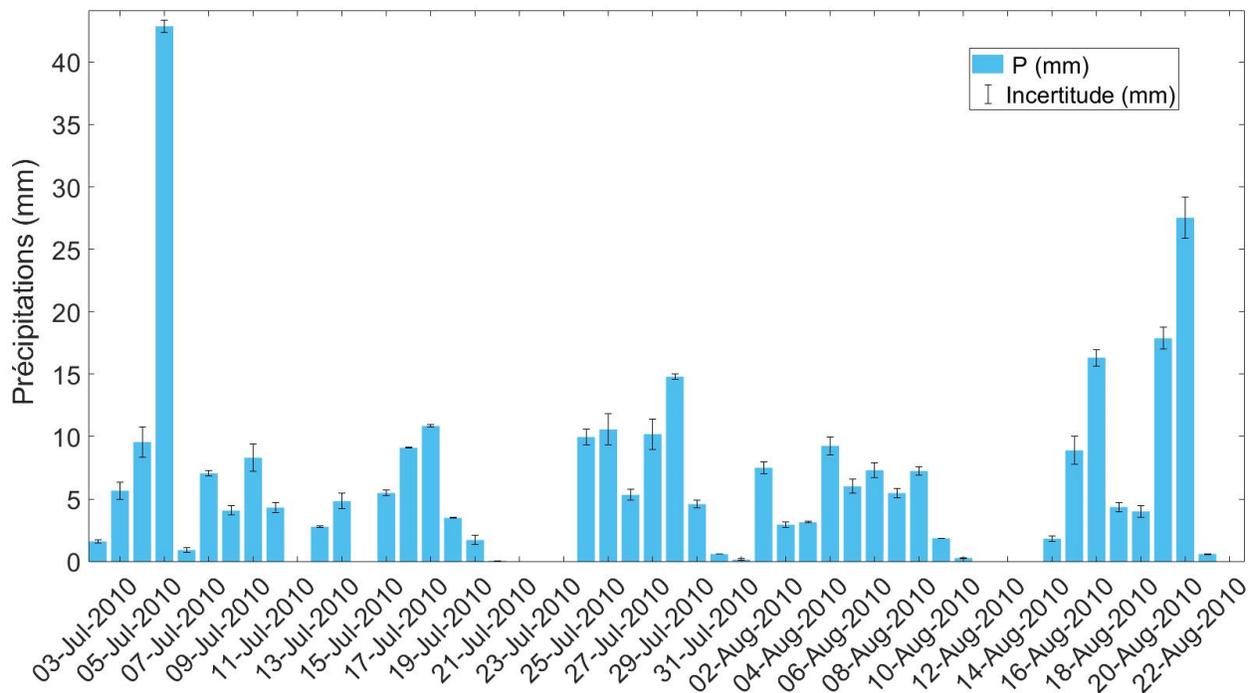


Figure 19 Démonstration de l'incertitude évaluée sur une cellule de la grille GRNCH-QC (P3)

Il est à noter que l'incertitude évaluée pour la méthodologie est certainement inférieure à celle qui proviendrait de la combinaison de toutes les erreurs et incertitudes provenant des jeux de données qui forment GRNCH-QC. Une grille d'incertitude en trois dimensions (jours x latitudes x longitudes) est disponible en format NetCDF dans les fichiers du projet, pour chaque période analysée.

5.2 Propriétés du jeu de données GRNCH-QC

1. Homogénéité temporelle

Il importe de préciser, d'entrée de jeu, que, un peu à la manière des réanalyses, le jeu de données produit dans le cadre de ce projet repose sur différentes sources de données dont la quantité, la nature, la couverture spatiale et, jusqu'à un certain point, la qualité varient dans l'espace et, surtout, dans le temps. En effet, tel que montré au *Tableau 1*, la période totale couverte, de 1970 à 2019, comporte quatre séquences temporelles (ou sous-périodes), P1 à P4, au cours desquelles les produits qui sont intégrés au jeu de données varient. Le *Tableau 5* fournit un résumé du nombre et de la nature des sources d'information incluses dans le jeu de données pour chacune des périodes P1 à P4.

Pour ce qui est des températures, pour les périodes P2 et P3, les produits inclus dans le jeu de données GRNCH-QC sont exactement les mêmes (voir *Tableau 1*), soient : stations de SCDNA, MELCC et RMCQ, et réanalyses ERA5-Land et CFSR. Au cours de la période P4, il y a une différence au niveau des données aux stations qui sont incorporées, par rapport à P2 et P3 (bien que le nombre de jeux de données aux stations demeure le même, soit trois) : stations de ECCC, MELCC et RMCQ². Pour la période P1, les jeux de données de stations sont les mêmes que pour P4, par contre, seule la réanalyse ERA5-Land est utilisée. Pour cette période en particulier, la *Figure 5* montre des températures, au sud du Québec, qui sont plus élevées, en moyenne, que pour les périodes P2 et P3.

Dans le cas des précipitations, les différences dans le nombre et la nature des jeux de données, de P1 à P4, sont plus grandes (voir le *Tableau 5*). Aucune des périodes P1 à P4 ne comporte la même combinaison. Les périodes les plus diversifiées sont P2 et P3 qui, bien qu'elles comportent des nombres et sources de données différents, reposent à tout le moins sur les trois mêmes jeux de stations, soient SCDNA, MELCC et RMCQ. Pour la période P4, au moment de rédiger ce rapport, aucune des bases de données de stations utilisées dans le cadre de ce projet n'avait été mise à jour. Tel qu'évoqué au point 4 ci-dessous, une mise à jour des grilles GRNCH-QC pourra être effectuée dès que les données seront disponibles.

Tableau 5 Résumé des nombres et types de données inclus dans les grilles GRNCH-QC pour chacune des périodes P1 à P4

Période	P1 (1970-1980)	P2 (1981-2000)	P3 (2001-2017)	P4 (2018-2019)
---------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

² Les stations de précipitations et de températures qui ont été utilisées, pour les périodes P1 à P3, sont montrées à l'Annexe 2.

Nombre de jeux de données inclus - Précipitations	4	6	9	6
Nature des jeux de données inclus - Précipitations	Stations = 3 Réanalyse = 1	Stations = 3 Réanalyses = 2 Satellites = 1	Stations = 3 Réanalyses = 3 Satellites = 3	Réanalyses = 3 Satellites = 3
Nombre de jeux de données inclus - Températures	4	5	5	5
Nature des jeux de données inclus - Températures	Stations = 3 Réanalyse = 1	Stations = 3 Réanalyses = 2	Stations = 3 Réanalyses = 2	Stations = 3 Réanalyses = 2

Il est possible que l'attribution de poids, variables d'une période à l'autre, aux différents produits qui sont intégrés au jeu de données GRNCH-QC, combinée à la présence constante d'ERA5-Land de P1 à P4 (tant pour les températures que pour les précipitations), contribuent à atténuer les sauts d'une période à l'autre. Ceci dit, toute utilisation nécessitant spécifiquement un jeu de données homogène dans le temps et sur une période recoupant une combinaison des séquences P1 à P4 (par exemple : analyse statistique, analyse de tendances) devrait inclure une vérification préalable de l'homogénéité.

2. Résolutions spatiale et temporelle

Le jeu de données GRNCH-QC bénéficie d'une résolution spatiale fine (0.1°), qui est la même que celle des grilles NRCAN et GCQ issues d'observations aux stations et souvent utilisées au Québec, et la même que celles de MSWEP V2 (jeu de données multi-sources) et de ERA5-Land (réanalyse) qui sont des produits récents et de plus en plus utilisés. Rappelons que, en fonction des résultats présentés au chapitre précédent, le jeu de données GRNCH-QC se compare, de manière générale, avantageusement à MSWEP V2 et à ERA5-Land.

La résolution temporelle actuelle des grilles GRNCH-QC est journalière. Rien n'empêche de passer à une résolution sous-journalière (horaire ou tri-horaire, par exemple) en adaptant la méthode de génération des grilles. Le jeu de données MSWEP V2 (Beck et al. 2019), à titre d'exemple, est généré aux 3 heures, alors qu'il intègre des produits journaliers et des produits sous-journaliers. Évidemment, avec une résolution temporelle journalière, l'utilisation des grilles GRNCH-QC n'est pas recommandée, en modélisation hydrologique, pour des bassins versants dont les superficies sont inférieures à des valeurs d'environ 500 km².

3. Modélisation hydrologique dans les secteurs situés au Nord

Un total de 105 bassins versants ont été ciblés un peu partout au Québec, parmi la sélection de 14 425 bassins d'Amérique du Nord de la base de données HYSETS (R. Arsenault et al., 2020). Ces 105 bassins ont obtenu des valeurs de KGE en validation relativement élevées dans un échantillon total de 239 bassins versants.

La figure 20 montre les écarts observés entre les valeurs de KGE obtenues en validation pour les grilles GRNCH-QC et GCQ. Les écarts positifs (en rouge) favorisent GRNCH-QC, alors que les écarts négatifs (en bleu) favorisent la grille GCQ.

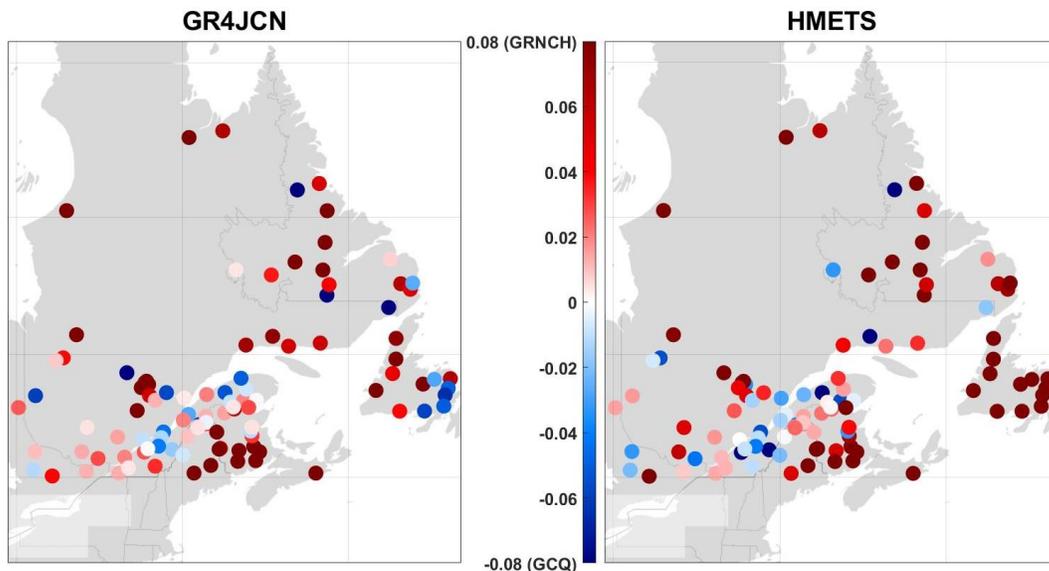


Figure 20 Différences de KGE entre les grilles GRNCH-QC et GCQ pour GR4JCN et HMETS

On peut constater que les bassins versants situés dans le Nord du Québec et au Labrador obtiennent généralement un KGE en validation supérieur lorsque la grille GRNCH-QC est utilisée, et ce, pour les deux modèles hydrologiques utilisés. Les écarts peuvent atteindre 0,08 point de KGE. De telles observations montrent une valeur ajoutée du jeu de données GRNCH-QC dans des régions où les données de stations se font plutôt rares.

4. Code ouvert

L'ensemble des codes MATLAB pour la génération des grilles GRNCH-QC (en version commentée et simplifiée) sont transmis à la DEH avec le présent rapport. Les codes ont été générés de manière à en permettre une utilisation agile et flexible. Il sera alors possible aux collaborateurs de la DEH de : (1) mettre à jour les grilles de précipitations et de températures au fur et à mesure que de nouvelles données, pour les différents produits qui y sont intégrés, deviennent disponibles; (2) faire différents essais visant à ajouter des produits supplémentaires qui permettraient potentiellement de bonifier les grilles GRNCH-QC. Dans ce dernier cas, il est recommandé, notamment, de tester l'ajout de CaPA, l'Analyse canadienne des précipitations, dont les données pour la période de 1980 à ce jour ne sont disponibles que depuis peu au moment de rédiger ce rapport.

6. Conclusion

Ce rapport présente la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus dans le cadre d'un projet Info-Crue qui visait à générer des grilles observationnelles pour le territoire du Québec. Les grilles obtenues doivent principalement servir au post-traitement de simulations climatiques. Il s'agit de grilles journalières de précipitations, températures minimales et températures maximales, nommées GRNCH-QC et couvrant la période de 1970 à 2019.

L'approche retenue, pour la génération des grilles, repose sur la combinaison de données provenant de sources multiples : données de stations, réanalyses, données satellitaires, et s'inspire de la méthode utilisée par (Beck et al., 2019) pour la génération des grilles de précipitation MSWEP V2. Les produits retenus ont été sélectionnés et combinés de manière à maximiser la valeur ajoutée des grilles GRNCH-QC sur le territoire de la province de Québec. L'analyse de différentes métriques de précipitations et de températures, de même que le calage et la validation des modèles hydrologiques HMETS et GR4JCN dans plusieurs bassins versants du Québec, ont permis de confirmer, globalement, l'avantage des grilles GRNCH-QC par rapport à MSWEP V2, aux grilles GCQ du MELCC et à l'ensemble des jeux de données intégrés dans GRNCH-QC. Les résultats de modélisation hydrologique montrent par ailleurs l'avantage des grilles GRNCH-QC par rapport aux grilles GCQ dans le nord du Québec et au Labrador, où les données de stations se font rares.

En raison de la disponibilité, variable dans le temps, des différents types de jeux de données intégrés aux grilles GRNCH-QC, la période couverte a été divisée en quatre sous-périodes (P1 à P4) couvrant respectivement les années 1970-1980, 1981-2000, 2001-2017 et 2018-2019. Le nombre de et la nature des jeux de données utilisés pour la production des grilles GRNCH-QC sont constants au cours d'une même sous-période mais varient de l'une à l'autre. Ceci dit, la réanalyse ERA5-Land est commune à toutes les sous-périodes.

Une analyse de l'incertitude liée aux choix des valeurs de deux paramètres de la méthode de génération des grilles de précipitation a été réalisée et accompagne les résultats présentés dans le cadre du présent rapport ainsi que les fichiers de données fournis à la DEH, en format NetCDF.

Enfin, l'ensemble des codes nécessaires à la production du jeu de données ont été remis à la DEH avec le présent rapport, permettant ainsi des mises à jour des grilles GRNCH-QC dans l'optique d'ajouter, si souhaité, des jeux de données supplémentaires.

Références

- Akinremi, O., McGinn, S., & Cutforth, H. (1999). Precipitation trends on the Canadian prairies. *Journal of Climate*, 12(10), 2996-3003.
- Andréassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., . . . Valéry, A. (2009). HESS Opinions" Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models". *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1757-1764.
- Arsenault, R. (2017). HMETs—A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts.
- Arsenault, R., Brissette, F., Chen, J., Guo, Q., & Dallaire, G. (2020). NAC2H: The North American climate change and hydroclimatology data set. *Water Resources Research*, 56(8).
- Arsenault, R., Brissette, F., Martel, J. L., Troin, M., Lévesque, G., Davidson-Chaput, J., . . . Poulin, A. (2020). A comprehensive, multisource database for hydrometeorological modeling of 14,425 North American watersheds. *Scientific Data*, 7(1), 1-12. doi: 10.1038/s41597-020-00583-2
- Arsenault, R., Poulin, A., Côté, P., & Brissette, F. (2014). Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7), 1374-1384.
- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., . . . Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69-83.
- Beck, H. E., Wood, E. F., McVicar, T. R., Zambrano-Bigiarini, M., Alvarez-Garreton, C., Baez-Villanueva, O. M., . . . Karger, D. N. (2020). Bias correction of global high-resolution precipitation climatologies using streamflow observations from 9372 catchments. *Journal of Climate*, 33(4), 1299-1315.
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I., . . . Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500.
- Berg, P., Almén, F., & Bozhinova, D. (2021). HydroGFD3. 0 (Hydrological Global Forcing Data): a 25 km global precipitation and temperature data set updated in near-real time. *Earth System Science Data*, 13(4), 1531-1545.

- Bergeron, O. (2016). Guide d'utilisation 2016 - Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement. 33.
- Collischonn, B., Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 207-216.
- Contractor, S., Donat, M. G., Alexander, L. V., Ziese, M., Meyer-Christoffer, A., Schneider, U., . . . Vose, R. S. (2020). Rainfall Estimates on a Gridded Network (REGEN)—a global land-based gridded dataset of daily precipitation from 1950 to 2016. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), 919-943.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94, 166-171.
- Ebita, A., Kobayashi, S., Ota, Y., Moriya, M., Kumabe, R., Onogi, K., . . . Takahashi, K. (2011). The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55": an interim report. *Sola*, 7, 149-152.
- Essou, G. R. C., Sabarly, F., Lucas-Picher, P., Brissette, F., & Poulin, A. (2016). Can Precipitation and Temperature from Meteorological Reanalyses Be Used for Hydrological Modeling? *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 1929-1950. doi: 10.1175/jhm-d-15-0138.1. Repéré à https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/17/7/jhm-d-15-0138_1.xml
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21.
- Gasset, N., Fortin, V., Dimitrijevic, M., Carrera, M., Bilodeau, B., Muncaster, R., . . . Bulat, M. (2021). A 10 km North American precipitation and land-surface reanalysis based on the GEM atmospheric model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(9), 4917-4945.

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Hansen, N., & Ostermeier, A. (1996). Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation. Dans *Proceedings of IEEE international conference on evolutionary computation* (pp. 312-317). IEEE.
- Haylock, M., Hofstra, N., Klein Tank, A., Klok, E., Jones, P., & New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
- Hersbach, H. (2016). The ERA5 Atmospheric Reanalysis. Dans *AGU fall meeting abstracts* (Vol. 2016, pp. NG33D-01).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., . . . Rozum, I. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). *ECMWF*, 147, 5-6.
- Huffman, G. (2016). TRMM (TMPA-RT) Near Real-Time Precipitation L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7, Edited by Kyle MacRitchie, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). doi: 10.5067/TRMM/TMPA/3H-E/7
- Huffman, G., Adler, R. F., Rudolf, B., Schneider, U., & Keehn, P. R. (1995). Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information. *Journal of Climate*, 8(5), 1284-1295.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). Dans *Satellite rainfall applications for surface hydrology* (pp. 3-22). Springer.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3), 487-503.
- Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1109-1116.
- Kochendorfer, J., Rasmussen, R., Wolff, M., Baker, B., Hall, M. E., Meyers, T., . . . Brækkan, R. (2017). The quantification and correction of wind-induced precipitation measurement errors. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 1973-1989.

- Leung, L. R., Boos, W. R., Catto, J. L., A. DeMott, C., Martin, G. M., Neelin, J. D., . . . Klingaman, N. P. (2022). Exploratory precipitation metrics: spatiotemporal characteristics, process-oriented, and phenomena-based. *Journal of Climate*, *35*(12), 3659-3686.
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., . . . Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950–2013. *Scientific Data*, *2*(1), 1-12.
- Mahfouf, J. F., Brasnett, B., & Gagnon, S. (2007). A Canadian precipitation analysis (CaPA) project: Description and preliminary results. *Atmosphere-Ocean*, *45*(1), 1-17.
- McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., . . . Owen, T. (2011). Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *92*(12), 1611-1622.
- Mei, Y., Anagnostou, E. N., Nikolopoulos, E. I., & Borga, M. (2014). Error Analysis of Satellite Precipitation Products in Mountainous Basins. *Journal of Hydrometeorology*, *15*(5), 1778-1793. doi: 10.1175/jhm-d-13-0194.1. Repéré à https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/15/5/jhm-d-13-0194_1.xml
- Menne, M. J., Durre, I., Vose, R. S., Gleason, B. E., & Houston, T. G. (2012). An overview of the global historical climatology network-daily database. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, *29*(7), 897-910.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., . . . Hersbach, H. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, *13*(9), 4349-4383.
- O'Brien, J. P., O'Brien, T. A., Patricola, C. M., & Wang, S.-Y. S. (2019). Metrics for understanding large-scale controls of multivariate temperature and precipitation variability. *Climate Dynamics*, *53*(7), 3805-3823.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, *303*(1-4), 290-306.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, *242*(3-4), 275-301.

- Roca, R., Alexander, L. V., Potter, G., Bador, M., Jucá, R., Contractor, S., . . . Cloché, S. (2019). FROGS: a daily 1x 1 gridded precipitation database of rain gauge, satellite and reanalysis products. *Earth System Science Data*, 11(3), 1017-1035.
- Rondeau-Genesse, G., & Braun, M. (2019). Impact of internal variability on climate change for the upcoming decades: analysis of the CanESM2-LE and CESM-LE large ensembles. *Climatic change*, 156(3), 299-314.
- Sabarly, F. (2015). *Évaluation du potentiel des réanalyses à représenter le cycle hydrologique de surface et de leur performance en modélisation hydrologique dans la province de Québec au Canada* (École de technologie supérieure).
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., . . . Goldberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058. doi: 10.1175/2010bams3001.1. Repéré à https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001_1.xml
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., . . . Iredell, M. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208.
- Simmons, A., Willett, K., Jones, P., Thorne, P., & Dee, D. (2010). Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D1).
- Skok, G., Žagar, N., Honzak, L., Žabkar, R., Rakovec, J., & Ceglar, A. (2016). Precipitation intercomparison of a set of satellite-and raingauge-derived datasets, ERA Interim reanalysis, and a single WRF regional climate simulation over Europe and the North Atlantic. *Theoretical and applied climatology*, 123(1), 217-232.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107.
- Sun, X., & Barros, A. P. (2010). An evaluation of the statistics of rainfall extremes in rain gauge observations, and satellite-based and reanalysis products using universal multifractals. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 388-404.
- Tang, G., Clark, M. P., Newman, A. J., Wood, A. W., Papalexiou, S. M., Vionnet, V., & Whitfield, P. H. (2020). SCDNA: A serially complete precipitation and temperature dataset for North America from 1979 to 2018. *Earth System Science Data*, 12(4), 2381-2409.

- Tang, G., Clark, M. P., & Papalexiou, S. M. (2021). SC-earth: a station-based serially complete earth dataset from 1950 to 2019. *Journal of Climate*, 34(16), 6493-6511.
- Valéry, A. (2010). *Modélisation précipitations débit sous influence nivale: Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants* (Doctorat Hydrobiologie, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech).
- Wang, X. L., Xu, H., Qian, B., Feng, Y., & Mekis, E. (2017). Adjusted daily rainfall and snowfall data for Canada. *Atmosphere-Ocean*, 55(3), 155-168.
- Zolina, O., Kapala, A., Simmer, C., & Gulev, S. K. (2004). Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 129-161.

Annexes

Annexe 1 : Tableaux montrant les produits climatiques recensés, par catégorie

Tableau A.1: Données aux stations

Nom	Couverture spatiale	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Référence	Type de données
RMCQ – Réseau météorologique coopératif du Québec	Québec	Journalière	À confirmer	Contacts MELCC	Précipitation, température
RSCQ – Réseau de surveillance du climat du Québec	Québec (jusqu'à 313 stations)	Horaire / biquotidienne	Variable-présent	http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/reseau-parametres.asp	Précipitation, température
Stations climatiques ECCC – Environnement et changement climatique Canada	Canada	Horaire / journalière	Variable-présent	https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html	Précipitation, température
SCDNA	Amérique du Nord (27 267 stations)	Journalière	1979-2018	Tang et al. (2020)	Précipitation, température
Stations climatiques NOAA	États-Unis	Journalière (~30 000 stations) / précipitation horaire (~1000 stations)	Variable-présent	https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/summaries/daily https://catalog.data.gov/dataset/u-s-hourly-precipitation-data	Précipitation, température
Stations Servicio nacional meteorológico, CONAGUA	Mexique	Journalière / horaire	Variable-présent	Contacts internes, http://clicom-mex.cicese.mx/	Précipitation, température

Tableau A.2: Produits sur grille globaux à l'échelle temporelle de 1 jour ou moins

Nom	Sources	Résolution spatiale	Couverture spatiale	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Référence	Type de données
CPC Unified	Stations	0.5°	Globale	journalière	1979-présent	Chen et al. (2008)	Précipitation, température
GPCP	Stations	1°	Globale	journalière	1979-2016	Schneider et al. (2014)	Précipitation, température
TMPA 3B42	Stations, Satellite	0.25°	50°N - 50°S	3 heures	1998-présent	Huffman et al. (2007)	Précipitation
PERSIANN-CDR V1R1	Stations, Satellite	0.25°	60°N - 60°S	6 heures	1983-2012	Ashouri et al. (2015)	Précipitation
CHIRPS V2.0	Stations, Satellite	0.05°	50°N - 50°S	journalière	1981-présent	Funk et al. (2015a)	Précipitation
NCEP-CFSR	Réanalyse	0.5°	Globale	6 heures	1979-2010	Saha et al. (2010)	Précipitation, température
ERA-Interim	Réanalyse	0.75°	Globale	3 heures	1979-8/2019	Dee et al. (2011)	Précipitation, température
ERA5	Réanalyse	0.25°	Globale	horaire	1979-présent	Hersbach et Dee (2016)	Précipitation, température
ERA5-Land	Réanalyse	0.1°	Globale	horaire	1979-présent	Hersbach et Dee (2016)	Précipitation, température
JRA-55	Réanalyse	0.5625°	Globale	3 heures	1959-présent	Kobayashi et al. (2015)	Précipitation, température
MSWEP V1.2	Stations, Satellite, Réanalyse	0.25°	Globale	3 heures	1979-2015	Beck et al. (2017)	Précipitation
IMERG-Final	Multi-satellites	0.1°	Quasi Globale (60°N - 60°S)	0.5 heures	2014-présent	Huffman et Savtchenko (2017)	Précipitation
CMORPH-gauge	Multi-satellites	0.07277°	Quasi Globale (60°N - 60°S)	0.5 heures	2002-présent	Joyce et al. (2004)	Précipitation
GSMaP-gauge	Multi-satellites	0.1°	Quasi Globale (60°N - 60°S)	3 heures	2014-présent	Kubota et al. (2007)	Précipitation

Tableau A.3: Produits sur grille couvrant le Québec à l'échelle temporelle de 1 jour ou moins

Nom	Sources	Résolution spatiale	Couverture spatiale	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Référence	Type de données
NRCAN	Stations	10 km	Canada	journalière	1961-2011	McKenney et al. (2011)	Précipitation, température
Livneh	Stations	1/16°	Canada 53° N et moins, É-U cont., Mexique	journalière	1950-2015	Livneh et al. (2015)	Précipitation, température
MELCC	Stations	0.1°	Québec	3 heures, journalière	1961-présent	Bergeron (2016)	Précipitation, température
HQ (si permission)	Stations	10 km	Québec	journalière	À valider	Tapsoba et al. (2005)	Précipitation, température
CaPA (nombre d'années limité)	Stations, Radar	2.5 km, 10 km	Amérique du Nord	6 heures	2012-2019	Fortin et al. (2018)	Précipitation

Annexe 2 : Localisation des stations intégrées dans les grilles de précipitation et de température GRNCH-QC

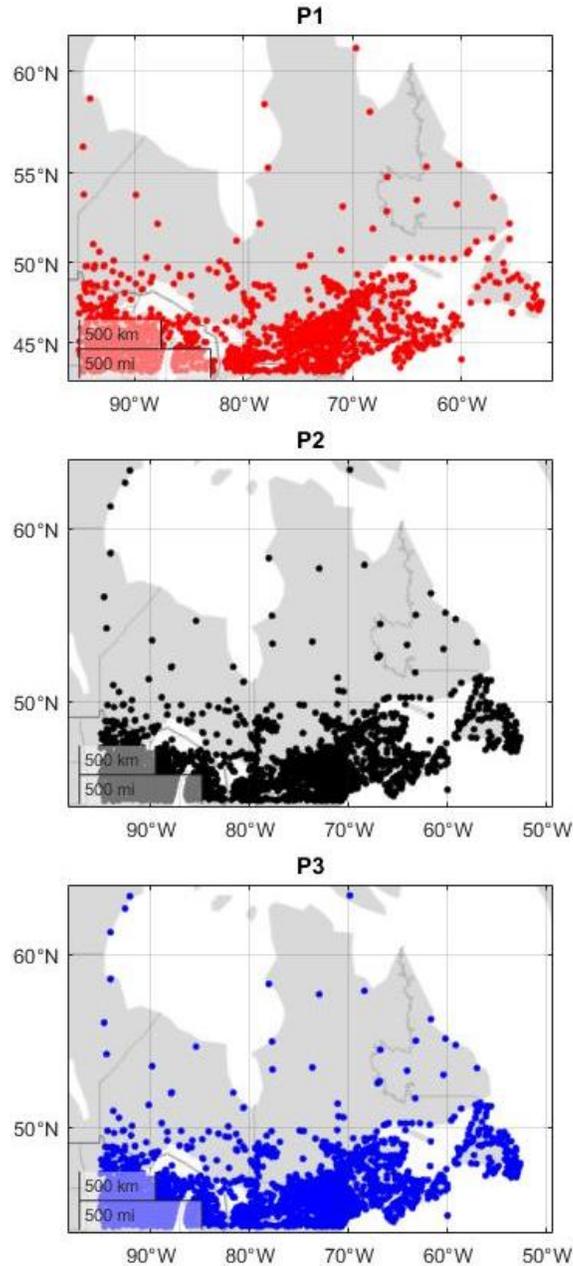


Figure A.1 Localisation des stations intégrées dans les grilles de précipitations GRNCH-QC par période

Période	Nombre total de stations	Nombre de stations conservées	% de retrait
P1	2 458	1 554	36,77
P2	3 873	2 661	31,13
P3	3 918	2 649	32,38

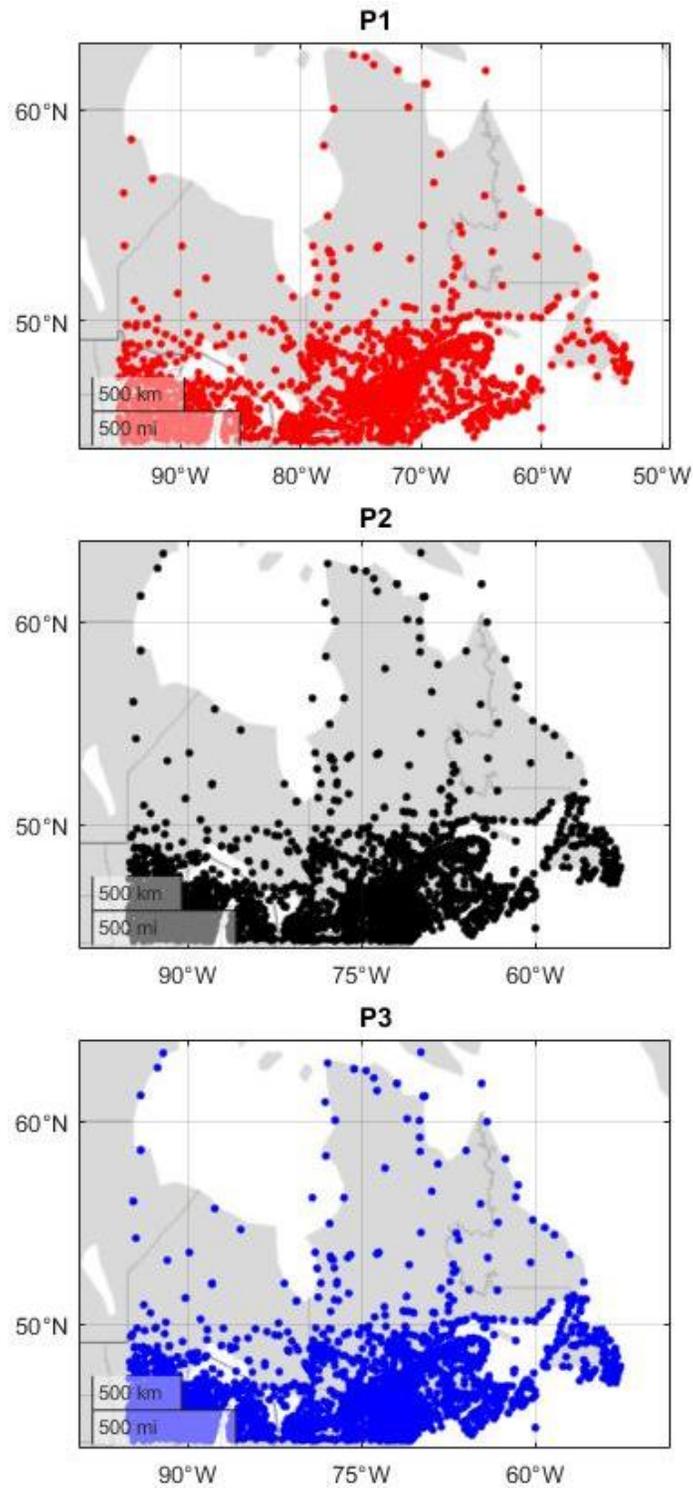


Figure A.2 Localisation des stations intégrées dans les grilles de températures GRNCH-QC par période

Annexe 3 : Cartes des températures moyennes saisonnières pour les grilles GRNCH-QC et GCQ, et les périodes P1 et P3

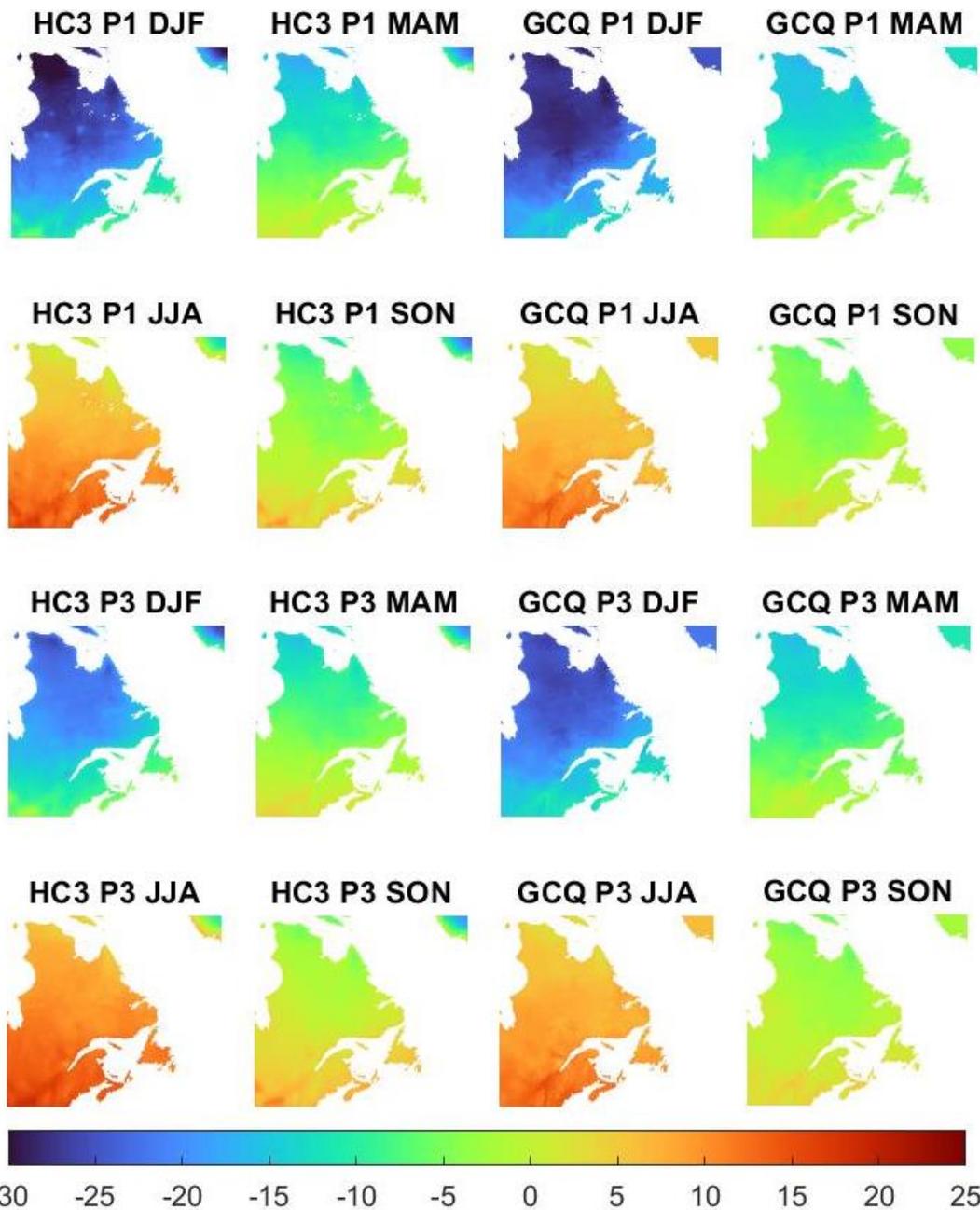


Figure A.3 Températures minimales (°C) de GRNCH-QC (nommé 'HC3' dans le but d'alléger la présentation) et GCQ moyennées pour chaque saison (P1 et P3)

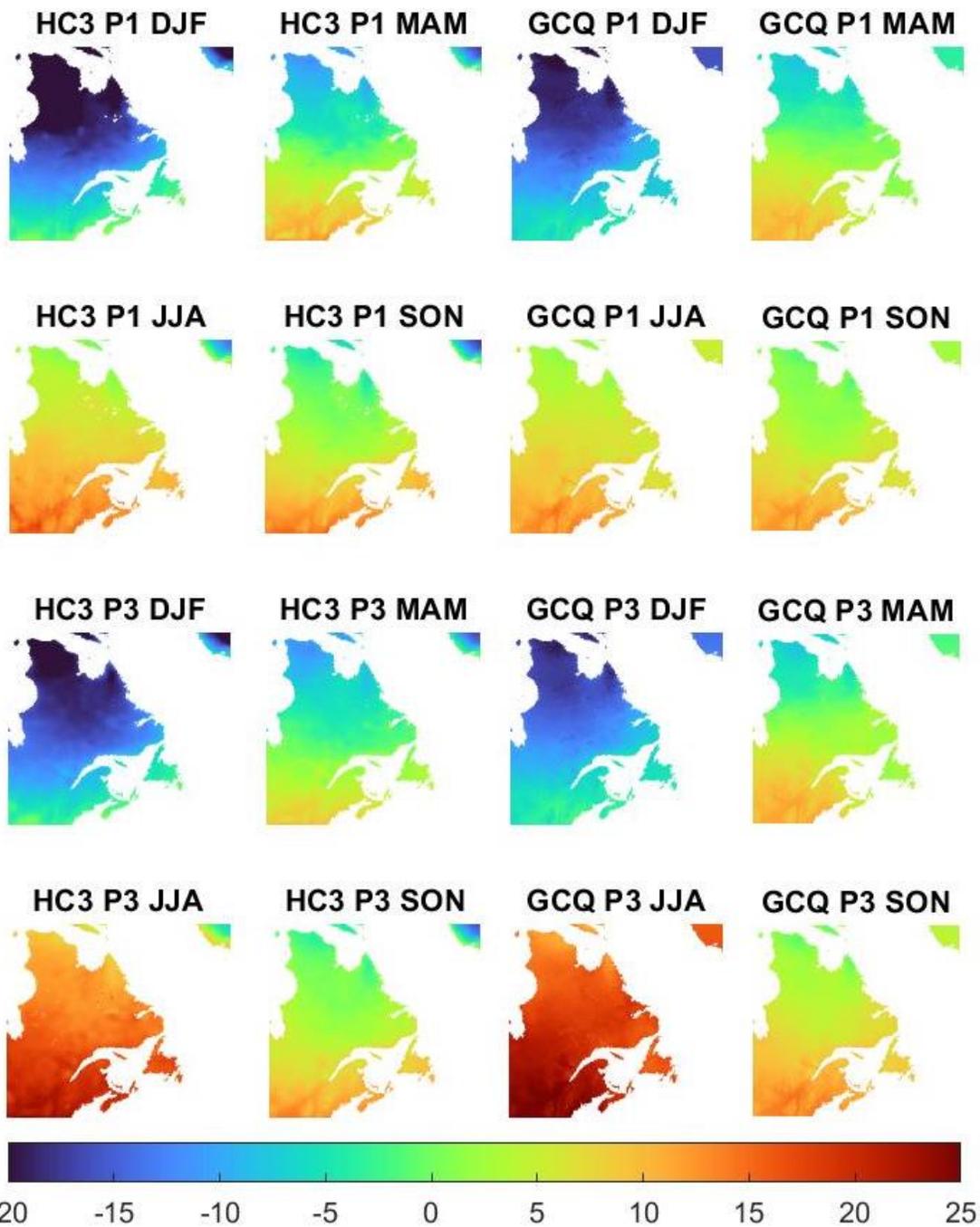


Figure A.4 Températures maximales (°C) de GRNCH-QC (nommé 'HC3' dans le but d'alléger la présentation) et GCQ moyennées pour chaque saison (P1 et P3)