

ATLAS HYDROCLIMATIQUE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL

2022 – RAPPORT TECHNIQUE

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction de l'hydrologie et de l'hydraulique du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCCFP.

Rédaction : Charles Malenfant, ing., M. Sc.
Martin-Pierre Lavigne, M. Sc.
Edouard Mailhot, ing., M. Sc.
Hind El-Housni, Ph. D.
Jasmine Pelletier-Dumont, M. Sc.
Simon Lachance-Cloutier, ing., M. Sc.

Collaboration : Richard Turcotte, ing., Ph. D.
Cyril Garneau, Ph. D.
Pierre-Luc Huot, ing., Ph. D. (ÉTS)
Jean-François Cyr, ing., M. Sc.
Gabriel Rondeau-Genesse (Ouranos)
Louis-Philippe Caron (Ouranos)
Marco Braun, Ph. D. (Ouranos)

Renseignements

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)
Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2024
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-96950-1 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.
© Gouvernement du Québec – 2024

Résumé

L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional décrit le régime hydrique actuel et futur du Québec méridional dans le but de soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Ce rapport technique s'adresse aux spécialistes intéressés à en apprendre davantage sur la méthodologie et les données de l'édition 2022 de cet atlas.

Cette édition est la plus récente d'une série de mises à jour intégrant les dernières avancées issues de la recherche en modélisation hydroclimatique. Le point de départ de cette démarche a été le lancement de la première édition de l'Atlas en mars 2013, suivi des éditions 2015 et 2018. La nouvelle version améliorée propose dorénavant de l'information sur 76 indicateurs pour près de 10 000 tronçons de rivières dans un site Web complètement renouvelé. Ce dernier accueille également deux nouveaux outils qui permettent de consulter une reconstitution de l'historique des débits des rivières du Québec méridional. Les autres changements apportés dans cette version et détaillés dans ce rapport sont : l'ajout de documentation, l'amélioration de la résolution spatiale et une plus grande couverture spatiale, l'ajout des ensembles climatiques ClimEx et CORDEX pour compléter l'ensemble CMIP5, une pondération des scénarios climatiques, l'utilisation de six plateformes hydrologiques et l'ajout de nombreux indicateurs hydrologiques, notamment annuels.

Les principaux faits saillants des résultats de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022 sont les suivants :

- Les pointes de crues printanières seront plus hâtives.
- L'évolution des volumes de crues printanières variera selon les régions, mais ces volumes seront plus élevés au nord et plus faibles au sud du Québec méridional.
- L'évolution des pointes de crues printanières variera selon les régions, mais ces pointes de crues seront généralement plus fortes ou peu modifiées.
- Les pointes de crues estivales et automnales seront plus élevées sur une large portion du Québec méridional.
- Les étiages seront plus sévères et plus longs en été et en automne.
- Les étiages seront moins sévères en hiver.
- L'évolution de l'hydraulicité variera selon les saisons et selon les régions, mais l'hydraulicité sera globalement plus forte.

Ces changements hydroclimatiques entraîneront diverses conséquences sociales, économiques et environnementales. Face aux besoins croissants d'informations de qualité pour le développement de pratiques résilientes de gestion de l'eau et l'aménagement du territoire, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs poursuivra le cycle de mise à jour de l'Atlas hydroclimatique. Cela permettra notamment l'utilisation de CMIP6 – les plus récentes simulations climatiques – dans la prochaine édition.

Table des matières

Résumé	iii
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Remerciements	ix
Avant-propos	x
Liste des abréviations	xi
Glossaire	13
1. Introduction	16
1.1 Contexte et historique	16
1.2 Nouveautés	16
1.3 Usages et limitations	17
2. Données et modèles	20
2.1 Données physiographiques	20
2.2 Données hydrométriques	25
2.3 Données climatiques	27
2.4 Projections climatiques	27
2.5 Modèle hydrologique	29
3. Méthodologie	41
3.1 Modélisation hydrologique	41
3.2 Calcul des indicateurs	42
3.3 Analyse en milieu non jaugé	46
3.4 Projections des indicateurs	51
4. Résultats	54
4.1 Projections pour les indicateurs de crue	55

4.2 Projections pour les indicateurs d'étiage	57
4.3 Projections pour les indicateurs d'hydraulicité	59
4.4 Produits et données disponibles	60
5. Discussion	63
5.1 Comparaison avec les Atlas précédents	63
5.2 Incertitudes	63
5.3 Limites	65
6. Conclusion	67
7. Références bibliographiques	68
Annexe A – Stations hydrométriques	77
Annexe B – Simulations climatiques	85
Annexe C – Pondération des scénarios hydroclimatiques	88
Annexe D – Paramètres et détails des plateformes hydrologiques	98
Annexe E – Validation du modèle hydrologique	103
Annexe F – Saisons hydrologiques	117
Méthode de détermination des saisons pour l'Atlas hydroclimatique 2018	117
Méthode de détermination des saisons pour l'Atlas hydroclimatique 2022	118
Annexe G – Interpolation optimale	124
Modèle d'incertitude	127
Annexe H – Influence potentielle de la gestion des barrages	128
Annexe J – Indicateurs hydroclimatiques projetés	130

Liste des tableaux

Tableau 1. Changements de l'Atlas 2022 par rapport à l'Atlas 2018	17
Tableau 2. Caractéristiques de projets Hydrotel de l'Atlas	23
Tableau 3. Regroupement des classes texturales	24
Tableau 4. Sous-modèles Hydrotel utilisés	30
Tableau 5. Liste des paramètres Hydrotel calibrés	31
Tableau 6. Description des 76 indicateurs de l'Atlas	42
Tableau 7. Horizons temporels de l'Atlas	43
Tableau 8. Différentes approches pour l'analyse fréquentielle des débits	45
Tableau 9. Approches identifiées et comparées pour le milieu non jaugé	46
Tableau 10. Termes utilisés pour décrire la confiance dans la direction du changement	53
Tableau 11. Faits saillants de l'Atlas hydroclimatique 2022	54
Tableau 12. Caractéristiques et utilisations des 285 stations hydrométriques utilisées pour l'Atlas hydroclimatique	77
Tableau 13. Simulations climatiques régionales (CORDEX-NA et ClimEx)	85
Tableau 14. Simulations climatiques globales (CMIP5)	86
Tableau 15. Pondération des scénarios hydroclimatiques proposée par Ouranos	88
Tableau 16. Valeurs des paramètres d'Hydrotel	98
Tableau 17. Bornes des 11 paramètres calibrés d'Hydrotel	99
Tableau 18. Valeurs des paramètres calibrés d'Hydrotel	99
Tableau 19. Résultats (KGE) en validation pour les six plateformes hydrologiques	113
Tableau 20. Liste des évacuateurs considérés pour le DOR	128

Liste des figures

Figure 1. Carte de la couverture spatiale des 15 projets de l'Atlas	20
Figure 2. Topographie utilisée pour l'Atlas hydroclimatique	21
Figure 3. Réseau hydrographique de la plateforme de modélisation de l'Atlas	22
Figure 4. Carte de la distribution des classes texturales intégrées décrivant les types de sol	24
Figure 5. Carte de la distribution des données d'occupation du sol	25
Figure 6. Carte des 307 stations utilisées pour l'Atlas hydroclimatique	26
Figure 7. Description des stations utilisées pour la calibration	27
Figure 8. Résultats de la validation des six plateformes hydrologiques	34
Figure 9. Cartes des KGE pour les six plateformes	36
Figure 10. Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit moyen sur 7 jours minimal	37
Figure 11. Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit moyen sur 7 jours minimal	37
Figure 12. Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit maximal	37
Figure 13. Hydrogramme des débits annuels moyens à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.	38
Figure 14. Hydrogramme des débits minimaux 7 jours à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.	39
Figure 15. Hydrogramme des débits annuels maximaux à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.	40
Figure 16. Schéma de production des indicateurs de l'Atlas	41
Figure 17. Exemple illustrant les principales étapes de l'IO. A : Observations. B : Champ d'essai (débits simulés pas le modèle). C : Erreur (différence entre les observations et le champ d'essai). D : Corrélation de l'erreur en fonction de la distance. E : Innovation. F : Analyse.	48
Figure 18. Comparaison en validation croisée des méthodes d'interpolation des débits journaliers aux tronçons non jaugés. 3NN : Moyenne des trois plus proches voisins. OK : Krigeage ordinaire. TK : Krigeage topologique. HM : Modèle hydrologique. SI : Interpolation statistique (Interpolation optimale). [Figure tirée de Lachance-Cloutier et collab. (2017)].	49
Figure 19. Comparaison des erreurs relatives des méthodes d'interpolation des indicateurs aux tronçons non jaugés, en validation croisée. PPV : Plus proche voisin. RLM : Régression linéaire multiple. KO : Krigeage ordinaire. KCan : Krigeage canonique. IO : Interpolation optimale. KT : Krigeage topologique. RFA : <i>Regional frequency analysis</i> . MM : Moyenne de méthodes.	50
Figure 20. Tronçons filtrés de moins de 50 km ²	51
Figure 21. Exemple de diagramme à boîte à moustaches présentant les 10 ^e , 25 ^e , 50 ^e , 75 ^e et 90 ^e centiles pour la période de référence et les 2 RCP pour les 3 horizons projetés.	52
Figure 22. Les descripteurs du signal de changement hydrologique	53
Figure 23. Coefficient de détermination (R ²) pour les débits annuels moyens des 6 plateformes	104
Figure 24. Coefficient de détermination (R ²) pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes	105
Figure 25. Coefficient de détermination (R ²) pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes	106
Figure 26. RMSE pour les débits annuels moyens des 6 plateformes	107
Figure 27. RMSE pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes	108
Figure 28. RMSE pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes	109

Figure 29. Biais pour les débits annuels moyens des 6 plateformes _____	110
Figure 30. Biais pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes _____	111
Figure 31. Biais pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes _____	112
Figure 32. Détermination des saisons hydrologiques à la station 021601 (méthode Atlas 2018)_____	117
Figure 33. Ampleur du changement projeté (exprimé en pourcentage) pour l'indicateur (Q7min2E) à l'horizon 2050 et pour le RCP4.5 (méthode Atlas 2018) _____	118
Figure 34. Exemples de temps de montée (TM) et de décrue (TD) calculés pour des crues jugées significatives _____	119
Figure 35. Exemple de détermination de la date du début de l'hiver-printemps (HP)_____	121
Figure 36. Exemple de détermination de la date de fin de l'hiver-printemps (HP) _____	121
Figure 37. Carte illustrant la date de la fin de la saison HP pour les tronçons de l'Atlas _____	122
Figure 38. Exemple de débits maximaux et minimaux annuels et issus des processus hydrométéorologiques (fonte de neige et pluie, et pluie _____	123
Figure 39. Valeurs expérimentales de la corrélation de l'erreur en fonction de la distance (points noirs) et ajustement théorique (ligne noire) pour la rive sud du fleuve Saint-Laurent et la plateforme MG24HA _____	126
Figure 40. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur JQ1MAXHP _____	130
Figure 41. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX2HP _____	131
Figure 42. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX2EA _____	132
Figure 43. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX20HP _____	133
Figure 44. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX20EA _____	134
Figure 45. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q7MIN2HP _____	135
Figure 46. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q7MIN2EA _____	136
Figure 47. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYAN _____	137
Figure 48. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYHP _____	138
Figure 49. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYEA _____	139

Remerciements

L'Atlas hydroclimatique est produit par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), mais il est le résultat de nombreuses collaborations nationales et internationales.

Nous remercions plus particulièrement le consortium Ouranos, qui a fourni et traité l'ensemble des données climatiques nécessaires à la réalisation de l'Atlas hydroclimatique. Dans le cadre du projet Soutien à INFO-Crue, Ouranos et ses collaborateurs universitaires a aussi contribué à certaines améliorations méthodologiques de l'Atlas, de même qu'aux efforts de diffusion.

Les observations météorologiques utilisées pour la modélisation hydrologique ont été fournies par la Direction de la qualité de l'air et du climat (DQAC) du MELCCFP. Le Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) a été fourni par la Direction de l'expertise en biodiversité (DEB) du MELCCFP. Les données CANSIS-USGS ont été transmises par Ouranos avec l'approbation de monsieur Kit K. Szeto. Les données d'occupation du territoire sont issues du projet ESA GlobCover 2009 (© ESA 2010 et UCLouvain).

Nous remercions le groupe de travail sur la modélisation couplée du Programme mondial de recherche sur le climat, responsable du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), et les groupes de modélisation du climat (énumérés dans le **Tableau 14**) qui ont produit et rendu disponibles leurs modèles. Nos remerciements vont également au U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, qui assure la coordination du soutien et le développement dirigé de l'infrastructure logicielle du CMIP en partenariat avec la Global Organization for Earth System Science Portals.

Nous remercions le World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate et le Working Group on Coupled Modelling, ancien organe de coordination du Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) et groupe responsable du CMIP5. Nous remercions aussi les groupes de modélisation du climat (énumérés dans le **Tableau 13**) pour la production et la mise à disposition de leur modèle. Nous remercions également le U.S. Department of Defense's Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) pour son soutien aux archives de données NA-CORDEX.

La production de ClimEx a été financée dans le cadre du projet ClimEx par le ministère bavarois de l'Environnement et de la Protection des consommateurs. Le CRCM5 a été mis au point par le centre ESCER de l'Université du Québec à Montréal (UQAM; www.escer.uqam.ca) en collaboration avec Environnement et Changement climatique Canada. Nous remercions le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique d'Environnement et Changement climatique Canada pour l'exécution et la mise à disposition des simulations du grand ensemble CanESM2 utilisées dans cette étude, et le Canadian Sea Ice and Snow Evolution (CanSISE) Network pour avoir proposé les simulations. Les calculs avec le CRCM5 pour le projet ClimEx ont été effectués sur le supercalculateur SuperMUC du Leibniz Supercomputing Centre (LRZ) de l'Académie bavaroise des sciences et des sciences humaines. Le fonctionnement de ce supercalculateur est financé via le Gauss Centre for Supercomputing (GCS) par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche et le ministère bavarois des sciences, de la recherche et des arts.

Nous remercions finalement les membres du comité scientifique pour leurs commentaires éclairés : François Anctil, Marie-Amélie Boucher, Marco Braun, François Brissette, Thomas Buffin-Bélanger, Louis-Philippe Caron, Éric Crobeddu, Vincent Fortin, Robert Lecompte, Alain Mailhot, Pascal Matte, Damien Pham Van Bang, Alain Rousseau et Mélanie Trudel.

Nous soulignons enfin le caractère crucial des banques de données d'observation du climat et du débit des rivières du Québec sans lesquelles la réalisation de l'Atlas hydroclimatique aurait été impossible.

Avant-propos

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) a pour mission de contribuer au développement durable du Québec en jouant un rôle clé dans la lutte contre les changements climatiques, la protection de l'environnement et la conservation de la biodiversité au bénéfice des citoyens.

À ce titre, le MELCCFP travaille depuis 2011 à soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Dans cette optique, le MELCCFP a produit l'[Atlas hydroclimatique du Québec méridional](#), un outil cartographique présentant le régime hydrique des rivières en climat actuel et futur, et aidant à une prise de décisions qui anticipent l'impact des changements climatiques sur les débits des rivières.

L'Atlas hydroclimatique est réalisé avec le soutien de nombreux collaborateurs, et son développement est appuyé financièrement par le Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques et du Plan pour une économie verte 2030 du gouvernement du Québec.

Suivant des versions en 2013 et en 2015 disponibles en format rapport, la première version cartographique interactive de l'Atlas était mise en ligne en 2018 et présentait des informations sur l'hydrologie en climat futur pour 1 900 tronçons de rivières. Une nouvelle version améliorée de l'Atlas est parue en 2022 et propose maintenant près de 10 000 tronçons de rivières ainsi que 2 nouveaux outils de consultation de l'historique des débits des rivières du Québec méridional.

Ce rapport technique documente la méthodologie et les données de l'Atlas hydroclimatique 2022 pour faciliter la compréhension de ses résultats et soutenir une utilisation éclairée de ses outils. Comme le présent document a pour objectif d'expliquer les processus, il s'adresse aux professionnels et aux spécialistes intéressés par la méthodologie de l'Atlas et qui désirent aller plus loin que le survol présenté dans le [Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022](#). Plus précisément, il pourra intéresser les chercheurs étudiant la modélisation hydroclimatique et les praticiens souhaitant comprendre et connaître les limites des données disponibles. De façon générale, il pourra être consulté par tout hydrologue, climatologue ou spécialiste des sciences de la Terre désirant en apprendre davantage sur l'hydroclimatologie.

Ce rapport est divisé en six chapitres. Le [chapitre 1](#) introduit l'Atlas par un historique et un résumé des nouveautés de la version 2022. Le [chapitre 2](#) présente les données et les modèles utilisés pour la production de l'Atlas, tandis que le [chapitre 3](#) détaille la méthodologie, c'est-à-dire comment ces données et ces modèles sont utilisés. Le [chapitre 4](#) fait un survol des principaux résultats, qui sont par la suite discutés au [chapitre 5](#). Le [chapitre 6](#) conclut le rapport, notamment en ouvrant sur les perspectives. Une [bibliographie](#) et des annexes complètent le rapport.

Liste des abréviations

BDTQ	Base de données topographiques du Québec
BV	Bassin versant
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORDEX-NA	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, sur le domaine nord-américain
DEB	Direction de l'expertise en biodiversité (MELCCFP)
DOR	<i>Degree of regulation</i> (indice de l'influence de la gestion des barrages)
EEN	Équivalent en eau de la neige
ETP	Évapotranspiration potentielle
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais, IPCC)
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC)
KGE	<i>Kling-Gupta efficiency</i>
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MRC	Modèle régional de climat
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
NED	National Elevation Dataset
RCP	<i>Representative concentration pathways</i> (scénarios d'émission et de concentration des GES)
RHN	Réseau hydrographique national
RMSE	<i>Root-mean-square error</i> (racine de l'erreur quadratique moyenne)
RNCan	Ressources naturelles Canada

SIEF	Système d'information écoforestière
UHRH	Unité hydrologique relativement homogène
USGS	United States Geological Survey

Glossaire

Modélisation du climat	
ClimEx	Grand ensemble de simulations climatiques du modèle climatique régional canadien (MRCC5-LE) piloté par 50 membres du Canadian Earth System Model (CanESM2) pour le RCP8.5 (~12 km de résolution).
CORDEX-NA	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment sur le domaine nord-américain (NA). Ensemble de simulations climatiques régionales, bonifié de simulations du MRCC5 réalisées par Ouranos et suivant un protocole similaire.
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. Ensemble de simulations climatiques réalisé sous la direction du Working Group on Coupled Modelling et soutenant la rédaction du cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).
Ensemble climatique	Groupe de simulations climatiques réalisées à partir de différents modèles climatiques et de différents RCP (<i>representative concentrating pathways</i>).
Membres climatiques	Groupe de simulations climatiques produites par un même modèle climatique et un même RCP à partir de conditions initiales légèrement différentes.
Modèle climatique	Représentation numérique du système climatique basée sur une représentation des processus atmosphériques et océaniques.
Post-traitement	Procédure visant à corriger ou à compenser les écarts entre les simulations climatiques et les observations de référence.
RCP	<i>Representative concentration pathways</i> . Scénarios d'émission et de concentration des gaz à effet de serre (GES), des aérosols et des gaz chimiquement actifs. Le scénario d'évolution du climat RCP4.5 est généralement considéré comme « optimiste », alors que le scénario RCP8.5 est plutôt considéré comme « pessimiste ».
Scénario climatique	Simulation climatique après post-traitement.
Simulation climatique	Exécution d'un modèle climatique selon certains paramètres et conditions initiales donnés.
Hydrologie	
Bassin versant	Unité géographique représentant le territoire de drainage d'un point donné appelé « exutoire ».
Bassin versant primaire (BV primaire)*	Bassin versant principal dans lequel se trouve le tronçon sélectionné.
Crue	Période de fort débit.
Étiage	Période de faible débit.
Hydraulicité	Valeur moyenne de débits sur une longue période (mois, saison, année).
Identifiant tronçon*	Identifiant du segment de rivière modélisé.

Indicateur hydrologique	Expression mathématique quantifiant une composante du régime hydrique.
Influence de la gestion des barrages*	Niveau d'influence potentiel de la gestion des barrages situés en amont sur les débits d'un tronçon (DOR : <i>degree of regulation</i>).
Interpolation optimale	Technique de post-traitement des données utilisée pour interpoler les débits et les indicateurs hydrologiques pour des tronçons non jaugés en combinant l'information de la modélisation hydrologique et des stations hydrométriques.
Modèle hydrologique	Représentation numérique des processus hydrologiques.
Pointe de crue	Valeur maximale de débit observée lors d'une crue.
Portrait	Reconstruction des débits historiques par combinaison des données des stations hydrométriques avec les simulations hydrologiques par la méthode de l'interpolation optimale. Le Portrait donne accès aux séries temporelles de débits journaliers pour la période de 1970 jusqu'à récemment, sur près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés.
Projections hydroclimatiques	Ensemble de simulations du régime hydrologique en climat futur.
Québec méridional	Fait référence au Québec hydrologique méridional, un territoire de 771 403 km ² couvrant l'ensemble des 40 zones de gestion intégrée de l'eau par bassin versant, soit tout le Québec méridional, à l'exception du fleuve Saint-Laurent et de ses îles (Montréal, Anticosti, d'Orléans, etc.).
Récurrence	Évaluation statistique à long terme de l'intervalle de temps moyen entre deux événements hydrologiques d'une intensité donnée.
Série temporelle	Série chronologique de débits; série de données de débit indexée par le temps.
Superficie drainée*	Superficie du bassin versant modélisé, en amont du tronçon sélectionné.
Volume	Quantité d'eau transportée par un cours d'eau sur une période donnée.
Analyse du changement	
Ampleur*	Valeur médiane des changements estimés.
Changement	Écart, exprimé en valeur relative, entre un indicateur hydrologique estimé sur une période de référence et une période future.
Direction du changement*	Proportion des projections hydrologiques anticipant une augmentation (ou une diminution) d'un indicateur donné. <ul style="list-style-type: none"> • Augmentation très probable : plus de 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation. • Augmentation probable : de 66 % à 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation. • Absence de consensus : de 33 % à 66 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation ou une diminution. L'absence de consensus peut indiquer un changement faible ou des projections hydroclimatiques dispersées. • Diminution probable : de 66 % à 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une diminution.

		<ul style="list-style-type: none"> • Diminution très probable : plus de 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une diminution.
Dispersion*		Évaluation de l'enveloppe interquartile (75 ^e -25 ^e) comprenant la moitié des valeurs probables autour de la valeur médiane (50 ^e). Indique la dispersion du signal autour de l'ampleur.
Horizon		Période de 30 ans. L'horizon 2020 (H20) couvre la période 2011-2040, l'horizon 2050 (H50) correspond à la période 2041-2070 et l'horizon 2080 (H80) couvre la période 2071-2100.
Niveau de confiance	de	Appréciation, fondée sur un jugement d'expert, de la valeur d'une information.
Valeur de référence*	de	Valeur d'un indicateur hydrologique calculé à partir d'une série de débits mesurés par une station hydrométrique au cours d'une période de référence.
Période de référence	de	Période historique de 30 ans, allant de 1981 à 2010.

*Ce terme apparaît dans la fenêtre de navigation associée aux tronçons sur le site Web de l'Atlas hydroclimatique; la définition s'applique donc au contexte précis de l'Atlas hydroclimatique.

1. Introduction

1.1 Contexte et historique

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) travaille depuis plus d'une décennie à soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Dans cette optique, le MELCCFP a produit l'[Atlas hydroclimatique du Québec méridional](#), un outil cartographique présentant le régime hydrique des rivières en climat actuel et futur, et aidant à une prise de décisions qui anticipent l'impact des changements climatiques sur les débits de ces rivières. L'information présentée est basée sur des projections hydrologiques produites selon des pratiques de modélisation largement reconnues par la communauté scientifique. L'analyse du signal de changement s'effectue sur la base d'un indicateur hydrologique, c'est-à-dire une expression mathématique quantifiant une composante du régime hydrique. Le développement et la mise en œuvre de cet outil de pointe sont réalisés en étroite collaboration avec Ouranos et d'autres partenaires de la pratique et de la recherche.

Ce travail s'effectue avec une approche séquentielle permettant des améliorations et des mises à jour progressives. Cela est notamment essentiel pour suivre les cycles de mise à jour des efforts internationaux pour la modélisation du climat. Cette progression par version a aussi l'avantage de permettre d'intégrer les suggestions des utilisateurs, sans compromettre la stabilité de l'outil.

Un [premier Atlas](#) a été publié en 2013 sous forme de rapport PDF. Cette version couvrait 40 bassins versants jaugés et incluait 89 simulations climatiques issues des ensembles CMIP3, NARCCAP et Ouranos-MRCC.

Une [mise à jour en 2015](#) a permis de bonifier la couverture spatiale et la qualité de la modélisation des étiages ainsi que d'intégrer la nouvelle génération de simulations climatiques, soit l'ensemble CMIP5. L'impact des changements climatiques était présenté pour 50 bassins versants jaugés.

En 2018, la première version cartographique interactive de l'Atlas était mise en ligne et présentait des informations sur l'hydrologie en climat futur pour 1 900 tronçons de rivières, jaugés et non jaugés. Deux variantes d'implantation du modèle Hydrotel étaient utilisées. Les données de cette version sont archivées sur [Données Québec](#).

1.2 Nouveautés

La plus récente version a été mise en ligne en 2022. Voici la liste des principaux changements apportés à l'Atlas dans cette version, avec les liens vers les sections correspondantes entre parenthèses :

- Refonte complète du [site Web](#), avec hébergement des indicateurs sur [Données Québec](#) pour faciliter la consultation et le téléchargement des données;
- Ajout de documentation ([tutoriel](#), [guide](#), etc.);
- Ajout des outils « Stations hydrométriques » et « Portrait » (3.3.1);
- Amélioration de la résolution spatiale du réseau hydrographique (2.1.3);
- Plus grande couverture spatiale (2.1.1);
- Ajout des ensembles climatiques ClimEx et CORDEX-NA pour compléter CMIP5, avec pondération des scénarios (2.3);
- Utilisation de six plateformes hydrologiques (variantes du modèle hydrologique) (2.5);
- Ajout de nombreux indicateurs hydrologiques, notamment annuels (3.2).

Le **Tableau 1** synthétise les nouveautés en présentant le comparatif avec la version précédente (Atlas 2018). Les effets des changements méthodologiques sur les résultats sont discutés à la [section 5.1](#).

Tableau 1. Changements de l'Atlas 2022 par rapport à l'Atlas 2018

	Atlas 2018	Atlas 2022
Nombre d'indicateurs hydrologiques	28	76
Horizons	<ul style="list-style-type: none"> • Référence (1971-2000) • H30 (2021-2050) • H50 (2041-2070) • H80 (2071-2100) 	<ul style="list-style-type: none"> • Référence (1981-2010) • H20 (2011-2040) • H50 (2041-2070) • H80 (2071-2100)
Saisons	La définition du printemps est basée sur la fin de la décrue printanière.	La définition du printemps est basée sur la neige au sol.
Nombre de scénarios climatiques	99 (CMIP5)	180 (CMIP5, ClimEx, CORDEX-NA), avec pondération
Modèle hydrologique	Hydrotel v4.0.14	Hydrotel v4.1.5
Nombre de plateformes	2	6
Résolution spatiale du modèle numérique d'élévation	100 à 200 m	100 m
Carte des types de sol	<ul style="list-style-type: none"> • Reclassification de Setzo • Reclassification de Shangguan 	Reclassification de Setzo
Formule d'évapotranspiration potentielle (ETP)	<ul style="list-style-type: none"> • Hydro-Québec • Linacre 	<ul style="list-style-type: none"> • Linacre • McGuinness
Couverture spatiale	742 917 km ²	771 403 km ²
Résolution spatiale	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau hydrographique d'ordre de Strahler 3+ à 5+ • 5 198 tronçons simulés • 1 961 tronçons diffusés • Taille moyenne des unités hydrologiques relativement homogène (UHRH) : 57 km² 	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau hydrographique d'ordre de Strahler 2+ à 4+ • 28 035 tronçons simulés • 9 665 tronçons diffusés • Taille moyenne des UHRH : 11 km²

1.3 Usages et limitations

L'information présentée dans l'Atlas est de nature générale et elle est mise à la disposition de l'utilisateur à titre informatif seulement. Il est de la responsabilité de celui-ci de bien comprendre les limites des données décrites ci-après. Le MELCCFP et les auteurs ne garantissent pas l'exactitude, l'exhaustivité ou l'actualité des renseignements ou données présentés dans l'Atlas ni leur utilité aux fins d'un usage particulier.

Toute personne qui fait usage de l'Atlas assume l'entière responsabilité de cet usage, et toute personne utilisant les données et l'information contenues dans l'Atlas à des fins de conception, de construction, de fabrication ou d'installation le fait à ses risques. Pour toute question particulière ou pour une adaptation de l'Atlas à une situation précise, il est recommandé de faire appel à un spécialiste. Le MELCCFP, ses employés, ses fonctionnaires, ses agents et les auteurs n'assument aucune responsabilité relativement à toute action, erreur ou omission dans les données de l'Atlas. De plus, toute utilisation de l'Atlas et tout résultat découlant de l'utilisation totale ou partielle de l'Atlas sont uniquement de la responsabilité de l'utilisateur. En conséquence, le MELCCFP n'est pas responsable de toute perte ou de tout dommage quels qu'ils soient, y compris, notamment, des dommages directs ou indirects attribuables à l'utilisation de l'Atlas.

Pour signaler une erreur, poser une question ou formuler un commentaire, écrivez-nous : atlas.hydroclimatique@environnement.gouv.qc.ca.

1.3.1 Conditions d'utilisation

Les ensembles de données de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022, soit les données et diagrammes des outils « Portrait » et « Indicateurs », sont proposés sous la [licence CC-BY 4.0](#).

Cela donne le droit de redistribuer les données et les diagrammes, de les développer et de les utiliser librement (y compris pour des applications commerciales), à condition que l'Atlas hydroclimatique soit correctement cité. Veuillez noter, toutefois, que le MELCCFP ne fait aucune déclaration et ne garantit pas l'exactitude des ensembles de données.

Les conditions d'utilisation pour les données de l'outil « Stations hydrométriques » sont disponibles aux liens suivants :

- [Conditions d'utilisation](#) pour les données historiques;
- [Conditions d'utilisation](#) pour les données de suivi en temps réel;
- [Conditions d'utilisation](#) pour les prévisions hydrologiques.

Pour citer les données de l'Atlas hydroclimatique

- Données du Portrait:

Atlas hydroclimatique 2022 – Portrait (version 202Xy) [base de données en ligne], Québec, MELCCFP, <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/carte-portrait/index.htm> (page consultée le jour mois année).

Mettre le bon numéro de version (par exemple, 2023a), qui est indiqué sur la page de l'accueil de l'outil ainsi que dans l'en-tête des fichiers de données.

L'article décrivant la méthodologie peut aussi être cité :

Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., et Cyr, J. F. (2017). "Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada)". *Journal of Hydrology*, 550, p. 294-306.

- Données des Indicateurs :

Atlas hydroclimatique 2022 – Indicateurs [base de données en ligne], Québec, MELCCFP, <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/atlas-hydroclimatique-2022> (page consultée le jour mois année).

Pour citer ce rapport technique :

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2023. *Rapport technique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*. [En ligne], www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/rapport-atlas-hydroclimatique-2022.pdf.

1.3.2 Outil « Portrait »

L'outil « Portrait » donne accès aux séries temporelles de débits journaliers pour la période s'étendant de 1970 jusqu'à une date récente, pour près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés. Des mises à jour sont réalisées de deux à quatre fois par année.

Le Portrait utilise l'interpolation optimale pour combiner l'information des stations hydrométriques et celle de la modélisation hydrologique (Lachance-Cloutier et collab., 2017). Un fichier CSV associé à chaque tronçon du Portrait peut être téléchargé sur ce site. Ce fichier contient les métadonnées relatives au tronçon, ainsi que les données de débit journalier en mètres cubes par seconde (m³/s) depuis le 1^{er} janvier 1970. Une estimation du 25^e, du 50^e et du 75^e centiles est fournie pour donner une appréciation de l'incertitude des débits.

1.3.3 Outil « Indicateurs »

L'outil « Indicateurs » rend disponibles, sous forme de cartes interactives et de tableaux téléchargeables, 76 indicateurs hydrologiques (crue, étiage, etc.) pour différentes périodes (1 historique et 3 futures), pour près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés. Une chaîne de modélisation hydroclimatique utilisant 180 scénarios climatiques (ensembles CMIP5, CORDEX-NA et ClimEx) simulés par 6 configurations d'un modèle hydrologique permet d'estimer l'impact des changements climatiques sur ces indicateurs.

2. Données et modèles

2.1 Données physiographiques

Les données physiographiques servent à la modélisation hydrologique. Par rapport à la version 2018 de l'Atlas hydroclimatique, les principaux changements en lien avec ces données sont l'amélioration de la résolution spatiale et l'augmentation de la couverture spatiale. Quelques secteurs près des frontières ontariennes et américaines qui avaient été omis dans la version précédente de l'Atlas ont été ajoutés afin de compléter la couverture à l'intérieur des frontières du Québec (notamment les secteurs des rivières s'écoulant dans la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick, de Vaudreuil et du lac Abitibi). Les autres sources de données (topographie, types de sol, occupation du sol) sont essentiellement les mêmes que celles utilisées pour l'Atlas 2018. Le traitement des données physiographiques a été effectué à l'aide d'ArcGIS 10.5 et de la version 4.0.11 de Physitel (Fortin et collab., 1995).

2.1.1 Territoire modélisé

Le territoire couvert par la plateforme de modélisation hydrologique a une superficie totale de 771 403 km², comparativement à 742 917 km² pour la version précédente de l'Atlas. Il couvre l'ensemble des 40 zones de gestion intégrée de l'eau par bassin versant (MELCCFP, s. d.), soit tout le Québec méridional à l'exception du fleuve Saint-Laurent et de ses îles (Montréal, Anticosti, d'Orléans, etc.). Pour faciliter la parallélisation des calculs, le territoire a été divisé virtuellement en 15 projets Hydrotel indépendants (**Figure 1**). La section 2.1.3 présente plus de détails sur ces projets.

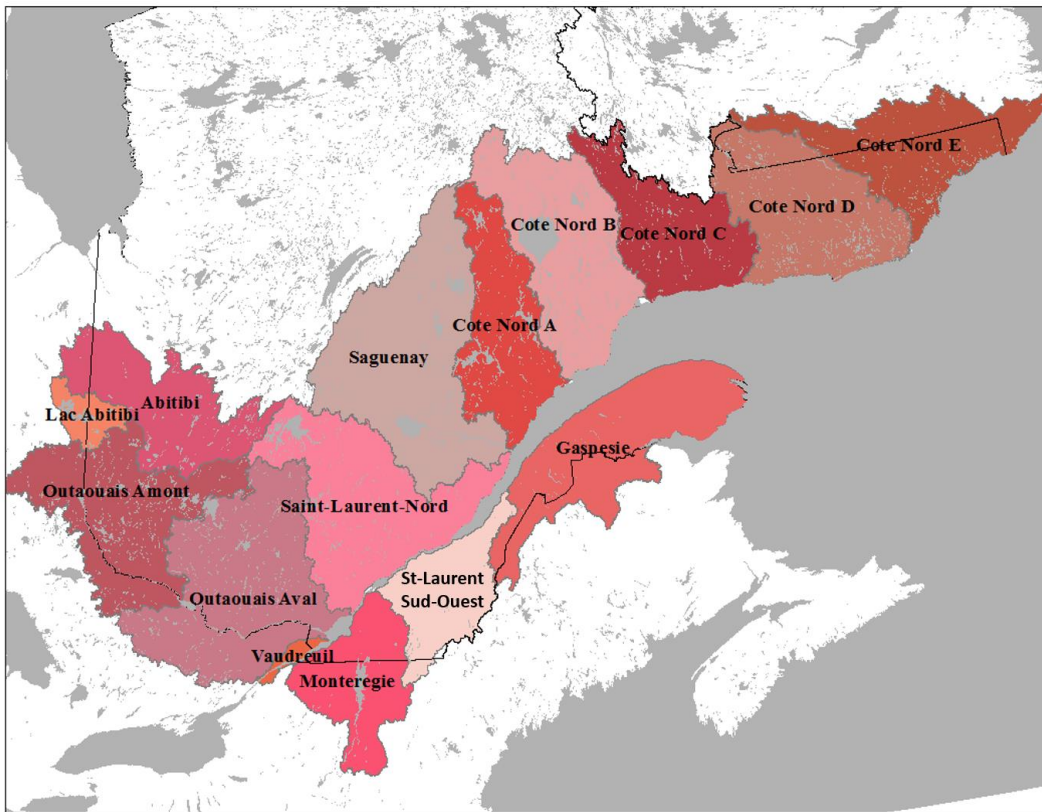


Figure 1. Carte de la couverture spatiale des 15 projets de l'Atlas

2.1.2 Topographie

Sur le territoire québécois, les données topographiques à une résolution de 10 m issues de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) (ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2008) ont été utilisées (**Figure 2**). Pour les portions ontarienne, néo-brunswickoise et états-unienne, les données à une résolution de 30 m du National Elevation Dataset (NED) (Gesch et collab., 2002; USGS, s. d.) produites par le U.S. Geological Survey (USGS) ont été utilisées. Ces jeux de données ont été agrégés puis convertis sur des mailles de résolution de 100 m pour l'ensemble de la plateforme.

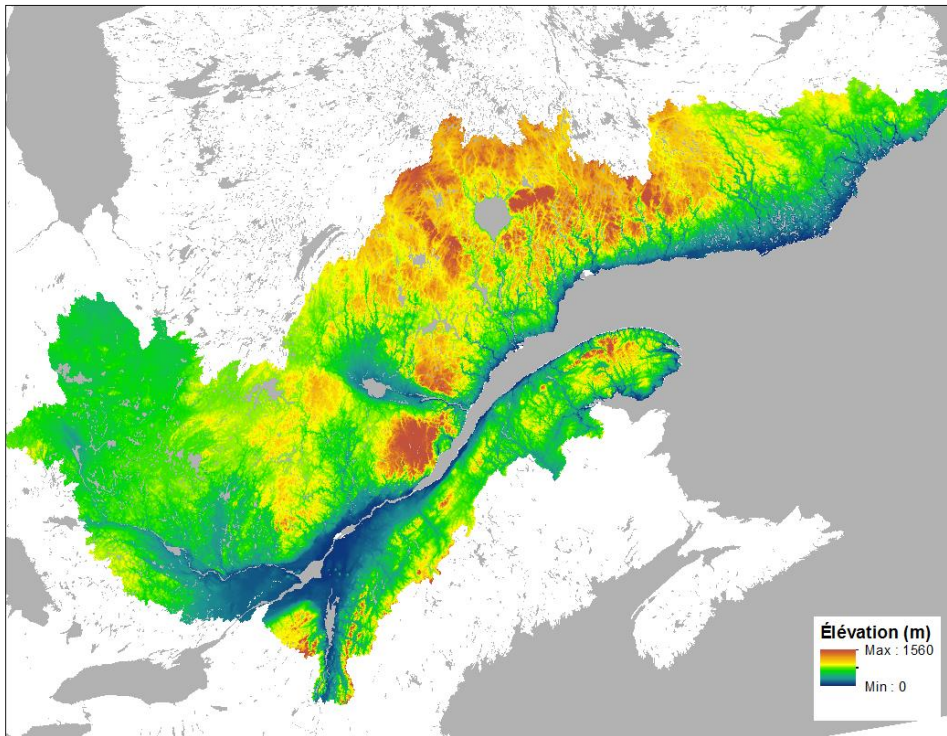


Figure 2. Topographie utilisée pour l'Atlas hydroclimatique

2.1.3 Réseau hydrographique

La Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ), produite par le MELCCFP et par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN, 2016), a été utilisée comme donnée source afin de construire la représentation vectorielle du réseau hydrographique sur le territoire modélisé. Une sélection a été appliquée afin de ne conserver, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, que les tronçons d'ordre de Strahler supérieur ou égal à 2. Pour la rive nord du fleuve, les tronçons d'ordre de Strahler supérieur ou égal à 3 ont été retenus, sauf pour la Côte-Nord et la section en amont de l'exutoire du lac Saint-Jean (tronçons d'ordre plus grand ou égal à 4).

Pour les sections du réseau hydrographique situées à l'extérieur du Québec où la GRHQ n'était pas disponible, le Réseau hydrographique national (RHN), produit par Ressources naturelles Canada (RNC), a été utilisé (Ressources naturelles Canada, s. d.). La résolution du réseau hydrographique définie pour les sections à l'extérieur du Québec correspond approximativement aux mêmes ordres de Strahler que la section à l'intérieur des frontières du Québec lorsque l'écoulement du réseau se fait vers le territoire québécois, et est composé d'un réseau d'environ un ordre de Strahler plus élevé lorsque l'écoulement se fait vers l'extérieur du territoire québécois,

vers la rivière des Outaouais ou vers le lac Champlain. La **Figure 3** illustre les 28 035 tronçons modélisés.

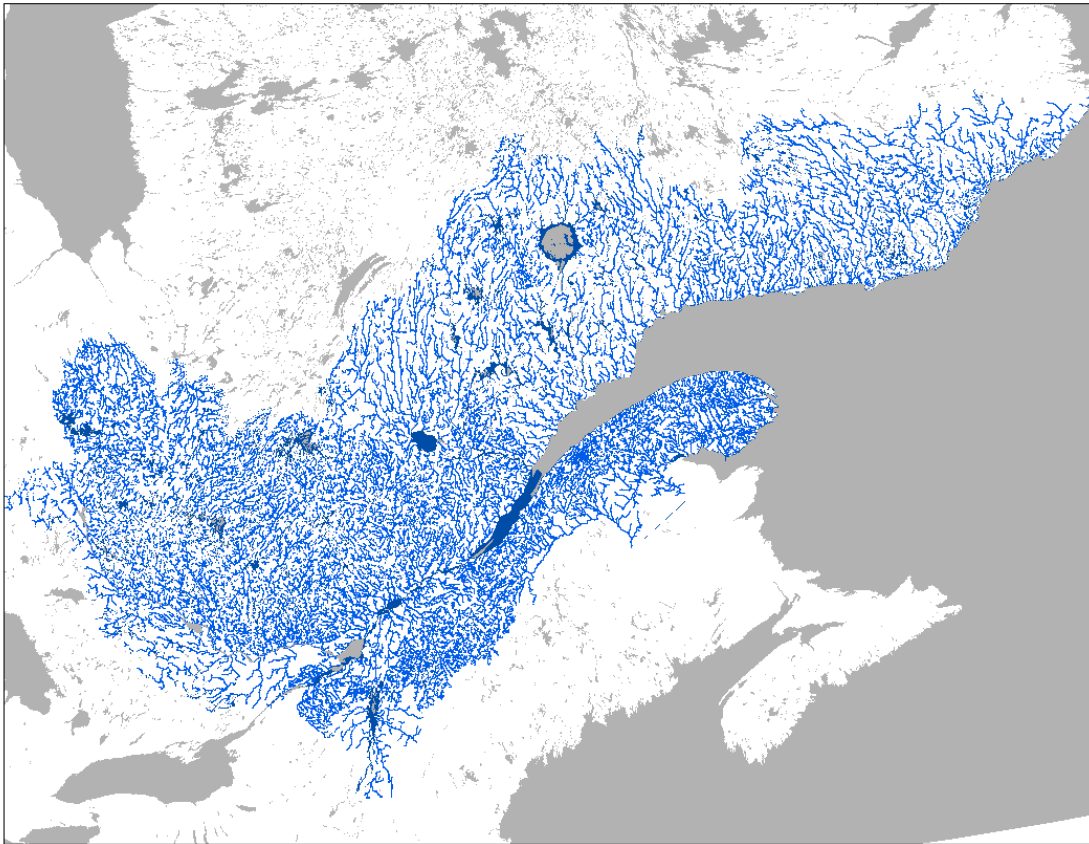


Figure 3. Réseau hydrographique de la plateforme de modélisation de l'Atlas

Le **Tableau 2** détaille le nombre de tronçons de rivières et la résolution par projet Hydrotel. Le code des projets et les numéros séquentiels des tronçons à l'intérieur d'un projet forment l'identifiant utilisé pour chacun des 28 035 tronçons de la plateforme. Par exemple, le tronçon GASP01646, soit le 1 646^e tronçon du projet Gaspésie, est le tronçon de la rivière Bonaventure qui correspond approximativement à la station hydrométrique 010802. Les identifiants sont notamment utilisés sur le site Web de l'Atlas, où les données sont présentées par tronçon. Le nombre d'unités spatiales de calcul (« UHRH » pour unité hydrologique relativement homogène) et leur superficie moyenne sont aussi présentés dans le tableau. La taille moyenne d'une UHRH est passée de 57 km² (Atlas hydroclimatique 2018) à 10 km² avec cette nouvelle plateforme.

Il est important de noter que le fleuve Saint-Laurent est exclu du réseau hydrographique de l'Atlas hydroclimatique.

Tableau 2. Caractéristiques de projets Hydrotel de l'Atlas

PROJET	Code	Nombre de tronçons	Nombre d'UHRH	Superficie* (km ²)	Superficie moyenne d'une UHRH (km ²)	Ordre de Strahler
Abitibi	ABIT	1 644	4 289	44 754	10,4	≥ 3
Côte-Nord A	CNDA	1 078	2 920	46 397	15,9	≥ 4
Côte-Nord B	CNDB	1 145	3 036	64 405	21,2	≥ 4
Côte-Nord C	CNDC	920	2 334	42 898	18,4	≥ 4
Côte-Nord D	CNDD	1 517	3 932	59 688	15,2	≥ 4
Côte-Nord E	CNDE	1 050	2 763	49 985	18,1	≥ 4
Gaspésie**	GASP	3 917	10 079	72 914	7,2	≥ 2
Montréal**	MONT	1 916	4 780	38 935	8,1	≥ 2
Outaouais amont**	OUTM	2 379	6 381	62 996	9,9	≥ 3
Outaouais aval**	OUTV	3 412	8 821	83 198	9,4	≥ 3
Saguenay	SAGU	2 212	5 735	87 468	15,3	≥ 3-4
Saint-Laurent Nord-Ouest	SLNO	3 362	8 676	71 641	8,3	≥ 3
Saint-Laurent Sud-Ouest	SLSO	2 889	7 324	34 571	4,7	≥ 2
Lac Abitibi	LABI	393	1 073	8 694	8,1	≥ 2
Vaudreuil	VAUD	201	537	2 860	5,3	≥ 2
TOTAL	-	28 035	72 680	771 404	10,6	-

*Superficie du projet qui inclut les lacs.

**Résolution plus élevée au Québec et plus grossière à l'extérieur.

2.1.4 Types de sol

La matrice des types de sol utilisée pour la plateforme de modélisation tire sa source des données CANSIS-USGS (Szeto et collab., 2008) présentant une estimation des pourcentages d'argile et de sable contenus dans les trois premières couches de sol. D'une résolution de 1 km, ces données couvrent l'ensemble de l'Amérique du Nord. Les données couvrant le territoire modélisé ont été extraites et traitées. Afin de ne déterminer qu'une seule classe texturale assignée à l'ensemble de la colonne de sol, une valeur verticalement pondérée des pourcentages d'argile et de sable a été calculée pour chaque pixel. L'application d'une fonction de pédotransfert a permis de transposer ces valeurs en différentes classes texturales, comme proposé par l'United States Department of Agriculture (Guber et Pachepsky, 2010). Une interpolation par plus proche voisin a été appliquée afin d'attribuer une classe à la plupart des données manquantes. Un reclassement des classes texturales a été opéré, comme décrit dans le **Tableau 3**. La **Figure 4** illustre la distribution des classes texturales intégrées pour chacune des sources de données.

Tableau 3. Regroupement des classes texturales

Classe intégrée	Classes initiales
Sableuse	Sable, sable loameux, loam sableux
Loameuse-argileuse	Loam sablo-argileux, loam argileux, limon argilo-silicieux
Loameuse	Loam, limon, loam limoneux
Argileuse	Argile limoneuse, argile

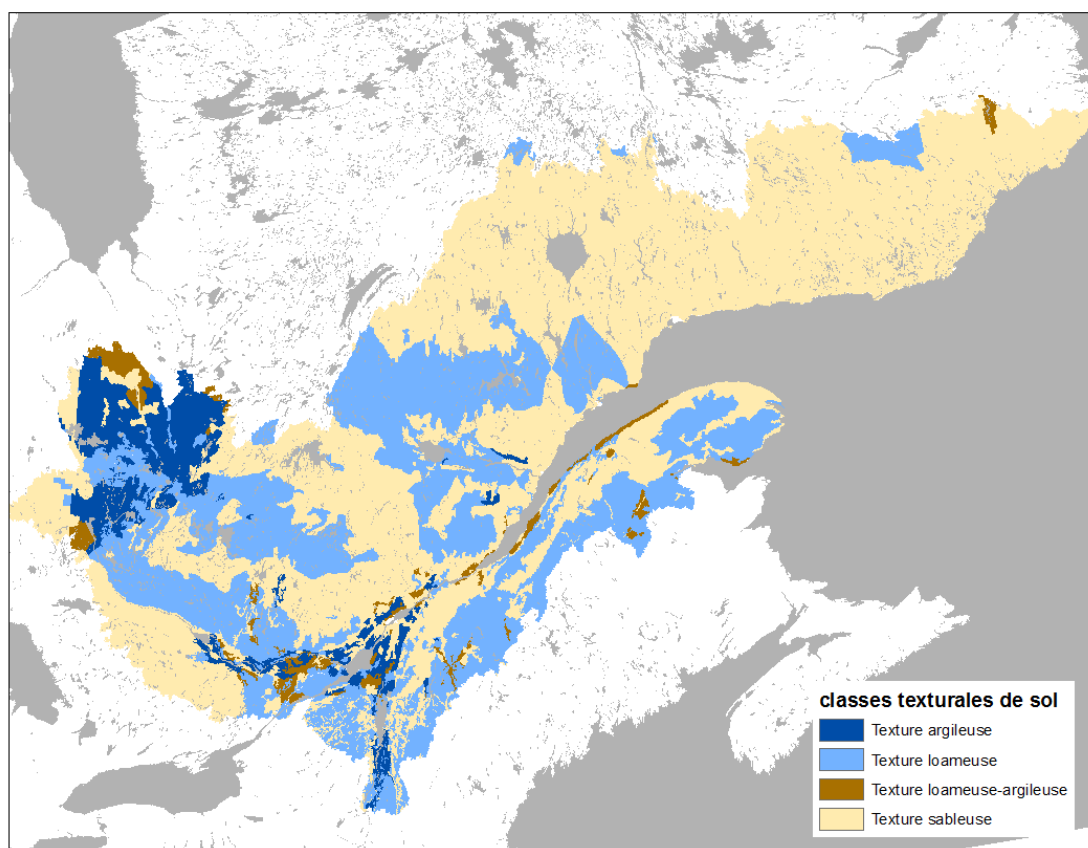


Figure 4. Carte de la distribution des classes texturales intégrées décrivant les types de sol

2.1.5 Occupation du sol

Les données d'occupation du sol proviennent de plusieurs sources. Elles ont été reclassifiées en 9 classes distinctes puis rééchantillonnées à une résolution de 100 m (**Figure 5**). Une compilation de plusieurs sources (SIEF¹, MELCCFP, MFFP², MERN) produite par le MELCCFP a servi de

¹ Système d'information écoforestière.

² Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

matrice de base (MDDELCC, 2016). Cette dernière a été complétée par les matrices du GlobCover 2009 de l'Agence spatiale européenne (Arino et collab., 2012) et Circa 2000 d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009).

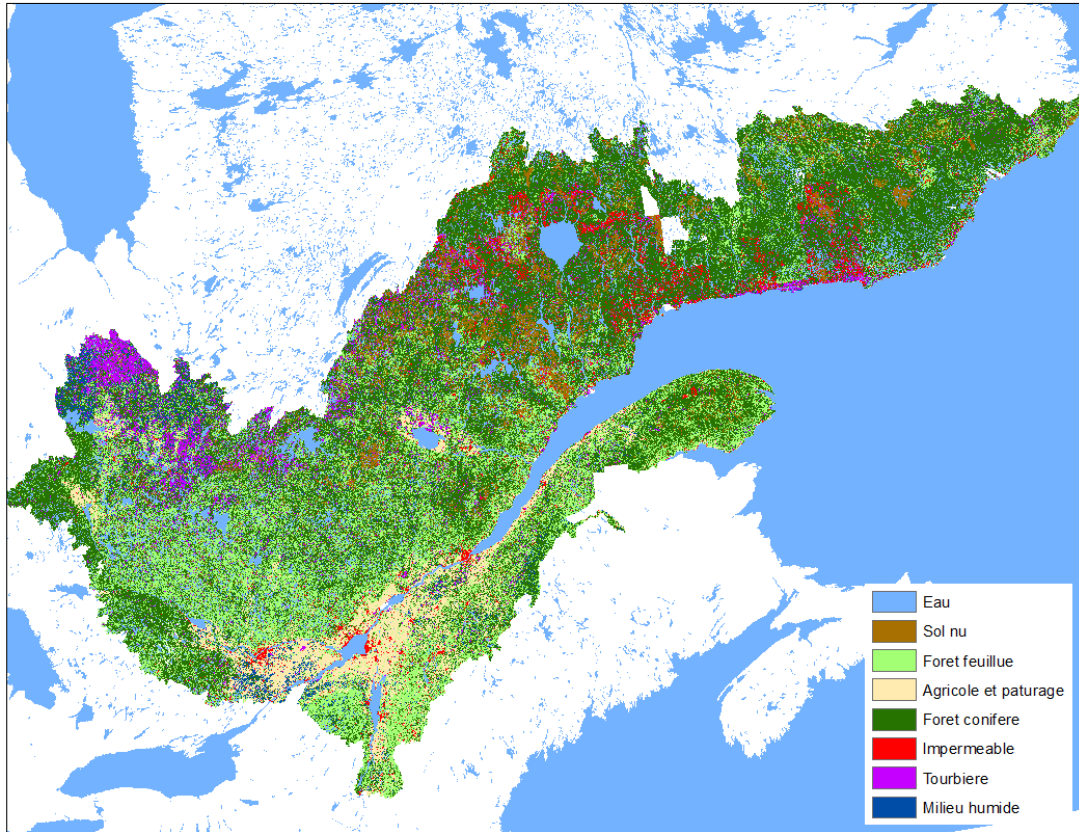


Figure 5. Carte de la distribution des données d'occupation du sol

2.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques proviennent du réseau hydrométrique québécois. Les débits observés servent à la calibration du modèle hydrologique et à sa validation, au calcul des indicateurs observés et à l'interpolation optimale des indicateurs et des séries temporelles de débits. L'Annexe A – Stations hydrométriques présente dans un tableau les stations utilisées, ainsi que leurs rôles (calibration, validation, tendance, Portrait). La carte de la **Figure 6** présente la répartition de ces 307 stations et leur état (ouverte ou fermée).

Parmi les 533 stations ayant des données de débit, la sélection des stations dépend des besoins, qui sont différents selon les rôles. Les critères communs sont que les stations doivent être situées sur le réseau de l'Atlas hydroclimatique (les stations au nord sont exclues) et avoir un régime naturel (ou influencé journalièrement), c'est-à-dire très peu ou pas influencé par la gestion d'un barrage. Pour des raisons de qualité, les données datant d'avant 1962 ne sont pas utilisées pour l'Atlas hydroclimatique. Seuls les débits journaliers ont été utilisés.

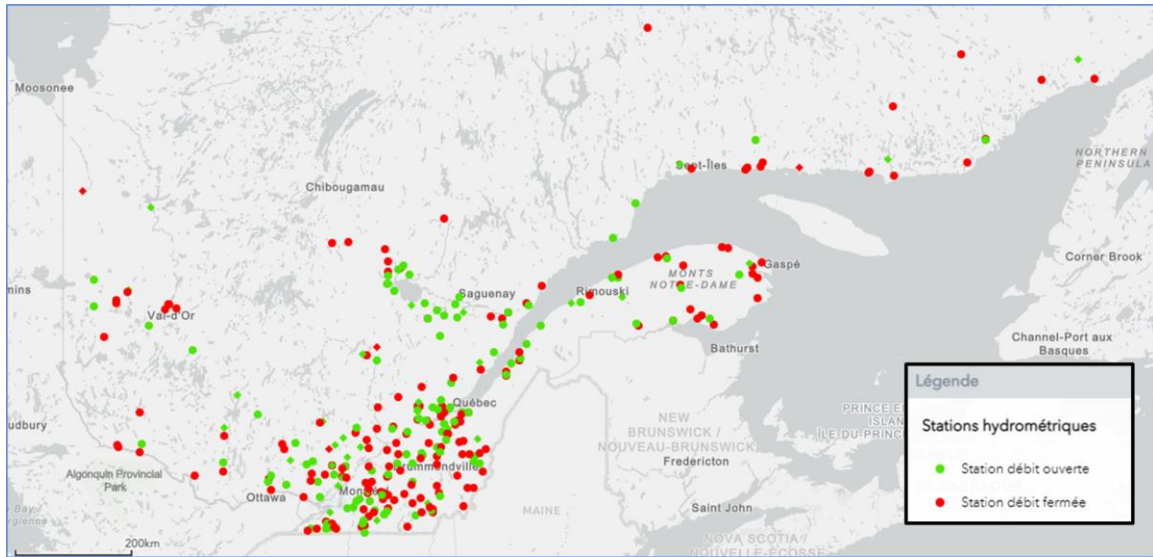


Figure 6. Carte des 307 stations utilisées pour l'Atlas hydroclimatique

Pour la calibration globale (2.5.2), les critères de sélection des stations incluaient :

- Des données récentes disponibles, car celles-ci sont de meilleure qualité;
- Un historique satisfaisant, c'est-à-dire peu de données manquantes sur la période de calibration (du 1^{er} octobre 2007 au 30 septembre 2017);
- Une bonne représentativité spatiale et de la gamme des superficies;
- Une courbe de tarage stable dans le temps. De plus, le débit maximal jaugé doit être supérieur au débit maximal de récurrence de 2 ans.

Ainsi, avec ces critères, 70 stations ont été retenues pour la calibration (**Figure 7**).

Pour la réalisation du Portrait, l'objectif étant d'intégrer un maximum d'informations, 279 stations ont été utilisées sur la base des critères communs. Autrement dit, même si une station avait un historique très court, ses données étaient tout de même prises pour l'interpolation optimale. Cependant, des poids différents étaient donnés aux stations selon des critères de qualité tels que le nombre d'années disponibles, la qualité de la courbe de tarage, etc. Voir la section 3.3 pour les détails.

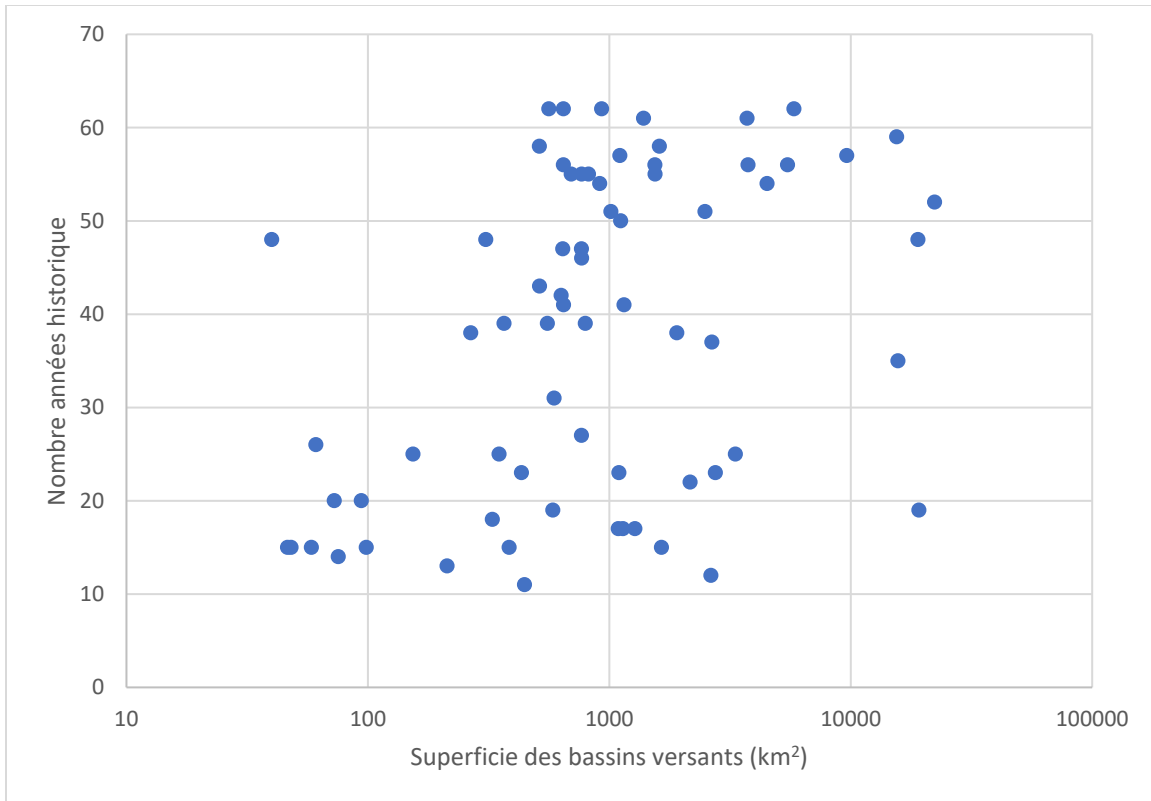


Figure 7. Description des stations utilisées pour la calibration

2.3 Données climatiques

Les données météorologiques utilisées pour le calage du modèle hydrologique et les simulations hydrologiques de la période de référence sont celles produites par la Direction de la qualité de l'air et du climat (DQAC) du MELCCFP (Bergeron, 2016). Les données de températures maximales et minimales journalières, ainsi que les hauteurs de précipitations journalières sont interpolées par la DQAC sur une grille d'une résolution de 0,1° (~ 10 km) couvrant l'ensemble du territoire québécois. Les données météorologiques pour la période 1962 à 2022 ont été extraites des grilles de la DQAC et formatées pour Hydrotel.

2.4 Projections climatiques

Pour une introduction aux simulations climatiques, le lecteur est prié de se référer au rapport de l'Atlas hydroclimatique 2015 (CEHQ, 2015), au *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022* (MELCCFP, 2022) ou au *Guide sur les scénarios climatiques* d'Ouranos (Charron, 2016).

2.4.1 Scénarios RCP

L'évolution possible des concentrations de gaz à effet de serre est représentée par quatre trajectoires appelées *representative concentration pathways* (RCP) (Van Vuuren et collab., 2011). Ces trajectoires sont celles adoptées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour son cinquième rapport d'évaluation, publié en 2014. Elles conduisent à des scénarios possibles d'évolution du forçage radiatif. Ces derniers représentent le déséquilibre

d'énergie entre, d'une part, le rayonnement solaire reçu par la Terre et, d'autre part, les émissions de rayonnement infrarouge quittant l'atmosphère.

Pour l'Atlas hydroclimatique, seuls les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été retenus, puisque la grande majorité des simulations disponibles sont pilotées par ceux-ci. De plus, une évolution présentement considérée comme probable se situe quelque part entre ces deux scénarios (Hausfather et Peters, 2020). Les simulations issues des trajectoires RCP2.6 et RCP6.0 sont rarement utilisées en raison de leur faible nombre. Le RCP2.6 est également jugé moins réaliste que les autres. Il correspond à une évolution où nous limitons rapidement les changements climatiques d'origine humaine, ce qui donne un réchauffement limité à moins de 2 °C à la fin du siècle, par rapport à l'ère préindustrielle. Le RCP4.5 correspond à un niveau d'émission de gaz à effet de serre « modéré », alors que le RCP8.5 correspond plutôt à un niveau « élevé ».

2.4.2 Simulations climatiques

Les 180 scénarios climatiques préparés par Ouranos et utilisés pour produire l'Atlas hydroclimatique sont issus de trois grands ensembles climatiques. Les 99 simulations globales proviennent de la 5^e génération de simulations effectuées dans le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) (Taylor et collab., 2012). L'ensemble ClimEx (Leduc et collab., 2019) consiste en 50 réalisations du modèle régional CRCM5, piloté par le grand ensemble CanESM2 avec des conditions initiales perturbées. L'ensemble Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment pour le domaine nord-américain (CORDEX-NA) (Mearns et collab., 2017) comprend 25 simulations régionales pour l'Atlas, et est bonifié de 6 simulations réalisées à Ouranos avec le modèle CRCM5 et en suivant un protocole semblable à celui de CORDEX-NA. La liste complète des simulations est présentée dans les **Tableau 13** et **Tableau 14** de l'Annexe B – Simulations climatiques.

2.4.3 Post-traitement climatique

Pour une variété de raisons explorées davantage par Charron (2016) notamment, les variables simulées par les modèles climatiques comportent généralement des biais par rapport aux données observées. Le post-traitement permet de corriger ces biais par des approches statistiques et est recommandé avant l'utilisation des données climatiques pour la modélisation hydrologique (Chen et collab., 2013). Dans le contexte de l'Atlas, une simulation climatique ayant subi un post-traitement est appelée un « scénario climatique ». Ce terme correspond, plus généralement, à une représentation plausible du climat futur, construite à partir de simulations climatiques (Charron, 2016). Les variables de précipitations et de températures maximales et minimales ont été corrigées avec la méthode de transformation par quantiles détendancée (Rondeau-Genesse et Braun, 2020). Cette méthode corrige chaque variable séparément, sans égard aux autres variables d'état. La première étape de cette méthodologie consiste à retirer temporairement la tendance (calculée mensuellement) de chaque variable, puis de créer une fonction de transfert pour chaque jour basée sur une fenêtre de 30 jours autour de la date d'intérêt. Pour les variables de températures, la méthode consiste en une transformation par quantiles (Gennaretti et collab., 2015; Mpelasoka et Chiew, 2009) avec 50 classes et une fonction de transfert additive. Pour les précipitations, cette étape est également appliquée (avec une fonction de transfert multiplicative), mais est suivie d'un post-traitement paramétrique pour les extrêmes (Roy et collab., 2023). La base de données produite par Ressources naturelles Canada (Hutchinson et collab., 2009; McKenney et collab., 2011) sert de référence pour le post-traitement. Les données sur grille de 10 x 10 km sont agrégées à l'échelle spatiale de chaque modèle, de façon à limiter l'incidence de la résolution sur le post-traitement. Pour la section américaine du domaine, le jeu de données produit par Livneh et collab. (2013) a été utilisé. Pour davantage d'information sur le post-traitement des données climatiques de l'Atlas 2022, le lecteur peut consulter le rapport de Rondeau-Genesse et Braun (2020).

Puisque cette méthode traite les biais de chaque variable de façon individuelle, elle ne tient pas compte des relations qui existent entre les variables et peut ainsi affecter la cohérence physique

qui existe entre celles-ci. Cela peut avoir une incidence sur les analyses subséquentes, y compris sur les simulations hydrologiques dérivées de celles-ci. Il faut cependant être prudent, car le seul fait de corriger plusieurs variables à la fois ne garantit pas qu'il n'y aura pas d'inconsistance physique dans les résultats (Alavoine et Grenier, 2022).

Finalement, lors du formatage des données des scénarios climatiques pour Hydrotel, les données de CMIP5 ont été mises à l'échelle par interpolation linéaire à une résolution spatiale de 0,44°.

2.4.4 Pondération des scénarios hydroclimatiques

Étant donné la grande hétérogénéité des ensembles climatiques utilisés, une méthode de pondération des scénarios hydroclimatiques a été appliquée. En effet, la sélection finale comprend de nombreux modèles globaux et régionaux de climat, dont le nombre de membres varie de 1 à 10 (CSIRO-Mk3.6.0), voire 50 (ClimEx). De plus, dans l'ensemble CORDEX-NA, deux modèles globaux (CanESM2 et MPI-ESM) pilotent environ la moitié des simulations disponibles. L'expression « ensemble d'opportunités » est ainsi utilisée pour décrire le fait que l'échantillonnage des simulations dépend en grande partie des ressources et des intérêts de chaque centre de recherche, qui contribue par un nombre arbitraire de réalisations, de modèles et de scénarios (Tebaldi et Knutti, 2007). Dans ce contexte, l'interprétation probabiliste des résultats de l'ensemble quant aux changements climatiques ou hydrologiques futurs est potentiellement problématique si les particularités de cet ensemble ne sont pas adéquatement prises en compte. Faute d'un consensus scientifique sur une manière de résoudre ce problème, l'approche utilisée presque systématiquement jusqu'à récemment est celle de la démocratie des modèles (« un modèle, un vote »), où tous les modèles sont considérés comme étant équiprobables (Collins et collab., 2013).

Pour résoudre cette problématique, Ouranos a mené un projet de recherche sur la meilleure pondération des scénarios permettant de prendre en compte l'hétérogénéité de l'ensemble de l'Atlas. Les analyses ont porté sur deux familles de critères pour la pondération : le niveau de performance des simulations hydroclimatiques en période historique et l'indépendance de leur signal de changements climatiques (Abramowitz et collab., 2018). La méthodologie et les résultats sont présentés dans le rapport de Rondeau-Genesse et collab. (2021).

Parmi plusieurs choix, l'option finale retenue pour l'Atlas hydroclimatique 2022 est celle de considérer une pondération universelle pour tous les tronçons et tous les indicateurs hydrologiques. Le schéma de pondération utilisé (nommé « PHYS-GP », Annexe C – Pondération des scénarios hydroclimatiques) a recours aux mêmes hypothèses que la proposition initiale et se rapproche de la méthodologie « un modèle, un vote » couramment employée dans la pratique, mais avec certaines vérifications pour assurer une diversité dans les composantes physiques lorsqu'un centre a produit plusieurs modèles climatiques. Ce schéma pose également comme hypothèse que les modèles régionaux amènent une information distincte de leurs pilotes, ce qui semble être généralement le cas. La pondération est utilisée à l'étape du calcul des indicateurs projetés (3.4).

2.5 Modèle hydrologique

La modélisation hydrologique a pour objectif de simuler des débits en rivière en reproduisant les principales composantes du cycle de l'eau à l'aide de représentations numériques des processus hydrologiques se produisant à l'échelle des bassins versants.

2.5.1 Hydrotel

Comme pour les versions précédentes de l'Atlas hydroclimatique, le modèle hydrologique Hydrotel a été choisi (Fortin et collab., 2001). Pour cet Atlas, la version 4.1.5.0007 a été utilisée. En bref, Hydrotel est un modèle hydrologique à base physique et semi-distribué dont la principale fonction est de simuler les débits en rivière à l'échelle du bassin versant à partir de variables climatiques. Il

fait appel à des expressions analytiques représentant, dans une certaine mesure, la physique des composantes du cycle de l'eau. À partir de données observées ou simulées de précipitations et de température, il simule notamment la distribution spatiale des précipitations, l'évapotranspiration potentielle, l'accumulation et la fonte du couvert de neige, le bilan vertical de l'écoulement de l'eau dans le sol, l'écoulement vers le réseau hydrographique et l'écoulement dans le réseau hydrographique.

Bien qu'il soit possible de simuler à un pas de temps sous-journalier, les simulations de l'Atlas ont toutes été réalisées au pas de temps journalier, et cela pour trois raisons. Premièrement, une analyse de l'impact des changements climatiques sur les facteurs de pointe a été réalisée pour évaluer la pertinence d'utiliser une résolution temporelle sous-journalière (DEH, 2019). Les résultats indiquent que, mis à part une tendance à la hausse au printemps, les facteurs de pointe des débits modélisés ne subissent pas d'augmentation ni de diminution significative. De plus, lorsqu'une tendance existe, elle est très faible. Deuxièmement, les coûts en temps de calcul et en stockage, déjà considérables, seraient multipliés par un facteur 8 pour un pas de temps de 3 heures. Troisièmement, seulement une partie des données climatiques est disponible au pas de temps sous-journalier et les séries temporelles des données observées (météorologiques et hydrologiques) au pas de temps sous-journalier sont beaucoup plus courtes. Ainsi, vu l'absence de changement substantiel et les contraintes qu'imposerait une modélisation à un pas de temps sous-journalier, il a été décidé de réaliser cette version de l'Atlas hydroclimatique à un pas de temps journalier.

Hydrotel permet notamment de choisir entre différents sous-modèles d'évapotranspiration potentielle (ETP). Ce choix pouvant avoir une incidence sur les projections hydroclimatiques (Seiller et Anctil, 2016), une analyse a été réalisée pour trouver la formule la plus adéquate pour l'Atlas parmi plusieurs choix (Hydro-Québec, Linacre, McGuinness, Priestley-Taylor, etc.). L'objectif est d'avoir une formule qui soit parcimonieuse en intrants (l'équation de Penman-Monteith a été écartée pour cette raison) et qui s'appuie sur une base physique afin d'avoir confiance dans les résultats projetés (l'équation empirique d'Hydro-Québec a été écartée). Finalement, les formules de Linacre (Linacre, 1977) et de McGuinness (McGuinness et Bordne, 1972) ont été sélectionnées et utilisées. Il s'agit aussi de la recommandation d'Oudin et collab. (2005).

Les autres sous-modèles utilisés dans Hydrotel sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 4. *Sous-modèles Hydrotel utilisés*

Sous-modèle	Choix
Interpolation des données météorologiques	Thiessen
Fonte de neige	Modèle de degrés-jours modifié
Évapotranspiration	Linacre et McGuinness
Bilan vertical (infiltration)	BV3C
Ruissellement de surface	Onde cinématique
Écoulement en rivière	Onde cinématique modifiée

2.5.2 Calibration

La calibration permet d'optimiser les valeurs des paramètres d'un modèle pour le rendre plus performant dans sa capacité à représenter les phénomènes réels. La calibration a donc pour rôle d'estimer les paramètres et d'ainsi compenser les approximations et les simplifications liées à la

modélisation, de même que les données météorologiques imparfaites. Le premier objectif de la calibration pour l'Atlas était d'avoir un modèle hydrologique distribué avec une cohérence spatiale grâce à une calibration globale (Ricard et collab., 2013), notamment pour faciliter l'interpolation aux tronçons non jaugés. Le second objectif était d'obtenir plusieurs calibrations performantes et diversifiées pour avoir une certaine prise en compte de l'incertitude liée à la modélisation hydrologique, plus précisément l'incertitude paramétrique (voir section 5.2). Autrement dit, l'objectif derrière la création et l'utilisation de plusieurs plateformes de modélisation est d'évaluer le rôle de la paramétrisation du modèle dans la réponse hydrologique aux changements climatiques.

Le modèle hydrologique Hydrotel comporte 27 paramètres internes. Selon les travaux précédents de Turcotte et collab. (2007), plusieurs de ces paramètres peuvent être fixés a priori compte tenu de leur faible impact sur la fonction objectif ou de leur nature additive/corrective appliquée aux données entrantes (voir Annexe D – Paramètres et détails des plateformes hydrologiques). Les 11 paramètres inclus dans la calibration sont listés dans le **Tableau 5**.

Tableau 5. Liste des paramètres Hydrotel calibrés

Paramètre	Description
BV3C_C1	Profondeur de la première couche de sol du sous-modèle BV3C
BV3C_C2	Profondeur de la deuxième couche de sol du sous-modèle BV3C
BV3C_CR	Coefficient de récession du sous-modèle BV3C
DJM_SFC	Température seuil de la fonte dans une forêt de conifères du modèle de degrés-jours modifié
DJM_SFF	Température seuil de la fonte dans une forêt de feuillus du modèle de degrés-jours modifié
DJM_SFO	Température seuil de la fonte dans un milieu ouvert du modèle de degrés-jours modifié
DJM_TFC	Taux de fonte maximal dans une forêt de conifères du modèle de degrés-jours modifié
DJM_TFF	Taux de fonte maximal dans une forêt de feuillus du modèle de degrés-jours modifié
DJM_TFO	Taux de fonte maximal dans un milieu ouvert du modèle de degrés-jours modifié
ETP	Coefficient multiplicatif d'ETP du modèle d'ETP
THI	Température seuil de passage de la pluie en neige du modèle d'interpolation des données météorologiques de Thiessen

Une interdépendance plus ou moins forte existe entre les valeurs attribuées aux différents paramètres d'Hydrotel. Par exemple, on calcule l'écoulement provenant de la troisième couche de sol du modèle BV3C en utilisant le produit de l'épaisseur de la troisième couche de sol et du coefficient de récession. Une augmentation de la valeur du paramètre BV3C_C3 peut donc être compensée par une baisse de la valeur du paramètre BV3C_CR. Afin de limiter ce phénomène de « compensation » lors de la recherche des valeurs optimales des paramètres, certains d'entre eux ont été fixés ou mis en relation. Une plage de valeur définie par des bornes à l'intérieur desquelles

l'algorithme d'optimisation recherche la valeur optimale des paramètres, ou des paramètres mis en relation, a ensuite été définie pour chaque paramètre. Le **Tableau 17** à l'Annexe D présente les bornes inférieures et supérieures fixées pour chacun des paramètres.

Deux fonctions objectifs ont été employées, l'une pour le calage local (par bassin versant), et l'autre pour le calage global (par groupe de bassins versants) (Ricard et collab., 2013; Gaborit et collab., 2015). Pour évaluer la qualité de chaque simulation d'Hydrotel, la fonction objectif est calculée entre les débits simulés et observés à la station d'observation (exutoire) du bassin versant à partir du critère *Kling-Gupta efficiency* (KGE) (Gupta et collab., 2009).

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2(\beta - 1)^2} \quad (1)$$

Où r correspond au coefficient de corrélation entre les débits simulés et observés, α est le rapport entre l'écart-type des débits simulés et l'écart-type des débits observés et β correspond au biais. L'algorithme d'optimisation travaillera alors à minimiser $1-KGE$, dont la gamme de résultats s'étend d'une valeur de 0 à ∞ et où une valeur de 0 signifie une représentation parfaite des débits observés par les débits simulés. Ce critère a été utilisé pour tous les calages locaux. Pour évaluer la qualité d'un groupe de simulation d'Hydrotel (plusieurs bassins versants) à partir du même jeu de paramètres simulé, un critère objectif global (IPG) a été mis en place et se décrit comme suit :

$$IPG = \sum_{j=1}^N \frac{IPS_j}{IPL_j} \quad (2)$$

Où $j = 1, 2, \dots, N$ correspond à chaque station hydrométrique d'évaluation (exutoire) des bassins versants intégrés au calcul de la fonction objectif globale, IPS_j correspond à la valeur de l'équation (1) obtenue par le jeu de paramètres simulé dans le modèle Hydrotel pour un bassin versant j et IPL_j , à la valeur de l'équation (1) obtenue par le meilleur jeu de paramètres obtenus en calage local (cible de performance) pour un bassin versant j . IPG s'étend d'une valeur de N à ∞ , où une valeur de N signifie une représentation parfaite des débits observés par les débits simulés par l'ensemble des bassins versants intégrés au calcul du critère objectif. Cette fonction objectif globale a été utilisée pour tous les calages globaux.

L'algorithme d'optimisation *dynamically dimensioned search* (DDS, version 1.2) (Tolson et Shoemaker, 2007) a été utilisé pour la calibration d'Hydrotel. Les paramètres d'optimisation internes de l'algorithme ont été fixés aux valeurs recommandées par Tolson et Shoemaker (2007). La période de simulation pour tous les calages s'étend du 1^{er} octobre 2007 au 30 septembre 2017 à un pas de temps de 24 heures. La première année sert à amorcer les processus hydrologiques (« spin-up ») et n'est pas évaluée au sein de la fonction objectif.

À noter que pour calculer le KGE, les débits observés ayant été corrigés à cause des effets de glace n'ont pas été considérés. Afin de compenser cette perte d'observations au cours de l'hiver, un poids de 30 jours a été attribué à chaque mesure de jaugeage hivernal dans le calcul de la fonction objectif.

Pour le calage local, une approche multi-calages a été choisie de manière à diminuer les risques d'obtenir un jeu de paramètres final de mauvaise qualité. Ainsi, cinq calages locaux par bassin versant ont été réalisés. Un total de 500 simulations a été accordé à chaque processus de calage local effectué par l'algorithme DDS.

Pour le calage global, le territoire du Québec méridional a été séparé en deux grandes régions calées indépendamment : celle située au sud du fleuve Saint-Laurent, appelée Rive-Sud, et celle au nord du fleuve, appelée Rive-Nord. Pour chacune des 2 régions, 35 bassins versants ont été inclus aux calages globaux. Tout comme pour les calages locaux, les calages globaux ont été réalisés avec une approche multi-calages pour les mêmes raisons qu'énoncées ci-haut. Cependant, trois lames de ruissellement (0,0025 m, 0,006 m et 0,01 m) pour la production de l'hydrogramme géomorphologique ont été employées de manière à permettre une relation entre l'épaisseur de la lame de ruissellement et l'ordre de Strahler défini sur les divers UHRH des bassins versants. Rappelons que le sud du Québec a, de manière générale, un ordre de Strahler plus élevé comparativement au nord du Québec, qui est plus petit (voir 2.1.3). Des expérimentations ont précédemment conclu qu'un ordre de Strahler plus élevé semble généralement plus performant avec de petites lames de ruissellement et vice-versa. De ces faits, 2 calages globaux ont été lancés avec une lame de 0,0025 m, 3 calages avec une lame de 0,006 m et 2 calages avec une lame de 0,01 m, pour un total de 7 calibrations. Un total de 500 simulations a été accordé à chaque calage global effectué par l'algorithme DDS³.

Cette approche de calibration globale a permis de répondre au premier objectif, soit d'obtenir un modèle hydrologique avec une cohérence spatiale sur le domaine de l'Atlas. Par contre, le second objectif (la création de plusieurs plateformes performantes et diversifiées en matière de paramètres et de réponse hydrologique) n'a pas été atteint. En effet, les résultats des 7 calibrations, bien que de performance satisfaisante (KGE médian de 0,79 en calibration globale), n'offraient pas de diversité : les plateformes étaient pratiquement identiques pour les séries temporelles de débits. Une autre approche, présentée à la section suivante, a donc été explorée.

2.5.3 Plateformes

Pour produire les plateformes finales de l'Atlas et corriger le problème du manque de diversité dans les calages initiaux, l'approche suivante a été retenue. D'abord, les deux meilleures plateformes issues de la calibration globale ont été sélectionnées : LN24HA et MG24HA. Les deux premières lettres identifient la formule d'ETP utilisée, soit LN pour Linacre et MG pour McGuinness. Le « 24H » signifie simplement la résolution temporelle de la plateforme (journalière), et la dernière lettre sert à identifier la calibration. Ainsi, LN24HA et MG24HA ont des paramètres identiques, sauf le paramètre calibré pour l'ETP.

Par la suite, quatre autres plateformes ont été ajustées manuellement pour aller chercher un maximum de diversité. Plutôt que d'utiliser un algorithme d'optimisation pour l'ajustement des paramètres, ces derniers ont été déterminés à l'aide d'un jugement d'expert et par itérations. L'objectif était d'explorer plus largement l'espace paramétrique du modèle que ce que la calibration automatique avait permis, tout en ayant des paramétrisations équivalentes pour la performance. Ainsi, en plus des paramètres du **Tableau 5**, des modifications ont été apportées aux propriétés hydrauliques des sols, aux paramètres de laminage des lacs, aux hydrogrammes géomorphologiques, etc. Les six configurations finales ont toutes en commun les mêmes données physiographiques et hydrographiques (mêmes tronçons rivières, mêmes lacs, mêmes unités hydrologiques). Le détail des différences des six plateformes est résumé dans le **Tableau 18** à l'[Annexe D](#). La section suivante présente l'évaluation et la validation de ces plateformes.

2.5.4 Validation

Cette section présente quelques résultats de la validation des six plateformes hydrologiques. La **Figure 8** donne un premier aperçu de la validation des plateformes sous forme de diagramme en

³ Si l'on parallélise les calculs, cela représente environ 45 jours de simulations pour chacune des 7 calibrations, pour chacune des 2 régions (Rive-Nord et Rive-Sud). L'implantation des codes et les simulations nécessaires à la calibration ont été réalisées par l'ETS dans le cadre d'une collaboration.

boîte (*boxplot*). L'axe des ordonnées indique les valeurs de KGE, tandis que l'axe des abscisses identifie les six plateformes. Chaque boîte contient les KGE obtenus en comparant les simulations aux observations de 151 stations non influencées ayant au moins 10 ans de données entre 1962 et 2020. La boîte bleue donne le 25^e, le 50^e (médiane) et le 75^e percentiles des données, tandis que les barres noires présentent les minimums et maximums qui ne sont pas des données aberrantes. Ces dernières sont définies comme toute valeur située à plus de 1,5 fois l'étendue interquartile de la boîte et représentées par des cercles bleus sur la figure. Les valeurs pour les 151 stations et pour les 6 plateformes peuvent être consultées dans le **Tableau 19** de l'Annexe E – Validation du modèle hydrologique.

Ces résultats permettent d'abord de constater que toutes les plateformes ont des performances semblables et très satisfaisantes dans le contexte d'une calibration globale. La médiane des KGE s'étend de 0,72 (MG24HI) à 0,78 (MG24HA). Un second constat est que le modèle ne réussit pas à bien reproduire les débits pour quelques stations, ce qui nécessite une analyse plus fine des résultats.

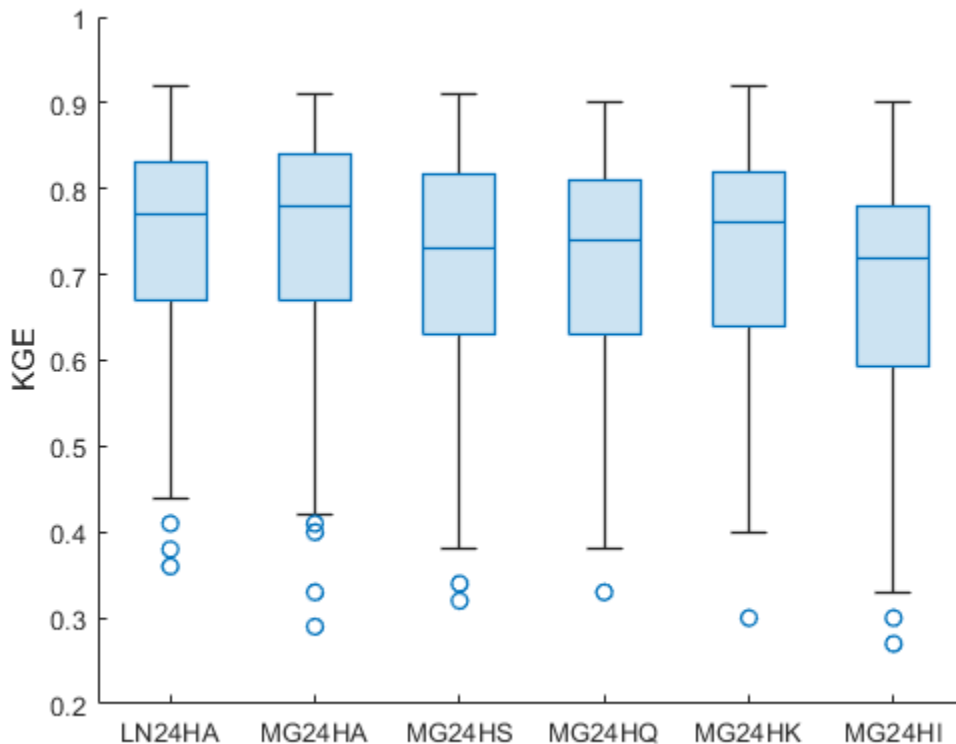


Figure 8. Résultats de la validation des six plateformes hydrologiques

Les cartes de la **Figure 9** donnent des éléments de réponse pour certaines des stations ayant des KGE plus faibles. Par exemple, parmi les quelques stations de la Côte-Nord (région hydrographique 07), plusieurs ont des scores inférieurs à 0,5. Cela s'explique par un problème connu avec l'interpolation des grilles climatiques pour cette région. De même, des stations de la région de l'Abitibi (région hydrographique 08) présentent des KGE autour de 0,5. Dans ce cas, outre la faible densité de stations hydrologiques et météorologiques, un enjeu supplémentaire vient de la quasi-omniprésence de milieux humides, difficiles à bien modéliser avec Hydrotel. Finalement, les autres stations ayant moins bien performé sont généralement de très petits bassins versants (par exemple, 024010 avec 25k m²). Ceux-ci sont difficiles à bien modéliser, surtout en calibration globale où les petits bassins versants sont sous-représentés et ce, malgré les efforts accomplis pour arriver à une distribution équilibrée. Les petits bassins sont très sensibles aux

erreurs de données météorologiques, de superficie (les KGE étant calculés sur les débits spécifiques), d'hydrométrie, etc., en plus d'avoir un temps de réaction plus court.

Plusieurs cartes complémentaires présentant d'autres validations sont disponibles à l'Annexe E – Validation du modèle hydrologique. Elles présentent les composantes du KGE (le coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne et le biais) pour différentes gammes de débits (moyens, faibles et forts).

Les **Figure 10**, **Figure 11** et **Figure 12** permettent de visualiser la corrélation de l'erreur relative entre les plateformes pour le débit moyen, le débit moyen sur 7 jours minimal et le débit maximal, respectivement. Cela permet d'avoir une appréciation de la diversité des six plateformes. Par exemple, les plateformes LN24HA et MG24HA ont une forte corrélation de leurs erreurs relatives, ce qui est attendu étant donné que ces deux plateformes sont presque identiques à l'exception de la formulation de l'ETP. Si toutes les plateformes ont des valeurs élevées de corrélation de l'erreur pour les débits moyens, il peut être constaté qu'il y a davantage de diversité pour les débits d'étiage et de crue. Un autre constat est que les plateformes MG24HI et MG24HK paraissent semblables selon ces figures, ce qui est cohérent avec l'analyse des paramètres (**Tableau 18**), qui montre notamment la même hauteur de lame de ruissellement pour les deux plateformes, ainsi que de nombreux paramètres en commun.

Finalement, des exemples d'hydrogrammes pour une station choisie arbitrairement (050304 – Batiscan; superficie du bassin versant : 4 504 km²) illustrent la performance et la diversité de la réponse hydrologique pour les différentes plateformes pour les débits moyens (**Figure 13**), les faibles débits (**Figure 14**) et les forts débits (**Figure 15**). Les observations sont en noir et les six plateformes (LN24HA, MG24HA, MG24HI, MG24HK, MG24HQ et MG24HS, respectivement), en couleurs. Trois constats ressortent de cet exemple. Premièrement, toutes les plateformes reproduisent très bien les débits annuels moyens. Ce constat peut être généralisé aux autres stations (voir les cartes des **Figure 23** et **Figure 26**). Deuxièmement, les plateformes ont de la difficulté à bien représenter la variabilité interannuelle des observations des faibles débits et ont parfois des biais importants (**Figure 30**), bien que ces résultats soient très variables selon les stations. Troisièmement, les crues sont bien simulées, tant pour la variabilité interannuelle que pour le biais (faible). Ce dernier constat ne se généralise cependant pas pour les petits bassins versants.

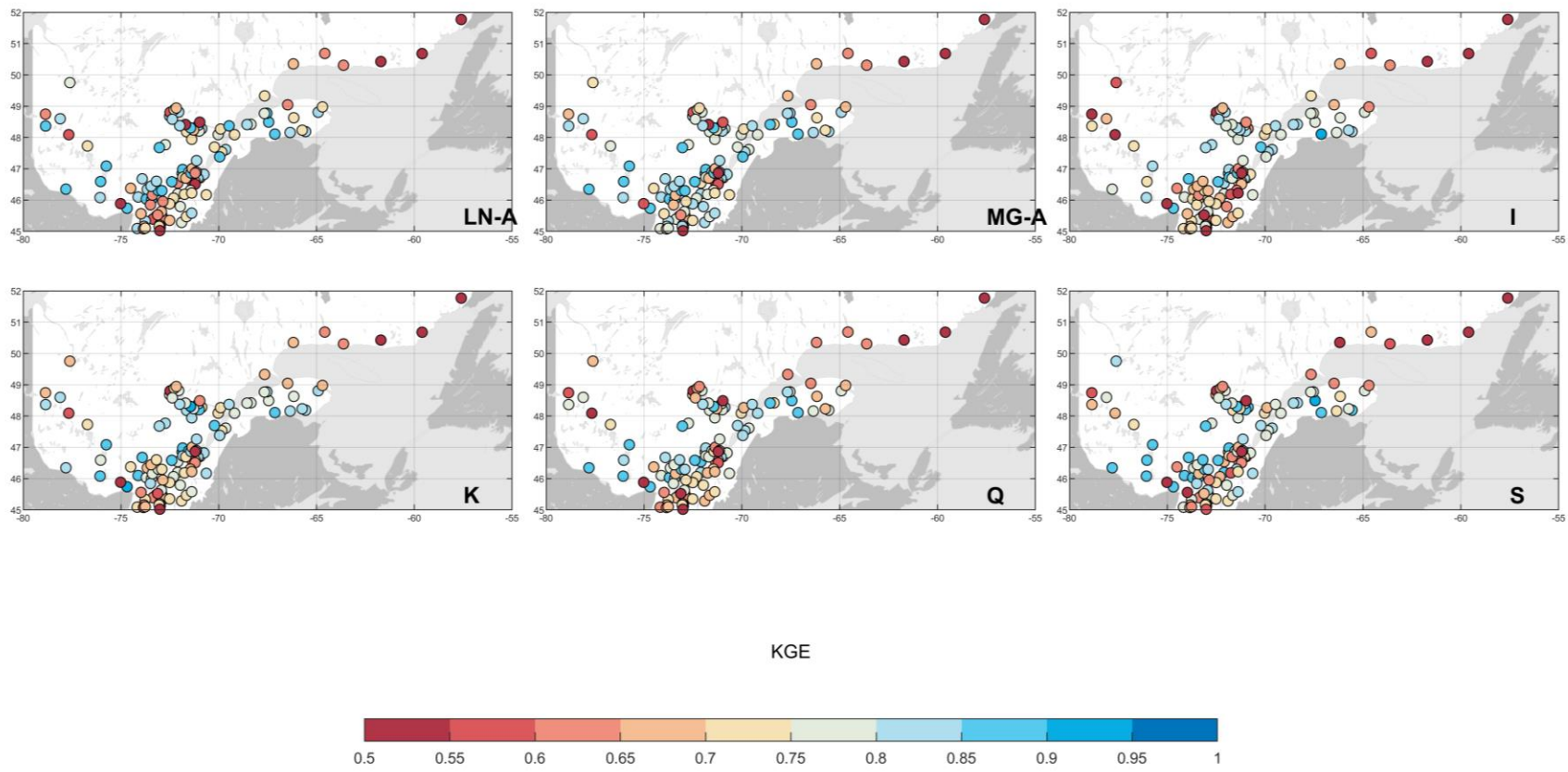


Figure 9. Cartes des KGE pour les six plateformes

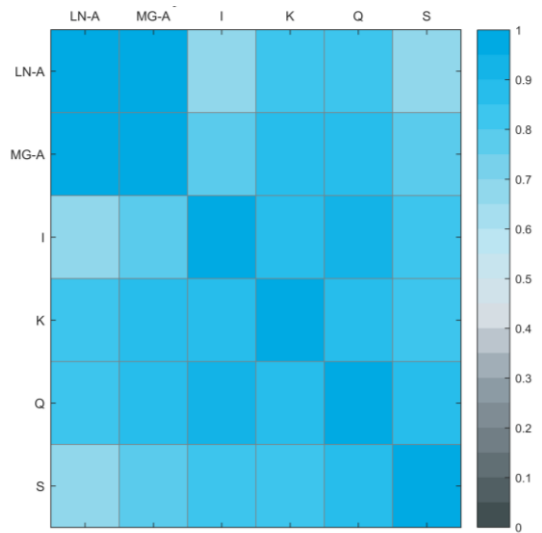


Figure 10. *Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit moyen sur 7 jours minimal*

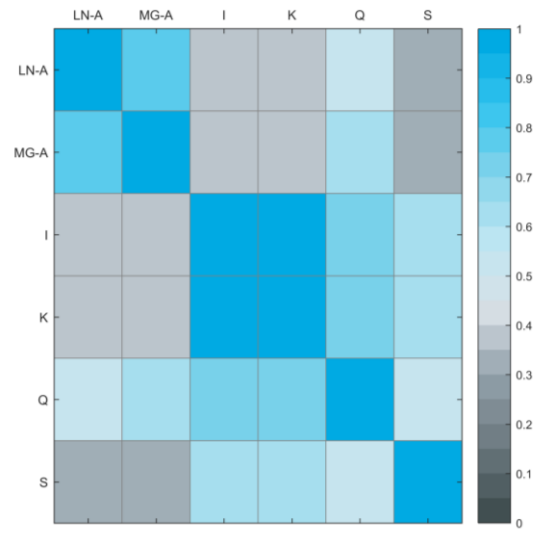


Figure 11. *Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit moyen sur 7 jours minimal*

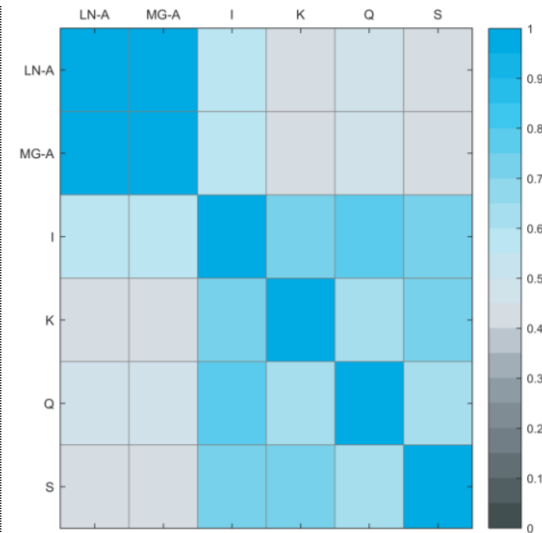


Figure 12. *Corrélation de l'erreur relative entre les six plateformes pour le débit maximal*

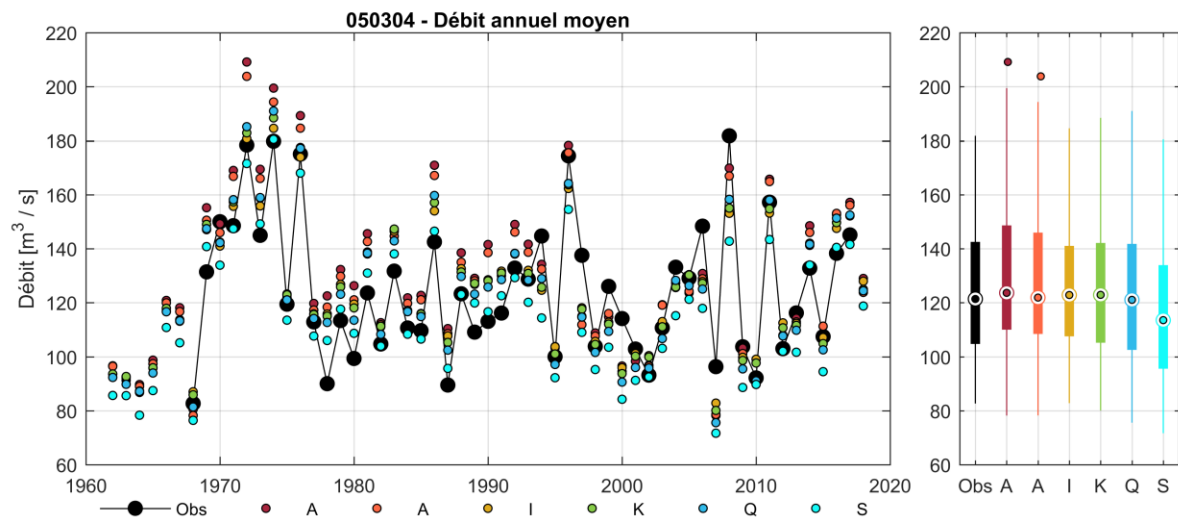


Figure 13. Hydrogramme des débits annuels moyens à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.

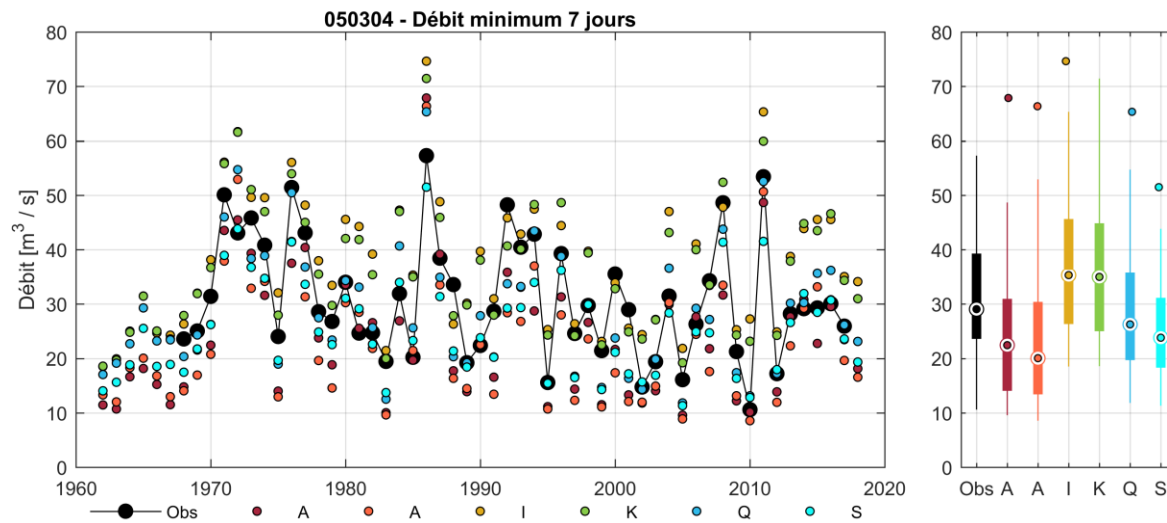


Figure 14. Hydrogramme des débits minimaux 7 jours à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.

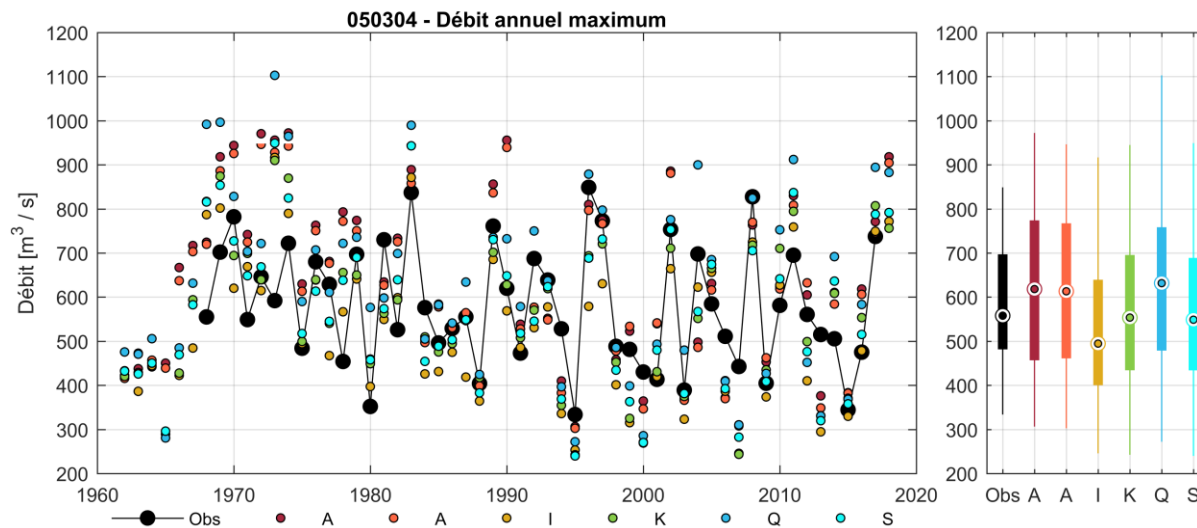


Figure 15. Hydrogramme des débits annuels maximaux à la station 050304 : comparaison des six plateformes aux observations. Les couleurs permettent d'identifier les six plateformes d'Hydrotel (A – rouge = LN24HA, A – orange = MG24HA, I – jaune = MG24HI, K – vert = MG24HK, Q – bleu foncé = MG24HQ, S – bleu pâle = MG24HS). À droite, données annuelles sous forme de diagramme en boîte à moustaches.

3. Méthodologie

Ce chapitre détaille la méthodologie pour la production de l'Atlas hydroclimatique, c'est-à-dire comment les données et les modèles ([chapitre 2](#)) sont utilisés pour obtenir les indicateurs historiques et projetés en climat futur ainsi que les séries de débits journaliers interpolés.

Le schéma ci-dessous synthétise les grandes étapes du calcul des indicateurs de l'Atlas. La boîte bleue contient la partie du processus nécessaire au calcul des indicateurs historiques. Les données hydrométriques (2.2) sont utilisées pour le calcul des indicateurs historiques aux stations. En parallèle, les données climatiques (2.3) sont utilisées comme intrant au modèle hydrologique (2.5) pour obtenir des séries de débits. À partir de celles-ci, les indicateurs historiques sur les débits simulés sont calculés (3.2) pour tous les tronçons jaugés et non jaugés. Ces indicateurs ainsi que ceux calculés avec les observations sont ensuite combinés à l'aide de la méthode de l'interpolation optimale pour obtenir les indicateurs historiques interpolés sur le domaine de l'Atlas. La boîte rouge résume la démarche pour le calcul des changements relatifs. Les projections climatiques (2.4) servent d'intrant au modèle hydrologique. Les indicateurs sont ensuite calculés pour différents horizons historiques et futurs des séries de débits simulés (3.2). La différence relative entre les indicateurs simulés en climat futur et ceux simulés pour la période récente (calcul des deltas) permet d'obtenir les changements relatifs qui seront ensuite appliqués aux indicateurs historiques (3.4).

Ce chapitre présente aussi la modélisation hydrologique (3.1) et l'interpolation optimale des séries de débits journaliers (Portrait) (3.3.1).

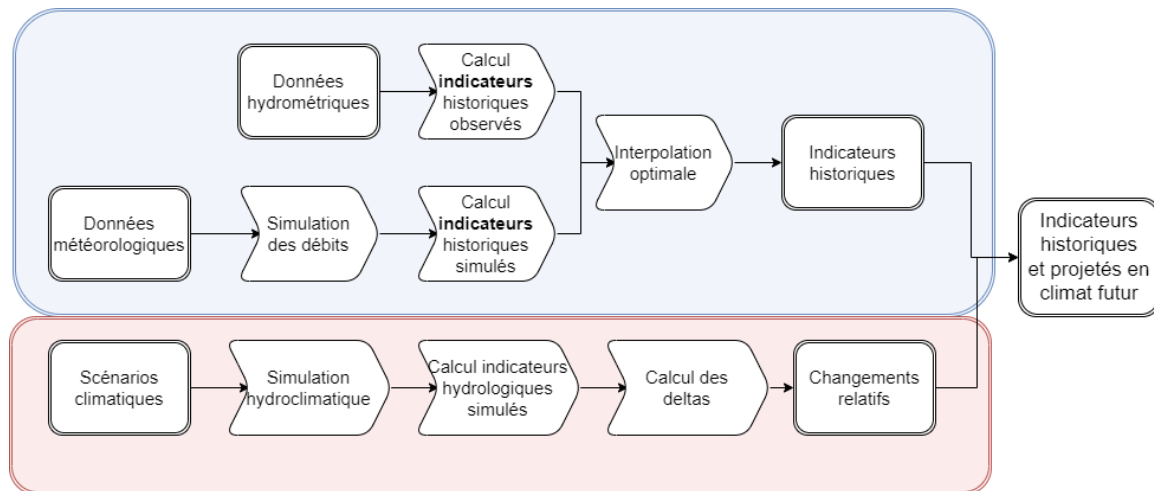


Figure 16. Schéma de production des indicateurs de l'Atlas

3.1 Modélisation hydrologique

Pour l'Atlas hydroclimatique 2022, des milliers de simulations hydrologiques ont été réalisées. D'abord, on a modélisé l'état de référence en forçant les données climatiques observées interpolées sur grilles en intrant de chacune des six plateformes Hydrotel, pour la période du

1^{er} janvier 1962 au 1^{er} février 2022⁴. Les débits journaliers à l'exutoire des 28 035 tronçons ont été enregistrés pour servir à :

- 1) La validation du modèle (2.5.4);
- 2) L'interpolation optimale des séries de débits (3.3);
- 3) L'interpolation optimale des indicateurs (3.3).

En plus des débits, l'équivalent en eau de la neige (EEN) a aussi été archivé pour chaque UHRH et chaque pas de temps. Cette variable est utilisée pour le calcul des saisons (3.2.3).

Ensuite, les débits journaliers ont été simulés avec les 180 projections climatiques, pour chacune des 6 plateformes, pour les 28 035 tronçons, de 1962 à 2100. Au total, cela représente $4,2 \times 10^9$ années de simulations. Cette étape a nécessité plusieurs semaines de calculs en parallèle sur trois supercalculateurs (Béluga, Cedar et Graham) de Calcul Québec⁵. On a transféré les 10 téraoctets de données en utilisant le service Globus.

Ces 1 080 scénarios hydroclimatiques (soit 180 fois les 6 plateformes) de débits journaliers ont servi au calcul des indicateurs, présenté aux sections suivantes.

3.2 Calcul des indicateurs

Un indicateur est une expression mathématique quantifiant sur une base statistique une composante du régime hydrique, comme un étiage d'été sévère, une crue printanière extrême ou le débit moyen du mois de juillet. Les indicateurs hydrologiques doivent être évalués sur d'assez longues périodes, idéalement d'au moins 30 ans, afin que la variabilité du processus à l'étude soit suffisamment bien échantillonnée (DEH, 2018).

3.2.1 Choix des indicateurs

L'Atlas hydroclimatique 2022 couvre 76 indicateurs hydrologiques, pour la période de référence et 3 horizons futurs. Le **Tableau 6** présente l'ensemble des indicateurs par groupes. La liste complète est aussi disponible sur le [site Web](#) de l'Atlas.

Le choix des indicateurs est basé sur plusieurs critères, notamment : la continuité avec les Atlas hydroclimatiques précédents, les indicateurs régulièrement utilisés en hydrologie (par exemple, le *débit journalier maximal annuel de récurrence de 20 ans* ou le *débit moyen sur 7 jours minimal annuel de récurrence de 2 ans*), les besoins du projet INFO-Crue pour certains indicateurs particuliers, des demandes particulières de groupes d'usagers, etc.

Tableau 6. Description des 76 indicateurs de l'Atlas

Type	Indicateur	Description	Récurrences (ans)	Périodes intra-annuelles ⁶	N ^{bre} total indicateurs
Pointe crue	Q1MAX	Débit journalier maximal annuel	2, 5, 10, 20, 100, 350	AN, HP, EA	18

⁴ La période du 1^{er} février 2022 au 29 janvier 2023 a été ajoutée au printemps 2023. La période sera allongée quelques fois par année pour maintenir à jour les données du « Portrait ».

⁵ Pour davantage d'information sur les grappes de calculs utilisés : <https://www.calculquebec.ca/> et https://docs.alliancecan.ca/wiki/National_systems/fr#Grappes_de_calcul.

⁶ AN : annuel. HP : hiver-printemps. EA : été-automne.

	JQ1MAX	Jour d'occurrence moyen du débit journalier maximal	2	HP	1
Volume crue	Q14MAX	Débit moyen sur 14 jours maximal annuel	2, 5, 10, 20, 100, 350	AN, HP	12
Étiage	Q30MIN	Débit moyen sur 30 jours minimal	2, 5, 10	AN, HP, EA	9
	Q7MIN	Débit moyen sur 7 jours minimal	5, 10	AN, HP, EA	6
			2	AN, HP, EA, mensuel	15
Hydraulicité	QMOY	Débit moyen	2	AN, HP, EA, mensuel	15
TOTAL					76

La grande majorité des indicateurs sont disponibles pour les périodes annuelle (AN), hiver-printemps (HP) et été-automne (EA), car un indicateur annuel peut cacher une tendance opposée entre les saisons. Par exemple, le débit moyen annuel varie un peu à la hausse pour plusieurs tronçons en climat futur, mais cela masque une baisse importante des débits moyens pendant l'été et une hausse des débits moyens hivernaux. Ce point est discuté plus en détail à la section 3.2.3.

Les indicateurs sont disponibles pour quatre horizons temporels, comme montré dans le **Tableau 7**. Ces horizons permettent de calculer des deltas qui estiment l'évolution d'un indicateur entre un climat de référence et un climat futur. La durée de 30 ans des horizons se veut un compromis entre le minimum d'années recommandé pour bien échantillonner la variabilité et l'utilisation d'une période assez courte pour éviter des effets importants de la non-stationnarité. Comme indiqué à la **Figure 16**, les deltas calculés sont appliqués aux indicateurs historiques obtenus sur la période 1962-2019. On peut remarquer qu'il y a un chevauchement entre la période historique (1962-2019) et le premier horizon futur (2011-2040). Cela est le résultat des choix méthodologiques d'utiliser le plus grand nombre de données observées et d'avoir 3 horizons futurs de 30 ans, qui se terminent en 2100.

Tableau 7. Horizons temporels de l'Atlas

Horizon	Période
Référence	1981-2010
H20	2011-2040
H50	2041-2070
H80	2071-2100

3.2.2 Analyse fréquentielle des débits

Différentes approches ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle des débits (**Tableau 8**), nécessaire à l'estimation des indicateurs de crue et d'étiage.

Pour le calcul des indicateurs aux stations, une fonction *generalized extreme values* (GEV) est ajustée aux débits observés de la période 1962-2019. L'évaluation de l'incertitude paramétrique est faite par approche bayésienne avec une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov

(MCMC), plus précisément l'algorithme de Metropolis-Hastings ($N = 20\ 000$). La probabilité a priori (« prior ») du paramètre de forme κ est tirée de Martins et Stedinger (2000). Ces indicateurs sont ensuite utilisés pour construire l'état de référence.

Pour les simulations, les indicateurs de crue et d'étiage ont été calculés à l'aide de six lois statistiques différentes, pour chaque tronçon, chaque simulation hydrologique et, dans le cas des scénarios hydroclimatiques, chaque horizon temporel. Les lois de Gumbel, d'extremum généralisé (GEV), log-normale, log-normale à trois paramètres, de Pearson à trois paramètres et log-Pearson à trois paramètres ont été utilisées. Dans chaque cas, une calibration des paramètres de la loi par la méthode du maximum de vraisemblance a été employée. Dans moins d'un pour cent des cas, la méthode des moments linéaires a dû être utilisée puisque la méthode du maximum de vraisemblance ne convergait pas.

Pour les indicateurs calculés à partir des séries de débits historiques reconstitués (1962-2019), la médiane des six lois est retenue pour l'analyse produisant l'état de référence. Pour les indicateurs calculés sur les 1 080 simulations hydroclimatiques, les 6 lois ont été pondérées par le critère d'information d'Akaike (Akaike, 1998), pour chaque simulation, chaque tronçon et chaque horizon temporel.

Tableau 8. Différentes approches pour l'analyse fréquentielle des débits

Source	Approche
Débits observés (Période 1962-2019)	GEV avec évaluation bayésienne de l'incertitude paramétrique
Débits simulés historiques (Période 1962-2019)	Médiane des six lois : <ul style="list-style-type: none"> • Gumbel, • GEV, • log-normale, • log-normale à trois paramètres, • Pearson à trois paramètres, • log-Pearson à trois paramètres.
Débits simulés des scénarios climatiques (Horizons du Tableau 7)	Pondération (critère d'information d'Akaike) des six lois : <ul style="list-style-type: none"> • Gumbel, • GEV, • log-normale, • log-normale à trois paramètres, • Pearson à trois paramètres, • log-Pearson à trois paramètres.

3.2.3 Saisons hydrologiques

Dans le contexte de l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie, il est nécessaire de ne pas se contenter d'analyser les indicateurs annuels, mais de considérer également les indicateurs saisonniers. En effet, la réponse hydrologique aux changements de température et de précipitations étant complexe et non linéaire, une tendance sur un indicateur annuel (par exemple, légère hausse des débits moyens annuels) peut masquer des tendances saisonnières fortes et opposées (baisse importante des débits moyens pendant l'été et hausse des débits moyens hivernaux). De plus, la saisonnalité est une composante importante pour de nombreux utilisateurs de l'eau au Québec (prélèvement d'eau, rejet d'eaux usées, gestion de barrage, etc.). Finalement, les indicateurs saisonniers sont aussi présentés pour assurer une continuité avec les versions précédentes de l'Atlas, pour lesquelles les indicateurs annuels n'étaient pas disponibles.

Cette section présente un survol de la nouvelle méthodologie servant à définir les saisons hydrologiques des indicateurs : hiver-printemps (HP) et été-automne (EA). À titre comparatif, l'algorithme de détermination des saisons utilisé pour l'Atlas hydroclimatique 2018 est présenté à l'Annexe F – Saisons hydrologiques. L'analyse des résultats faite en fin de processus de l'Atlas 2018 avait mis en évidence que l'algorithme était inadéquat pour les indicateurs d'étiage d'été-automne de certains tronçons situés dans les latitudes supérieures, typiquement des tronçons du secteur de la Côte-Nord. Étant donné le début plus hâtif de l'hiver dans ces régions, il arrivait régulièrement que des étiages hivernaux situés en début d'hiver aient été sélectionnés plutôt que des étiages d'été-automne.

Pour l'Atlas hydroclimatique 2022, une volonté forte de lier davantage les crues aux phénomènes physiques a remis en question la méthode de 2018. L'objectif demeure de séparer les événements nivo-pluviaux (hiver-printemps) de ceux qui sont uniquement pluviaux (été-automne). Ainsi, la saison « hiver-printemps » (HP) correspond à la période de l'année où les apports hydriques sont produits par la fonte du couvert de neige et la saison « été-automne » (EA), à celle où les apports hydriques sont produits par les précipitations liquides. La méthodologie détaillée est présentée à l'Annexe F – Saisons hydrologiques. En résumé, les dates de la saison hiver-printemps sont basées sur un critère d'équivalent de neige au sol pour chaque tronçon, ajusté pour prendre en compte le temps de réaction du bassin versant. Pour les indicateurs annuels, l'année civile est utilisée (du 1^{er} janvier au 31 décembre).

Des analyses internes comparant différentes approches pour les saisons ont montré que bien que ce choix puisse affecter la distribution des crues, la queue droite de la distribution (c'est-à-dire les extrêmes) est peu influencée par la méthode des saisons. Les limites de la méthode sont abordées à la section 5.3.

3.3 Analyse en milieu non jaugé

Cette section décrit l'approche utilisée pour rendre disponible l'information de l'Atlas hydroclimatique aux tronçons non jaugés, qui sont grandement majoritaires dans la plateforme. L'objectif est de produire un état de référence hydrologique distribué sur l'ensemble du Québec méridional, tant pour les séries journalières de débits que pour les indicateurs hydrologiques. Ainsi, plusieurs méthodes différentes (**Tableau 9**) ont été comparées afin de retenir la meilleure approche pour l'estimation des débits et des indicateurs en milieu non jaugé. Seule la méthode retenue (l'interpolation optimale – IO) est décrite ci-dessous. Pour les détails, le lecteur peut se référer à l'Annexe G – Interpolation optimale et à l'article de Lachance-Cloutier et collab. (2017), qui décrit l'application de la méthode pour l'estimation des débits journaliers.

Tableau 9. Approches identifiées et comparées pour le milieu non jaugé

	Information utilisée		Produit	
	Débits observés	Débits simulés	Séries temporelles de débits	Indicateurs hydrologiques
Transfert de station(s) voisine(s)	X		X	X
Map-correlation method/CDC	X		X	
Régressions linéaires multiples	X			X
Calcul d'indicateurs à partir de séries temporelles interpolées	X			X
Krigeage ordinaire	X		X	X
Krigeage topologique	X		X	X
Krigeage canonique	X			X
Modélisation hydrologique		X	X	X
Interpolation optimale	X	X	X	X

3.3.1 Interpolation spatiale des séries de débits journaliers

Le concept de l'interpolation optimale (aussi connue sous le nom d'interpolation statistique) est de combiner le maximum d'informations disponibles (données hydrométriques, mais aussi physiographiques et météorologiques via la modélisation hydrologique) pour améliorer l'estimation des valeurs pour les tronçons non jaugés. Cette technique relativement simple d'assimilation de données a d'abord été utilisée en météorologie (Fortin et collab., 2015), puis pour les séries temporelles de débits en milieu non jaugé (Lachance-Cloutier et collab., 2017). Plus généralement, l'IO produit une analyse en combinant les données observées avec les données modélisées (soit le champ d'essai) grâce à une pondération qui prend en compte la corrélation spatiale des différences entre les observations et le champ d'essai. La **Figure 17** illustre les principales étapes de l'interpolation à l'aide d'un exemple sur les débits spécifique de la région de la Gaspésie⁷. La première étape (**Figure 17A**) consiste en la sélection des observations, soit les données aux stations hydrométriques (2.2). La seconde étape (**Figure 17B**) est la production du champ d'essai, soit une simulation hydrologique couvrant les tronçons de rivières jaugés et non jaugés (2.5). La troisième étape (**Figure 17C**) est le calcul de l'erreur, soit la différence entre les observations et le champ d'essai aux tronçons correspondant aux stations. La spatialité de l'erreur est ensuite estimée par une fonction reliant la covariance de l'erreur et la distance entre le centroïde des bassins versants (**Figure 17D**). À l'étape suivante, ce modèle d'erreur est utilisé pour produire l'« innovation », soit l'erreur estimée à chaque tronçon, jaugé et non jaugé (**Figure 17E**). Finalement, on obtient le résultat final, l'« analyse » (**Figure 17F**), en appliquant l'innovation (E) au champ d'essai (B).

⁷ Prendre note que l'interpolation optimale pour l'Atlas est réalisée sur l'ensemble du domaine, et non pas par région.

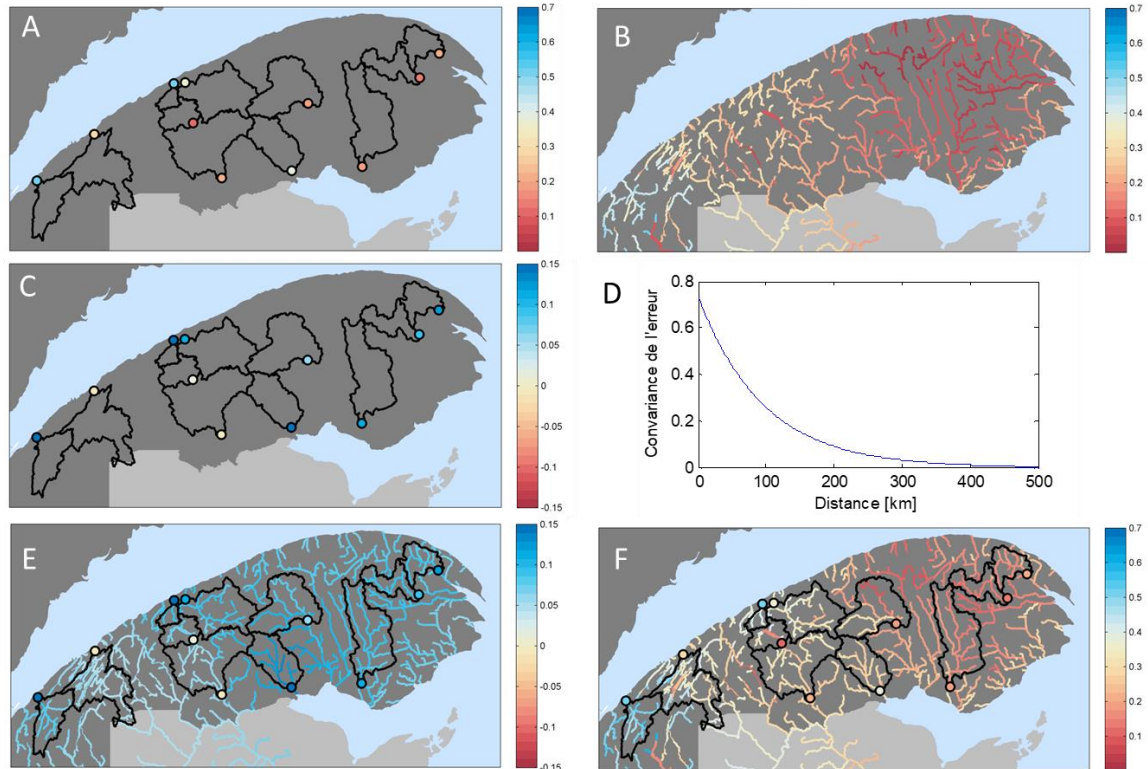


Figure 17. Exemple illustrant les principales étapes de l'IO. A : Observations. B : Champ d'essai (débits simulés pas le modèle). C : Erreur (différence entre les observations et le champ d'essai). D : Corrélacion de l'erreur en fonction de la distance. E : Innovation. F : Analyse.

Cette méthode permet d'honorer les valeurs aux stations et de corriger les erreurs du modèle, tout en assurant une cohérence spatiale (notamment de l'amont vers l'aval) et temporelle. Pour l'interpolation optimale des séries journalières de débits, une valeur de 0,25 est donnée au ratio entre la variance de l'erreur d'observation et la variance de l'erreur de modèle dans la détermination des poids. Ainsi, pour un tronçon à l'emplacement exact d'une station hydrométrique utilisée par l'IO et sans autre station à proximité, l'IO donnera quatre fois plus de poids à l'observation qu'au modèle. La corrélation spatiale diminue en fonction de la distance entre l'observation et le champ d'essai. Au-delà d'environ 200 km, la corrélation est nulle. Cela signifie que pour les tronçons sans station à proximité, les valeurs de l'analyse convergent vers les valeurs du champ d'essai (c'est-à-dire des simulations hydrologiques).

La **Figure 18**, tirée de l'étude de Lachance-Cloutier et collab. (2017), présente une comparaison en validation croisée de la performance de différentes techniques utilisées pour estimer les débits journaliers aux sites non jaugés. On peut y voir que l'interpolation optimale se démarque positivement.

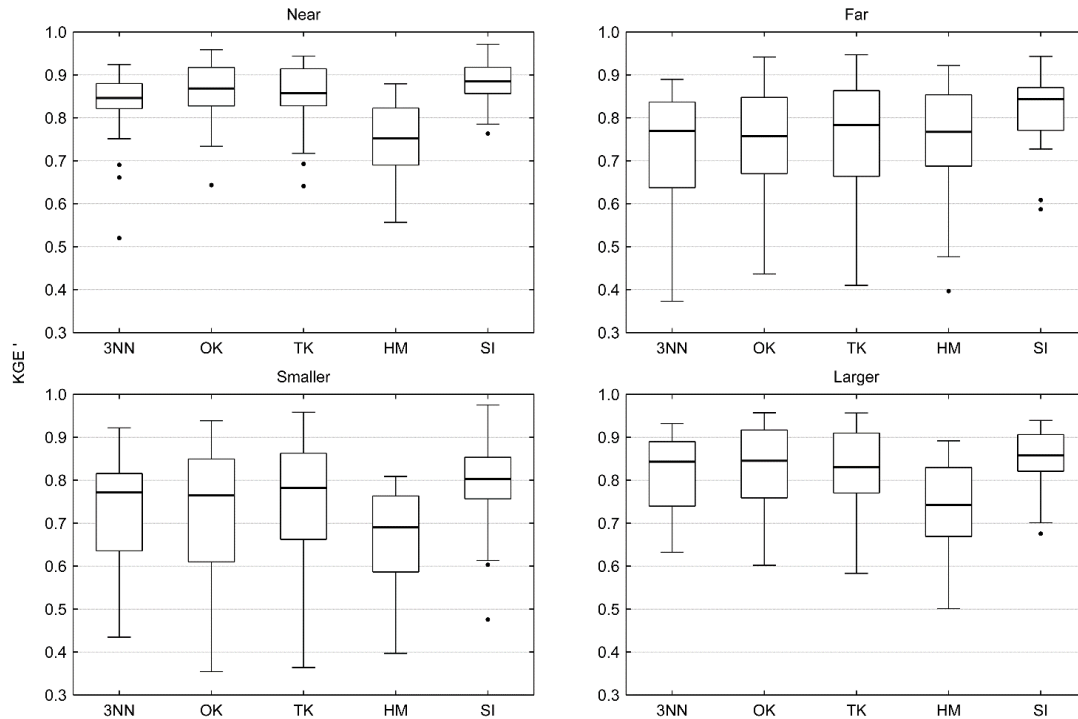


Figure 18. Comparaison en validation croisée des méthodes d'interpolation des débits journaliers aux tronçons non jaugés. 3NN : Moyenne des trois plus proches voisins. OK : Krigeage ordinaire. TK : Krigeage topologique. HM : Modèle hydrologique. SI : Interpolation statistique (Interpolation optimale). [Figure tirée de Lachance-Cloutier et collab. (2017)].

3.3.2 Interpolation spatiale des indicateurs

Pour l'IO sur les indicateurs, sensiblement la même méthodologie que celle décrite à la section précédente est utilisée. La première différence a été d'ajouter quatre catégories qui reflètent la qualité des données des stations en se basant sur la longueur de l'historique, la stabilité de la courbe de tarage, le jaugage de crues importantes, etc. Ces catégories servent à ajuster le poids associé à chaque station lors du krigeage. Plus la qualité des données d'une station est jugée haute, plus elle contribuera à modifier les données du champ d'essai. À l'inverse, si une station est jugée de moins bonne qualité, elle va peu contribuer à l'« innovation » appliquée au champ d'essai. La seconde différence avec l'IO sur les débits journaliers est le débiaisage du champ d'essai avant que le krigeage soit effectué.

La **Figure 19** présente une comparaison de la performance de différentes méthodes d'estimation des indicateurs aux tronçons non jaugés. Encore une fois, l'interpolation optimale se démarque favorablement.

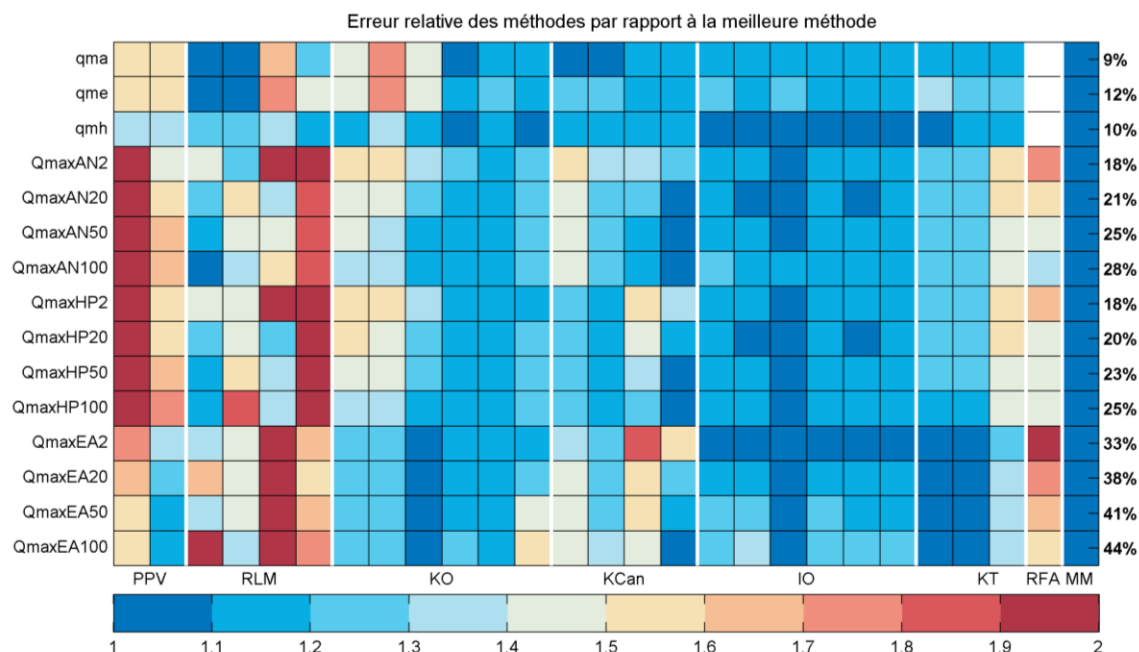


Figure 19. Comparaison des erreurs relatives des méthodes d'interpolation des indicateurs aux tronçons non jaugés, en validation croisée. PPV : Plus proche voisin. RLM : Régression linéaire multiple. KO : Krigeage ordinaire. KCan : Krigeage canonique. IO : Interpolation optimale. KT : Krigeage topologique. RFA : *Regional frequency analysis*. MM : Moyenne de méthodes.

3.3.3 Filtre appliqué aux tronçons

La méthode de l'interpolation optimale permet d'obtenir des données pour les tronçons non jaugés. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte les limites des données et modèles servant à cette interpolation (voir aussi la section 1.3). Pour l'Atlas hydroclimatique 2022, les 28 035 tronçons du domaine ont été simulés et un filtre a ensuite été appliqué pour ne conserver que les 9 665 tronçons qui répondaient aux critères ci-dessous. Le même filtre est appliqué pour tous les produits de l'Atlas, soit le Portrait et les Indicateurs références et projetés en climat futur.

1. Les tronçons dont la superficie du bassin versant est inférieure à 50 km² ont été retirés (en rouge, sur la **Figure 20** Erreur ! Source du renvoi introuvable.). L'hydrologie des petits bassins versants comporte plus de particularités, ce qui rend difficile leur modélisation à l'échelle d'analyse considérée dans l'Atlas. Par exemple, pour les étiages, les débits peuvent être intermittents et les erreurs relatives de mesures, très grandes. Pour les crues, des données météorologiques à haute résolution spatio-temporelle sont nécessaires, ce qui représente un défi important, tant pour l'état de référence que pour les projections climatiques. Enfin, il y a peu de stations hydrométriques pour ces bassins versants, ce qui complexifie la calibration et la validation du modèle hydrologique pour ces cas particuliers.
2. Les tronçons situés hors Québec (bassins versants limitrophes) ont été retirés, notamment parce qu'un effort minimal a été mis sur l'acquisition des données hors Québec. Par exemple, seules les stations hydrométriques et météorologiques à l'intérieur de la province ont été utilisées. Il était tout de même nécessaire de modéliser les tronçons extérieurs pour avoir l'hydrologie à l'amont des tronçons situés au Québec.
3. Les tronçons de type « Lac » dans Hydrotel ont été retirés.

4. Les tronçons principaux de la rivière Richelieu ont été retirés, puisque la majorité du bassin versant se situe aux États-Unis (voir point 2 ci-dessus) et que le lac Champlain n'a pas fait l'objet d'une calibration spécifique dans le cadre de l'Atlas⁸. Les tributaires québécois du Richelieu sont cependant disponibles.
5. Les tronçons théoriquement influencés par des barrages sont retirés. En effet, l'Atlas ne modélise pas la gestion des barrages et ne peut donc pas prendre en compte l'impact de cette gestion sur l'hydrologie à l'aval. Pour identifier les tronçons influencés, le *degree of regulation* (DOR) (Mailhot et collab., 2018) est utilisé. Le DOR est un indicateur de l'impact de la gestion des barrages sur les débits à l'aval. Une valeur élevée signifie que la capacité de stockage totale des barrages en amont représente une fraction significative du volume transitant au tronçon. Pour l'Atlas, un tronçon ayant un DOR supérieur à 8 est retiré, tandis qu'un tronçon entre 0,1 et 8 est identifié comme « potentiellement influencé », mais n'est pas filtré. Les tronçons ayant un DOR de 0 sont considérés comme ayant un régime naturel. La méthode est décrite brièvement à l'Annexe H – Influence potentielle de la gestion des barrages, et en détail dans l'article de Mailhot et collab. (2018).

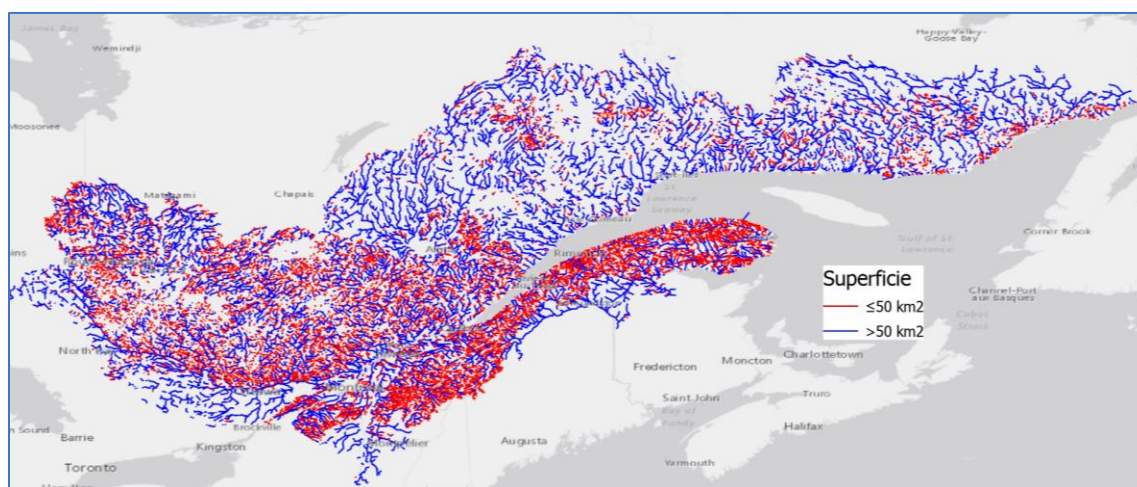


Figure 20. Tronçons filtrés de moins de 50 km²

3.4 Projections des indicateurs

Cette section décrit la production des indicateurs projetés en climat futur à partir du Portrait et des scénarios hydroclimatiques (**Figure 16**). La première étape est le calcul des deltas : pour chacun des scénarios, la différence entre les indicateurs des horizons futurs et ceux de l'horizon de référence (**Tableau 7**) est calculée. Pour chaque tronçon, chaque indicateur et chacun des 3 horizons futurs, il y a 384 (soit 64 scénarios x 6 plateformes) valeurs de changement relatif⁹ pour le RCP4.5 et 696 (soit 116 scénarios x 6 plateformes) valeurs pour le RCP8.5.

En deuxième étape, une pige aléatoire dans la distribution de valeurs du Portrait pour un indicateur donné, est effectuée. À cette valeur de référence est ajouté un changement relatif tiré de la première étape par une pige aléatoire prenant en compte la pondération des scénarios (2.4.4).

⁸ Pour de l'information sur les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Richelieu, voir l'article de Lucas-Picher et collab. (2021).

⁹ À l'exception de l'indicateur JQ1MAXHP, pour lequel la différence absolue en jours est utilisée.

Cette opération est répétée 50 000 fois, pour les 2 RCP, les 3 horizons, les 76 indicateurs et les 9 665 tronçons.

Le résultat est une distribution de valeurs d'indicateurs pour la période historique et six distributions de valeurs projetées (deux RCP et trois horizons futurs). Les quantiles sont extraits de ces distributions, et les 10^e, 25^e, 50^e (la médiane), 75^e et 90^e centiles sont diffusés sous forme de diagrammes en boîte à moustaches (**Figure 21**) dans l'outil Web « Indicateurs » de l'Atlas et sous forme de tableaux sur [Données Québec](#).

L'avantage de cette approche par deltas est qu'elle permet de s'affranchir des biais dans les scénarios hydroclimatiques, selon l'hypothèse que la méthode permet de les annuler en ne gardant que le signal de changement. La pige aléatoire permet de prendre en compte plusieurs sources d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique et d'intégrer la pondération des scénarios. Les indicateurs sont disponibles en valeurs absolues pour tous les tronçons jaugés et non jaugés, tant pour la période de référence que pour les horizons futurs.

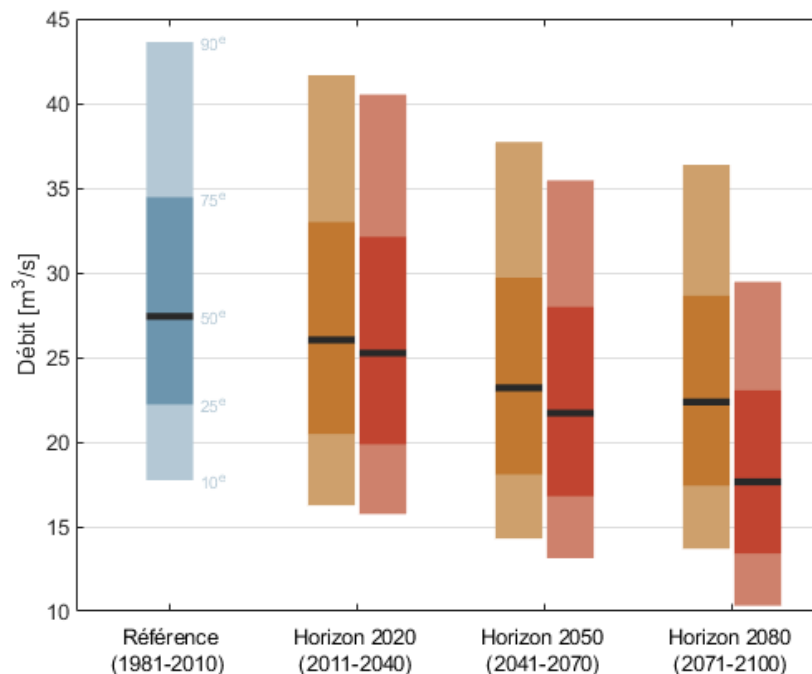


Figure 21. Exemple de diagramme à boîte à moustaches présentant les 10^e, 25^e, 50^e, 75^e et 90^e centiles pour la période de référence et les 2 RCP pour les 3 horizons projetés. (Exemple tiré du site Web de l'Atlas pour l'indicateur Q7MIN2EA et le tronçon SLSNO00347, correspondant à l'exutoire de la rivière Jacques-Cartier.)

3.4.1 Signal de changement

Le signal de changement associé à un indicateur est présenté sous la forme de trois principaux descripteurs (**Figure 22**). La direction du changement correspond à la proportion (P) des projections hydrologiques pondérées anticipant une augmentation ($\Delta > 0$) ou une diminution de l'indicateur ($\Delta < 0$). L'ampleur du changement correspond à la valeur médiane (Δ_{50}) de l'ensemble des valeurs de changement. La dispersion du signal autour de l'ampleur est évaluée par l'enveloppe interquartile ($\Delta_{75} - \Delta_{25}$) comprenant la moitié des valeurs probables autour de la valeur médiane (Δ_{50}).

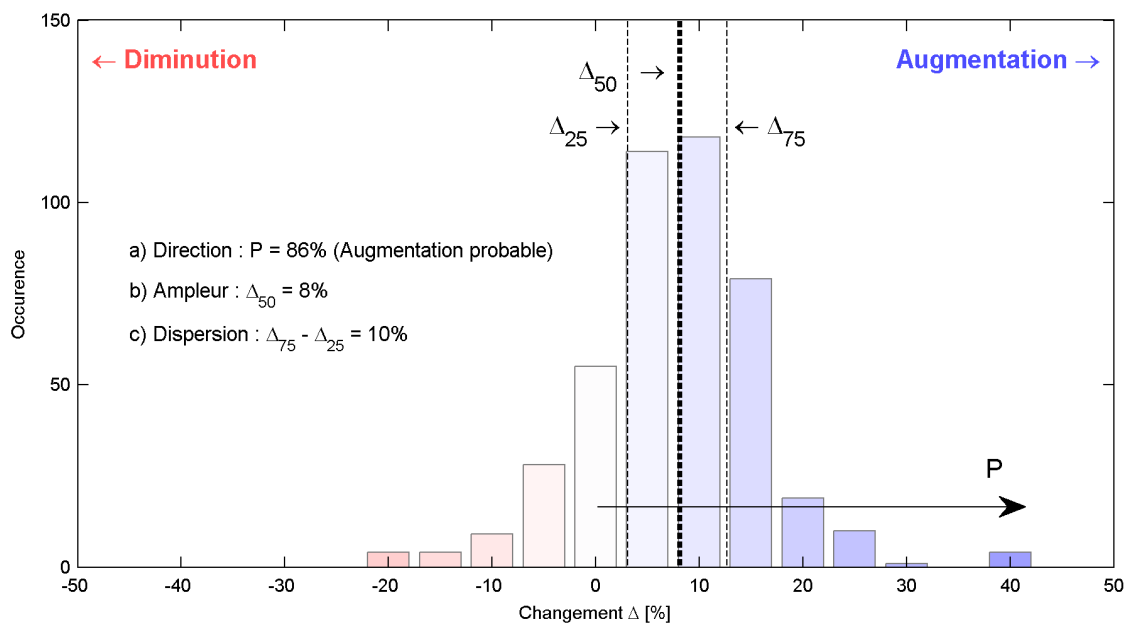


Figure 22. Les descripteurs du signal de changement hydrologique

Dans l'outil Web « Indicateurs » de l'Atlas, la direction, l'ampleur et la dispersion du changement sont présentées sous forme de carte pour chaque indicateur. Ces données sont également disponibles sous forme de tableaux via [Données Québec](#). La direction est qualifiée en fonction du consensus entre les différentes projections hydrologiques, comme le montre le **Tableau 10**. Les trois descripteurs sont présentés distinctement selon les horizons temporels et pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Tableau 10. Termes utilisés pour décrire la confiance dans la direction du changement

Direction	Consensus des projections hydrologiques
Augmentation très probable	Plus de 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation.
Augmentation probable	De 66 % à 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation.
Absence de consensus	De 33 % à 66 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation ou une diminution.
Diminution probable	De 66 % à 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une diminution.
Diminution très probable	Plus de 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une diminution.

4. Résultats

Ce chapitre présente une synthèse des principaux résultats. Les trois sections résument la direction et l'ampleur des changements pour les indicateurs projetés de l'Atlas pour les crues, les étiages et l'hydraulicité. La section 0 liste l'ensemble des produits disponibles dans l'Atlas hydroclimatique 2022. Les faits saillants de l'Atlas sont exposés dans le **Tableau 11** : les résultats y sont condensés par grandes familles d'indicateurs (lignes) et par saisons (colonnes). Des cartes des résultats pour quelques indicateurs sont présentées à l'Annexe J – Indicateurs hydroclimatiques projetés.

Tableau 11. Faits saillants de l'Atlas hydroclimatique 2022

Indicateurs	Hiver-printemps	Été-automne	Annuel
Pointes de crue (JQ1MAX, Q1MAX)	Plus hâtives <i>[Confiance élevée]</i> Plus fortes au nord; plus faibles dans le sud pour les réurrences de 2 et 5 ans, et plus fortes pour les réurrences de 100 et 350 ans <i>[Confiance modérée]</i>	Plus fortes <i>[Confiance modérée]</i>	Plus fortes <i>[Confiance modérée]</i>
Volume de crue (Q14MAX)	Plus fort au nord, moins fort au sud <i>[Confiance modérée]</i>	S. O.	Plus fort au nord, moins fort au sud <i>[Confiance modérée]</i>
Étiages (Q7MIN, Q30MIN)	Moins sévères <i>[Confiance élevée]</i>	Plus sévères et plus longs <i>[Confiance élevée]</i>	Plus sévères et plus longs <i>[Confiance modérée]</i>
Hydraulicité (QMOY)	Plus forte <i>[Confiance élevée]</i>	Plus faible <i>[Confiance élevée]</i>	Plus forte au nord et à l'est <i>[Confiance modérée]</i>

Dans ce tableau, un jugement d'expert est aussi donné entre crochets sur la confiance associée à chaque énoncé. Ce jugement s'appuie notamment sur la capacité du modèle hydrologique et des

simulations climatiques à reproduire les indicateurs observés sur la période de référence. Un niveau de confiance élevé signifie que les conclusions et valeurs présentées ne devraient pas ou peu changer puisque les processus clés liés aux phénomènes sont adéquatement modélisés et qu'il n'est pas attendu qu'une amélioration de la chaîne de modélisation conduise à des résultats significativement différents. Pour un niveau de confiance modéré, les conclusions et valeurs présentées ne devraient pas changer de façon importante, à grande échelle. Toutefois, il se pourrait qu'à l'échelle locale, une amélioration de la chaîne de modélisation conduise à des résultats modérément différents. On juge l'information suffisamment bonne et utile pour être diffusée et servir de point de départ à des démarches d'adaptation, mais il est possible que les conclusions se précisent, voire changent avec une amélioration de la chaîne de modélisation. Typiquement, on considère que la modélisation de certains processus clés devra être améliorée.

4.1 Projections pour les indicateurs de crue

- Les pointes de crue printanières seront plus hâtives [confiance élevée].
- Les pointes de crue printanières seront plus fortes au nord; elles seront plus faibles au sud pour les récurrences de 2 et 5 ans, et plus fortes pour les récurrences de 100 et 350 ans [confiance modérée].
- Les pointes de crue seront plus fortes à l'été-automne [confiance modérée].
- Les pointes de crue annuelles seront plus fortes [confiance modérée].
- Le volume des crues printanières sera moins élevé pour le sud du Québec méridional [confiance modérée].

Type	Indicateur	Description	Récurrences (ans)	Périodes annuelles	Nbre intra-total ind.
Pointes de crue	Q1MAX	Débit journalier maximal annuel	2, 5, 10, 20, 100, 350	AN, HP, EA	18
	JQ1MAX	Jour d'occurrence moyen du débit journalier maximal	2	HP	1
Volume de crue	Q14MAX	Débit moyen sur 14 jours maximal annuel	2, 5, 10, 20, 100, 350	AN, HP	12

Les pointes de crue printanières seront plus hâtives [confiance élevée].

L'indicateur JQ1MAXHP correspond au jour de l'année où se produit la pointe de crue au printemps. À l'horizon 2050, les projections décrivent un devancement probable à très probable du JQ1MAXHP sur l'ensemble du Québec méridional, de l'ordre de -9 jours (RCP4.5) à -14 jours (RCP8.5). À l'horizon 2080, le devancement est de l'ordre de -15 jours et de -24 jours, pour les RCP4.5 et RCP8.5 respectivement. En général, le devancement est plus important pour les bassins versants situés plus au sud que pour ceux au nord du Québec méridional. Par exemple, pour un bassin versant de la Montérégie, la crue printanière pourrait être devancée du 4 avril

(actuellement) au 9 mars (horizon 2080, RCP8.5). Le niveau de confiance est très élevé pour la direction, et élevé pour l'ampleur.

Les pointes de crue printanières seront plus fortes au nord; elles seront plus faibles au sud pour les récurrences de 2 et 5 ans, et plus fortes pour les récurrences de 100 et 350 ans [confiance modérée].

L'indicateur de débit journalier maximal annuel (Q1MAX) est calculé pour les saisons hiver-printemps (HP) et automne-été (EA) et pour toute l'année (AN) pour plusieurs récurrences (2, 5, 10, 20, 100, 350 ans). Il s'agit de la famille d'indicateurs généralement utilisée pour l'évaluation des risques associés aux crues.

En ce qui concerne les crues printanières, les cartes montrent une augmentation probable au nord du Québec méridional. Pour le sud, il y a souvent une absence de consensus sur le signal, mais les ampleurs (changements médians) indiquent généralement une baisse pour les récurrences de 2 et 5 ans (Q1MAX2AN et Q1MAX5AN) et une hausse pour les récurrences de 100 et 350 ans (Q1MAX100AN et Q1MAX350AN). Il n'y a pas de message clair pour les récurrences intermédiaires.

Les pointes de crue seront plus fortes à l'été-automne [confiance modérée].

Pour les crues estivales et automnales (EA), des augmentations probables sont projetées pour toutes les récurrences et toutes les régions. L'ampleur des augmentations est plus grande pour l'horizon 2080 que pour l'horizon 2050, et pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5. L'ampleur est aussi plus grande pour les récurrences plus rares. Par exemple, pour la récurrence de 2 ans (Q1MAX2EA), les changements sont en moyenne de +7 % pour H50-RCP4.5, +8,5 % pour H50-RCP8.5, +9 % pour H80-RCP4.5 et +12 % pour H80-RCP8.5. En moyenne pour les 2 RCP et les 2 horizons, les augmentations projetées sont de +9 % (récurrence de 2 ans), de +13 % (5 ans), de +14,5 % (10 ans) et +15,5 % (20 ans). Pour les indicateurs Q1MAX100EA et Q1MAX350EA, il y a absence de consensus sur la direction, sauf pour l'horizon 2080 RCP8.5, où une augmentation est probable.

Les pointes de crue annuelles seront plus fortes [confiance faible].

Pour les crues annuelles (AN), il y a absence de consensus sur la direction du changement pour une grande partie du domaine et des augmentations probables dans la partie nord. Pour le débit journalier maximal annuel de récurrence de 2 ans (Q1MAX2AN), il y a absence de consensus sur la direction pour tout le sud du Québec méridional, à l'exception de quelques tronçons pour lesquels une diminution de l'ordre de -9 % est probable à l'horizon 2080. Pour le nord du territoire modélisé, des augmentations probables sont projetées pour tous les horizons et les deux RCP, de l'ordre de +6 %. Pour les autres récurrences des crues annuelles, il y a davantage de consensus des scénarios pour une augmentation sur plusieurs tronçons du sud, notamment en Gaspésie et pour Chaudière-Appalaches. L'augmentation est de l'ordre de +5 % en moyenne sur l'ensemble du domaine pour la récurrence de 5 ans, de +6 % pour la récurrence de 10 ans et de +7 % pour la récurrence de 20 ans. Il y a consensus pour une augmentation sur un plus grand nombre de tronçons pour le RCP8.5 par rapport à ceux de RCP4.5.

Le volume des crues printanières sera plus élevé au nord et moins élevé au sud du Québec méridional [confiance modérée].

L'indicateur de débit moyen sur 14 jours maximal annuel (Q14MAX) est calculé pour la saison hiver-printemps (HP) et pour toute l'année (AN) pour plusieurs récurrences (2, 5, 10, 20, 100, 350 ans).

Le débit moyen sur 14 jours maximal sur la période hiver-printemps de récurrence de 2 ans (Q14MAX2HP) présente un gradient nord-sud marqué. Alors que pour le sud (y compris la Gaspésie, l'Outaouais et une partie de la Côte-Nord), les projections décrivent une diminution probable à très probable de l'ordre de -10 %, elles décrivent pour le nord une augmentation probable de l'ordre de +7 %. Entre les deux se trouve une bande plus incertaine (absence de consensus), dont l'emplacement varie selon les horizons et les RCP. Ce même gradient nord-sud s'observe pour les autres récurrences (5, 10, 20, 100, 350 ans), mais l'ampleur est en moyenne moins importante que pour la récurrence de 2 ans.

Pour les indicateurs de débit moyen sur 14 jours maximal annuel, le signal est pratiquement le même que pour la saison hiver-printemps. Par exemple, les projections pour l'indicateur Q14MAX2AN sont presque identiques à celle de l'indicateur Q14MAX2HP.

4.2 Projections pour les indicateurs d'étiage

- Les étiages hivernaux seront moins sévères [confiance élevée].
- Les étiages estivaux seront plus sévères et plus longs [confiance élevée].
- Les étiages annuels seront plus sévères et plus longs [confiance élevée].

Type	Indicateur	Description	Récurrences (ans)	Périodes annuelles	Nbre intra-total ind.
Étiage	Q30MIN	Débit moyen sur 30 jours minimal	2, 5, 10	AN, HP, EA	9
	Q7MIN	Débit moyen sur 7 jours minimal	5, 10	AN, HP, EA	6
			2	AN, HP, EA, mensuel	15

Les étiages hivernaux seront moins sévères [confiance élevée].

Pour le débit moyen sur 30 jours minimal sur la période hiver-printemps de récurrence de 2 ans (Q30MIN2HP), les projections décrivent une augmentation très probable pour tout le Québec méridional. L'ampleur du changement est plus grande à l'horizon 2080 qu'à l'horizon 2050. L'ampleur est aussi plus grande pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5. À l'horizon 2050 pour le RCP8.5, l'ampleur est de l'ordre de +50 % pour les bassins versants situés au sud du fleuve et de l'ordre de +25 % pour ceux au nord du fleuve. Pour les récurrences de 5 et 10 ans, les mêmes tendances sont projetées, avec une augmentation probable à très probable des débits sur l'ensemble du domaine. Pour l'indicateur Q30MIN5HP, à l'horizon 2050 et RCP8.5, l'ampleur est en moyenne de +40 % au sud du fleuve et de +18 % au nord du fleuve. Pour la récurrence de 10 ans (Q30MIN10HP), à l'horizon 2050 et RCP8.5, l'ampleur est de l'ordre de +35 % au sud du fleuve et de +15 % au nord du fleuve.

Les étiages estivaux seront plus longs [confiance élevée].

Pour le débit moyen sur 30 jours minimal sur la période été-automne, les projections décrivent une diminution probable à très probable pour tout le Québec méridional et ce, pour les récurrences de 2, 5 et 10 ans. Pour la récurrence de 2 ans (Q30MIN2EA), l'ampleur de la baisse des débits est plus grande à l'horizon 2080 qu'à l'horizon 2050. Elle est aussi plus grande pour le RCP8.5 que

pour le RCP4.5. Les projections décrivent des étiages plus sévères pour les bassins versants situés au sud et à l'ouest (de l'ordre de -25 % à l'horizon 2050, RCP8.5) qu'au nord et à l'est du Québec méridional (de l'ordre de -20 %, mêmes horizon et RCP). À l'horizon 2080 pour le RCP8.5, l'ampleur est en moyenne de -43 % pour le sud du Québec méridional. Les projections sont très semblables pour la récurrence de 5 ans (Q30MIN5EA) et de 10 ans (Q30MIN10EA), avec des diminutions de même ampleur que pour Q30MIN2EA.

Les étiages annuels seront plus longs [confiance élevée].

La direction des tendances annuelles pour le débit moyen 30 jours minimal suit un gradient du sud-ouest (diminution très probable) vers le nord-est (augmentation très probable). Pour la récurrence de 2 ans (Q30MIN2AN), à l'horizon 2050 et pour le RCP8.5, l'ampleur est de l'ordre de -28 % pour les bassins versants de la Montérégie et de -15 % pour ceux de l'Outaouais, de l'Estrie et de Chaudière-Appalaches, tandis qu'il est de +2 % pour ceux de la Gaspésie, de +10 % pour ceux du Saguenay et de +16 % pour ceux de la Côte-Nord. Les différences d'ampleur entre les régions sont encore plus importantes pour l'horizon 2080. Pour les récurrences de 5 ans (Q30MIN5AN) et de 10 ans (Q30MIN10AN), la zone du domaine pour laquelle une diminution est projetée s'étend vers le nord-est (diminution probable en Gaspésie et absence de consensus pour les bassins versants de la Côte-Nord). L'ampleur de la diminution est plus importante pour les récurrences de 5 et 10 ans que pour celle de 2 ans.

L'indicateur de débit moyen sur 7 jours minimal (Q7MIN) est calculé pour les saisons hiver-printemps et été-automne et sur toute l'année pour les récurrences de 2, 5 et 10 ans. Pour la récurrence de 2 ans, cet indicateur est aussi calculé pour chacun des 12 mois.

Pour le débit moyen sur 7 jours minimal sur la période hiver-printemps de récurrence de 2 ans (Q7MIN2HP), les projections décrivent une augmentation probable à très probable sur tout le domaine. À l'horizon 2050, pour le RCP8.5, l'ampleur de l'augmentation est en moyenne de +22 % : un peu plus fort pour les bassins versants du sud et un peu plus faible pour ceux du nord. L'ampleur augmente à +35 % en moyenne à l'horizon 2080 (RCP8.5). Les projections sont semblables pour les récurrences de 5 ans (Q7MIN5HP) et de 10 ans (Q7MIN10HP), avec des augmentations probables à très probables de l'ordre de +16 % en moyenne (Q7MIN5HP, horizon 2050, RCP8.5) et de +13 % (Q7MIN10HP, mêmes horizon et RCP). Pour les récurrences de 5 et 10 ans, il y a cependant absence de consensus pour plusieurs tronçons de l'Abitibi et de l'Outaouais.

Les étiages estivaux seront plus sévères [confiance élevée].

L'indicateur Q7MIN2EA décrit le débit moyen sur 7 jours minimal sur la période été-automne de récurrence de 2 ans. Pour cet indicateur, une diminution probable à très probable est projetée sur tout le Québec méridional. À l'horizon 2050, pour le RCP8.5, les projections décrivent une diminution moyenne des débits de -24 %. Cette baisse est plus sévère pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5, et pour l'horizon 2080 (-40 %). Les mêmes tendances sont décrites pour les projections de récurrence de 5 ans (Q7MIN5EA) et de 10 ans (Q7MIN10EA).

Les étiages annuels seront plus sévères [confiance élevée].

Les projections pour le débit moyen sur 7 jours minimal annuel de récurrence de 2 ans (Q7MIN2AN) présentent un gradient du sud-ouest (diminution très probable) vers le nord-est (augmentation probable) très semblable à l'indicateur Q30MIN2AN. L'ampleur du changement varie beaucoup selon les régions, le RCP et l'horizon. Par exemple, pour le RCP8.5 à l'horizon 2050, l'ampleur est de l'ordre de -26 % pour les bassins versants de la Montérégie, de -17 % pour ceux de l'Outaouais et de l'Abitibi, de -7 % en Gaspésie, de +6 % au Saguenay et de +12 % pour les bassins de la Côte-Nord. Les diminutions projetées à l'horizon 2080 sont plus importantes. Par exemple, pour cet horizon et pour le RCP8.5, l'ampleur moyenne est de -40 % en

Montérégie. Pour les récurrences de 5 ans (Q7MIN5AN) et de 10 ans (Q7MIN10AN), la tendance à la diminution est plus grande : l'ampleur de la baisse est plus importante et touche davantage de tronçons. De plus, pour plusieurs bassins de la Côte-Nord, le signal de la direction change pour « absence de consensus » ou « diminution probable ». De façon générale, l'ampleur de la diminution sur le domaine pour l'horizon 2050 (RCP8.5) est en moyenne de -11 % (Q7MIN2AN), de -14 % (Q7MIN5AN) et de -16 % (Q7MIN10AN). À l'horizon 2080, l'ampleur de la diminution est environ le double, soit -23 %, -29 % et -31 %, respectivement pour ces trois indicateurs.

Les projections pour les indicateurs mensuels de débit moyen sur 7 jours minimal de récurrence de 2 ans sont cohérentes avec les indicateurs saisonniers. Ainsi, pour les mois de décembre, janvier, février et mars (Q7MIN2_12, Q7MIN2_01, Q7MIN2_02 et Q7MIN2_03), la direction du changement est une augmentation très probable sur l'ensemble du domaine pour tous les horizons et les deux RCP. Pour les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre (Q7MIN2_06, Q7MIN2_07, Q7MIN2_08, Q7MIN2_09 et Q7MIN2_10), la direction du changement est une diminution probable à très probable, pour tout le Québec méridional, pour tous les horizons et RCP. Les mois de transition, soit avril, mai et novembre (Q7MIN2_04, Q7MIN2_05 et Q7MIN2_11), présentent généralement une diminution probable des débits au sud et une augmentation au nord du Québec méridional. Pour ces mois, il y a absence de consensus sur la direction pour plusieurs tronçons.

4.3 Projections pour les indicateurs d'hydraulicité

- L'hydraulicité hivernale sera plus forte [confiance élevée].
- L'hydraulicité estivale sera plus faible [confiance élevée].
- L'hydraulicité à l'échelle annuelle sera plus forte au nord et à l'est du Québec méridional [confiance modérée].

Type	Indicateur	Description	Récurrence (ans)	Périodes annuelles	intra- total ind.
Hydraulicité	QMOY	Débit moyen	2	AN, HP, EA, mensuel	15

L'hydraulicité hivernale sera plus forte [confiance élevée].

L'indicateur hydrologique QMOYHP correspond au débit moyen évalué sur la période d'hiver-printemps. À l'horizon 2050, les projections décrivent une augmentation très probable du QMOYHP sur une large proportion du Québec méridional, de l'ordre de +5 % à +10 % (RCP4.5) et pouvant atteindre +12 % (RCP8.5). À l'horizon 2080, l'ampleur est de l'ordre de +10 % (RCP4.5) à +18 % (RCP8.5). Les indicateurs d'hydraulicité mensuels reflètent également ces constats puisque les augmentations sont probables et très probables pour l'ensemble du Québec méridional pour les mois de novembre, décembre, janvier et mars.

L'hydraulicité estivale sera plus faible [confiance élevée].

L'indicateur hydrologique QMOYEA correspond au débit moyen évalué sur la période d'été-automne. À l'horizon 2050, les projections décrivent une diminution probable du QMOYEA sur une large portion du Québec méridional, de l'ordre de -5 % (RCP4.5) et pouvant atteindre -10 %

(RCP8.5) pour les bassins à l'ouest et au sud. Il y a absence de consensus sur la direction du changement pour plusieurs bassins versants de la Côte-Nord. Les indicateurs d'hydraulicité mensuels reflètent également ces constats puisque les diminutions sont probables et très probables pour presque tout le Québec méridional pour les mois de mai, juin, juillet et août.

L'hydraulicité à l'échelle annuelle sera plus forte au nord et à l'est du Québec méridional [confiance modérée].

L'indicateur hydrologique QMOYAN correspond au débit moyen annuel. À l'horizon 2050, les projections décrivent une augmentation probable du QMOYAN sur le nord et l'est du Québec méridional, de l'ordre de +2 % à +5 % (RCP4.5) et pouvant atteindre +10 % (RCP8.5). Pour les mêmes régions, à l'horizon 2080, l'ampleur est de l'ordre de +2 % à +10 % pour les deux RCP. Pour tous les horizons et les RCP, il y a absence de consensus sur la direction du changement pour le sud du Québec.

4.4 Produits et données disponibles

Cette section décrit brièvement les produits et données de l'Atlas hydroclimatique 2022.

Documentation :

- **Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022.**
Le [guide](#) propose une introduction générale aux outils de l'Atlas 2022, à l'hydrologie et à l'impact des changements climatiques sur les régimes hydrologiques des rivières dans le Québec méridional. Il s'adresse à tous les acteurs de la société québécoise préoccupés par les impacts des changements climatiques sur les usages de l'eau et qui désirent commencer à intégrer des actions d'adaptation dans leurs projets de conception ou dans leurs pratiques de gestion. Il a été produit en étroite collaboration avec Ouranos.
- **Tutoriel interactif.**
Le [tutoriel](#) accompagne l'utilisateur dans le choix de l'outil répondant le mieux à ses besoins. Il illustre également la démarche d'utilisation des différents outils Web, ainsi que les options disponibles. Il a été produit en étroite collaboration avec Ouranos.
- **Rapport technique.**
Le présent document a comme l'objectif de documenter la méthodologie et les données de l'Atlas hydroclimatique 2022 pour faciliter la compréhension de ses résultats et soutenir une utilisation éclairée de ses outils. Il s'adresse aux professionnels et aux spécialistes intéressés par la méthodologie de l'Atlas et qui désirent aller plus loin que le survol présenté dans le *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*.
- **Webinaire Ouranos sur l'Atlas hydroclimatique 2022.**
L'enregistrement du [webinaire](#) est disponible. Celui-ci présente un survol de la méthodologie et des nouveautés de l'Atlas, en plus d'offrir un aperçu des faits saillants. Le guide d'accompagnement et un tutoriel interactif sont aussi sommairement présentés.

Données et outils :

- **Outil « Stations hydrométriques ».**
Cet outil présente une [carte des stations hydrométriques](#) (débit et niveau) produite par le MELCCFP, ainsi que les informations sur les stations et les liens vers les données. Les

données accessibles sont les historiques, le suivi hydrologique en temps réel (pour les stations ouvertes) et les prévisions hydrologiques, le cas échéant. Plusieurs filtres permettent de sélectionner les stations en fonction de critères sur les métadonnées (par exemple, afficher seulement les stations ouvertes). Il est aussi possible d'afficher la couche des bassins versants primaires, ainsi que la couche des bassins versants des stations. Les métadonnées peuvent être facilement téléchargées en format CSV.

- **Outil « Portrait ».**

Le [Portrait](#) fournit les séries temporelles de débits journaliers de 1970 à récemment, pour près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés. L'outil donne donc accès à des valeurs de débit historique pour un tronçon de rivière sans station ou pour une période où les données d'une station n'étaient pas disponibles. Les données peuvent être téléchargées facilement en format CSV et sont mises à jour à quelques reprises pendant l'année. L'incertitude sur les valeurs est présentée avec les valeurs des 25^e et 75^e centiles qui accompagnent la valeur médiane de débit (50^e centile).

- **Outil « Indicateurs ».**

[Il s'agit d'un outil Web](#) cartographique des indicateurs hydrologiques (crue, étiage, etc.) pour la période historique et estimés pour le climat futur avec l'impact des changements climatiques, pour près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés. Il présente les valeurs absolues pour les 76 indicateurs pour le Portrait (période historique) et projetés en climat futur selon 2 RCP et 3 horizons temporels. L'incertitude est également donnée, avec les 10^e, 25^e, 50^e, 75^e et 90^e centiles des valeurs calculées. Le changement relatif (ampleur), ainsi que la direction et la dispersion de ce changement sont aussi illustrés. Les données sont disponibles sous forme de cartes interactives, de tableaux et de diagrammes en boîte à moustaches (« boxplot »).

- **Données Québec.**

La plateforme de partage de données ouvertes héberge [toutes les données](#) diffusées de l'Atlas hydroclimatique 2022, à l'exception des séries temporelles de débits du Portrait. Cela inclut la carte des 24 604 tronçons de rivières de l'Atlas en différents formats (GeoJSON et shapefile), les tables CSV avec les descripteurs de changements (ampleur, direction, dispersion) et les tables CSV des quantiles des valeurs absolues des indicateurs historiques et projetés. Un PDF comprenant les métadonnées et une description détaillée des données complète la liste.

Autres liens utiles :

- **Archives des Atlas précédents.**

Les Rapports des [Atlas hydroclimatiques 2013](#) et [2015](#) sont disponibles en format PDF, de même que le [Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique 2018](#). Ce dernier fournit une introduction générale à l'hydrologie et aux changements climatiques s'adressant plus particulièrement aux acteurs de l'eau généralistes afin que ceux-ci aient les clés nécessaires à la compréhension et à l'utilisation de l'information donnée dans l'Atlas. Il propose un ensemble d'arguments en faveur des pratiques de gestion résilientes aux changements climatiques. Le site Web de l'Atlas 2018 n'est plus accessible, mais les archives des données peuvent être consultées sur [Données Québec](#).

- **Portraits climatiques.**

Cette [plateforme](#) produite par Ouranos présente de l'information climatique touchant la province de Québec. Elle vise à faciliter la visualisation des changements climatiques, à sensibiliser les différents acteurs et à appuyer l'adaptation sur le territoire québécois.

- **Atlas de l'eau.**

Cet [Atlas](#) produit par le MELCCFP diffuse les informations d'intérêt public concernant, notamment, les sources de pollution du milieu aquatique, la qualité de l'eau et des écosystèmes ainsi que les problématiques prioritaires identifiées par zone de gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Plusieurs autres sources d'information utiles en lien avec l'hydrologie et les changements climatiques sont décrites au chapitre 6 du *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*.

5. Discussion

Ce chapitre présente quelques éléments de discussion et d'analyse des chapitres précédents, particulièrement celui portant sur les résultats (chapitre 4).

5.1 Comparaison avec les Atlas précédents

Il y a de nombreuses différences méthodologiques entre cet Atlas et les précédentes versions (**Tableau 1**) qui rendent plus complexe la comparaison entre les versions. Les changements dans la production de l'Atlas qui influencent davantage les résultats sont la plus grande résolution hydrographique, les modifications apportées au modèle hydrologique (calibration différente, utilisation de six plateformes, etc.), les horizons temporels différents (comme la référence n'est pas la même et que la méthode des deltas est utilisée, cela change les résultats de tous les horizons), l'ajout de nombreuses simulations climatiques de MRC (ClimEx, Cordex), les différences dans le post-traitement, un nouveau calcul des indicateurs et des saisons différentes. Cette évolution itérative de l'Atlas a pour objectif de garder l'outil à jour avec les meilleures pratiques de modélisation hydroclimatique et aussi d'ajouter des informations (par exemple, en passant de 1 500 à 10 000 tronçons).

Il est important de noter que, malgré l'évolution de la méthodologie, les faits saillants qui synthétisent les principaux résultats demeurent les mêmes depuis le premier Atlas hydroclimatique. Ces conclusions sont aussi cohérentes avec d'autres analyses sur les rivières du Québec (Boyer et collab., 2010; Castaneda-Gonzalez et collab., 2022; Guay et collab., 2015). L'Atlas 2022 est cependant venu nuancer deux faits saillants des Atlas précédents. Le premier concerne l'énoncé suivant : « La pointe des crues printanières sera moins élevée au sud du Québec méridional. » Dans la plus récente mise à jour, pour plusieurs indicateurs de crue printanière, la majorité des tronçons du sud affiche en fait une absence de consensus, plutôt qu'une diminution probable comme dans l'Atlas 2018 (voir par exemple les cartes de la **Figure 41** et de la **Figure 43**). L'ajout de nombreuses simulations climatiques, la définition différente du printemps et la période de référence décalée (1971-2000 pour l'Atlas 2018, 1981-2010 pour 2022) expliquent cette dissemblance pour les crues. Cependant, en analysant les cartes d'ampleur de l'Atlas 2022, on reconnaît les conclusions de l'Atlas 2018. En effet, on voit que les pics de crues vont en augmentant dans le nord et en diminuant dans le sud pour les indicateurs de faible récurrence (Q1MAX2AN et Q1MAX5AN). Pour les indicateurs de haute récurrence (Q1MAX100AN et Q1MAX350AN), qui n'étaient pas couverts dans l'édition précédente, on observe une augmentation au nord comme au sud. Le second fait saillant nuancé par l'Atlas 2022 est que « l'hydraulicité à l'échelle annuelle sera plus forte au nord du Québec méridional et plus faible au sud ». En effet, le signal pour le sud du Québec méridional est passé de « diminution probable » à « absence de consensus » (**Figure 47**). Encore une fois, l'ajout de nombreuses simulations climatiques à l'ensemble CMIP5 explique au moins partiellement ce changement de résultat entre les versions. Il semble aussi que la diminution de l'hydraulicité anticipée pendant la saison été-automne (**Figure 49**) ne compense plus la hausse projetée des débits moyens de la période hiver-printemps (**Figure 48**), ce qui donne un bilan à la hausse pour les débits moyens annuels.

5.2 Incertitudes

Il est essentiel de prendre en compte l'incertitude dans la chaîne de modélisation hydroclimatique. Bien que l'incertitude soit généralement connotée négativement dans le langage de tous les jours, il est important d'insister sur sa valeur comme information en science et particulièrement en hydroclimatologie. Elle peut être comprise comme une information sur la donnée, de façon analogue à des métadonnées. Si presque toutes les études sur l'impact des changements climatiques sur les débits considèrent l'incertitude, les méthodes pour y arriver et surtout le choix des sources d'incertitude analysées varient grandement dans la littérature.

Par exemple, pour la production d'Hydro-CH2018 (Muelchi et collab., 2020), la base de données hydroclimatiques officielle de la Suisse, les chercheurs ont considéré 68 combinaisons de scénarios GCM-RCM (« Global climate model » - « Regional climate model ») couvrant 3 RCP. Cependant, un seul modèle hydrologique a été utilisé. Il s'agit d'un exemple parmi tant d'autres. Dans chaque cas, les auteurs font le choix de se pencher sur certaines étapes de la démarche qui, selon eux, contribuent le plus à l'incertitude des conclusions.

Dans les prochains paragraphes, trois types d'incertitudes dans la chaîne de production de l'Atlas seront explorés, c'est-à-dire les incertitudes climatiques, hydrologiques et celles associées au calcul des indicateurs. Ensemble, ces sources d'incertitude donnent une bonne estimation de l'incertitude totale dans les résultats finaux. C'est sur ces sources d'erreur que se base l'estimation des percentiles associés à chaque valeur produite dans l'Atlas.

5.2.1 Incertitudes climatiques

Les émissions de gaz à effet de serre futurs et leurs concentrations dans l'atmosphère au cours des prochaines décennies étant inconnues, le choix d'une trajectoire précise pour les simulations climatiques vient avec des incertitudes. Pour les prendre en compte, les scénarios climatiques choisis dans l'Atlas 2022 couvrent le RCP4.5 ainsi que le RCP8.5. Le premier est considéré comme optimiste et le second, comme pessimiste.

La modélisation des processus physiques à l'intérieur des GCM vient également avec son lot d'incertitudes. Pour cette raison, les 180 simulations climatiques qui servent à faire les projections en climat futur dans l'Atlas 2022 proviennent de 6 GCM différents. Le consensus ou non-consensus entre ces simulations permet d'estimer le niveau de confiance des projections.

Pour les RCM, la mise à l'échelle à partir des grilles de GCM qui servent de pilotes implique une part d'incertitude. L'ensemble CORDEX utilisé dans l'Atlas 2022 permet d'explorer celle-ci puisqu'il contient six modèles de RCM différents.

Le post-traitement statistique appliqué aux données brutes des simulations climatiques pour, entre autres, les débiaiser vient également avec son lot d'incertitudes. De plus, ce post-traitement étant basé sur des données observées, l'incertitude de celles-ci entre en jeu.

La dernière source d'incertitude climatique est la variabilité naturelle (c.-à-d. les fluctuations naturelles des composantes du système climatique). C'est la variabilité naturelle qui fait que les données climatiques changent d'une année à l'autre à un même endroit. L'ensemble CLIMEX permet d'avoir une idée de l'incertitude associée à la variabilité naturelle en ayant 50 membres. Ces 50 réalisations du même modèle ont seulement de petites différences dans leurs conditions initiales et permettent d'avoir une grande variété de « climats possibles ». L'ajout des 50 scénarios climatiques de l'ensemble CLIMEX à l'Atlas 2022 permet donc une prise en compte robuste de la variabilité naturelle.

5.2.2 Incertitudes hydrologiques

Le Portrait, qui sert aux indicateurs de la période de référence et sur lequel sont basées les projections, utilise des données de débit du réseau hydrométrique. Bien que ces données ne soient pas exemptes d'incertitude, aucune mesure pour essayer d'estimer celle-ci n'a été incluse dans la chaîne de production de l'Atlas. Il semble tout de même important de souligner les deux types de débit pour lesquels on sait que l'incertitude est plus grande :

- les débits extrêmes, puisqu'ils sont souvent obtenus par une extrapolation de la courbe de tarage sans avoir été jaugés,
- les débits hivernaux, puisque l'effet de glace est difficile à estimer.

Les sources d'incertitude hydrologique incluent également l'incertitude liée à la modélisation hydrologique. La représentation des processus physiques amène sa part d'incertitude, tout comme la paramétrisation du modèle. Pour tenter de réduire le premier type d'erreur, il a été décidé de modéliser avec une plateforme Hydrotel, qui utilise la formule d'évaporation Linacre (LN24HA; Linacre, 1977) et une autre qui prend la formule McGuinness (MG24HA; McGuinness et Bordne, 1972). Pour prendre en compte le second type d'erreur, six paramétrisations d'Hydrotel ont été utilisées. Les résultats de ces « saveurs » ont ensuite été pondérés pour obtenir une valeur moyenne. L'Annexe D décrit les six paramétrisations avec davantage de détails.

5.2.3 Incertitudes associées au calcul des indicateurs

Le dernier type d'incertitude à être exploré dans ce rapport est celui lié au calcul des indicateurs de l'Atlas. Puisque les indicateurs de récurrence sont obtenus à l'aide d'une distribution statistique avec des paramètres ajustés, quelques sources d'erreur en ressortent. Premièrement, l'ajustement des paramètres de chaque loi est un processus ayant son lot d'incertitudes. La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour arriver à des valeurs de paramètres uniques pour chaque loi. Bien que les paramètres soient ensuite validés, l'incertitude associée à chaque paramètre n'est pas estimée. Deuxièmement, le choix de la meilleure loi statistique à utiliser est une étape incertaine. Pour considérer cette incertitude, chaque indicateur combine les données pondérées de six lois, les poids étant fonction du critère d'information d'Akaike (AIC; Akaike, 1998).

Certains indicateurs représentent des valeurs ayant des probabilités au dépassement faibles (c.-à-d. des périodes de récurrence hautes) et sont calculés sur des horizons de 30 ans. Pour limiter l'erreur liée à l'extrapolation extrême des distributions, on utilise une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov pour les indicateurs historiques. Cela permet d'allonger les séries de maximums annuels sur lesquelles sont ajustées les lois statistiques et de réduire l'erreur liée à une extrapolation due à un faible échantillon.

Le calcul des indicateurs inclut également l'étape de la régionalisation de ceux-ci. À cette étape, l'interpolation optimale permet de combiner l'information sur les tronçons jaugés (observations) à celle sur les tronçons non jaugés (modélisation hydrologique). Comme discuté à la section 3.4, l'interpolation optimale est une façon efficace d'estimer les indicateurs aux tronçons pour lesquels aucune donnée observée n'existe. Toute méthode de régionalisation ajoute de l'incertitude à celle des données jaugées; l'estimation de cette dernière pour la méthode de l'interpolation optimale est couverte à l'Annexe G.

5.3 Limites

On doit utiliser les données fournies par l'Atlas en étant conscient des limites de chaque outil. Ces limites seront brièvement présentées dans cette section. Un lecteur qui souhaite en savoir davantage peut consulter la page Web suivante : <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/usages-limitation.htm>.

Premièrement, la modélisation hydrologique effectuée à différentes étapes dans la chaîne de production de l'Atlas ne considère pas les modifications anthropiques du débit (gestion de barrages en amont, prélèvement d'eau, rejet d'émissaires, etc.). Pour cette raison, les données concernant les tronçons dont le régime subit l'influence d'un ou de plusieurs barrages ne sont pas diffusées.

Deuxièmement, l'usage des données concernant les tronçons qui drainent un bassin versant de moins de 100 km² n'est pas recommandé. Il y a peu de stations hydrométriques de cette taille, la modélisation hydrologique y est plus difficile et l'interpolation des données climatiques à un petit bassin versant est sensible aux erreurs d'interpolation. Pour ces raisons, aucune donnée n'est diffusée pour les bassins versants de moins de 50 km².

Troisièmement, les débits sont simulés en eau libre et ne couvrent donc pas les phénomènes liés à la glace, comme les embâcles.

Quatrièmement, la qualité des données aux tronçons dont l'identifiant commence par « CND » est hautement incertaine. En effet, les données météorologiques pour la région de la Côte-Nord sont peu nombreuses et contiennent des problèmes connus qui remettent en question leur qualité. L'utilisation des données de l'Atlas à ces tronçons doit se faire de façon prudente.

Finalement, la méthodologie qui permet d'identifier les dates des saisons à chaque tronçon de la plateforme (voir section 3.3.3 et Annexe F) en se basant sur le couvert neigeux peut, dans certains cas, causer des problèmes. La stratégie d'identification des saisons changera dans la prochaine édition de l'Atlas, pour revenir à quelque chose de plus simple.

Un utilisateur attentif pourrait remarquer que, à quelques reprises, un indicateur de crue sur la période annuelle est plus faible que le même indicateur sur une saison (« HP », par exemple). Cela n'est pas logique : l'indicateur de crue annuel devrait toujours être supérieur aux indicateurs saisonniers. Ce qui cause ces rares anomalies est l'incertitude lors de l'ajustement des lois statistiques et l'extrapolation à des probabilités au dépassement faibles.

6. Conclusion

Ce rapport technique détaille la méthodologie de l'Atlas hydroclimatique 2022. Les données et les modèles utilisés ont d'abord été présentés, avec une attention particulière portée sur les projections climatiques et la modélisation hydrologique. Les méthodologies nécessaires au Portrait, à l'analyse de tendance, au calcul des indicateurs et aux projections hydroclimatiques ont ensuite été décrites. Les résultats ont été synthétisés, puis discutés. Ces résultats, soit l'impact des changements climatiques sur les débits des rivières du Québec méridional, montrent notamment des changements anticipés dans les prochaines décennies tant pour les crues (devancement de la crue printanière, changement dans les pointes et les volumes) que pour les étiages (moins sévères en hiver, mais plus critiques en été).

7. Références bibliographiques

- Abramowitz, G., Herger, N., Gutmann, E., Hammerling, D., Knutti, R., Leduc, M., Lorenz, R., Pincus, R., et Schmidt, G. (2018). "Model dependence in multi-model climate ensembles : Weighting, sub-selection and out-of-sample testing". *Earth System Dynamics Discussions*, 6, 1-20. <https://doi.org/10.5194/esd-2018-51>.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2009). *Couverture des terres des régions agricoles du Canada, vers l'an 2000*. <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/16d2f828-96bb-468d-9b7d-1307c81e17b8>.
- Akaike, H. (1998). "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle". *Selected papers of hirotugu akaike*, p. 199-213.
- Alavoine, M., et Grenier, P. (2022). "The distinct problems of physical inconsistency and of multivariate bias involved in the statistical adjustment of climate simulations". *International Journal of Climatology*, n/a (n/a). <https://doi.org/10.1002/joc.7878>.
- Arino, O., Ramos Perez, J. J., Kalogirou, V., Bontemps, S., Defourny, P., et Van Bogaert, E. (2012). *Global land cover map for 2009 (GlobCover 2009)*. European Space Agency (ESA) et Université catholique de Louvain (UCL http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf.
- Bergeron, O. (2016). *Guide d'utilisation 2016 – Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2* [Rapport technique]. 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 p. <https://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs2545297>.
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., et Roy, A. G. (2010). "Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries". *Journal of Hydrology*, 384(1), p. 65-83. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.011>.

- Burkey, J. (2022). *Mann-Kendall Tau-b with Sen's Method (enhanced)*.
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11190-mann-kendall-tau-b-with-sen-s-method-enhanced>.
- Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Turcotte, R., et Chaumont, D. (2022). "Uncertainty sources in flood projections over contrasting hydrometeorological regimes". *Hydrological Sciences Journal*, 67(15), p. 2232-2253.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (2012). *Mise à jour sur les changements récents des indicateurs hydrologiques aux stations hydrométriques du Québec*. Gouvernement du Québec, 16 p. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/repertoire-information/AccesDonnees.ashx?telecharge=LxcRLRYVZ5cBR9aFZVZ5cUMLqNbRJIalc9bdZUMFwIZMcRmGuWi61FySp2smkHwTznIWDHyy0Wt2uGDSD10Wt3v0z3p0>.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2015). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*, 81 p.
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques – Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*. Montréal, Qc, Canada. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/hors_proj-2016-charron-guide_scenario_0.pdf.
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., et Braun, M. (2013). "Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America". *Water Resources Research*, 49(7), p. 4187-4205.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., et Wehner, M. (2013). "Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility". Dans *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 1029-1136. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024>.

- Comité de la cartographie des inondations (2019). *Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables. Version 1.0* (Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables). Ressources naturelles Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/rncan-nrcan/m45/M45-113-2019-fra.pdf.
- Direction de l'expertise hydrique (DEH) (2018). *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2018*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 31 p. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/doc-accompagnement.pdf>.
- Direction de l'expertise hydrique (DEH) (2019). *Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les facteurs de pointe*. [Rapport interne]. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 15 p.
- Do, H. X., Westra, S., et Leonard, M. (2017). "A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow". *Journal of Hydrology*, 552, p. 28-43. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.015>.
- Fortin, J. P., Moussa, R., Bocquillon, C., et Villeneuve, J. P. (1995). "Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique". *Revue des sciences de l'eau*, 8(1), p. 97. Ariane Articles. <https://doi.org/10.7202/705215ar>.
- Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., et Villeneuve, J.-P. (2001). "Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I : Description of model". *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), p. 91-99.
- Fortin, V., Roy, G., Donaldson, N., et Mahidjiba, A. (2015). "Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA)". *Journal of Hydrology*, 531(2), p. 296-307. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.003>.
- Foulon, É., et Rousseau, A. N. (2018). "Equifinality and automatic calibration : What is the impact of hypothesizing an optimal parameter set on modelled hydrological processes?".

- Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(1), p. 47-67. <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1430620>.
- Gaborit, E, Ricard, S. Lachance-Cloutier, S., Anctil, F. Turcotte, R. (2015). "Comparing global and local calibration schemes from a differential split-sample test perspective". *Canadian Journal of Earth Sciences*. 10.1139/cjes-2015-0015.
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., et Grenier, P. (2015). "Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(23), 11,862-11,877. <https://doi.org/10.1002/2015JD023890>.
- Gesch, D., Oimoen, M., Greenlee, S., Nelson, C., Steuck, M., et Tyler, D. (2002). "The national elevation dataset". *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1), p. 5-32.
- Guay, C., Minville, M., et Braun, M. (2015). "A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec". *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 40(3), p. 285-302. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1043583>.
- Guber, A. K., et Pachepsky, Y. A. (2010). *Multimodeling with Pedotransfer Functions. Documentation and User Manual for PTF Calculator (CalcPTF) Version 2.0*.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., et Martinez, G. F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling". *Journal of Hydrology*, 377(1), p. 80-91. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Hausfather, Z., et Peters, G. P. (2020). "Emissions – the 'business as usual' story is misleading". *Nature*, 577(7792), p. 618-620.
- Hodgkins, G. A., Whitfield, P. H., Burn, D. H., Hannaford, J., Renard, B., Stahl, K., Fleig, A. K., Madsen, H., Mediero, L., Korhonen, J., Murphy, C., et Wilson, D. (2017). "Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe". *Journal of Hydrology*, 552, p. 704-717. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027>.

- Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., et Papadopol, P. (2009). "Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), p. 725-741.
- Hydro-Com Technologies (2008). *Analyse des tendances hydrométriques*. Centre de recherche sur l'environnement et sur le développement durable, Université du Nouveau-Brunswick, 10 p. <https://www.voixfemmesnb-voiceswomennb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/AnalyseTendancesHydrometriques.pdf>.
- Kendall, M. G. (1938). "A new measure of rank correlation". *Biometrika*, 30(1/2), p. 81-93.
- Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., et Cyr, J.-F. (2017). "Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada)". *Journal of Hydrology*, 550, p. 294-306. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.011>.
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.-L., Ludwig, R., Brietzke, G. B., Giguère, M., Brissette, F., Turcotte, R., Braun, M., et Scinocca, J. (2019). "The ClimEx Project : A 50-Member Ensemble of Climate Change Projections at 12-km Resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5)". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(4), p. 663-693. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0021.1>.
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., Döll, P., Endejan, M., Frenken, K., et Magome, J. (2011). "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management". *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), p. 494-502.
- Linacre, E. T. (1977). "A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone". *Agricultural Meteorology*, 18(6), p. 409-424.
- Livneh, B., Rosenberg, E. A., Lin, C., Nijssen, B., Mishra, V., Andreadis, K. M., Maurer, E. P., et Lettenmaier, D. P. (2013). "A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes

- and states for the conterminous United States: Update and extensions". *Journal of Climate*, 26(23), p. 9384-9392.
- Lucas-Picher, P., Lachance-Cloutier, S., Arsenault, R., Poulin, A., Ricard, S., Turcotte, R., et Brissette, F. (2021). "Will Evolving Climate Conditions Increase the Risk of Floods of the Large US-Canada Transboundary Richelieu River Basin?". *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 57(1), p. 32-56.
- Mailhot, A., Talbot, G., Ricard, S., Turcotte, R., et Guinard, K. (2018). "Assessing the potential impacts of dam operation on daily flow at ungauged river reaches". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, p. 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.06.006>.
- Martins, E. S., et Stedinger, J. R. (2000). "Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data". *Water Resources Research*, 36(3), p. 737-744. <https://doi.org/10.1029/1999WR900330>.
- McGuinness, J. L., et Bordne, E. F. (1972). *A Comparison of Lysimeter-Derived Potential Evapotranspiration with Computed Values*. US Department of Agriculture, 71 p.
- McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R. F., Price, D., et Owen, T. (2011). "Customized spatial climate models for North America". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), p. 1611-1622.
- Mearns, L., McGinnis, S., Korytina, D., Arritt, R., Biner, S., Bukovsky, M., Chang, H.-I., Christensen, O., Herzmann, D., Jiao, Y., Kharin, S., Lazare, M., Nikulin, G., Qian, M., Scinocca, J., Winger, K., Castro, C., Frigon, A., et Gutowski, W. (2017). *The NA-CORDEX Dataset [NetCDF]*. UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2016). *Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)*. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (s. d.). *Gestion intégrée des ressources en eau par bassins versants*.

(Consulté le 23 février 2023)

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/gire-bassins-versants.htm>.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2022). *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/guide-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2008). *La Base de données topographiques du Québec à l'échelle de 1/20 000 (BDTQ 20k) [Données numériques]*. Québec.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2016). *Utilisation du territoire. Méthodologie et description de la couche d'information géographique*. Direction de l'écologie et de la conservation et Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 36 p.. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire/ressource/2ff3684f-cfb3-4dd2-8d7d-09517c46358d>.

Mpelasoka, F. S., et Chiew, F. H. (2009). "Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections". *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), p. 1168-1183.

Muelchi, R., Schwanbeck, J., Rössler, O., Weingartner, R., et Martius, O. (2020). *Hydro-CH2018-Runoff ensemble (Version v1) [dataset]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3937485>.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., et 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), p. 290-306. Ariane Articles. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.

Ressources naturelles Canada. (s. d.). *Réseau hydrographique national*. Ressources naturelles Canada. (Consulté le 23 février 2023) <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/a4b190fe-e090-4e6d-881e-b87956c07977>

- Ricard, S., Bourdillon, R., Roussel, D., et Turcotte, R. (2013). "Global Calibration of Distributed Hydrological Models for Large-Scale Applications". *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(6), p. 719-721. Ariane Articles. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000665](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000665).
- Rondeau-Genesse, G., et Braun, M. (2020). *Production des scénarios climatiques pour les projets – Impact des changements climatiques sur les débits au Québec (cQ2) et la thématique Évolution du climat du projet de Soutien à INFO-Crue* [Rapport présenté par Ouranos], 14 p. <https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications/post-traitement-projections-precipitations-extremes>.
- Rondeau-Genesse, G., Braun, M., et Caron, L.-P. (2021). *Pondération des scénarios climatiques d'INFO-Crue sur la base de l'unicité et de la performance des simulations hydrologiques* [Rapport technique présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques]. Ouranos, 51 p. <https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications/performance-simulations-hydrologiques>.
- Roy, P., Rondeau-Genesse, G., Jalbert, J., et Fournier, É. (2023) "Climate scenarios of extreme precipitation using a combination of parametric and non-parametric bias correction methods in the province of Québec", *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, DOI: 10.1080/07011784.2023.2220682.
- Seiller, G., et Anctil, F. (2016). "How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections?". *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), p. 2249-2266. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1100302>.
- Serinaldi, F., et Kilsby, C. G. (2015). "Stationarity is undead : Uncertainty dominates the distribution of extremes". *Advances in Water Resources*, 77, p. 17-36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.
- Szeto, K. K., Motchalova, T., et Vivier, P. (2008). *On the Preparation of a 1-km Resolution Gridded Soil Texture Dataset—A CRB Internal Report*. Environnement Canada, 11 p.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., et Meehl, G. A. (2012). "An overview of CMIP5 and the experiment design". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), p. 485-498.

- Tebaldi, C., et Knutti, R. (2007). "The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1857), p. 2053-2075.
- Tolson, B. A., et Shoemaker, C. A. (2007). "Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration". *Water Resources Research*, 43(1).
- Turcotte, R., Fortin, L.-G., Fortin, V., Fortin, J.-P., et Villeneuve, J.-P. (2007). "Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada". *Hydrology Research*, 38(3), p. 211-234.
- USGS. (s. d.). *National Elevation Dataset*. (Consulté le 23 février 2023)
<https://apps.nationalmap.gov/viewer/>.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., et Lamarque, J.-F. (2011). "The representative concentration pathways : An overview". *Climatic Change*, 109, p. 5-31.
- Zhao, C., et Brissette, F. (2022). "Impacts of large-scale oscillations on climate variability over North America". *Climatic Change*, 173(1), p. 4. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03383-2>.

Annexe A – Stations hydrométriques

Le **Tableau 12** présente les 307 stations hydrométriques utilisées pour l'Atlas hydroclimatique : 70 pour la calibration (section 2.5.2), 151 pour la validation (2.5.4), 120 pour l'analyse de tendance (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et 279 pour le Portrait (3.4**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

La colonne « Historique » est le nombre d'années comportant au moins une donnée à la station, entre 1960 et 2022, inclusivement.

La colonne « Validation » indique les stations utilisées pour valider la calibration (2.5.4); voir Annexe E – Validation du modèle hydrologique.

La colonne « Concaténée à » informe sur la station avec laquelle les données ont été combinées, après application d'un ratio de superficie. Ce sont des stations fermées qui étaient situées très proche d'une nouvelle station et pour lesquelles il n'y a pas de rupture dans les données une fois combinées.

Pour le Portrait, les stations 011508, 023403, 041903, 073503 et 080101 influencent le débit à l'aval seulement. La liste des 279 stations du Portrait peut être téléchargée au format CSV avec les métadonnées depuis l'[outil Web](#).

Tableau 12. Caractéristiques et utilisations des 285 stations hydrométriques utilisées pour l'Atlas hydroclimatique

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
010101	GASP01982	534	48,48	-64,53	26		X	X	
010801	GASP01641	2 130	48,10	-65,46	19			X	010802
010802	GASP01646	1 906	48,19	-65,56	40	X	X	X	
010901	GASP01528	1 410	48,19	-65,81	21			X	010902
010902	GASP01534	1 340	48,23	-65,73	38		X	X	
010903	GASP01534	1 340	48,23	-65,73	4			X	010902
011001	GASP00726	1 480	48,67	-66,19	14		X	X	
011002	GASP00714	2 400	48,32	-65,97	5			X	
011003	GASP00723	1 690	48,63	-66,17	45		X	X	
011201	GASP01440	1 140	48,16	-66,35	38			X	011204
011204	GASP01440	1 139	48,16	-66,35	21	X	X	X	
011507	GASP00941	2 760	48,09	-67,10	32			X	011509
011508	GASP00990	555	48,49	-67,45	41	X	X		
011509	GASP00941	2 753	48,11	-67,13	26	X	X	X	
020301	GASP02049	1 090	48,77	-64,52	10			X	
020401	GASP02165	1 010	48,83	-64,63	22		X	X	
020404	GASP02179	647	48,81	-64,92	43	X	X	X	
020502	GASP00038	59,8	48,98	-64,43	21		X	X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
020601	GASP02292	748	48,93	-64,64	10			X	
020602	GASP02294	626	48,98	-64,70	53		X	X	
020701	GASP02406	128	49,19	-65,15	7			X	
020802	GASP02420	1 200	49,20	-65,29	37		X	X	
021403	GASP02724	208	48,95	-66,13	4			X	
021405	GASP02667	786	49,07	-66,49	8			X	
021407	GASP02669	772	49,04	-66,48	50		X	X	
021502	GASP02747	721	49,06	-66,67	31		X	X	
021601	GASP02850	1 655	48,77	-67,54	63		X	X	
021702	GASP03025	223	48,77	-67,67	56		X	X	
021915	GASP03127	494	48,52	-68,16	25		X	X	
021916	GASP03139	98,6	48,42	-68,36	23	X	X	X	
022003	GASP03334	1 615	48,41	-68,56	61	X	X	X	
022301	GASP03654	930	48,09	-69,20	63	X	X	X	
022507	GASP03811	515	47,61	-69,64	45	X	X	X	
022513	GASP03802	1 042	47,82	-69,52	62			X	
022601	SLSO02878	213	47,53	-69,85	15	X	X	X	
022703	SLSO02794	783	47,36	-69,94	12			X	022704
022704	SLSO02792	796	47,38	-69,95	41	X	X	X	
023002	SLSO02552	61	46,71	-70,96	30	X	X	X	
023004	SLSO02542	191	46,82	-70,90	27		X	X	
023005	SLSO02550	30,6	46,70	-71,00	10			X	
023006	SLSO02553	21,4	46,69	-70,93	8			X	
023007	SLSO02544	19,9	46,79	-70,91	10			X	
023101	SLSO02598	826	46,83	-70,76	7			X	
023106	SLSO02599	821	46,82	-70,76	57	X	X	X	
023301	SLSO02389	1 130	46,64	-71,04	20			X	023303
023303	SLSO02388	1 152	46,69	-71,07	43	X	X	X	
023401	SLSO00585	708	46,66	-71,29	63		X	X	
023402	SLSO00025	5 820	46,59	-71,21	63	X	X	X	
023403	SLSO00306	1 170	45,69	-70,79	24		X		
023421	SLSO00105	663	46,20	-70,89	9			X	
023422	SLSO00160	696	46,17	-70,64	59	X	X	X	
023426	SLSO00141	4 090	46,20	-70,74	17		X	X	
023428	SLSO00460	806	46,06	-70,53	9			X	
023429	SLSO00246	3 085	46,10	-70,65	48			X	
023432	SLSO00633	154	46,54	-71,34	45	X	X	X	
023433	SLSO00498	380	45,95	-70,46	14			X	
023436	SLSO00222	152	46,22	-70,52	7			X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
023437	SLSO00395	141	45,41	-70,87	7			X	
023438	SLSO00055	40,1	46,38	-70,96	7			X	
023440	SLSO00280	114	45,70	-70,67	15			X	
023443	SLSO00635	47,4	46,51	-71,22	8			X	023445
023444	SLSO00064	23,68	46,40	-70,88	5			X	
023445	SLSO00635	46,3	46,51	-71,21	8			X	
023501	SLSO00666	66,7	46,65	-71,59	7			X	
023701	SLSO00710	356	46,50	-72,11	36			X	023702
023702	SLSO00708	385	46,54	-72,09	16	X	X	X	
023902	SLSO00740	304	46,38	-72,33	7			X	
024001	SLSO00813	1 410	46,37	-71,62	9			X	
024003	SLSO00829	914	46,31	-71,45	57	X	X	X	
024004	SLSO00887	100,87	46,22	-71,78	9			X	
024007	SLSO00786	2330	46,19	-72,28	32		X	X	
024010	SLSO00880	25,7	46,18	-71,46	19		X	X	
024012	SLSO00820	216	46,30	-71,37	7			X	
024013	SLSO00850	227	46,05	-71,45	32		X	X	
024014	SLSO00796	2 163	46,20	-72,10	24	X	X	X	
024015	SLSO00889	48,1	46,18	-71,75	17	X	X	X	
024016	SLSO00828	74,2	46,22	-71,38	12			X	
02E901	GASP03897	69,2	47,70	-69,66	7			X	
030101	SLSO01106	562	45,79	-71,97	63	X	X	X	
030103	SLSO00958	1 550	46,06	-72,31	57	X	X	X	
030106	SLSO00969	344	46,07	-71,98	48			X	
030107	SLSO01185	150	46,02	-72,48	8			X	
030108	SLSO01181	65,3	45,96	-72,23	7			X	
030109	SLSO01149	66,3	45,75	-72,00	7			X	
030110	SLSO00970	249	46,14	-71,81	14			X	
030215	SLSO02154	514	45,28	-71,90	63	X	X	X	
030219	SLSO01636	839	45,62	-71,39	18		X	X	
030234	SLSO01945	646	45,47	-71,66	63	X	X	X	
030238	SLSO01974	87,2	45,33	-71,53	14		X	X	
030239	SLSO02020	267	45,38	-71,53	11			X	
030242	SLSO01972	192,67	45,34	-71,57	17		X	X	
030246	SLSO02247	217	45,32	-71,77	20		X	X	
030253	SLSO01955	21,9	45,40	-71,60	5			X	
030260	SLSO02104	214	45,11	-72,08	15			X	
030262	SLSO01214	262	45,88	-72,51	33			X	030299
030263	SLSO02305	130	45,47	-71,97	6			X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
030273	SLSO01325	75,4	45,54	-71,80	7			X	
030274	SLSO01771	99,5	45,73	-71,45	9			X	
030275	SLSO01853	206	45,88	-71,02	7			X	
030282	SLSO01659	769	45,58	-71,39	49	X	X	X	
030291	SLSO01214	244	45,86	-72,52	12			X	030299
030299	SLSO01214	273	45,90	-72,51	9			X	
030304	MONT00051	1 505	45,50	-72,91	58		X	X	
030305	MONT00475	87	45,68	-72,91	13			X	
030314	MONT00413	214	45,21	-72,75	55			X	
030315	MONT00087	721	45,64	-72,65	4			X	
030316	MONT00026	323	45,95	-72,86	54		X	X	
030318	MONT00102	271	45,51	-72,37	9			X	
030322	MONT00470	96,2	45,38	-73,03	10			X	
030327	MONT00498	53,3	46,02	-72,93	8			X	
030328	MONT00480	149	45,77	-72,99	7			X	
030329	MONT00178	33,6	45,53	-72,62	15			X	
030333	MONT00092	63,4	45,59	-72,51	9			X	
030335	MONT00248	59,3	45,38	-72,50	20		X	X	
030337	MONT00395	408	45,27	-72,92	11			X	
030340	MONT00230	235	45,36	-72,78	40			X	0303A0
030341	MONT00048	3 310	45,62	-72,95	12			X	030345
030343	MONT00252	31,2	45,35	-72,52	38		X	X	
030344	MONT00042	159	45,79	-72,86	9			X	
030345	MONT00048	3 334	45,63	-72,94	29	X	X	X	
030346	MONT00088	585	45,63	-72,58	8			X	
030348	MONT00174	102	45,59	-72,64	23			X	
030353	MONT00314	230,9	45,30	-72,59	9			X	
0303A0	MONT00227	271	45,32	-72,81	8			X	
030401	MONT00577	22 000	45,40	-73,26	63			X	
030415	MONT01271	308	45,49	-73,19	50	X	X	X	
030420	MONT00932	395	45,12	-73,00	34		X	X	
030421	MONT00543	367	45,39	-73,37	44	X	X	X	
030422	MONT00974	8,7	45,11	-73,07	11			X	
030423	MONT00926	94,1	45,20	-73,03	24	X	X	X	
030424	MONT00924	584	45,16	-73,05	22	X	X	X	
030425	MONT00902	72,6	45,02	-73,02	22	X	X	X	
030429	MONT01277	35,1	45,52	-73,12	15		X	X	
030903	MONT01466	678	45,18	-73,85	7			X	030907
030905	MONT01337	2 492	45,33	-73,76	53	X	X	X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
030907	MONT01470	642	45,16	-73,82	50	X	X	X	
030908	MONT01363	404	45,05	-74,23	10			X	
030915	MONT01472	227	45,15	-73,71	10			X	
030917	MONT01443	134	45,08	-74,04	8			X	
030919	MONT01361	1 051	45,09	-74,17	19		X		
030920	MONT01537	46,5	45,08	-73,85	18	X	X	X	
030921	MONT01496	246	45,10	-73,76	18		X	X	
030923	MONT01478	38,5	45,07	-73,63	7			X	
030924	MONT01486	32,9	45,11	-73,66	6			X	
031501	SLSO00933	21,9	46,26	-72,52	7			X	
040110	OUTV03263	1 163	45,80	-74,01	63			X	
040122	OUTV03291	311	46,05	-74,25	52			X	
040123	OUTV03359	141	45,56	-74,32	7			X	
040127	OUTV03269	167	45,91	-74,15	12			X	
040128	OUTV03356	54,1	45,80	-74,18	13			X	
040129	OUTV03331	106	46,10	-74,12	46		X	X	
040204	OUTV00034	5 479	45,74	-74,69	59	X	X	X	
040212	OUTV00306	40	46,37	-74,50	55	X	X	X	
040238	OUTV00234	1 160	46,11	-74,60	14			X	
040401	OUTV00461	1 300	45,83	-75,07	9			X	
040402	OUTV00457	1 990	45,67	-75,04	13		X	X	
040406	OUTV00460	1 331	45,79	-75,09	55			X	
040409	OUTV00561	62,6	45,88	-75,02	47		X	X	
040624	OUTV00742	4 560	46,79	-75,31	44			X	
040810	OUTV02023	1 780	46,47	-76,04	36			X	040841
040830	OUTV01390	6 768	47,08	-75,75	48		X	X	
040840	OUTV02212	1 277	46,08	-76,07	19	X	X	X	
040841	OUTV02027	1 646	46,59	-76,04	18	X	X	X	
041301	OUTV02655	5 150	45,87	-76,68	37		X	X	
041902	OUTM00046	3 756	46,35	-77,82	58	X	X	X	
041903	OUTM00096	2 110	46,82	-77,87	31		X		
042102	OUTM00284	619	46,30	-78,32	5			X	
042103	OUTM00287	575	46,33	-78,35	34		X	X	
043008	OUTM00780	984	48,41	-78,36	13		X	X	
043009	OUTM00753	1 680	48,46	-78,36	7			X	
043012	OUTM00709	2 594	48,37	-78,85	58		X	X	
043030	OUTM01108	1 090	47,73	-76,71	17	X		X	
046709	OUTV03406	196	45,56	-73,98	13		X	X	
050116	SLNO02636	2 670	47,66	-72,96	25			X	050144

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
050117	SLNO01445	1 850	47,58	-72,74	9			X	
050118	SLNO00951	997	46,90	-72,73	13		X	X	
050119	SLNO01060	1 387	46,68	-73,91	63	X	X	X	
050135	SLNO01454	1 563	47,77	-72,74	54		X	X	
050143	SLNO01076	1 080	46,67	-73,98	4			X	
050144	SLNO02638	2 662	47,68	-73,04	41	X	X	X	
050304	SLNO02931	4 504	46,59	-72,40	56	X	X	X	
050305	SLNO02944	2 870	47,04	-72,28	17		X	X	
050402	SLNO03300	751	46,91	-71,83	8			X	
050403	SLNO03248	764	46,92	-71,86	6			X	
050408	SLNO03245	1 546	46,85	-71,87	58	X	X	X	
050409	SLNO03249	646	46,98	-71,85	58	X	X	X	
050426	SLNO03276	218	47,20	-71,78	5			X	
050701	SLNO03347	355	46,71	-71,87	39			X	050702
050702	SLNO03348	328	46,73	-71,84	21	X	X	X	
050801	SLNO00372	1 997	46,89	-71,53	59		X	X	
050811	SLNO00462	72,3	46,71	-71,67	10			X	
050812	SLNO00460	97,8	46,70	-71,69	36		X	X	
050906	SLNO00033	62,8	46,91	-71,34	9			X	
050907	SLNO00008	52,7	46,82	-71,29	11			X	
050914	SLNO00040	58,5	46,80	-71,36	4			X	
050915	SLNO00019	58,4	46,87	-71,43	17	X	X	X	
050916	SLNO00029	75,5	47,00	-71,36	16	X	X	X	
051001	SLNO00295	1 107	46,90	-71,15	59	X	X	X	
051005	SLNO00321	267	47,26	-71,14	44	X	X	X	
051006	SLNO00330	58,8	47,33	-71,10	17		X	X	
051301	SLNO00196	865	47,45	-70,51	30		X	X	
051502	SLNO00094	1 707	47,69	-70,22	56		X	X	
052201	SLNO00642	549	46,27	-73,77	13		X	X	
052202	SLNO00586	1 340	46,01	-73,43	6			X	052211
052203	SLNO00717	1 260	46,04	-73,72	6			X	
052211	SLNO00586	1 340	46,01	-73,43	5			X	
052212	SLNO00717	1 263	46,03	-73,71	57			X	
052219	SLNO00586	1 286,3	46,01	-73,43	53			X	
052228	SLNO00616	188	46,34	-73,65	48		X	X	
052229	SLNO00569	208	45,87	-73,48	19		X	X	
052230	SLNO00692	319	45,99	-73,50	12			X	
052231	SLNO00815	76,7	45,89	-73,87	36		X	X	
052233	SLNO00791	632,4	45,85	-73,49	44	X	X	X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
052236	SLNO00564	70,3	45,85	-73,41	6			X	
052401	SLNO00830	194	46,16	-73,39	14			X	
052601	SLNO00501	1 017	46,30	-73,10	57	X	X	X	
052606	SLNO00514	205	46,44	-73,46	28		X	X	
052801	SLNO00852	1 380	46,42	-72,96	6			X	
052803	SLNO00865	53,2	46,51	-73,21	28		X	X	
052805	SLNO00872	769	46,60	-73,19	58	X	X	X	
052810	SLNO00851	1 419	46,30	-72,91	7			X	
053901	SLNO00344	70,7	46,76	-71,36	6			X	
054001	SLNO00341	23,9	46,86	-71,21	17		X	X	
060101	SAGU00015	712	48,19	-70,05	27		X	X	
060102	SAGU00034	433	48,09	-70,03	25	X	X	X	
060202	SAGU00072	651	48,21	-70,28	13		X	X	
060601	SAGU00151	564	48,28	-70,87	25		X	X	
060704	SAGU00184	446	48,21	-71,00	15	X	X	X	
060901	SAGU00279	358	48,39	-71,04	15		X	X	
061019	SAGU00324	1 110	48,18	-71,64	5			X	
061020	SAGU00324	1 115	48,18	-71,64	52	X	X	X	
061022	SAGU00390	490	47,94	-71,38	54		X	X	
061024	SAGU00297	350	48,24	-71,29	26	X	X	X	
061028	SAGU00311	2 639	48,31	-71,44	18	X	X	X	
061307	SAGU00621	306	48,41	-71,70	27		X	X	
061502	SAGU00641	2 212	48,38	-72,00	54		X	X	
061801	SAGU01949	1 020	48,81	-72,05	49		X	X	
061901	SAGU00822	15 515	48,69	-72,49	63	X	X	X	
061905	SAGU00838	11 100	49,28	-73,36	50		X	X	
061906	SAGU00973	4 330	49,26	-73,71	32		X	X	
061909	SAGU01090	591	48,68	-72,51	41	X	X	X	
062001	SAGU01102	295	48,86	-72,49	6			X	
062002	SAGU01101	26,8	48,80	-72,49	14			X	
062101	SAGU01125	8 680,6	48,90	-72,21	45			X	062114
062102	SAGU01329	9 631	48,89	-72,27	63	X	X	X	
062103	SAGU01332	4 580	49,17	-72,57	7			X	
062104	SAGU01407	3420	49,00	-72,50	11			X	
062114	SAGU01125	8 643,9	48,94	-72,17	20		X	X	
062210	SAGU01739	2 220	49,61	-71,30	6			X	
062701	SAGU00201	768	48,49	-70,97	49	X	X	X	
062802	SAGU02134	1 100	48,27	-69,91	23			X	062803
062803	SAGU02134	1 097	48,27	-69,91	25	X	X	X	

Station	Tronçon	Superficie (km ²)	Latitude	Longitude	Historique	Calibration	Validation	Portrait	Concaténée à
064101	SAGU00818	177	48,58	-72,38	12			X	
070202	CNDA00019	40,7	48,41	-69,52	11			X	
070204	CNDA00018	768	48,37	-69,47	31	X	X	X	
070401	CNDA00036	3 085	48,65	-69,18	22		X	X	
071401	CNDB00855	1 577	49,33	-67,65	49		X	X	
071801	CNDB01112	219,5	49,82	-67,16	9			X	
072301	CNDC00469	19 012	50,35	-66,19	58	X	X	X	
072302	CNDC00566	3 390	52,19	-66,89	18		X	X	
072503	CNDC00795	679	50,29	-65,96	12			X	
073301	CNDC00003	684	50,28	-64,78	27			X	073303
073303	CNDC00003	676	50,31	-64,75	10			X	
073502	CNDC00033	7 590	50,38	-64,43	15		X	X	
073503	CNDC00037	7 201	50,69	-64,58	45		X		
073801	CNDD00900	12 922	50,31	-63,62	55		X	X	
074701	CNDD01367	5 590	50,25	-62,12	21		X	X	
074702	CNDD01505	151	50,24	-62,14	11			X	
074901	CNDD00486	16 000	50,19	-61,59	10			X	
074902	CNDD00502	11 600	51,14	-61,61	18		X	X	
074903	CNDD00491	15 693	50,43	-61,71	43	X	X	X	
075601	CNDD00015	2 950	50,38	-59,99	20		X	X	
075701	CNDE00482	19 100	50,70	-59,60	16			X	075705
075702	CNDE00511	12 100	51,84	-60,12	15		X	X	
075705	CNDE00485	19 191	50,68	-59,60	28	X	X	X	
076201	CNDE01024	1 060	51,50	-58,40	14		X	X	
076601	CNDE00147	5 504	51,77	-57,60	56		X	X	
076801	CNDE00093	206	51,51	-57,25	12			X	
080101	ABIT01483	3 724	48,60	-78,11	63	X	X		
080104	ABIT00822	11 200	49,99	-79,10	37		X	X	
080106	ABIT01542	365	48,09	-77,67	14		X	X	
080705	ABIT00192	8 310	48,34	-77,08	6			X	
080706	ABIT00590	1 990	48,32	-77,30	9			X	
080707	ABIT00018	22 275	49,75	-77,62	61	X	X	X	
089907	LABI00175	222	48,74	-78,86	13			X	

Annexe B – Simulations climatiques

Tableau 13. Simulations climatiques régionales (CORDEX-NA et ClimEx)

Centre de modélisation	Modèle régional ¹⁰	Pilote	Nombre de membres		Résolution de la grille atmosphérique (degrés)
			RCP4.5	RCP8.5	
Université du Québec à Montréal (UQAM)	CRCM5	CanESM2	1	1	0,44
		MPI-ESM-LR	1		0,44
		MPI-ESM-MR	X ¹¹	1	0,44
Ouranos	CRCM5	CanESM2	-	50 ¹²	0,11
		MPI-ESM-LR	1	5	0,22
		MPI-ESM-LR	1	1	0,22
		CNRM-CM5	1	1	0,22
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA4	GFDL-ESM2M	1	1	0,22
		CanESM2	1	1	0,44
Iowa State University (ISU) National Center for Atmospheric Research (NCAR)	RegCM4 ¹³	EC-EARTH	1	1	0,44
		MPI-ESM-LR	-	1	0,22
		MPI-ESM-LR	-	1	0,44
		GFDL-ESM2M	-	1	0,22
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanRCM4	CanESM2	1	1	0,22
		CanESM2	1	1	0,44
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	EC-EARTH	1	1	0,44
Total			11	19 + 50	

¹⁰ Toutes les simulations disponibles du modèle régional WRF ont été retirées. En raison d'erreurs lors de l'enregistrement des sorties du modèle, les variables tasmin et tasmax comportent plusieurs jours où toutes les tuiles sont égales à 0°kelvin.

¹¹ Errata : Une simulation MPI-ESM-MR_CRCM5-UQAM_RCP4.5 avait originellement été fournie à la DEH, mais il s'est avéré qu'il s'agissait d'une erreur d'archivage (doublon de la simulation pilotée par MPI-ESM-LR); celle-ci a été détectée par l'UQAM en 2018 et retirée de CORDEX.

¹² Les 50 simulations CanESM2_CRCM5 à 0,11° font partie de l'ensemble ClimEx.

¹³ La simulation du modèle RegCM4 piloté par HadGEM2-ES n'a pas été retenue. La raison du retrait est l'utilisation d'un calendrier de 360 jours (12 x 30 jours) qui n'est pas compatible avec Hydrotel.

Tableau 14. Simulations climatiques globales (CMIP5)

Centre de modélisation	Modèle	Nombre de membres		Résolution de la grille atmosphérique (degrés)	
		RCP4.5	RCP8.5	Latitude	Longitude
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation / Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	ACCESS1.0	1	1	1,25	1,875
	ACCESS1.3	1	1	1,25	1,875
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1.1	1	1	2,7906	2,8125
	BCC-CSM1.1(m)	1	1	1,1215	1,125
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	1	1	2,7906	2,8125
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	5	5	2,7906	2,8125
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CESM	-	1	3,4431	3,75
	CMCC-CM	1	1	0,7484	0,75
	CMCC-CMS	1	1	1,8653	1,875
Centre national de recherches météorologiques / Centre européen de recherche et de formation avancées en calcul scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	1	1	1,4008	1,40625
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3.6.0	10	10	1,8653	1,875
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Tsinghua University (LASG-CESS)	FGOALS-g2	1	1	2,7906	2,8125
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	GFDL-CM3	3	1	2	2,5
	GFDL-ESM2G	1	1	2,0225	2
	GFDL-ESM2M	1	1	2,0225	2
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS)	GISS-E2-H	1	-	2	2,5
	GISS-E2-R	2	-	2	2,5
Institute for Numerical Mathematics (INM)	INM-CM4	1	1	1,5	2
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-LR	4	4	1,8947	3,75
	IPSL-CM5A-MR	1	1	1,2676	2,5
	IPSL-CM5B-LR	1	1	1,8947	3,75
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) / National Institute for Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC-ESM	1	1	2,7906	2,8125
	MIROC-ESM-CHEM	1	1	2,7906	2,8125
	MIROC5	3	3	1,4008	1,40625
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	3	3	1,8653	1,875
	MPI-ESM-MR	3	1	1,8653	1,875
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-CGCM3	1	1	1,12148	1,125
	MRI-ESM1	-	1	1,12148	1,125
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	1	1	1,8947	2,5

	Total	52	47	
--	-------	----	----	--

Annexe C – Pondération des scénarios hydroclimatiques

La pondération des scénarios hydroclimatiques telle que proposée par Ouranos est donnée dans le **Tableau 15**. Les lignes regroupent les simulations d'un même centre de modélisation et, à l'intérieur d'un centre de modélisation donné, l'alternance de couleurs blanche et grise représente les différents sous-groupes formés par les schémas de pondération. Référence : Rondeau-Genesse et collab. (2021).

Tableau 15. Pondération des scénarios hydroclimatiques proposée par Ouranos

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.0		1,25	1,875	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.3		1,25	1,875	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	BCC	BCC-CSM1.1		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	BCC	BCC-CSM1.1(m)		1,1215	1,125	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	GCESS	BNU-ESM		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r2i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r3i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r4i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r5i1p1		0,2
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0,22	0,22	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0,44	0,44	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	CCCma	CanESM2	RCA4	0,44	0,44	RCP4.5	r1i1p1		1
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-UQAM	0,44	0,44	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	CMCC	CMCC-CM		0,7484	0,75	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	CMCC	CMCC-CMS		1,8653	1,875	RCP4.5	r1i1p1		0,5

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5		1,4008	1,40625	RCP4.5	r1i1p1		1
CORDEX	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r1i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r2i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r3i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r4i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r5i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r6i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r7i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r8i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r9i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP4.5	r10i1p1		0,1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	HIRHAM5	0,44	0,44	RCP4.5	r3i1p1		1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	RCA4	0,44	0,44	RCP4.5	r12i1p1		1
CMIP5	LASG-CESS	FGOALS-g2		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2,5	RCP4.5	r1i1p1		0,333
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2,5	RCP4.5	r3i1p1		0,333
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2,5	RCP4.5	r5i1p1		0,333
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2G		2,0225	2	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M		2,0225	2	RCP4.5	r1i1p1		1
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-H		2	2,5	RCP4.5	r6i1p1		1
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-R		2	2,5	RCP4.5	r6i1p1		1

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-R		2	2,5	RCP4.5	r6i1p3		1
CMIP5	INM	INM-CM4		1,5	2	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP4.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP4.5	r2i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP4.5	r3i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP4.5	r4i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-MR		1,2676	2,5	RCP4.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5B-LR		1,8947	3,75	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP4.5	r1i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP4.5	r2i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP4.5	r3i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM-CHEM		2,7906	2,8125	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP4.5	r1i1p1		0,167
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP4.5	r2i1p1		0,167
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP4.5	r3i1p1		0,167
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR		1,8653	1,875	RCP4.5	r1i1p1		0,167
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR		1,8653	1,875	RCP4.5	r2i1p1		0,167
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR		1,8653	1,875	RCP4.5	r3i1p1		0,167
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM	0,44	0,44	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP4.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	0,44	0,44	RCP4.5	r1i1p1		0
CMIP5	MRI	MRI-CGCM3		1,12148	1,125	RCP4.5	r1i1p1		1
CMIP5	NCC	NorESM1-M		1,8947	2,5	RCP4.5	r1i1p1		1

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.0		1,25	1,875	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.3		1,25	1,875	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	BCC	BCC-CSM1.1		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	BCC	BCC-CSM1.1(m)		1,1215	1,125	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	GCESS	BNU-ESM		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r2i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r3i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r4i1p1		0,2
CMIP5	CCCma	CanESM2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r5i1p1		0,2
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	CCCma	CanESM2	RCA4	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		1
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-UQAM	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		0,01786
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		0,01786
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r2i1p1		0,01786
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r3i1p1		0,01786
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r4i1p1		0,01786
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r5i1p1		0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r1i1p1	kda	0,01786

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r2i1p1	kdb	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r3i1p1	kdc	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r4i1p1	kdd	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r5i1p1	kde	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r6i1p1	kdf	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r7i1p1	kdg	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r8i1p1	kdh	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r9i1p1	kdi	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r1-r10i1p1	kdj	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r1i1p1	kdk	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r2i1p1	kdl	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r3i1p1	kdm	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r4i1p1	kdn	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r5i1p1	kdo	0,01786

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r6i1p1	kdp	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r7i1p1	kdq	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r8i1p1	kdr	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r9i1p1	kds	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r2-r10i1p1	kdt	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r1i1p1	kdu	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r2i1p1	kdv	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r3i1p1	kdw	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r4i1p1	kdx	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r5i1p1	kdy	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r6i1p1	kdz	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r7i1p1	kea	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r8i1p1	keb	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r9i1p1	kec	0,01786

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r3-r10i1p1	ked	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r1i1p1	kee	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r2i1p1	kef	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r3i1p1	keg	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r4i1p1	keh	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r5i1p1	kei	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r6i1p1	kej	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r7i1p1	kek	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r8i1p1	kel	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r9i1p1	kem	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r4-r10i1p1	ken	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r1i1p1	keo	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r2i1p1	kep	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r3i1p1	keq	0,01786

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r4i1p1	ker	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r5i1p1	kes	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r6i1p1	ket	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r7i1p1	keu	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r8i1p1	kev	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r9i1p1	kew	0,01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0,11	0,11	RCP8.5	r5-r10i1p1	kex	0,01786
CMIP5	CMCC	CMCC-CESM		3,4431	3,75	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	CMCC	CMCC-CM		0,7484	0,75	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	CMCC	CMCC-CMS		1,8653	1,875	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5		1,4008	1,40625	RCP8.5	r1i1p1		1
CORDEX	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r1i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r2i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r3i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r4i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r5i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r6i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r7i1p1		0,1

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r8i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r9i1p1		0,1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1,8653	1,875	RCP8.5	r10i1p1		0,1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	HIRHAM5	0,44	0,44	RCP8.5	r3i1p1		1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	RCA4	0,44	0,44	RCP8.5	r12i1p1		1
CMIP5	LASG-CESS	FGOALS-g2		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2,5	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2G		2,0225	2	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M		2,0225	2	RCP8.5	r1i1p1		1
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	RegCM4	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	RegCM4	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	INM	INM-CM4		1,5	2	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP8.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP8.5	r2i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP8.5	r3i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1,8947	3,75	RCP8.5	r4i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-MR		1,2676	2,5	RCP8.5	r1i1p1		0,2
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5B-LR		1,8947	3,75	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP8.5	r1i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP8.5	r2i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC5		1,4008	1,40625	RCP8.5	r3i1p1		0,333
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM-CHEM		2,7906	2,8125	RCP8.5	r1i1p1		1

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		RCP	Membre	Membre (ClimEx)	PHYS GP
				Latitude	Longitude				
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP8.5	r1i1p1		0,25
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP8.5	r2i1p1		0,25
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1,8653	1,875	RCP8.5	r3i1p1		0,25
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR		1,8653	1,875	RCP8.5	r1i1p1		0,25
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	RegCM4	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	RegCM4	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	CRCM5-Ouranos	0,22	0,22	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	0,44	0,44	RCP8.5	r1i1p1		0,5
CMIP5	MRI	MRI-CGCM3		1,12148	1,125	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	MRI	MRI-ESM1		1,12148	1,125	RCP8.5	r1i1p1		1
CMIP5	NCC	NorESM1-M		1,8947	2,5	RCP8.5	r1i1p1		1

Annexe D – Paramètres et détails des plateformes hydrologiques

Les valeurs fixées des paramètres et les valeurs des paramètres calibrés sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 16. Valeurs des paramètres d'Hydrotel

Paramètre	Sous-modèle	Valeur
Épaisseur de sol de la Couche 3	BV3C	2,65
Humidité Relative Initiale Couche 1	BV3C	0,9
Humidité Relative Initiale Couche 2	BV3C	0,9
Humidité Relative Initiale Couche 3	BV3C	0,9
Coefficient d'Extinction	BV3C	0,6
Coefficient Multiplicatif de l'Assèchement	BV3C	1
Variation Maximale de l'Humidité Relative	BV3C	0,03
Taux de Fonte	Degré Jour Modifié	0,5
Densité Maximale	Degré Jour Modifié	550
Constante de Tassement	Degré Jour Modifié	0,1
Seuil Albédo	Degré Jour Modifié	1
Gradient Température	Thiessen	0
Gradient Précipitation	Thiessen	0
Lame de ruissellement	Onde Cinématique	0,0025*
Coefficient Manning Forêts	Onde Cinématique	0,3
Coefficient Manning Eaux	Onde Cinématique	0,03
Coefficient Manning Autres	Onde Cinématique	0,1
Coefficient d'Optimisation Rugosité	Onde Cinématique Modifiée	1
Coefficient d'Optimisation Largeur de Rivières	Onde Cinématique Modifiée	1

*À l'exception des diverses formulations pour le calage global.

Tableau 17. Bornes des 11 paramètres calibrés d'Hydrotel

Paramètre	Min.	Max.
BV3C_C1 / BV3C_C2	0,50	1,50
BV3C_C1 + BV3C_C2	0,15	1,00
LOG ₁₀ (2,65 * BV3C_CR)	-7,00	-3,00
DJM_SFF	-5,00	5,00
DJM_SFF - DJM_SFO	0,00	5,00
DJM_SFC - DJM_SFF		
DJM_TFF	3,00	20,00
DJM_TFF / DJM_TFO	0,50	1,00
DJM_TFC / DJM_TFF		
ETP	0,25	1,00
THI	-5,00	5,00

Tableau 18. Valeurs des paramètres calibrés d'Hydrotel

	LN24HA		MG24HA		MG24HI		MG24HK		MG24HQ		MG24HS	
	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud
Formule ETP	Linacre		McGuinness		McGuinness		McGuinness		McGuinness		McGuinness	
Lame de ruissellement (HGM)	0,025		0,0025		0,006		0,006		Varie spatialement entre 0,005 et 0,01 selon la superficie drainée des UHRH			
cm_etp	0,398919		0,4989		0,9	0,8	0,6	0,5	0,55		0,85	
Épaisseur de sol de la couche 1 (z1)	0,216	0,219	0,216	0,219	0,1		0,1		0,1		0,15	
Épaisseur de sol de la couche 2 (z2)	0,432	0,157	0,432	0,157	0,7	0,5	0,65	0,55	0,7	0,5	0,35	0,35

	LN24HA		MG24HA		MG24HI	MG24HK	MG24HQ	MG24HS	
Épaisseur de sol de la couche 3 (z3)	2,65		2,65		1	1	1	0,5	
log récession	$4 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-5}	
Seuil fonte	0,4034	1,9156	0,4034	1,9156	-1,5	-1,75	-1,5	-1	
Delta seuil fonte	-2,9484	-0,3485	-2,9484	-0,3485	1,25	2	1,5	1,5	
Taux fonte air (conifères)	7,20	4,52	7,20	4,52	3,53	4	4,5	4	
Taux fonte air (feuillus)	8,52	9,05	8,52	9,05				4,5	
Taux fonte air (découvert)	10,10	18,09	10,10	18,09				5	
Taux fonte sol	0,5		0,5		0,546	0,546	0,546	0,546	
Densité maximale	550		550		420	420	420	420	
Const. tassement	0,1		0,1		0,0054	0,0054	0,0054	0,0054	
Température passage pluie neige	-2,2168	-3,0672	-2,2168	-3,0672	-0,34	0	0.5	0	
Profondeur racinaire	Couche 3		Couche 3		Couche 2	Couche 2	Couche 2	Couche 2	
ThetaMax (couche 1)	Carte des sols de Szeto reclassifiée et propriétés de Rawls et Brakensiek		Carte des sols de Szeto reclassifiée et propriétés de Rawls et Brakensiek		0,42	0,42	0,42	0,43	
ThetaCC (couche 1)					0,42	0,40	0,35	0,40	
PF (couche 1)					0,27	0,25	0,20	0,15	
Ksat (couche 1)					$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	
ThetaMax (couche 2)					0,43	0,43	0,43	0,43	
ThetaCC (couche 2)					0,42	0,40	0,35	0,40	
PF (couche 2)					0,27	0,25	0,20	0,15	
Ksat (couche 2)					$13 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
ThetaMax (couche 3)					0,385		0,385		0,385

	LN24HA	MG24HA	MG24HI	MG24HK	MG24HQ	MG24HS
ThetaCC (couche 3)			0.42	0.42	0.35	0.40
PF (couche 3)			0.27	0.27	0.20	0.15
Ksat (couche 3)			$0.6 * 10^{-3}$	$0.6 * 10^{-3}$	$0.6 * 10^{-3}$	$0.6 * 10^{-3}$

Milieux humides	Non actif	Non actif	ABIT et LABI	ABIT et LABI	ABIT et LABI	Non actif
Pourcentage MH			$0.4 * \text{Classe}_8 + \text{Classe}_9$	$0.4 * \text{Classe}_8 + \text{Classe}_9$	$0.4 * \text{Classe}_8 + \text{Classe}_9$	
WETDMAX			0.5	0.5	0.5	
WETDNOR			0.2	0.2	0.2	
C_EV			0	0	0	
KSAT_BS			0.45	0.45	0.45	

Modifications des tronçons / schéma routage	Aucune	Aucune	Aucune	Transformation des tronçons de tête en lacs de superficie égale au % d'occupation du sol de type eau x superficie UHRH	Aucune	Transformation de certains tronçons de tête en lacs lorsque plus de 5 % du BV amont est milieux humides ou eau Transformation de certains tronçons de rivières de moins de 150 km ² de BV en lacs lorsque les milieux humides
---	--------	--------	--------	--	--------	---

	LN24HA	MG24HA	MG24HI	MG24HK	MG24HQ	MG24HS
						riverains font plus de 0,1 km ²
Modification occupation sol	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Modification des proportions d'occupation du sol par UHRH pour avoir un minimum de 15 % de surface imperméable et un maximum de 45 %
Modification HGM	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Modification du HGM en fonction de la proportion de lacs et milieux humides
Ratio ETR / ETP	1	1	0,5955	0,8544	0,9509	0,6853

Annexe E – Validation du modèle hydrologique

Cette annexe présente des résultats complémentaires pour la validation des six plateformes du modèle hydrologique (section 2.5.4), avec les trois composantes du KGE. Les cartes indiquant les coefficients de corrélation (R^2) pour chaque station et par plateforme sont d'abord présentées : pour les débits annuels moyens (**Figure 23**), pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels (**Figure 24**) et pour les débits annuels maximaux (**Figure 25**). Puis les cartes de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE pour *root-mean-square error*) sont présentées pour les débits annuels moyens (**Figure 26**), pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et pour les débits annuels maximaux (**Figure 28**). Enfin, les cartes des biais complètent le portrait, encore une fois pour les trois régimes : débits annuels moyens (**Figure 29**), débits moyens sur 7 jours minimaux annuels (**Figure 30**) et débits annuels maximaux (**Figure 31**). Cela permet d'avoir une appréciation des plateformes à représenter les débits moyens (utilisés pour les indicateurs d'hydraulicité), les faibles débits (utilisés pour les indicateurs d'étiage) et les forts débits (utilisés pour les indicateurs de crue).

Le **Tableau 19** donne les performances (KGE) des 6 plateformes en validation sur la période allant du 1^{er} janvier 1962 au 31 décembre 2020, pour les 151 stations hydrométriques non influencées ayant au moins 10 ans de données. Les stations marquées d'un astérisque (*) font partie des 70 stations utilisées pour la calibration globale.

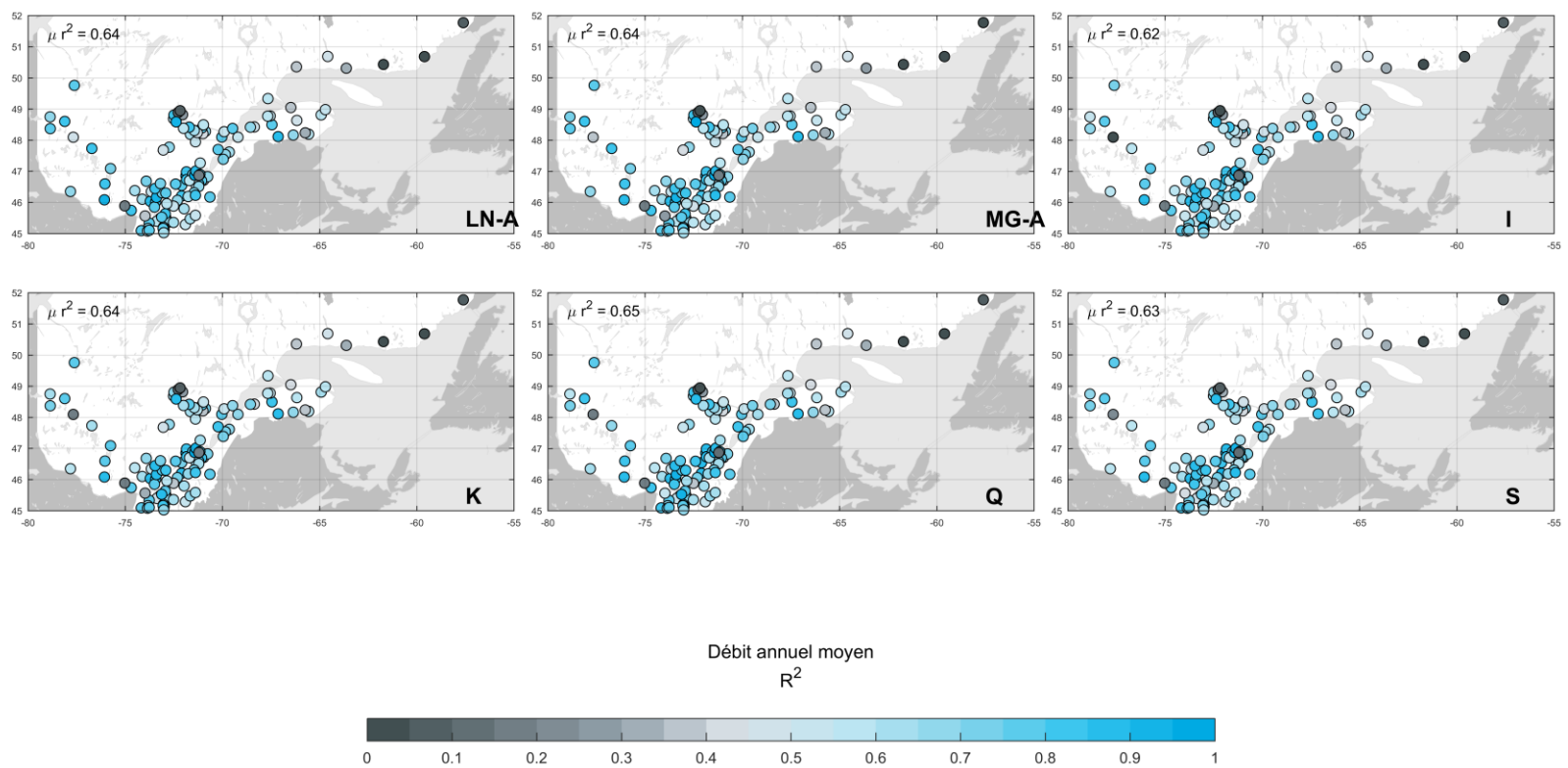


Figure 23. Coefficient de détermination (R^2) pour les débits annuels moyens des 6 plateformes

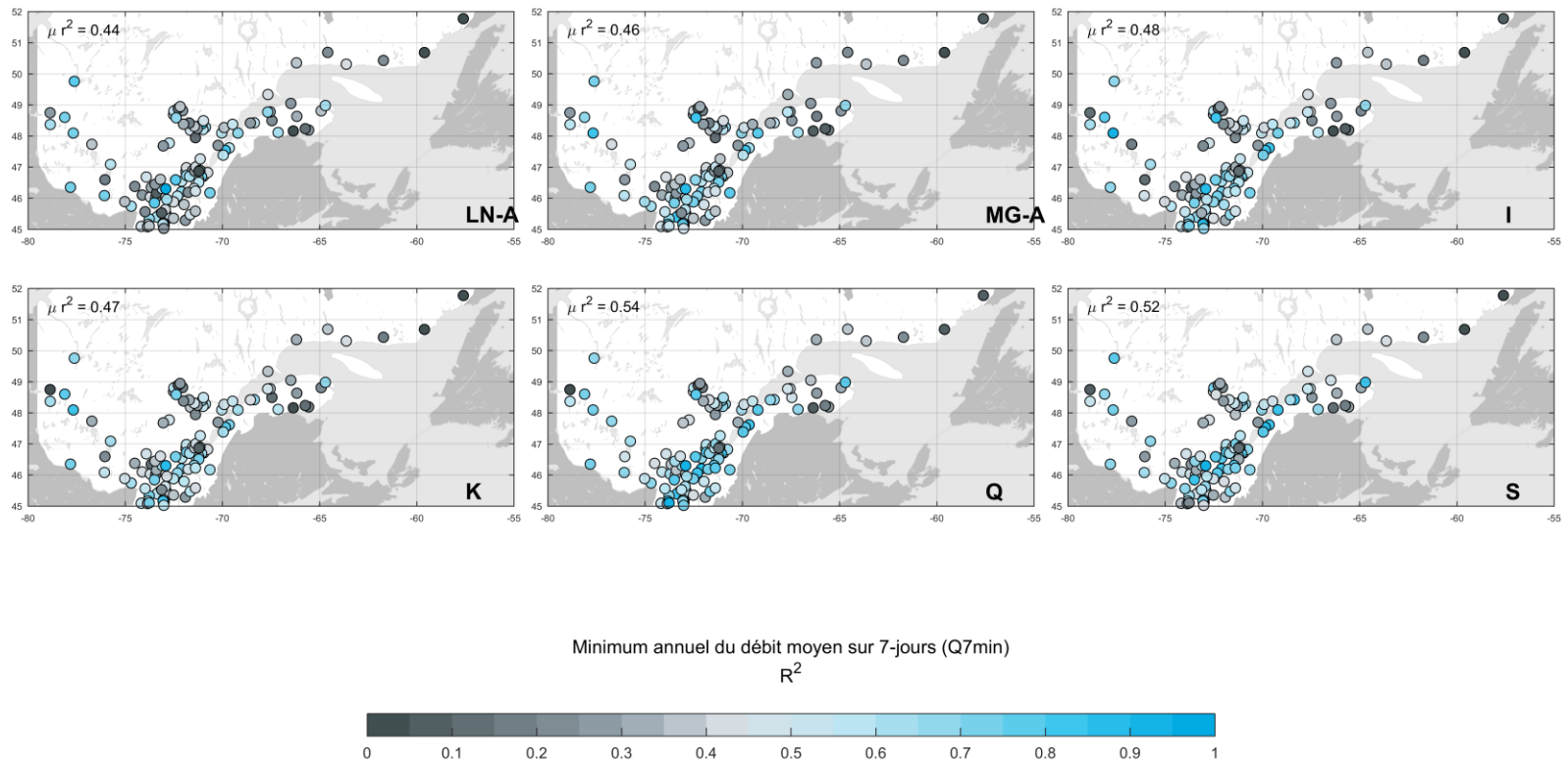


Figure 24. Coefficient de détermination (R^2) pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes

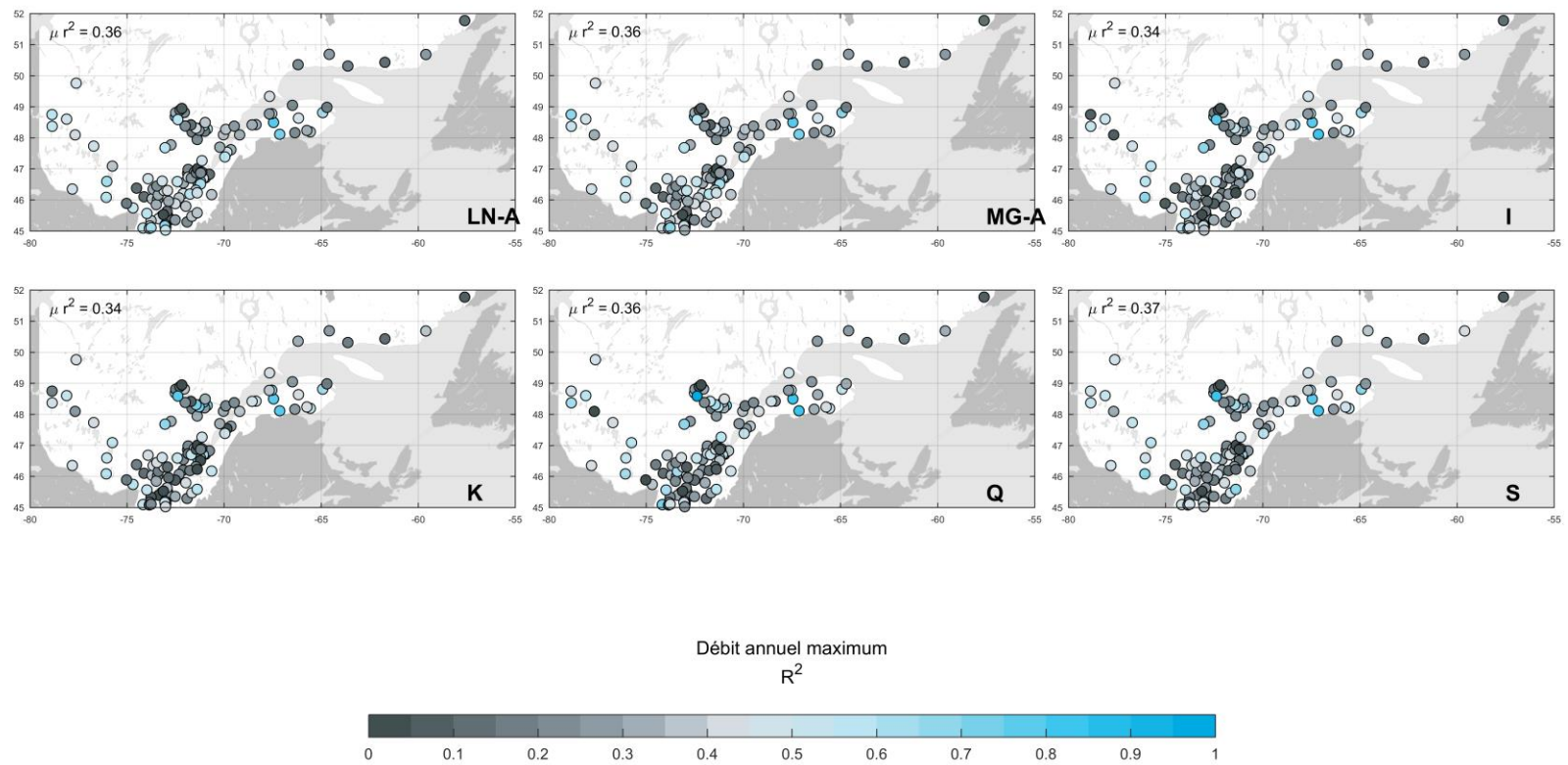


Figure 25. Coefficient de détermination (R^2) pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes

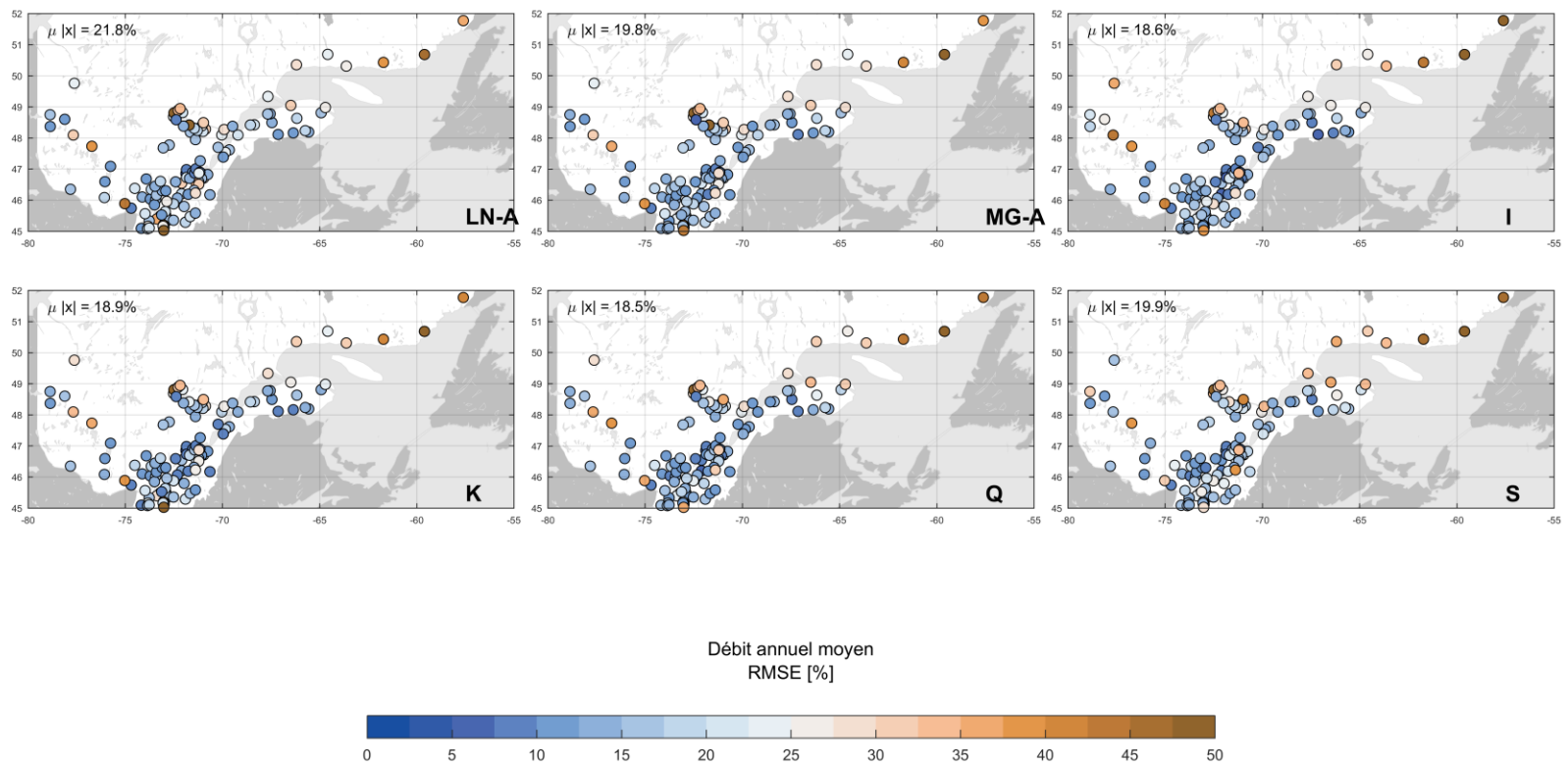


Figure 26. RMSE pour les débits annuels moyens des 6 plateformes

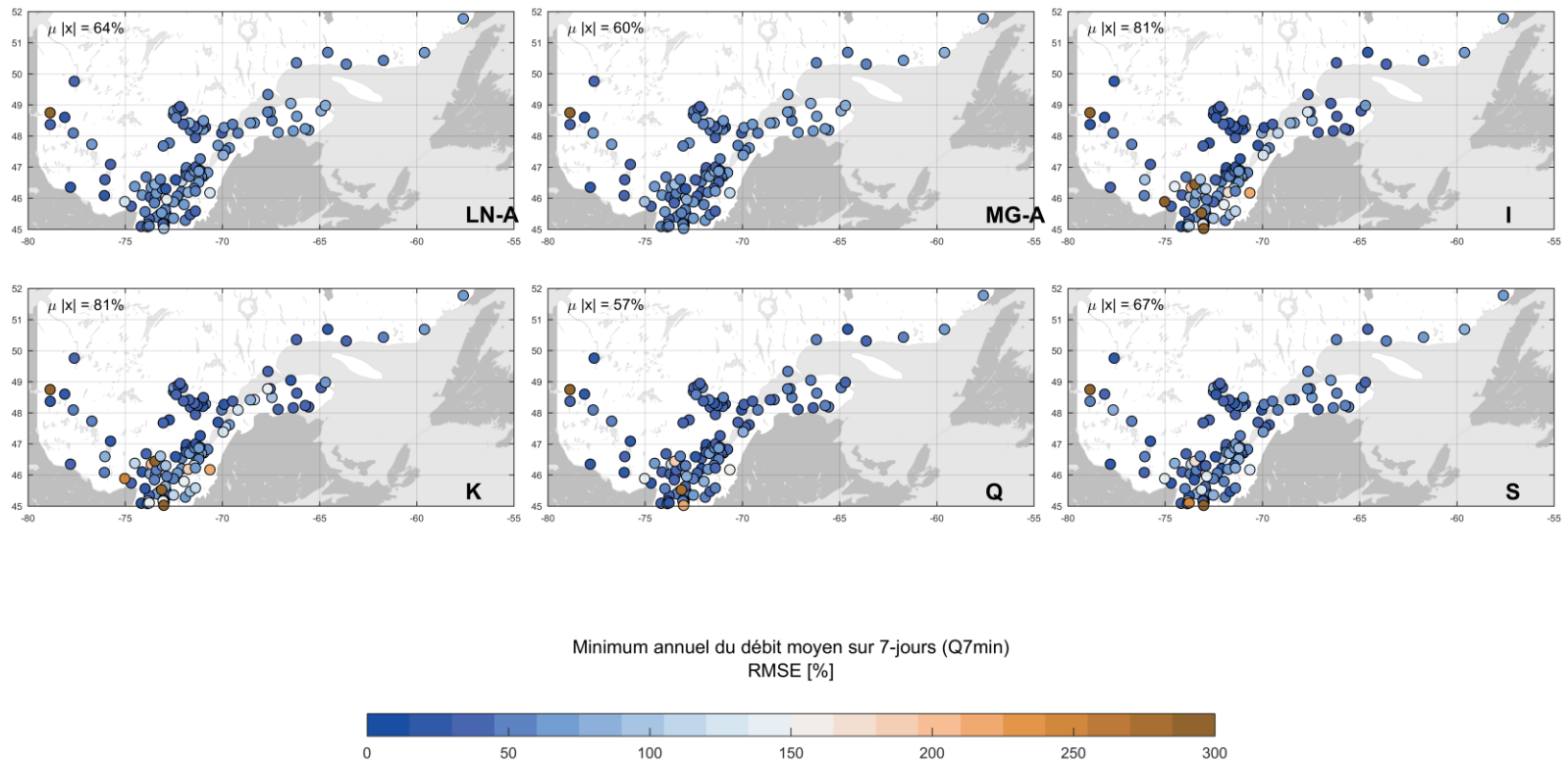


Figure 27. RMSE pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes

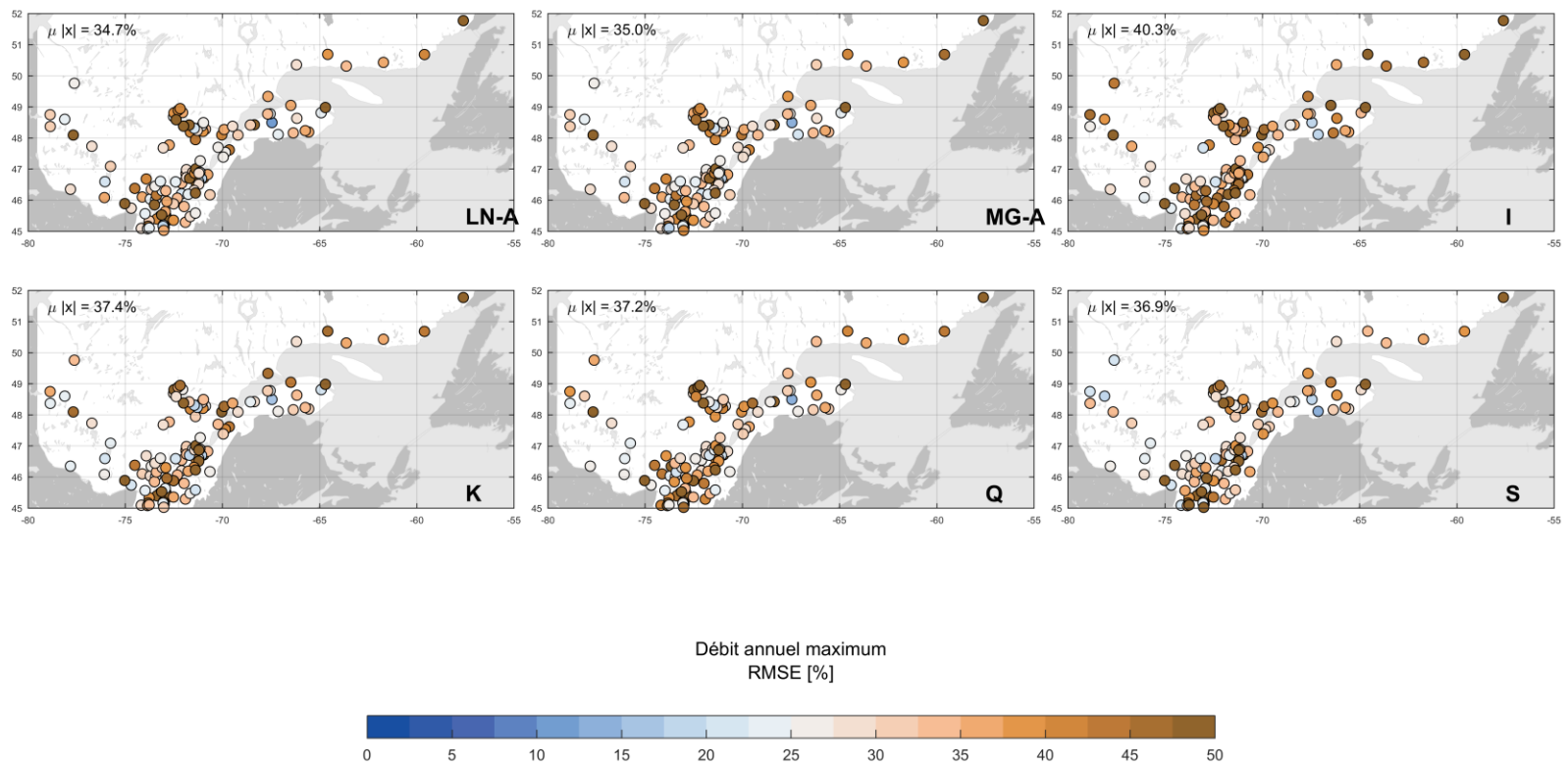


Figure 28. RMSE pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes

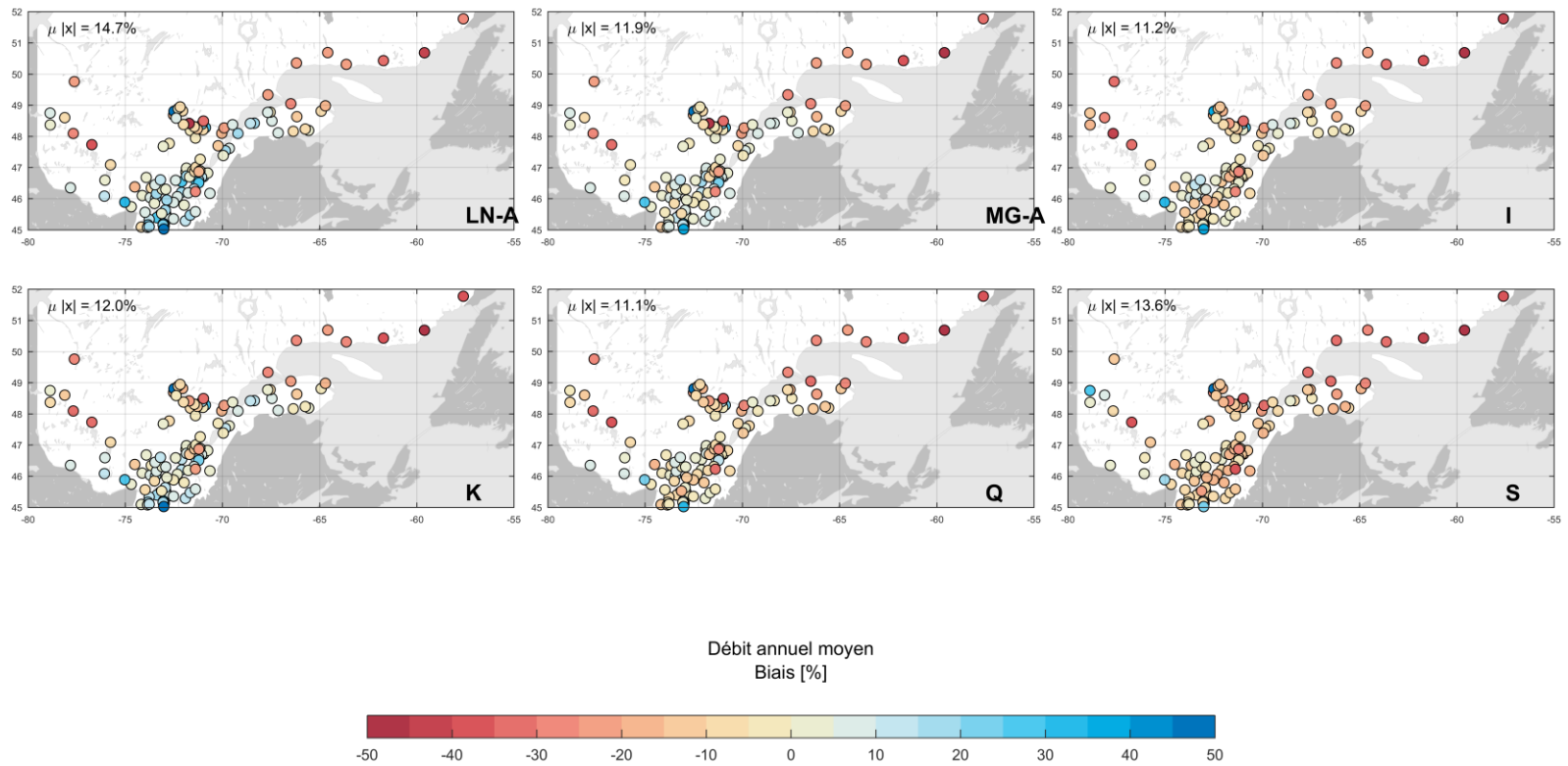


Figure 29. Biais pour les débits annuels moyens des 6 plateformes

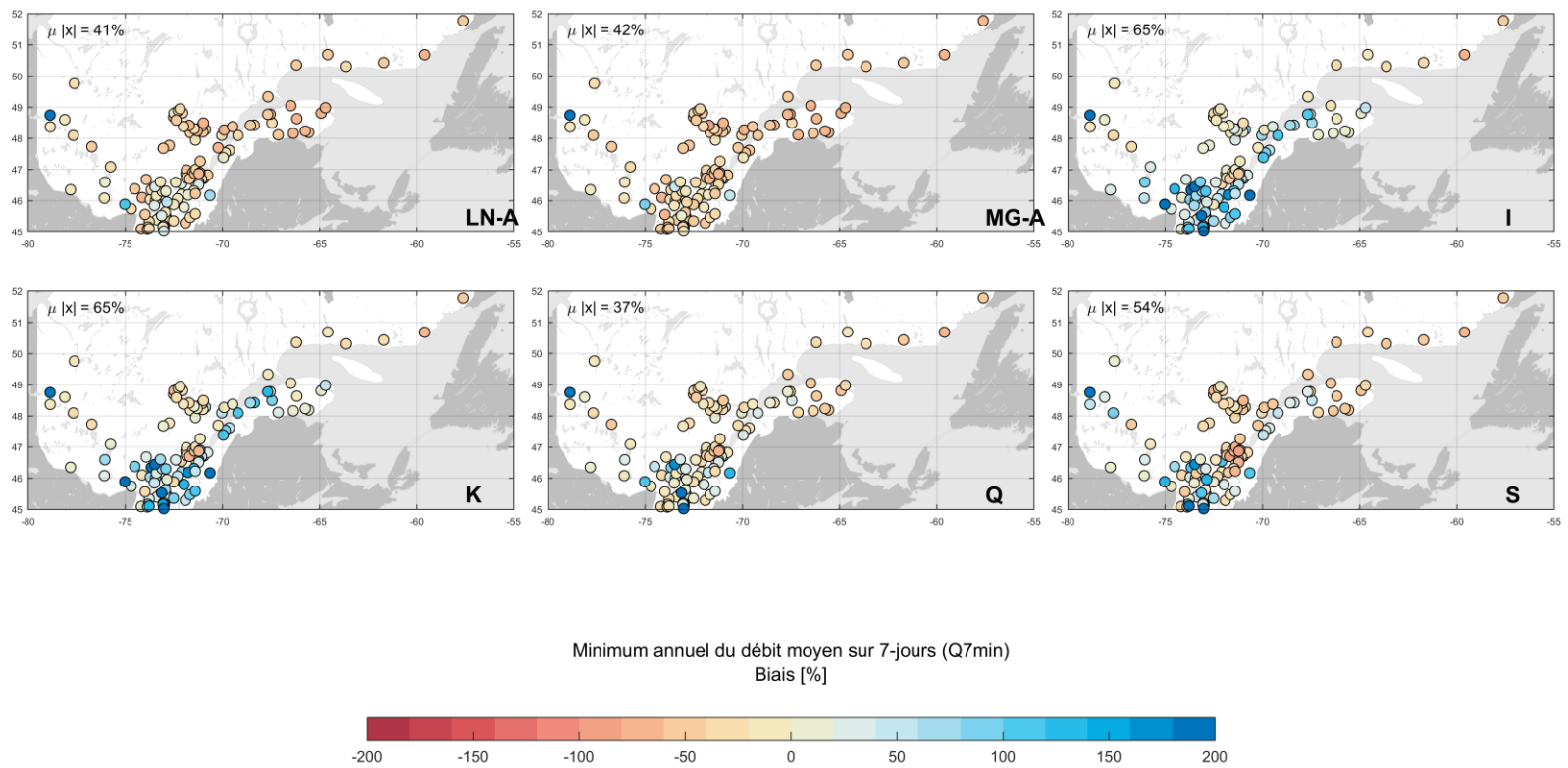


Figure 30. Biais pour les débits moyens sur 7 jours minimaux annuels des 6 plateformes

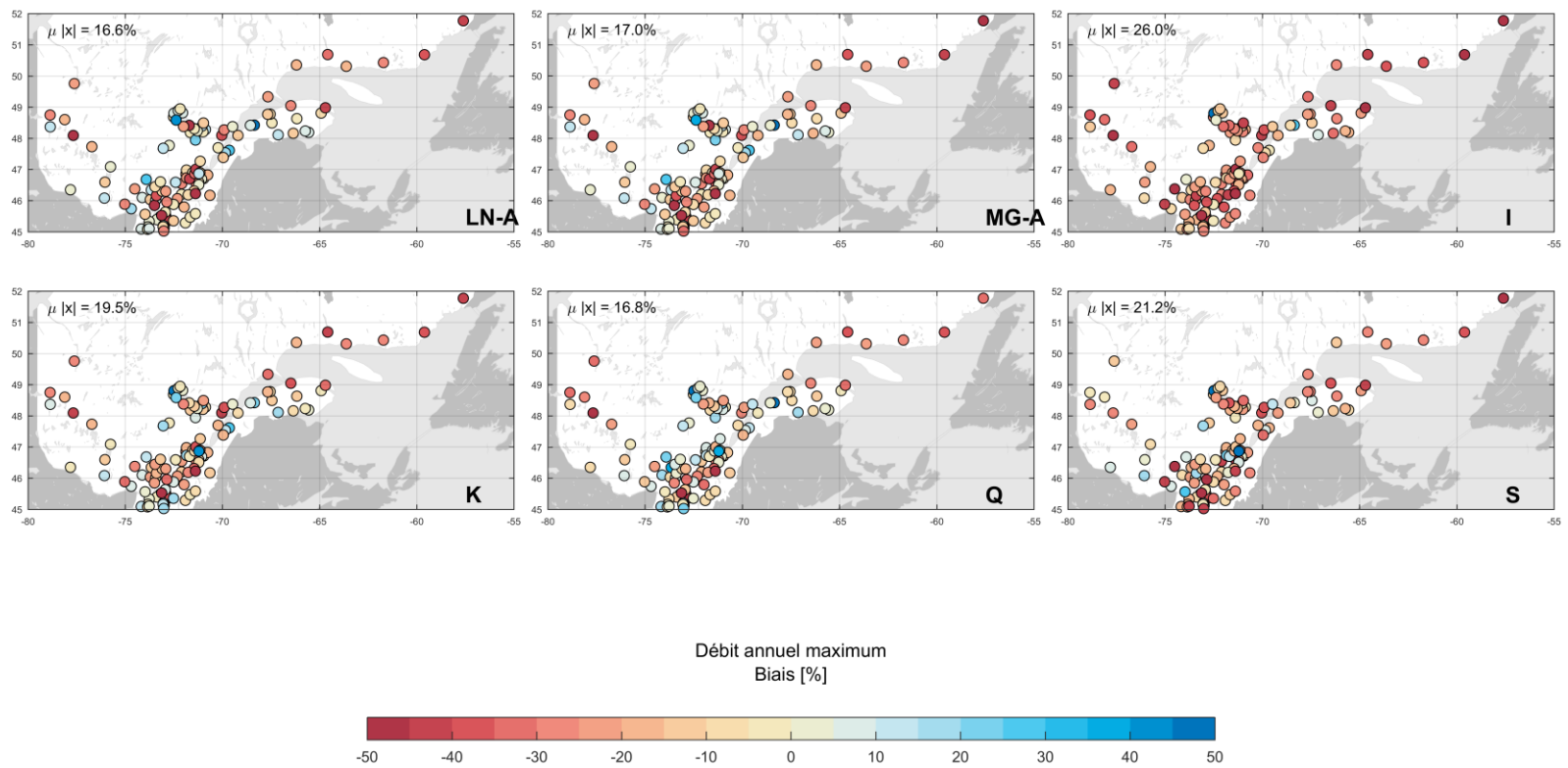


Figure 31. Biais pour les débits annuels maximaux des 6 plateformes

Tableau 19. Résultats (KGE) en validation pour les six plateformes hydrologiques

Station	Tronçon	LN24HA	MG24HA	MG24HS	MG24HQ	MG24HK	MG24HI
010101	GASP01982	0,67	0,64	0,58	0,60	0,65	0,58
010802*	GASP01646	0,84	0,85	0,83	0,83	0,83	0,82
010902	GASP01534	0,80	0,79	0,74	0,77	0,82	0,79
011001	GASP00726	0,78	0,77	0,63	0,66	0,72	0,68
011003	GASP00723	0,79	0,77	0,66	0,70	0,75	0,70
011204*	GASP01440	0,86	0,84	0,73	0,78	0,82	0,78
011508*	GASP00990	0,92	0,91	0,89	0,87	0,81	0,79
011509*	GASP00941	0,84	0,86	0,89	0,90	0,84	0,90
020401	GASP02165	0,77	0,73	0,61	0,70	0,73	0,67
020404*	GASP02179	0,83	0,81	0,69	0,76	0,79	0,74
020502	GASP00038	0,50	0,46	0,38	0,41	0,44	0,40
020602	GASP02294	0,60	0,57	0,47	0,53	0,58	0,51
020802	GASP02420	0,64	0,61	0,49	0,55	0,59	0,54
021407	GASP02669	0,63	0,61	0,50	0,55	0,58	0,55
021502	GASP02747	0,67	0,63	0,50	0,55	0,58	0,53
021601	GASP02850	0,84	0,81	0,68	0,76	0,81	0,72
021702	GASP03025	0,85	0,85	0,74	0,81	0,79	0,75
021915	GASP03127	0,84	0,84	0,70	0,79	0,76	0,72
021916*	GASP03139	0,72	0,74	0,77	0,77	0,77	0,81
022003*	GASP03334	0,82	0,87	0,85	0,90	0,82	0,83
022301*	GASP03654	0,82	0,84	0,77	0,82	0,79	0,76
022507*	GASP03811	0,79	0,80	0,75	0,78	0,75	0,78
022601*	SLSO02878	0,67	0,74	0,75	0,82	0,67	0,82
022704*	SLSO02792	0,88	0,87	0,72	0,77	0,83	0,72
023002*	SLSO02552	0,67	0,68	0,63	0,66	0,63	0,65
023004	SLSO02542	0,71	0,70	0,63	0,63	0,67	0,61
023106*	SLSO02599	0,85	0,84	0,76	0,77	0,84	0,72
023303*	SLSO02388	0,84	0,85	0,80	0,83	0,85	0,80
023401	SLSO00585	0,79	0,82	0,76	0,80	0,76	0,78
023402*	SLSO00025	0,82	0,82	0,77	0,71	0,76	0,66
023403	SLSO00306	0,73	0,73	0,72	0,69	0,70	0,62
023422*	SLSO00160	0,79	0,78	0,75	0,76	0,84	0,71
023426	SLSO00141	0,78	0,76	0,67	0,67	0,75	0,60
023432*	SLSO00633	0,64	0,66	0,61	0,67	0,64	0,65
023702*	SLSO00708	0,73	0,75	0,64	0,85	0,80	0,77
024003*	SLSO00829	0,83	0,83	0,78	0,73	0,75	0,65
024007	SLSO00786	0,83	0,83	0,80	0,76	0,80	0,70
024010	SLSO00880	0,48	0,45	0,40	0,38	0,45	0,30
024013	SLSO00850	0,76	0,78	0,67	0,66	0,75	0,62

Station	Tronçon	LN24HA	MG24HA	MG24HS	MG24HQ	MG24HK	MG24HI
024014*	SLSO00796	0,86	0,88	0,85	0,81	0,83	0,76
024015*	SLSO00889	0,71	0,71	0,64	0,63	0,72	0,56
030101*	SLSO01106	0,79	0,78	0,70	0,65	0,77	0,59
030103*	SLSO00958	0,79	0,78	0,70	0,68	0,78	0,64
030215*	SLSO02154	0,80	0,81	0,73	0,70	0,75	0,67
030219	SLSO01636	0,78	0,78	0,70	0,73	0,81	0,67
030234*	SLSO01945	0,77	0,79	0,78	0,70	0,76	0,65
030238	SLSO01974	0,75	0,74	0,71	0,61	0,73	0,51
030242	SLSO01972	0,74	0,75	0,73	0,60	0,71	0,51
030246	SLSO02247	0,70	0,72	0,68	0,63	0,72	0,58
030282*	SLSO01659	0,83	0,84	0,78	0,76	0,81	0,72
030304	MONT00051	0,70	0,72	0,76	0,70	0,74	0,71
030316	MONT00026	0,70	0,71	0,60	0,68	0,66	0,65
030335	MONT00248	0,69	0,72	0,85	0,71	0,56	0,78
030343	MONT00252	0,74	0,75	0,70	0,73	0,71	0,73
030345*	MONT00048	0,78	0,81	0,82	0,74	0,78	0,75
030415*	MONT01271	0,71	0,77	0,71	0,67	0,68	0,63
030420	MONT00932	0,68	0,72	0,71	0,62	0,64	0,61
030421*	MONT00543	0,60	0,71	0,57	0,63	0,55	0,73
030423*	MONT00926	0,59	0,67	0,62	0,67	0,59	0,76
030424*	MONT00924	0,76	0,81	0,71	0,68	0,70	0,74
030425*	MONT00902	0,51	0,57	0,60	0,48	0,52	0,49
030429	MONT01277	0,62	0,60	0,59	0,41	0,55	0,34
030905*	MONT01337	0,80	0,84	0,73	0,70	0,69	0,71
030907*	MONT01470	0,70	0,77	0,65	0,65	0,61	0,68
030919	MONT01361	0,83	0,82	0,75	0,65	0,74	0,68
030920*	MONT01537	0,55	0,63	0,73	0,63	0,55	0,64
030921	MONT01496	0,75	0,79	0,65	0,68	0,68	0,72
040129	OUTV03331	0,79	0,80	0,86	0,77	0,86	0,82
040204*	OUTV00034	0,86	0,86	0,90	0,90	0,92	0,88
040212*	OUTV00306	0,53	0,55	0,53	0,62	0,66	0,56
040402	OUTV00457	0,86	0,87	0,89	0,85	0,78	0,73
040409	OUTV00561	0,58	0,58	0,52	0,54	0,56	0,45
040841*	OUTV02027	0,89	0,88	0,89	0,86	0,82	0,75
040830	OUTV01390	0,90	0,91	0,86	0,87	0,88	0,80
040840*	OUTV02212	0,78	0,79	0,83	0,83	0,82	0,88
041301	OUTV02655	0,89	0,89	0,89	0,88	0,86	0,79
041902*	OUTM00046	0,88	0,87	0,84	0,90	0,87	0,82
041903	OUTM00096	0,41	0,42	0,32	0,49	0,49	0,70
042103	OUTM00287	0,88	0,87	0,81	0,84	0,82	0,76

Station	Tronçon	LN24HA	MG24HA	MG24HS	MG24HQ	MG24HK	MG24HI
043008	OUTM00780	0,74	0,72	0,86	0,77	0,79	0,59
043012	OUTM00709	0,86	0,85	0,73	0,75	0,83	0,67
046709	OUTV03406	0,64	0,63	0,50	0,55	0,60	0,54
050144*	SLNO02638	0,83	0,82	0,86	0,86	0,85	0,87
050118	SLNO00951	0,75	0,75	0,78	0,74	0,72	0,65
050119*	SLNO01060	0,78	0,78	0,89	0,83	0,89	0,90
050135	SLNO01454	0,81	0,83	0,82	0,84	0,87	0,83
050304*	SLNO02931	0,85	0,87	0,91	0,88	0,91	0,90
050305	SLNO02944	0,69	0,72	0,82	0,76	0,84	0,86
050408*	SLNO03245	0,87	0,88	0,81	0,82	0,83	0,79
050409*	SLNO03249	0,84	0,85	0,88	0,81	0,88	0,85
050702*	SLNO03348	0,78	0,80	0,75	0,80	0,81	0,85
050801	SLNO00372	0,81	0,82	0,85	0,82	0,88	0,85
050812	SLNO00460	0,68	0,67	0,75	0,82	0,81	0,75
050915*	SLNO00019	0,87	0,87	0,84	0,81	0,85	0,87
050916*	SLNO00029	0,63	0,63	0,67	0,63	0,65	0,58
051001*	SLNO00295	0,83	0,84	0,78	0,80	0,80	0,75
051005*	SLNO00321	0,81	0,84	0,79	0,79	0,82	0,76
051006	SLNO00330	0,89	0,88	0,86	0,82	0,85	0,80
051301	SLNO00196	0,83	0,81	0,75	0,77	0,79	0,77
051502	SLNO00094	0,83	0,86	0,82	0,85	0,87	0,85
052201	SLNO00642	0,80	0,82	0,86	0,86	0,87	0,84
052228	SLNO00616	0,84	0,83	0,75	0,79	0,73	0,74
052229	SLNO00569	0,70	0,72	0,70	0,73	0,77	0,74
052231	SLNO00815	0,75	0,74	0,68	0,67	0,71	0,60
052233*	SLNO00791	0,66	0,66	0,79	0,74	0,79	0,68
052601*	SLNO00501	0,88	0,87	0,82	0,84	0,77	0,75
052606	SLNO00514	0,88	0,86	0,79	0,80	0,74	0,72
052803	SLNO00865	0,56	0,58	0,60	0,60	0,62	0,64
052805*	SLNO00872	0,86	0,85	0,91	0,85	0,79	0,77
054001	SLNO00341	0,63	0,57	0,52	0,61	0,62	0,54
060101	SAGU00015	0,74	0,71	0,65	0,68	0,65	0,65
060102*	SAGU00034	0,70	0,68	0,63	0,67	0,64	0,64
060202	SAGU00072	0,80	0,79	0,73	0,79	0,79	0,76
060601	SAGU00151	0,79	0,79	0,89	0,85	0,81	0,76
060704*	SAGU00184	0,74	0,72	0,89	0,80	0,86	0,84
060901	SAGU00279	0,78	0,78	0,88	0,81	0,81	0,82
061020*	SAGU00324	0,82	0,83	0,79	0,84	0,84	0,80
061022	SAGU00390	0,81	0,84	0,82	0,82	0,84	0,79
061024*	SAGU00297	0,75	0,77	0,81	0,78	0,84	0,82

Station	Tronçon	LN24HA	MG24HA	MG24HS	MG24HQ	MG24HK	MG24HI
061028*	SAGU00311	0,88	0,90	0,84	0,89	0,89	0,83
061307	SAGU00621	0,73	0,72	0,70	0,79	0,82	0,72
061502	SAGU00641	0,85	0,85	0,78	0,82	0,81	0,75
061801	SAGU01949	0,85	0,85	0,80	0,83	0,83	0,78
061901*	SAGU00822	0,74	0,76	0,84	0,80	0,82	0,82
061905	SAGU00838	0,65	0,67	0,76	0,68	0,73	0,76
061906	SAGU00973	0,84	0,84	0,80	0,77	0,78	0,65
061909*	SAGU01090	0,83	0,81	0,72	0,76	0,79	0,71
062102*	SAGU01329	0,76	0,77	0,79	0,77	0,80	0,81
062114	SAGU01125	0,79	0,80	0,73	0,75	0,76	0,72
062701*	SAGU00201	0,62	0,62	0,50	0,54	0,54	0,51
062803*	SAGU02134	0,64	0,64	0,53	0,61	0,57	0,58
070204*	CNDA00018	0,86	0,85	0,82	0,85	0,85	0,83
070401	CNDA00036	0,89	0,87	0,82	0,84	0,79	0,77
071401	CNDB00855	0,67	0,63	0,54	0,62	0,56	0,59
072301*	CNDC00469	0,69	0,67	0,63	0,66	0,67	0,60
072302	CNDC00566	0,78	0,79	0,71	0,78	0,78	0,68
073502	CNDC00033	0,55	0,52	0,56	0,50	0,47	0,43
073503	CNDC00037	0,57	0,56	0,60	0,55	0,52	0,47
073801	CNDD00900	0,61	0,58	0,56	0,59	0,57	0,51
074701	CNDD01367	0,49	0,44	0,42	0,47	0,43	0,41
074902	CNDD00502	0,60	0,56	0,53	0,56	0,56	0,49
074903*	CNDD00491	0,57	0,53	0,50	0,53	0,53	0,46
075601	CNDD00015	0,36	0,29	0,34	0,33	0,30	0,27
075702	CNDE00511	0,46	0,41	0,48	0,46	0,49	0,36
075705*	CNDE00485	0,46	0,42	0,40	0,41	0,43	0,33
076201	CNDE01024	0,44	0,40	0,51	0,48	0,47	0,41
076601	CNDE00147	0,38	0,33	0,32	0,39	0,40	0,30
080101*	ABIT01483	0,76	0,74	0,84	0,66	0,71	0,53
080104	ABIT00822	0,59	0,58	0,47	0,44	0,50	0,36
080106	ABIT01542	0,50	0,49	0,66	0,42	0,49	0,33
080707*	ABIT00018	0,66	0,64	0,77	0,54	0,56	0,43

*Station utilisée pour la calibration globale.

Annexe F – Saisons hydrologiques

Méthode de détermination des saisons pour l'Atlas hydroclimatique 2018

L'échantillonnage des valeurs maximales de débit est appliqué pour deux saisons hydrologiques distinctes : la saison « hiver-printemps » (HP) correspond à la période de l'année où les apports hydriques sont produits par la fonte du couvert de neige et la saison « été-automne » (EA), à celle où les apports hydriques sont produits par les précipitations liquides. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous illustre comment les saisons hydrologiques sont déterminées pour chaque tronçon modélisé par la plateforme; la station 021601 est ici donnée comme exemple. Les lignes gris pâle correspondent aux différents hydrogrammes annuels disponibles à la station. Le trait foncé représente l'hydrogramme interannuel moyen et les points, les valeurs maximales de débit échantillonnées chaque année pour les saisons HP (bleu) et EA (rouge). Le début de la saison HP est fixé au 1^{er} janvier. Le jour correspondant au débit maximal de l'hydrogramme interannuel est ensuite défini comme le « jour de la mi-cruie » (JMC). Pour déterminer la fin de la décrue printanière (correspondant au début de la saison été-automne), un nombre de jours (n_j) est ajouté itérativement ($JMC+n_j$) jusqu'à ce que la proportion de débit annuel maximal de la saison EA survenant dans les cinq premiers jours de cette saison soit inférieure à 15 %. La valeur initiale de n_j est posée à 28 jours et l'incrément à 7 jours ($n_{j_i} = n_{j_{i-1}} + 7$), et l'algorithme est borné comme suit : l'été débute au plus tard le 1^{er} août et la valeur maximale pour n_j est de 120 jours. Cet algorithme cherche donc à minimiser le nombre de débits maximaux échantillonnés pour la saison EA correspondant à des décrues printanières tardives.

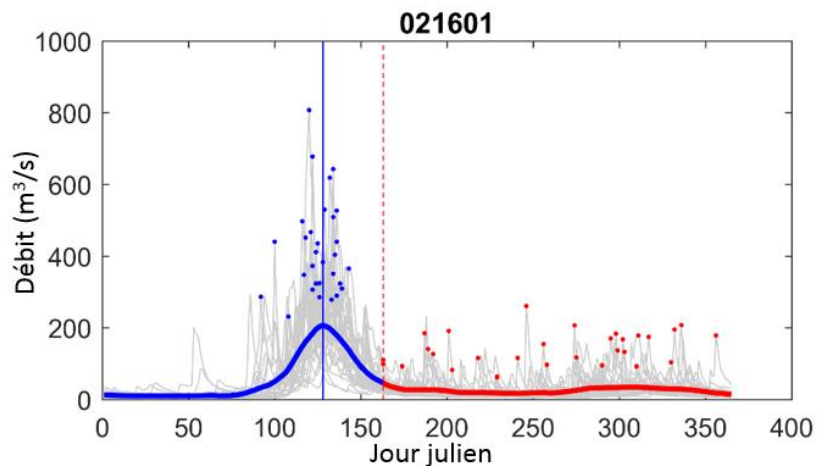


Figure 32. Détermination des saisons hydrologiques à la station 021601 (méthode Atlas 2018)

La **Figure 33** présente l'ampleur du changement pour l'indicateur hydrologique Q_{7min2E} à l'horizon 2050 et pour le RCP4.5. La distribution spatiale sur la Côte-Nord met en évidence une problématique d'échantillonnage des faibles débits en fonction des différentes saisons hydrologiques. Un nombre élevé d'étiages survenant en début de la saison HP ont été échantillonnés pour la saison EA. Le calcul des débits de récurrence ainsi que les valeurs de changement qui en découlent confondent donc les signaux spécifiques et les saisons. Ainsi, l'augmentation du Q_{7min2E} observé régionalement sur la Côte-Nord est en partie expliquée par l'augmentation des faibles débits durant la période hivernale (Q_{7min2H}).

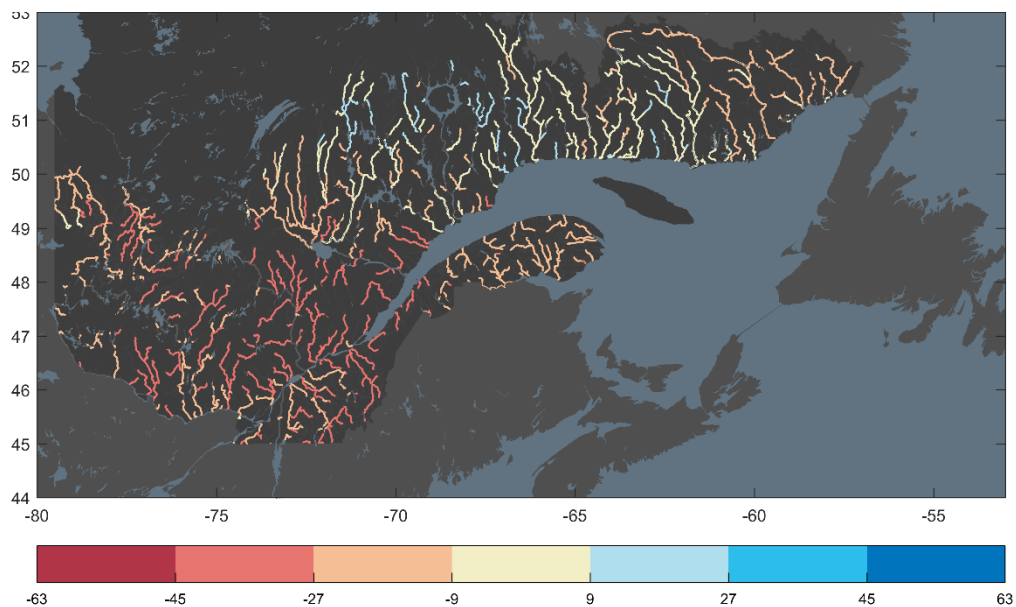


Figure 33. Ampleur du changement projeté (exprimé en pourcentage) pour l'indicateur (Q7min2E) à l'horizon 2050 et pour le RCP4.5 (méthode Atlas 2018)

Méthode de détermination des saisons pour l'Atlas hydroclimatique 2022

Deux processus sont considérés dans la méthodologie de détermination des saisons hydrologiques. Il s'agit des processus de la fonte de la neige, avec ou sans pluie (hiver-printemps : HP), et du processus de la pluie seule (été-automne : EA). Selon la présence ou non de l'équivalent en eau de la neige (EEN) au sol, le débit est attribué à l'une ou l'autre saison. Les données concernant l'EEN sont issues des simulations hydrologiques réalisées à l'aide d'Hydrotel avec comme intrant des données météorologiques observées ou issues des modèles climatiques, représentant les conditions climatiques actuelles ou futures (3.1). La méthodologie consiste en trois grandes étapes :

- 1) Identifier les jours avec de la neige au sol (seuil d'EEN) pour la période hiver-printemps;
- 2) Majorer cette période pour tenir compte du temps de réponse du BV;
- 3) Sélectionner les débits maximal et minimal associés à chacune des saisons.

Identification des jours avec EEN

Une journée est associée à la saison hiver-printemps lorsque l'EEN enregistré pendant cette même journée et pendant les trois jours avant et les quatre jours après cette dernière, de manière consécutive, est supérieur ou égal à 10 mm. Autrement, la journée est associée à la saison été-automne. Ces critères sont issus de l'étude réalisée par Foulon et Rousseau (2018) et d'une analyse de sensibilité. La **Figure 35** et la **Figure 36** montrent un exemple de détermination du début de la saison HP et de fin de la saison HP, respectivement.

Ajustement en fonction du temps de réponse de chaque BV

Pour chaque tronçon, le temps de réponse du bassin versant (TR_{BV}) est estimé et additionné à la date de la fin de saison préliminaire déterminée à l'étape précédente. Cet ajustement permet d'éviter d'inclure de forts débits de décrue printanière aux crues estivales.

Le TR_{BV} est estimé sur la base des temps de montée et de décrue moyens calculés sur la série totale de données de débit disponibles.

$$TR_{BV} = TM_{moy} + TD_{moy} \quad (3)$$

où TM_{moy} et TD_{moy} sont respectivement les moyennes des temps de montée et de décrue calculés sur les crues jugées significatives. Pour qu'une crue soit jugée significative, le débit doit augmenter d'au moins le tiers du débit minimal avant crue (débit de référence de la crue; Q_{Ref_crue}) et diminuer du tiers du débit de crue (Q_{crue}). La **Figure 34** illustre des exemples de crues jugées significatives pour lesquelles des temps de montée et de décrue sont calculés pour un tronçon donné.

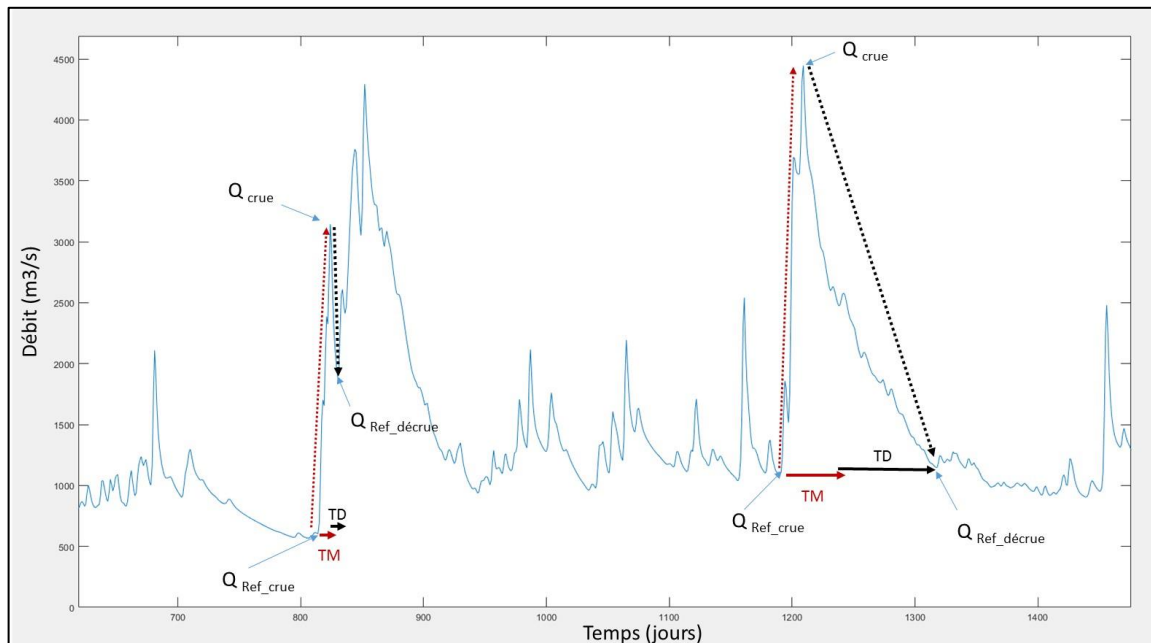


Figure 34. Exemples de temps de montée (TM) et de décrue (TD) calculés pour des crues jugées significatives

Sélection des débits maximal et minimal par saison

Pour chaque tronçon, on calcule la moyenne interannuelle des dates de début et de fin de saison sur la période de référence (1981-2011) en excluant les années pour lesquelles l'algorithme n'a pas réussi à identifier clairement les saisons. Cela permet d'éliminer notamment les années ne présentant pas de crue d'été, souvent associées à des étés très courts (moins de 100 jours). **Figure 37** La **Figure 37** présente la carte pour la date de la fin de la saison HP. Les incohérences spatiales (notamment au Saguenay et sur la Côte-Nord) font ressortir la difficulté d'identifier les saisons sur tout le territoire de l'Atlas de façon automatique (voir section 5.3). Les dates des saisons pour la période de référence servent également pour les horizons futurs, même s'il est connu que la durée de l'hiver-printemps changera de façon importante d'ici la fin du siècle. La même simplification était faite pour l'Atlas hydroclimatique 2018.

La **Figure 38** présente des exemples de débits maximal et minimal sélectionnés pour les différentes saisons pour trois années successives, pour un tronçon situé dans la région de la Gaspésie.

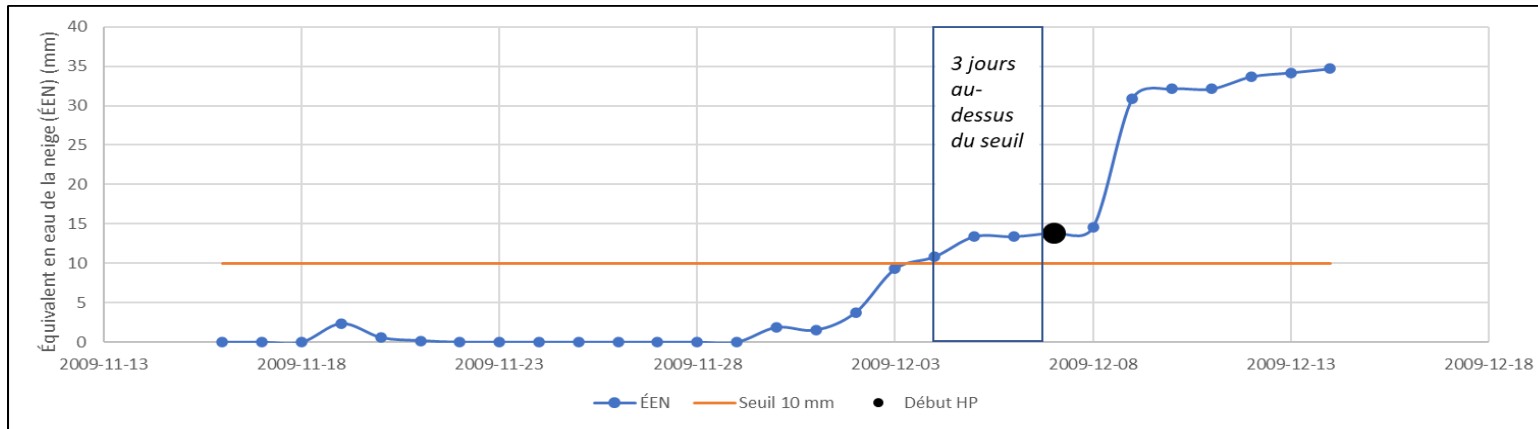


Figure 35. Exemple de détermination de la date du début de l'hiver-printemps (HP)

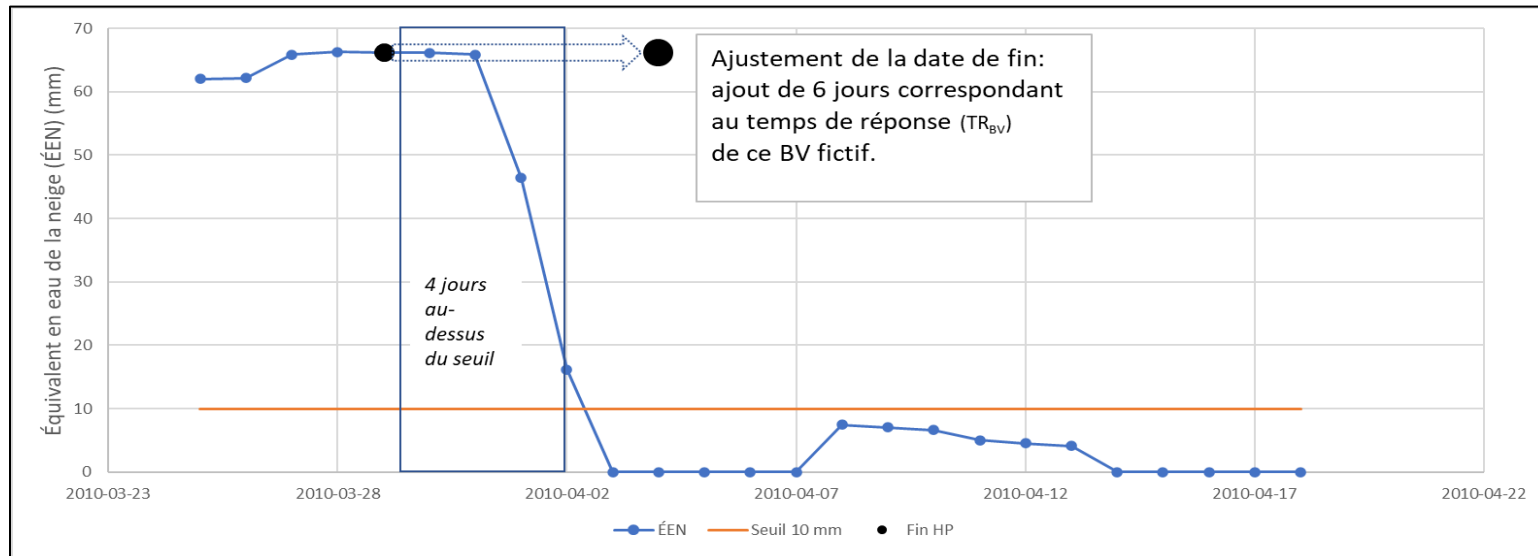


Figure 36. Exemple de détermination de la date de fin de l'hiver-printemps (HP)

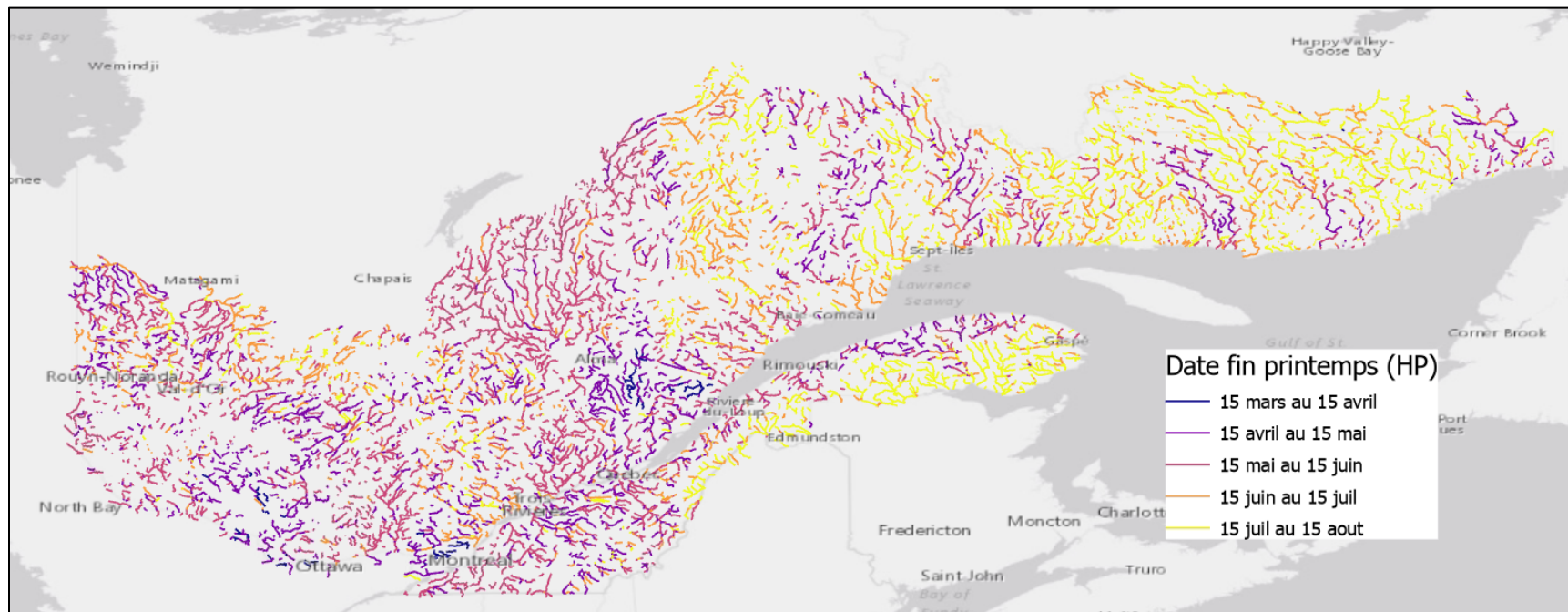


Figure 37. Carte illustrant la date de la fin de la saison HP pour les tronçons de l'Atlas

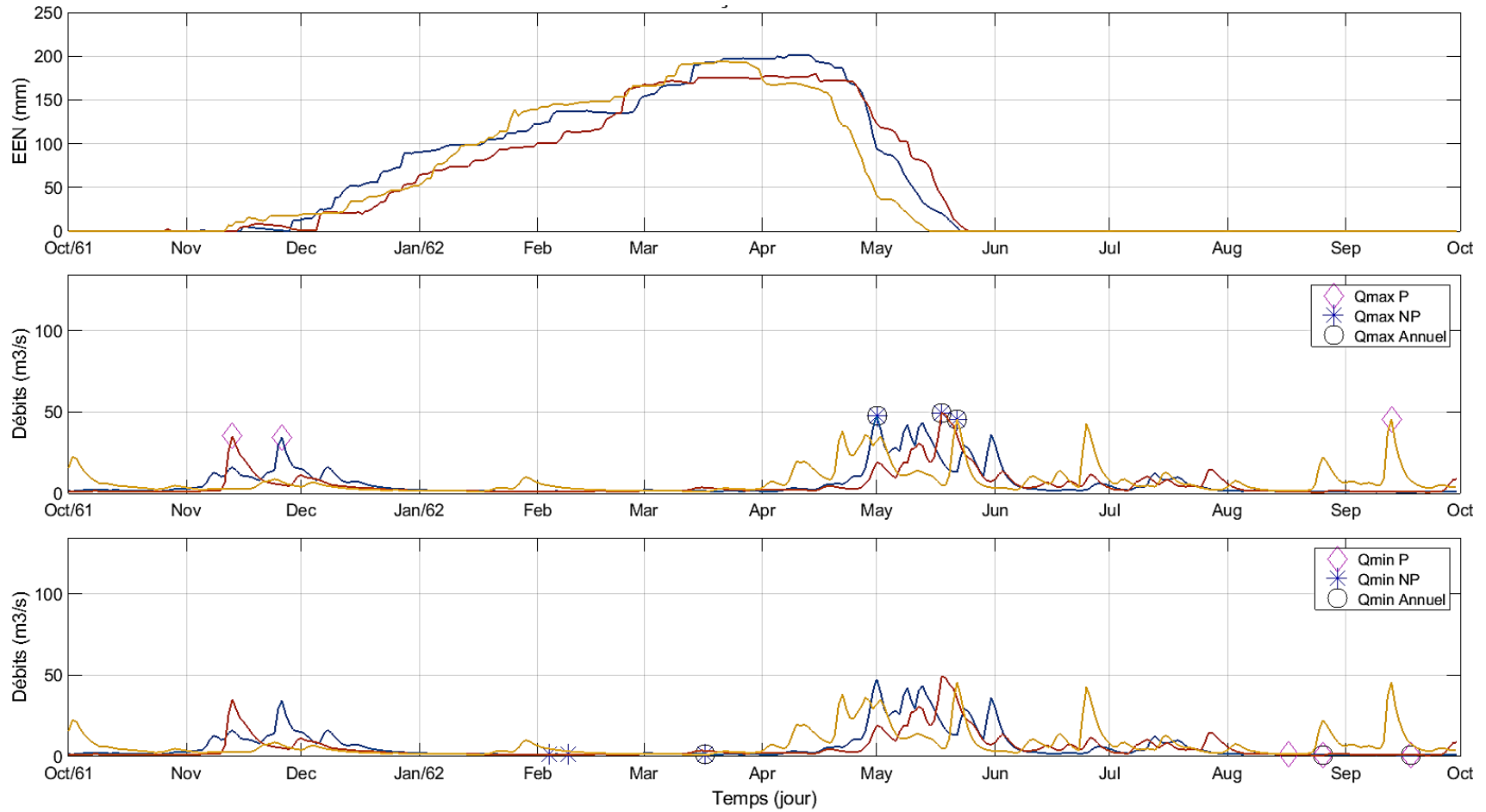


Figure 38. Exemple de débits maximaux et minimaux annuels et issus des processus hydrométéorologiques (fonte de neige et pluie, et pluie seule)

Annexe G – Interpolation optimale

L'interpolation optimale est une technique d'assimilation de données relativement simple qui est utilisée principalement dans le domaine de la météorologie (Fortin et collab., 2015). Elle permet de combiner des données disponibles « localement », généralement des observations, aux données issues d'un **champ d'essai**, généralement un modèle, distribué spatialement en exploitant la corrélation spatiale de l'erreur (écart par rapport au modèle) entre les données et le modèle. La méthode permet d'estimer l'**innovation** (correction) à partir d'une combinaison linéaire des écarts entre les données et le champ d'essai afin de produire une **analyse** aux sites d'intérêt. La technique d'interpolation optimale a déjà été appliquée à la reconstitution journalière des débits historiques. Lachance-Cloutier et collab. (2017) ont comparé l'interpolation optimale à plusieurs autres méthodes d'estimation des débits en milieu non jaugé et ont conclu que cette approche présentait les performances les plus intéressantes.

À l'instar du krigeage, l'interpolation optimale trouve les poids qui minimisent la variance d'estimation. Pour un instant donné, l'analyse au site d'estimation (\hat{z}_e), soit un tronçon de la plateforme, est donnée par

$$\hat{z}_e = m_e + \sum_{i=1}^N w_i [z_i - m_i] \quad (3)$$

où m_e est la valeur du champ d'essai au site d'estimation, m_i et z_i sont respectivement les valeurs du champ d'essai et de l'observation à la station hydrométrique « i », w_i représente les poids pour chacune des stations et $[z_i - m_i]$ est l'écart entre l'observation et le champ d'essai au site d'observation « i ». La somme du produit des poids avec les écarts s'appelle l'innovation et représente la correction devant être appliquée au champ d'essai.

Sous forme matricielle, le système d'équation linéaire permettant d'obtenir les poids w_i s'écrit ainsi :

$$\left[\mathbf{B} + \mathbf{I} \frac{\sigma_o^2}{\sigma_b^2} \right] \mathbf{W} = \mathbf{b} \quad (4)$$

où \mathbf{B} est une matrice [N x N] de la corrélation spatiale de l'erreur du champ d'essai entre les observations aux stations hydrométriques « i » et « j », \mathbf{I} est une matrice identité [N x N] de diagonale 1, $\frac{\sigma_o^2}{\sigma_b^2}$ est le rapport entre la variance des erreurs des observations et la variance de l'erreur du champ d'essai, \mathbf{W} est un vecteur de poids [N x 1] et \mathbf{b} un vecteur [N x 1] de la corrélation spatiale de l'erreur entre les observations et le site d'estimation « e ».

Cette équation découle de la forme adimensionnelle de Garand et Grassoti (1995) pour laquelle une hypothèse d'erreur uniforme des données et du champ d'essai et une hypothèse d'erreur de données non corrélées sont considérées.

Elle met en évidence l'importance du rapport entre la variance de l'erreur des observations et la variance de l'erreur du champ d'essai dans la détermination des poids. Pour l'interpolation sur les

débits journaliers (« Portrait »), la valeur de ce ratio a été fixée à 0,25 de sorte que les résultats de l'analyse soient près des valeurs observées aux sites où celles-ci sont disponibles. Avec un ratio de 0,25, en supposant un site d'estimation colocalisé à un site d'observation sans autre site d'observation à proximité, l'analyse accordera 4 fois plus de poids à la donnée observée qu'au champ d'essai. Pour l'IO sur les indicateurs, le ratio entre la variance de l'erreur des observations et la variance de l'erreur du champ d'essai n'est pas fixé. On utilise alors la variance des données observées multipliée par 1, 1,25, 1,5 ou 2, selon la qualité de la station.

L'évaluation de **B** et de **b** requiert de trouver la fonction décrivant la corrélation spatiale de l'écart au champ d'essai en fonction de la distance de séparation « h ». On ajuste deux fonctions, une pour la rive nord du fleuve Saint-Laurent et l'autre pour la rive sud. Dans le cas de l'IO sur les débits journaliers, pour chaque pas de temps disponible, la corrélation de l'erreur entre les débits simulés et les débits observés a été évaluée à partir des paires de sites disponibles. Les valeurs de corrélation obtenues sur l'ensemble de la période ont été regroupées en 12 classes de distances sur lesquelles nous avons évalué les valeurs de corrélation moyennes.

La **Figure 39** montre les points expérimentaux et la fonction théorique ajustée par la méthode des moindres carrés. La fonction suivante a été utilisée pour décrire la corrélation de l'erreur en fonction de la distance de séparation « h » :

$$\rho(h) = \left(1 + \frac{h}{L}\right) \exp\left(\frac{-h}{L}\right) \quad (5)$$

où L est un coefficient représentant la portée dont la valeur a été estimée au tiers de la moyenne des distances de séparation moyennées à l'intérieur de chaque classe de distance.

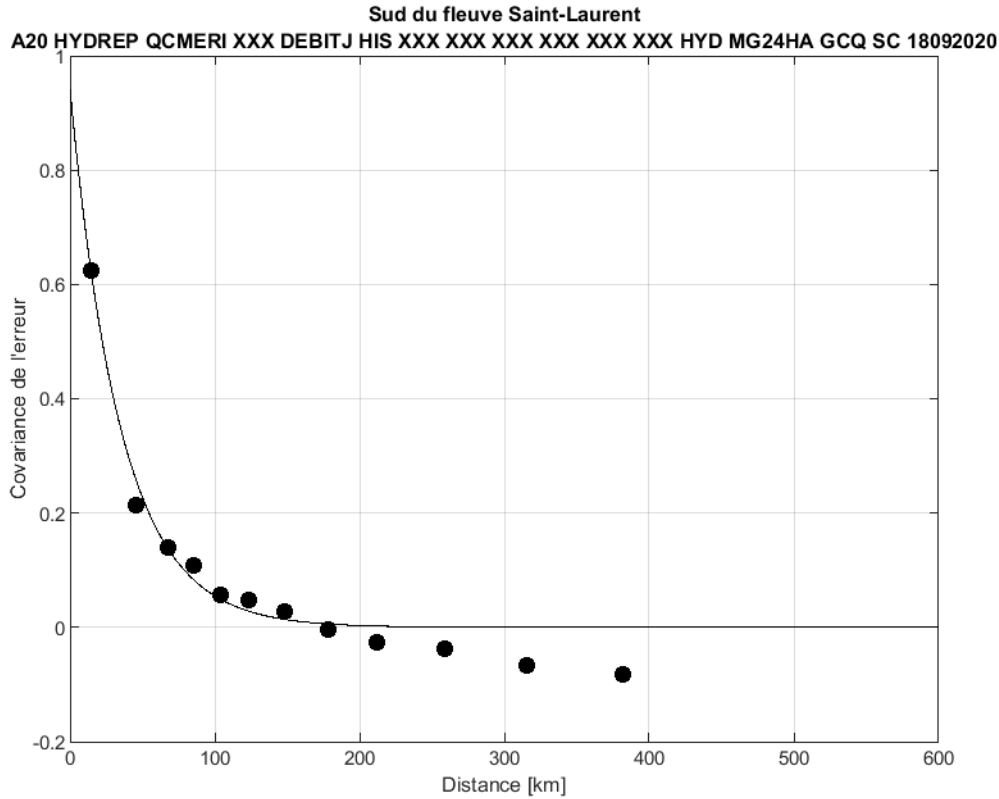


Figure 39. Valeurs expérimentales de la corrélation de l'erreur en fonction de la distance (points noirs) et ajustement théorique (ligne noire) pour la rive sud du fleuve Saint-Laurent et la plateforme MG24HA

La **Figure 39** montre que la corrélation spatiale de l'erreur décroît avec la distance de séparation. Dans cet exemple, au-delà d'environ 200 km, la corrélation est nulle. Ainsi, l'erreur observée en un site « i » n'a aucun pouvoir prédictif sur l'erreur en un site distant de plus de 200 km. Pour cette raison, l'interpolation optimale converge vers les valeurs du champ d'essai au fur et à mesure que l'on s'éloigne des sites d'observation.

La variance d'analyse normalisée est donnée par l'équation (6). Elle est une valeur comprise entre 0 et 1 représentant dans quelle proportion la valeur de l'analyse dépend du champ d'essai. Une valeur de 1 signifie que tout le poids est donné au champ d'essai (aucune contribution des sites de prévisions expertisées) et 0 signifie que le résultat de l'analyse provient essentiellement des observations.

$$\varepsilon_e^2 = 1 - \mathbf{W}^T \mathbf{b} \quad (6)$$

Pour la présente application, l'interpolation optimale est appliquée sur le logarithme naturel des débits spécifiques du champ d'essai et des observations. Cette transformation permet notamment d'éviter les débits négatifs et d'obtenir facilement un modèle d'incertitude hétéroscédastique, c'est-à-dire un modèle dont la variance est fonction de la valeur de la variable.

$$z_i = \ln \frac{Q_{\text{observé},i}}{A_i} \quad (7)$$

$$m_i = \ln \frac{Q_{champ\ essai,i}}{A_i}$$

Les valeurs d'analyse obtenues à la suite de l'interpolation optimale sont ramenées en [m³/s] en appliquant la transformation inverse :

$$\hat{Q}_e = A_e e^{2e} \quad (8)$$

Modèle d'incertitude

La variance normalisée obtenue par l'équation (6) est utilisée afin de déterminer l'incertitude de l'analyse non jaugée. Cette variance normalisée représente uniquement la portion de l'incertitude en lien avec l'application de l'interpolation optimale, soit l'incertitude sur l'estimation de la correction à appliquer au champ d'essai pour un site donné. Comme mentionné précédemment, la variance normalisée est une valeur variant spatialement entre 0 et 1. Sa valeur est de 0 lorsque l'analyse est fortement conditionnée par les données des observations et 1 lorsqu'elle est fortement conditionnée par le champ d'essai. Par conséquent, les tronçons où la variance normalisée est proche de 0 devraient avoir une incertitude comparable à l'incertitude des observations, et les tronçons où la variance normalisée est près de 1 devraient avoir une incertitude comparable à l'incertitude du champ d'essai. La variance de l'analyse $\sigma_{A,t}^2$ pour un site « t » est posée comme suit :

$$\sigma_{A,t}^2 = \varepsilon_t \sigma_B^2 \quad (9)$$

où ε_t est la variance normalisée et σ_B^2 est la variance de l'erreur du champ d'essai pour un site de superficie drainée « S ». Pour les séries journalières de débits, σ_B^2 varie journalièrement; on l'obtient en calculant la variance échantillonnale des écarts entre le modèle et les observations de chaque journée.

Dans le cas de l'IO sur les indicateurs, le ratio entre la variance de l'erreur d'observation et la variance de l'erreur du champ d'essai $\frac{\sigma_o^2}{\sigma_b^2}$ dans l'équation (4) varie selon le site d'observation et de l'indicateur. Pour chaque indicateur et chaque rive (nord et sud), une validation croisée permet d'ajuster l'erreur du champ d'essai pour améliorer la fiabilité de l'incertitude. L'erreur des observations, quant à elle, dépend de la qualité des données et de l'incertitude de l'ajustement statistique effectué lors du calcul de l'indicateur avec les données observées.

Le modèle d'incertitude suppose une distribution normale centrée sur 0 et est appliqué sur les débits obtenus par transformation logarithmique des débits spécifiques (équation (7)). Une fois la transformation inverse appliquée, l'incertitude suivra une loi log-normale.

Annexe H – Influence potentielle de la gestion des barrages

On calcule l'indice *degree of regulation* (DOR) (Lehner et collab., 2011) en multipliant par 100 le rapport entre la capacité de rétention totale des réservoirs d'un ou de plusieurs barrages situés en amont d'un tronçon, et le volume d'écoulement annuel circulant dans ce tronçon. À noter que seuls les barrages ayant une capacité de gestion sont considérés, par exemple des barrages ayant des vannes de fond, des déversoirs pouvant subir une gestion ou destinés à la production d'hydroélectricité. La liste des évacuateurs est fournie dans le **Tableau 20**. Cela implique par exemple que les barrages ayant uniquement des seuils fixes ne contribuent pas au calcul du DOR. Lorsqu'il n'y a pas de barrage gérés en amont d'un tronçon, l'indice DOR est égal à 0. Pour les tronçons non jaugés, le volume d'écoulement annuel a été interpolé à l'aide d'une régression linéaire entre la médiane des volumes d'écoulement annuels moyens et la superficie des bassins versants jaugés.

L'étude de Mailhot et collab. (2018) établit que lorsque l'indice DOR d'un tronçon est supérieur à 8 (c'est-à-dire que la capacité totale de rétention du ou des réservoirs d'un ou des barrages en amont est supérieure à 8 % du volume de l'écoulement annuel dans ce tronçon), la modalité de la distribution des débits de ce tronçon peut être affectée par la gestion des ouvertures de ce ou ces barrages. L'étude démontre que la distribution des débits des rivières en régime naturel tend à être unimodale, alors que celle des rivières influencées par la gestion des ouvertures des barrages tend à être plurimodale.

On a calculé l'indice DOR sur les tronçons du réseau hydrographique modélisé en tenant compte des types de barrages qui, selon l'information contenue dans le [Répertoire des barrages du MELCCFP](#), permettent une gestion des ouvertures¹⁴, et dont la superficie du réservoir est supérieure à 15 km².

Tableau 20. Liste des évacuateurs considérés pour le DOR

Évacuateur
Déversoir à poutrelles
Vanne
Vanne bascule
Vanne segment déversante
Vanne verticale de fond
Vanne verticale déversante
Vanne verticale demi-fond
Vanne-clapet
Vanne segment
Vanne verticale de type Stoney

¹⁴ L'information contenue dans le Répertoire des barrages ne permet pas de savoir s'il y a effectivement une gestion des ouvertures qui est faite.

Annexe J – Indicateurs hydroclimatiques projetés

Cette annexe présente les cartes de l'ampleur du changement pour les principaux indicateurs. Pour chaque indicateur, les changements projetés sont montrés pour les trois horizons et deux RCP. Les tronçons dont la direction présente une absence de consensus entre les scénarios sont en noir. Pour l'ensemble des cartes, données et résultats, le lecteur est invité à consulter le site Web de l'Atlas hydroclimatique (outil « Indicateurs »).

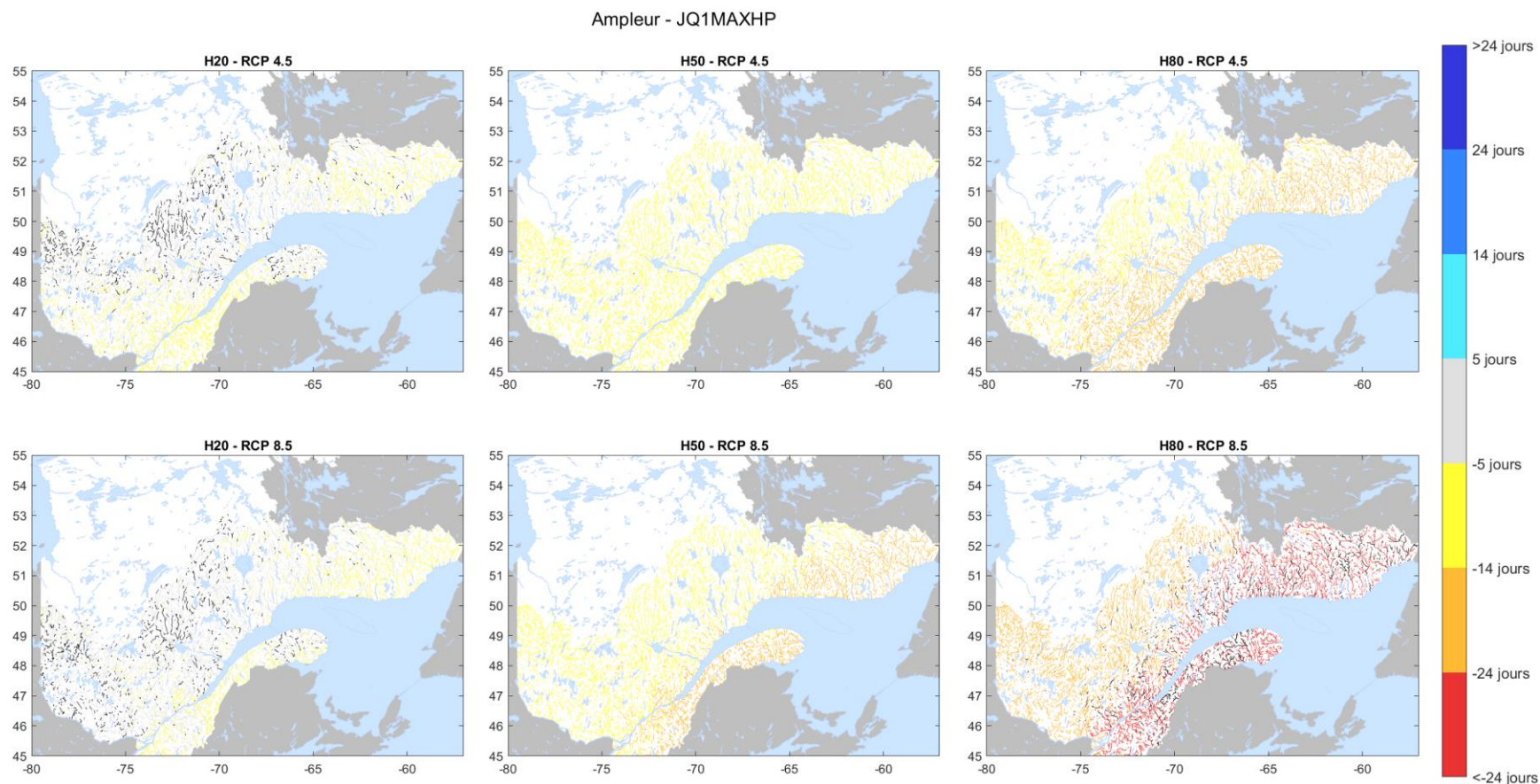


Figure 40. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur JQ1MAXHP

En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. JQ1MAXHP : Jour d'occurrence moyen du débit journalier maximal sur la période hiver-printemps.

Ampleur - Q1MAX2HP

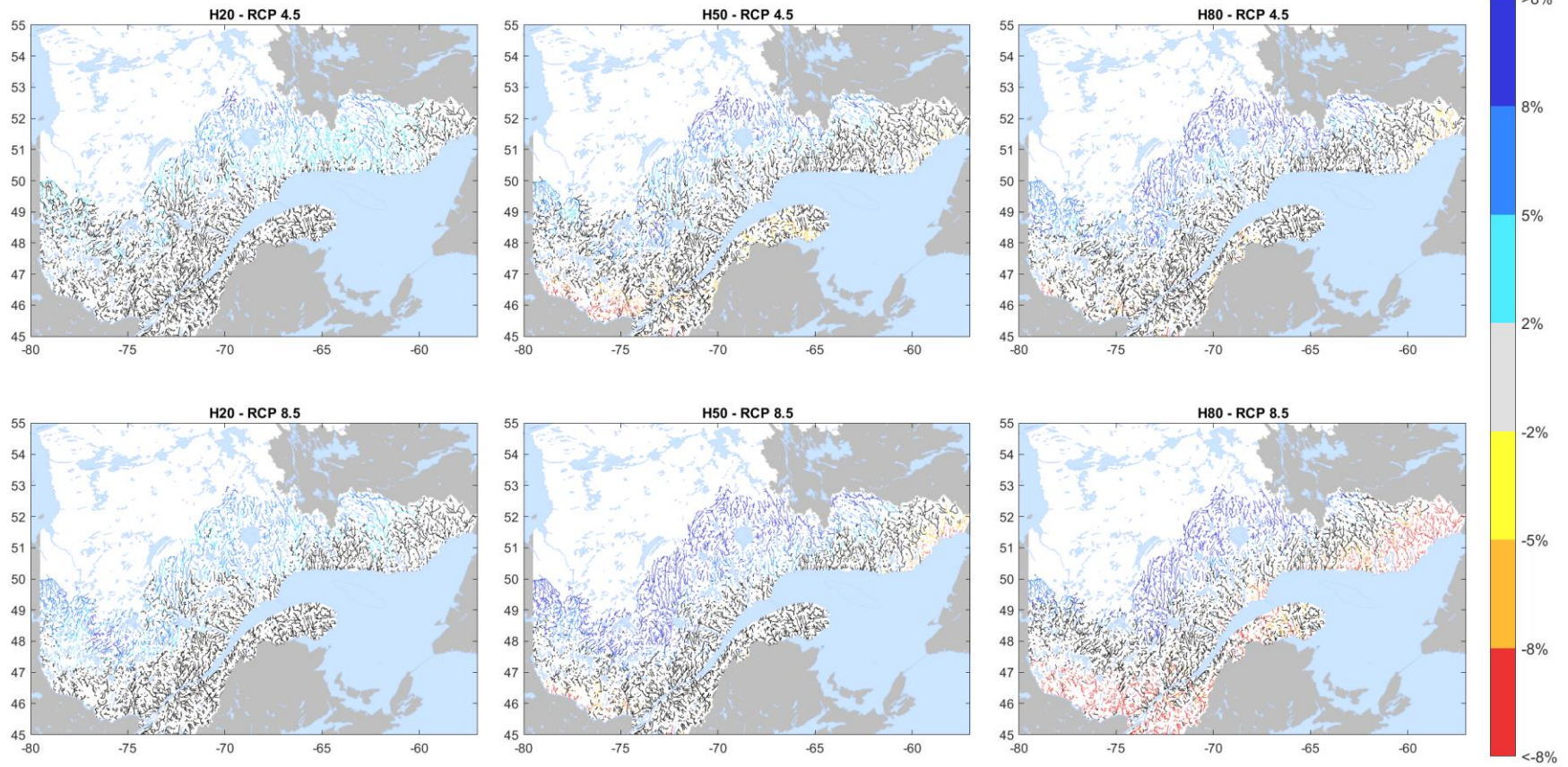


Figure 41. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX2HP
En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q1MAX2HP : Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence de 2 ans.

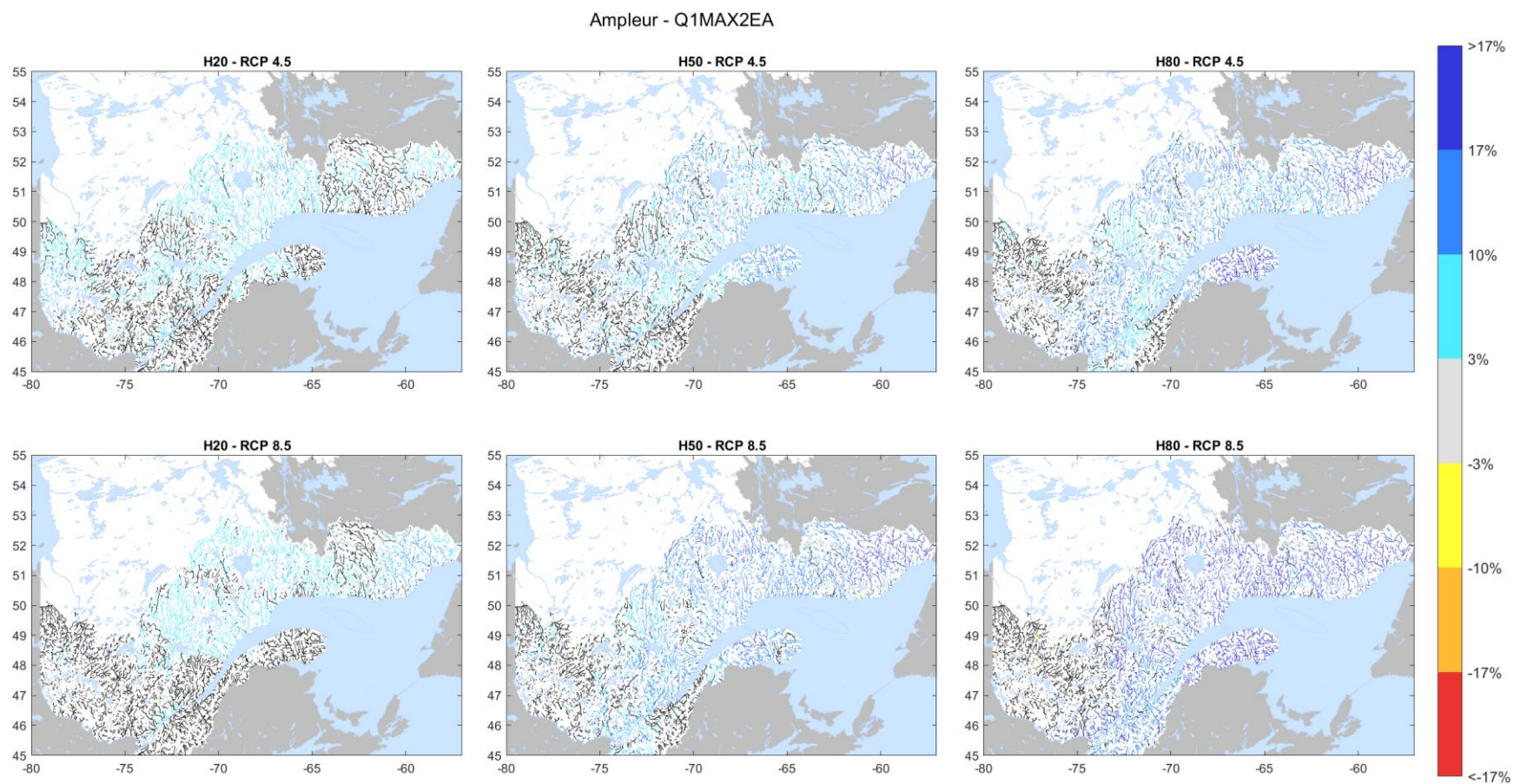


Figure 42. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX2EA
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q1MAX2EA : Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence de 2 ans.

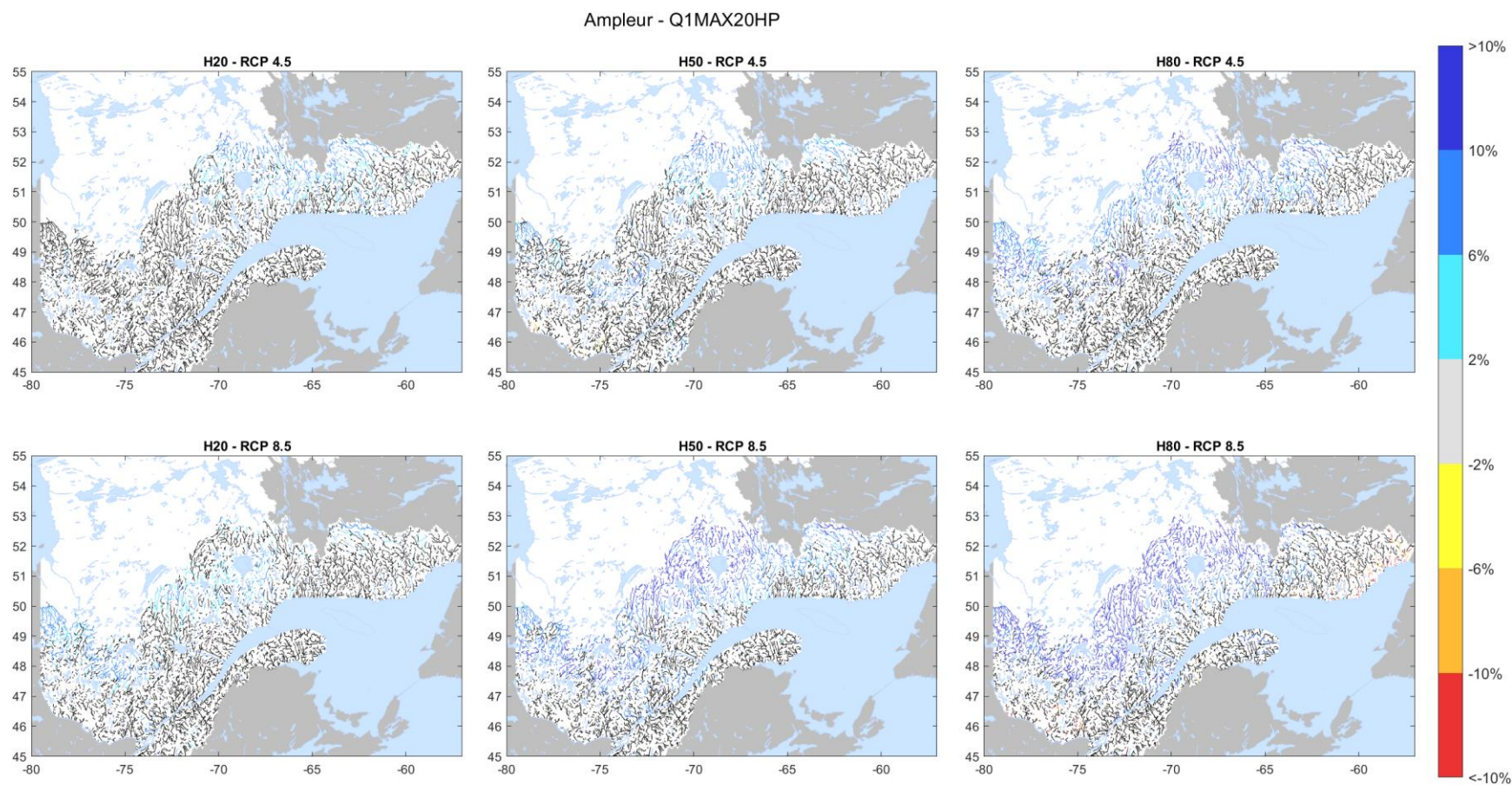


Figure 43. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX20HP
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q1MAX20HP : Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence de 20 ans.

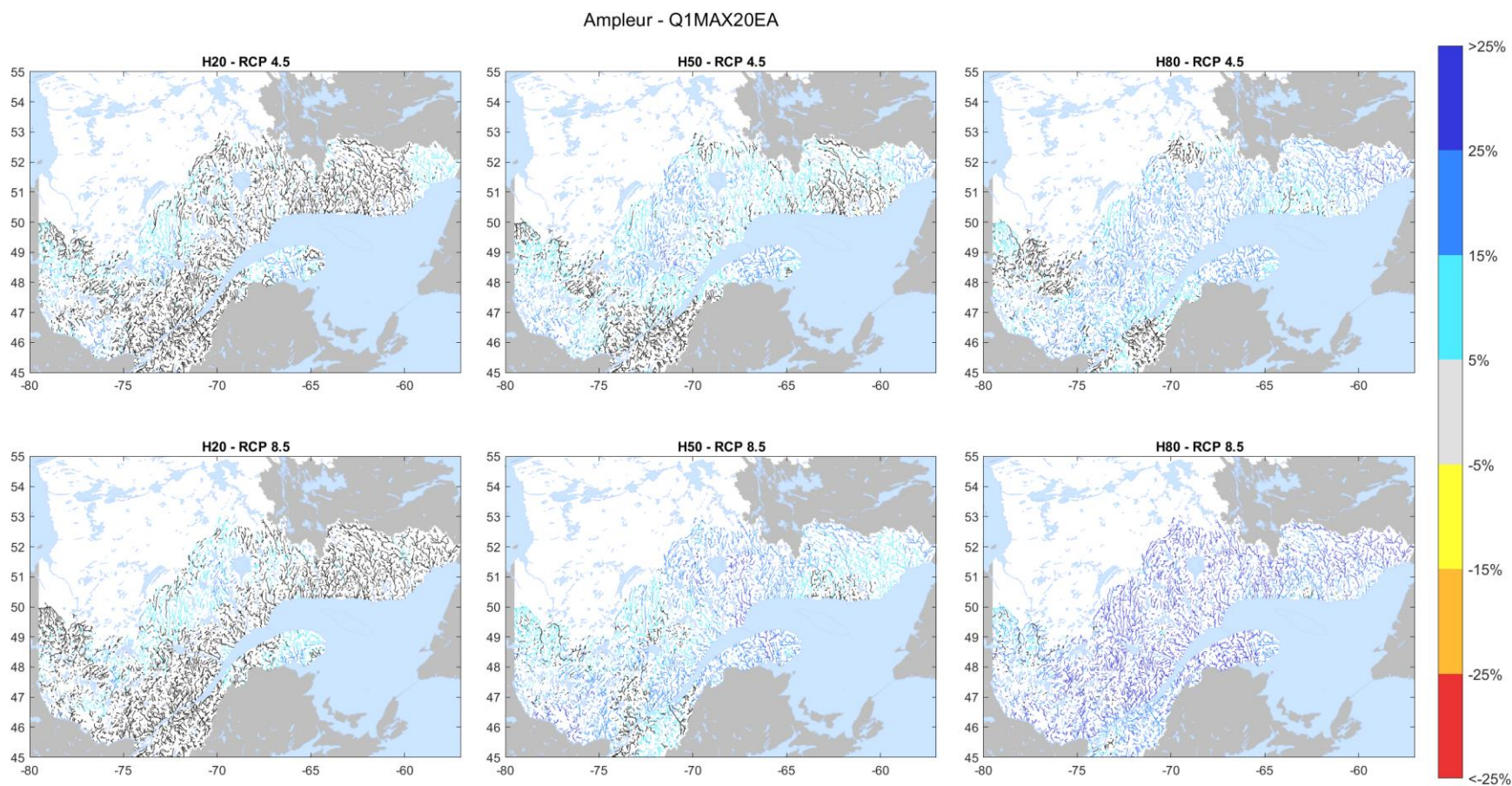


Figure 44. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q1MAX20EA
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q1MAX20EA : Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence de 20 ans.

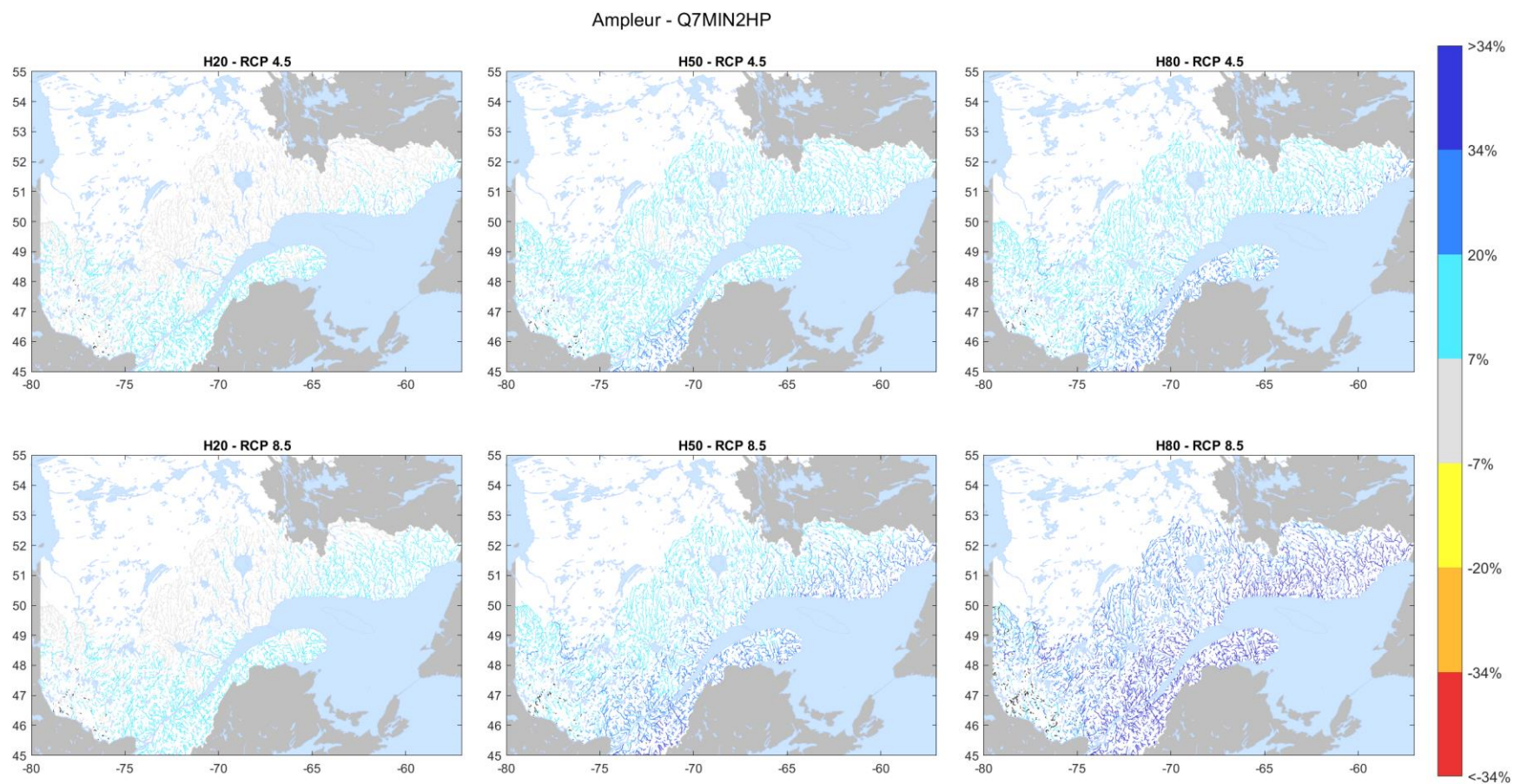


Figure 45. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q7MIN2HP
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q7MIN2HP : Débit moyen sur 7 jours minimal sur la période hiver-printemps de récurrence de 2 ans.

Ampleur - Q7MIN2EA

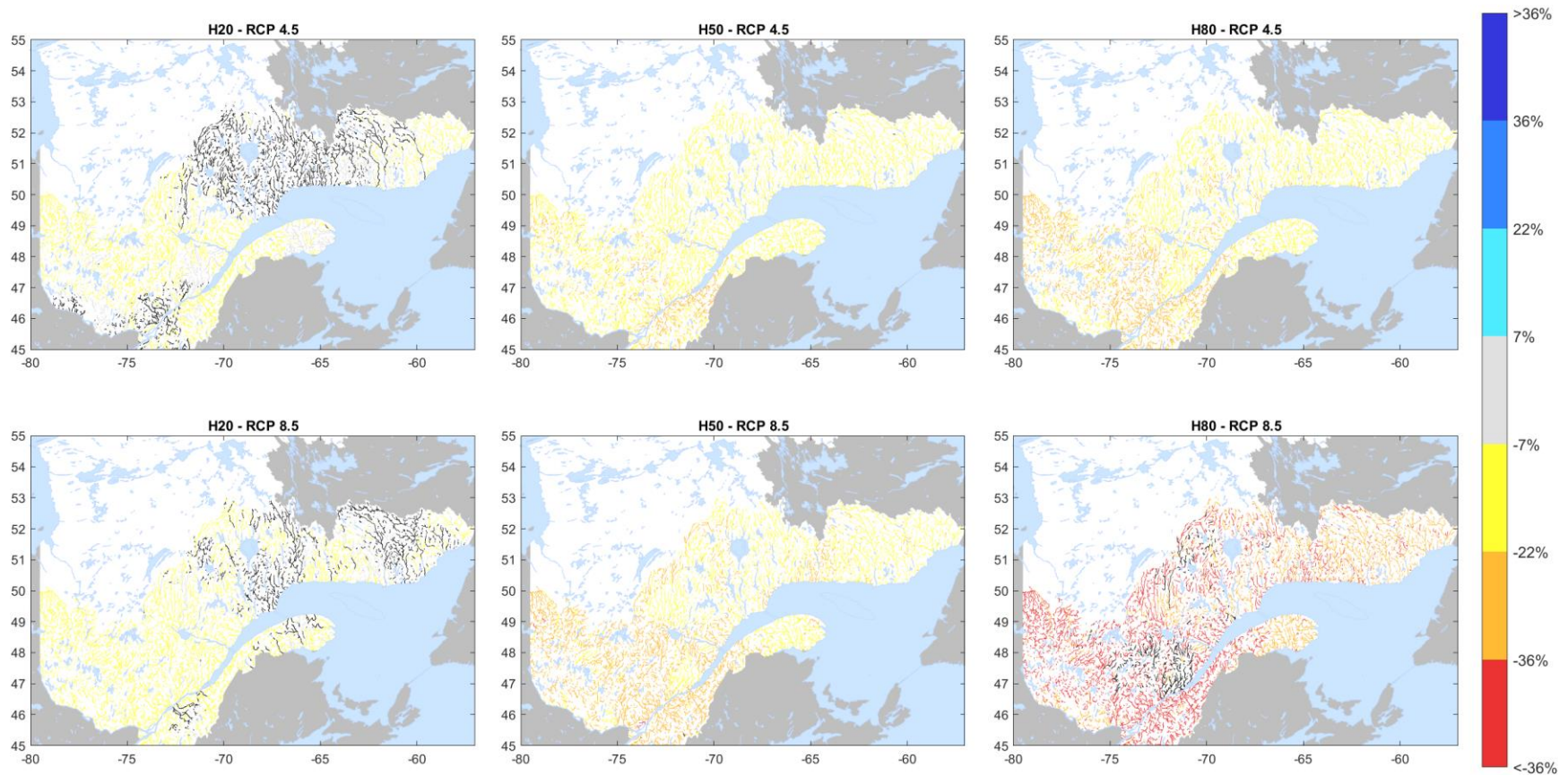


Figure 46. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur Q7MIN2EA

En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. Q7MIN2EA : Débit moyen sur 7 jours minimal sur la période été-automne de récurrence de 2 ans.

Ampleur - QMOYAN

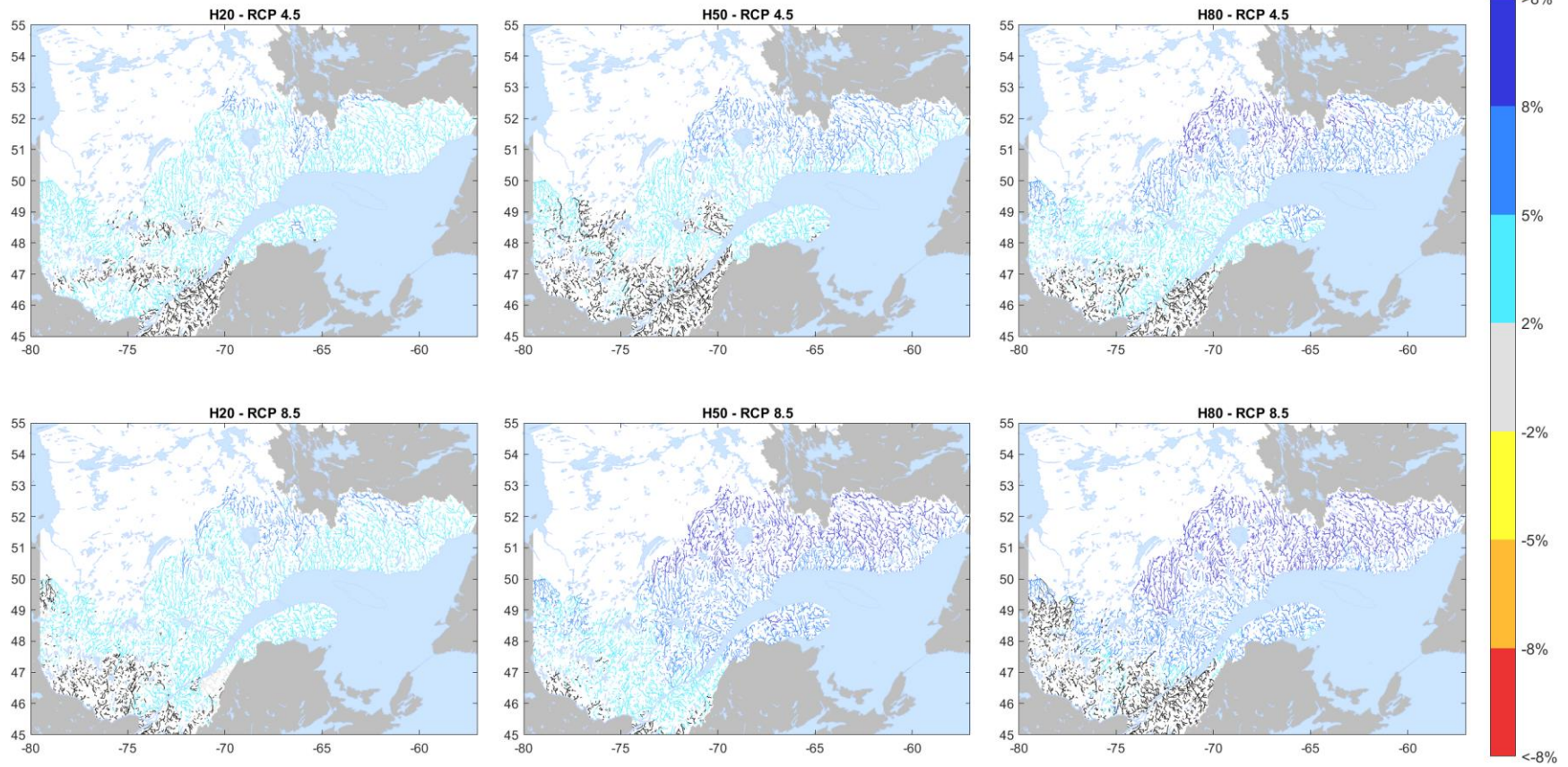


Figure 47. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYAN
En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. QMOYAN : Débit moyen annuel.

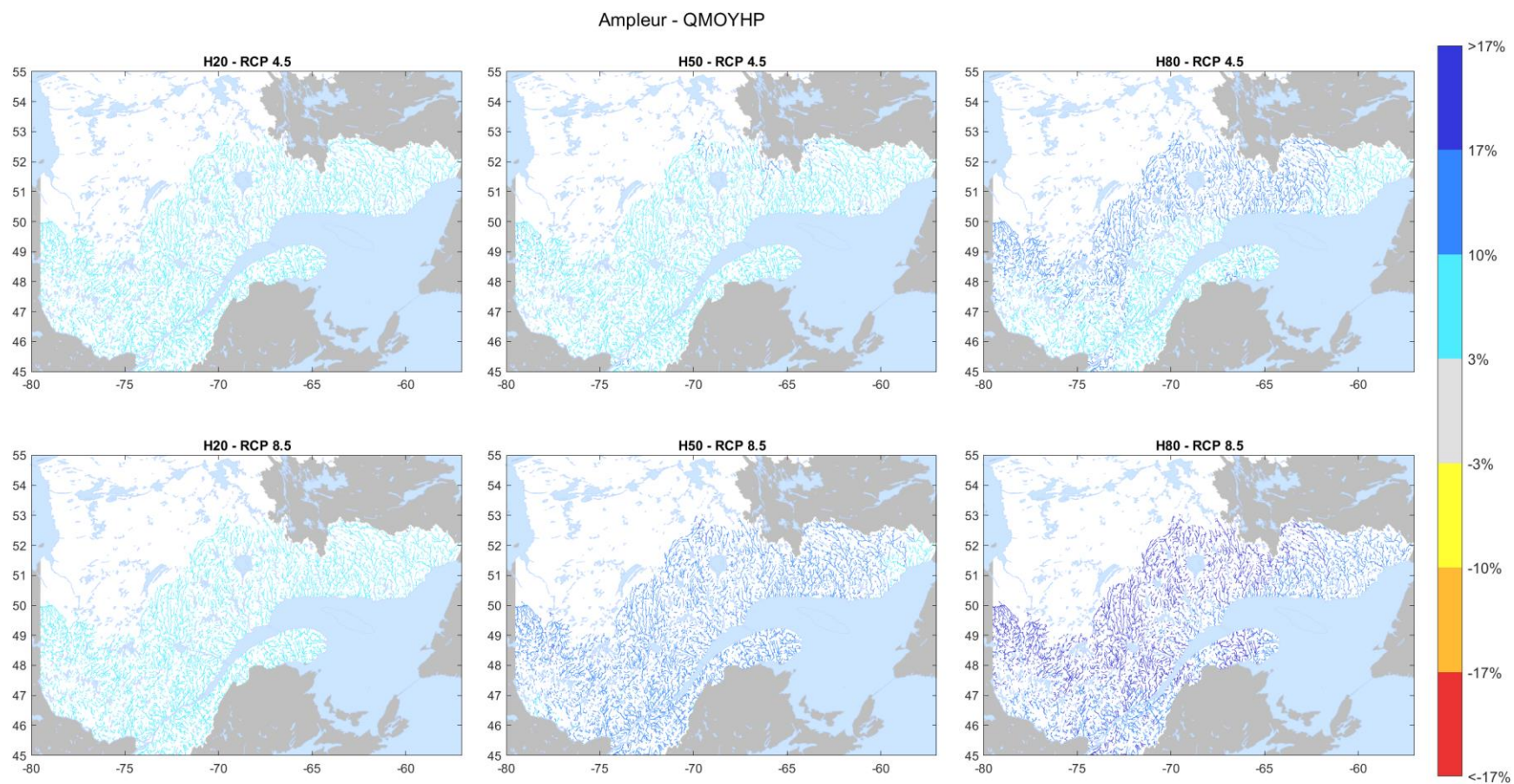


Figure 48. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYHP
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. QMOYHP : Débit moyen sur la période hiver-printemps.

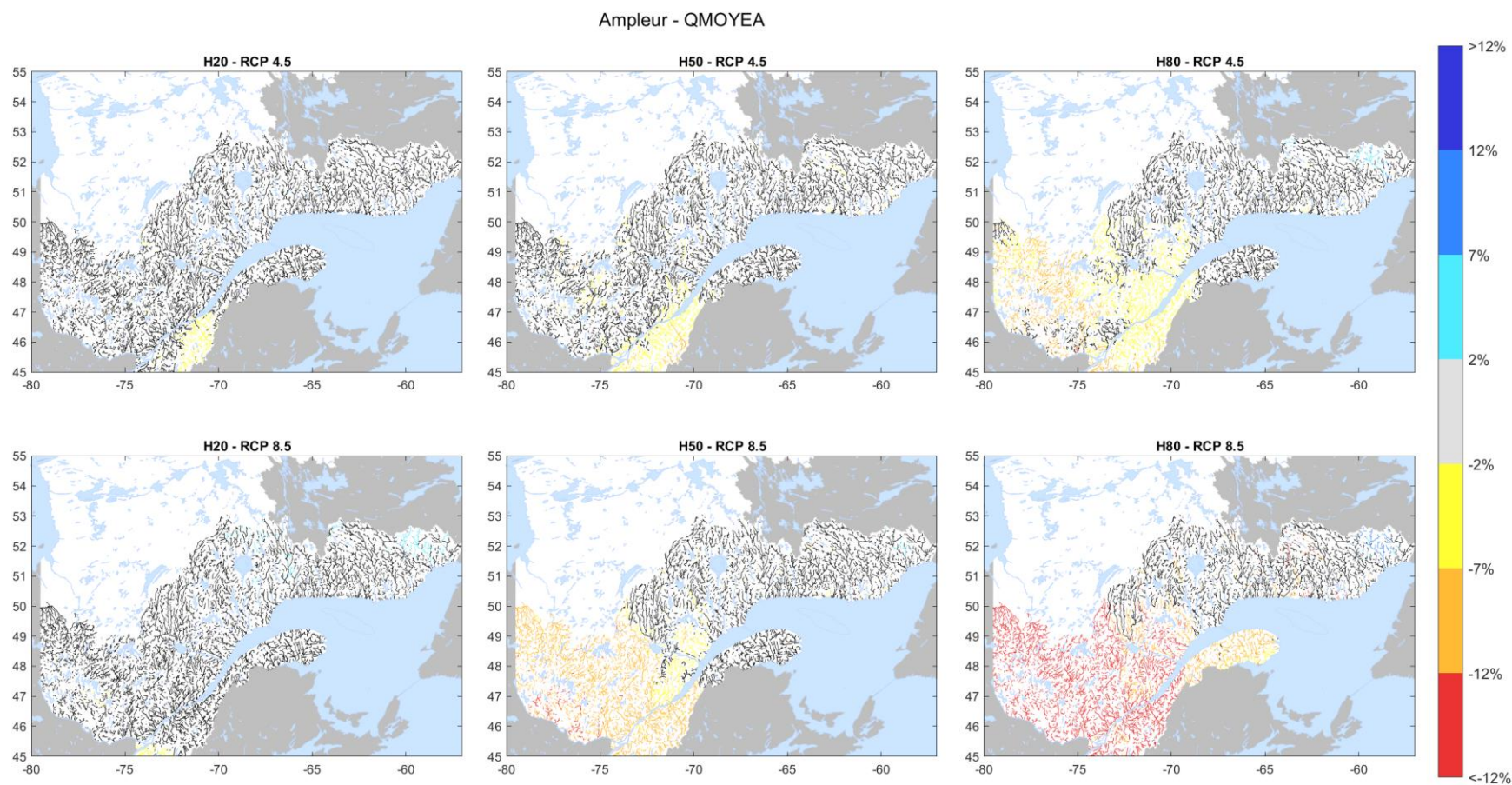
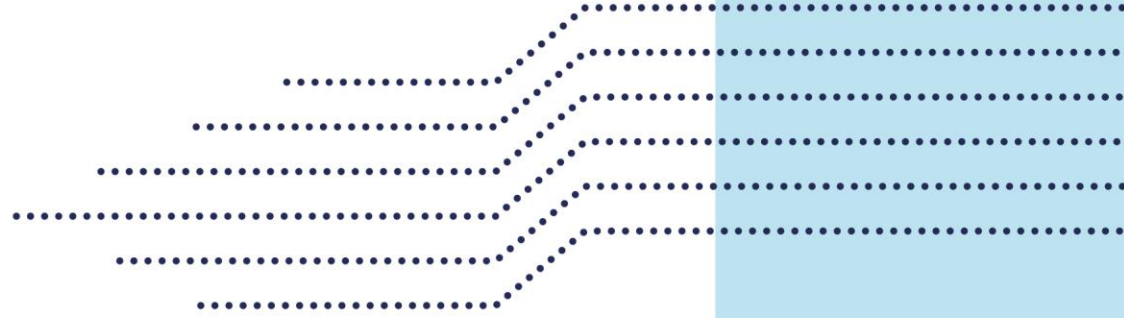


Figure 49. Carte de l'ampleur du changement pour l'indicateur QMOYEA
 En noir, les tronçons présentant une absence de consensus sur la direction. QMOYEA : Débit moyen sur la période été-automne.



*Environnement,
Lutte contre
les changements
climatiques,
Faune et Parcs*

Québec 