



Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique

2018



Québec 

Équipe de réalisation

Réalisation

Simon Lachance-Cloutier, ing., M. Sc.

Simon Ricard, ing., M. Sc.

Charles Malenfant, ing. Jr, M. Sc.

Jean-François Cyr, ing., M. Sc.

Collaboration

Martin-Pierre Lavigne, M. Sc.

Richard Turcotte, ing., Ph. D.

Jean Francoeur, ing., M. Sc.

Dominique Paquin, M. Sc. (Ouranos)

Nathalie Bacon (Université Laval)

Crédit photo

Direction de l'expertise hydrique, MDDELCC, 2018

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018

ISBN 978-2-550-82571-5 (PDF)

© Gouvernement du Québec, 2018

Notice bibliographique recommandée

Direction de l'expertise hydrique. *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018, 34 p.

Pour information

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Direction de l'expertise hydrique

675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7

Aile Louis-Alexandre-Taschereau, 4^e étage, boîte 28

Téléphone : 418 521-3993

Télécopieur : 418 643-6900

Courriel : atlas.hydroclimatique@mddelcc.gouv.qc.ca

Site Internet : www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique

Faits saillants

Au cours du 21^e siècle, les changements climatiques modifieront le régime d'écoulement des cours d'eau du Québec méridional et mettront une pression sur la conciliation des usages de l'eau. Sur la base des projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est possible d'anticiper que :

- Le risque d'inondation sera plus important à l'automne, découlant de l'occurrence plus fréquente des queues d'ouragan sur l'Est de la province. L'occurrence des forts débits favorisera l'érosion des berges, les inondations subites et le lessivage des sols, exerçant une pression sur la qualité de l'eau.
- Le risque de sécheresse sera plus important en été sur l'ensemble du territoire, découlant d'une plus forte évapotranspiration, ce qui augmentera la pression exercée sur l'approvisionnement en eau, les écosystèmes aquatiques et diverses activités récréatives.
- La disponibilité des eaux de surface sera globalement modifiée. Elle sera plus forte en hiver et plus faible en été, ce qui affectera la production hydroélectrique et l'approvisionnement en eau potable.

Ces éléments militent en faveur d'un développement de pratiques résilientes de gestion de l'eau.

Glossaire

Ampleur : Valeur médiane des changements relatifs produits par les différentes projections hydroclimatiques entre un horizon futur et la période de référence.

Bassin versant primaire (BV primaire) : Bassin versant principal dans lequel se trouve le tronçon sélectionné. Un bassin versant est une unité géographique représentant le territoire de drainage d'un point donné appelé « exutoire ».

CMIP5 : « Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 ». Le plus récent ensemble de simulations climatiques réalisé sous la direction du Working Group on Coupled Modelling (WGCM) et soutenant la rédaction du cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cet ensemble a été réalisé à partir de différents modèles climatiques et pour différents RCP (« Representative Concentrating Pathways »; voir la définition plus loin).

Crue : Période de fort débit.

Direction : Proportion des projections hydrologiques indiquant l'augmentation (ou la diminution) éventuelle d'un indicateur donné.

- 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 associées 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.
- Diminution très probable : plus de 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une diminution.

Étiage : Période de faible débit.

GES : Gaz à effet de serre, tel que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃).

Horizon : Période future de 30 ans. L'horizon 2030 couvre la période 2021-2050, l'horizon 2050 correspond à la période 2041-2070 et l'horizon 2080 couvre la période 2071-2100.

Hydraulicité : Valeur moyenne de débits sur de longues périodes (mois, saison, année, etc.).

Indicateur : Expression mathématique quantifiant une composante du régime hydrique.

Influence de l'opération des barrages : Niveau d'influence potentiel de l'opération des barrages situés en amont sur les débits d'un tronçon.

MDDELCC : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Membre climatique : Groupe de simulations climatiques produites par un même modèle climatique et un même RCP (voir la définition plus loin) à partir de conditions initiales légèrement différentes.

Niveau de confiance : Jugement d'expert sur la capacité de la chaîne de modélisation hydroclimatique à reproduire un indicateur donné.

Période de référence : Période historique de 30 ans, allant de 1971 à 2000.

Projections hydroclimatiques : Ensemble de simulations du régime hydrologique en climat futur.

Québec méridional : Territoire de 726 000 km² couvrant les bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais, de la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord et d'une portion de l'Abitibi-Jamésie.

RCP : « Representative Concentration Pathways ». Scénarios d'émission et de concentration des gaz à effet de serre, 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 ».

Récurrence : Évaluation statistique à long terme de l'intervalle de temps moyen entre deux événements hydrologiques d'une intensité donnée.

Superficie drainée : Superficie du bassin versant modélisé en amont du tronçon sélectionné.

Valeur de référence : Valeur estimée d'un indicateur hydrologique au cours de la période de référence.

Table des matières

Glossaire	iii
Mise en contexte	1
1. L’Atlas hydroclimatique du Québec méridional : un outil d’adaptation aux changements climatiques	2
1.1. Nos rivières sous le climat de demain	3
1.2. L’Atlas hydroclimatique et la nécessité d’adapter notre gestion de l’eau aux changements climatiques	5
1.3. Comment l’Atlas est-il produit?.....	7
1.4. L’Atlas Hydroclimatique, un produit évolutif	8
2. L’estimation du débit des rivières en climat futur	11
2.1. Simuler le climat futur	11
2.2. Les modèles climatiques.....	13
2.3. Les gaz à effet de serre : les scénarios de concentrations RCP4.5 et RCP8.5	14
2.4. Post-traitement des simulations climatiques.....	16
2.5. Du climat au débit des rivières	16
3. Des débits actuels aux débits futurs : extraire le signal de changement	19
3.1. Le régime hydrique des cours d’eau : des hauts et des bas.....	19
3.2. Des indicateurs hydrologiques : un peu de statistiques pour décrire le régime hydrique	22
3.3. Les signaux de changement des indicateurs hydrologiques	25
3.4. Incertitude et niveaux de confiance sur le signal de changement.....	27
3.5. Limitations de l’Atlas 2018	29
Conclusion	30
Références	31
Remerciements	32

Mise en contexte

L'Atlas hydroclimatique 2018 comporte trois produits complémentaires : le présent guide (*Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique 2018*), ainsi que « l'Atlas hydroclimatique Web » et le « Rapport technique ». Ce document d'accompagnement est une introduction générale à l'hydrologie et aux changements climatiques s'adressant plus spécifiquement 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.

L'Atlas hydroclimatique Web¹ rend facilement accessible une description quantitative de la projection du régime d'écoulement pour 1 500 tronçons de rivières du Québec méridional. Cet outil dynamique présente la direction et l'ampleur des changements anticipés aux horizons 2030, 2050 et 2080 pour 28 indicateurs statistiques largement utilisés en gestion de l'eau. Le rapport technique, quant à lui, est un document s'adressant aux lecteurs spécialisés s'intéressant aux détails méthodologiques de la réalisation de l'Atlas 2018. Il est disponible sur demande (atlas.hydroclimatique@mddelcc.gouv.qc.ca).

Le présent guide est divisé en trois grandes parties. La première partie est une présentation générale de l'Atlas hydroclimatique; elle expose notamment les principaux enjeux liés à l'impact des changements climatiques sur le débit des rivières et les grands processus scientifiques et techniques qui sous-tendent la production de l'Atlas. La seconde partie expose la méthodologie d'évaluation des débits futurs des rivières en fonction de différentes projections décrivant l'évolution possible du climat. La troisième partie explique la production des différents indicateurs statistiques d'usage courant en gestion de l'eau et décrit les états saisonniers du régime hydrique des cours d'eau. L'incertitude, les niveaux de confiance et les limitations de l'Atlas sont également abordés dans cette dernière partie.

La portée de l'Atlas se limite aux aspects quantitatifs du régime d'écoulement naturel des rivières du Québec méridional. Il exclut donc des aspects tels que la pluviométrie, les eaux souterraines, la qualité et la température de l'eau, les écosystèmes aquatiques et lacustres.

¹ www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique

1. L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional : un outil d'adaptation aux changements climatiques

Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) 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 MDDELCC travaille depuis 2013 à la production de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Ce document présente l'état des connaissances sur la disponibilité actuelle et future des ressources en eau de surface du Québec méridional. On y décrit l'impact des changements climatiques sur les débits d'eau en rivières aux horizons 2030, 2050 et 2080 sur plus de 1 500 tronçons de rivières du Québec méridional. Le document 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 dans une perspective de développement durable. L'objectif des sections qui suivent est de répondre à la question suivante : *Qu'est-ce que l'Atlas hydroclimatique?*

1.1. Nos rivières sous le climat de demain



Le Québec possède d'abondantes ressources en eau, mais les changements climatiques auront inévitablement une incidence sur la distribution de ces ressources sur le territoire et dans le temps. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014), les changements climatiques sont sans équivoque et l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), produits par les activités humaines en est la cause principale. La plus récente synthèse du consortium Ouranos (Ouranos, 2015) prévoit que la température moyenne du Québec méridional devrait augmenter de deux à quatre degrés d'ici 2050 et de quatre à sept degrés d'ici 2100. On peut également s'attendre à davantage de précipitations à l'hiver et au printemps ainsi qu'à des épisodes de précipitations extrêmes plus fréquents et plus intenses à l'été et à l'automne. À l'autre bout du spectre, bien que les tendances soient moins nettes, la synthèse du consortium Ouranos évoque un accroissement des conditions de sécheresse, particulièrement en saison estivale.

Élément notable, il apparaît, dans la synthèse d'Ouranos, que c'est à l'égard des conditions extrêmes que se manifesteront avec le plus d'intensité les impacts des changements climatiques :

- *Selon les projections, les températures extrêmes maximales en été augmentent plus que les températures moyennes estivales. De la même manière, les températures extrêmes minimales en hiver augmentent aussi plus que les températures moyennes hivernales.*
- *On s'attend à des hausses significatives pour tous les indices de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec.*

Ces modifications climatiques auront vraisemblablement des impacts importants sur l'hydrologie du Québec méridional. Comme les changements climatiques influent sur toutes les composantes du cycle de l'eau qui interagissent entre elles, la nature de ces impacts est complexe.

Les principaux impacts sur l'hydrologie sont les suivants :

- Les étiages seront plus importants en été, ce qui augmentera la pression exercée sur l'approvisionnement en eau, les écosystèmes aquatiques et diverses activités récréatives;
- Les crues seront plus intenses à l'été et à l'automne, favorisant l'érosion des berges, les inondations subites, le rejet d'eaux usées par surverse et le lessivage des sols, ce qui aura un impact sur la qualité de l'eau;
- Le cycle de l'eau sera globalement modifié et présentera une hydraulité plus forte en hiver, plus faible en été et plus forte dans le nord du territoire, ce qui aura notamment des répercussions sur la production hydroélectrique.

Toutefois, l'intensité de ces impacts varie de façon importante selon les caractéristiques des rivières et leur localisation sur le territoire.

Les modifications du cycle de l'eau devraient être de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin du siècle. Pour le siècle suivant, une grande partie de la réponse dépendra des efforts consentis mondialement dans la lutte aux changements climatiques et dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours des prochaines décennies.

1.2. L'Atlas hydroclimatique et la nécessité d'adapter notre gestion de l'eau aux changements climatiques



Les changements appréhendés du cycle hydrologique auront vraisemblablement des impacts concrets sur les différents usages de l'eau d'un territoire et sur leur gestion. Les prélèvements d'eau, la sécurité des populations, des aménagements et des milieux naturels riverains soumis aux aléas d'inondation et d'érosion, la gestion des volumes d'eau par les barrages, la conception d'ouvrages de drainage, l'intégrité des écosystèmes aquatiques et des infrastructures riveraines, la gestion des rejets d'eaux usées, le maintien des activités récréotouristiques et la préservation de la biodiversité en sont quelques exemples.

- L'une des premières préoccupations lorsqu'il est question de l'usage de l'eau est celle du **prélèvement d'eau**, et en particulier de la **qualité** et la **quantité** de l'eau. En conditions de forts débits, la qualité de l'eau peut être affectée par les phénomènes d'inondation et d'érosion. Il peut s'ensuivre une contamination des prises d'eau potable, des terres agricoles, des habitats fauniques ou floristiques, des plages, etc. Par ailleurs, les périodes de sécheresse prolongée peuvent réduire de façon importante le débit des rivières (étiage) et faire craindre un risque d'approvisionnement insuffisant en eau, ou une concentration importante en contaminants en raison des capacités de dispersion réduites des cours d'eau. Face au risque de voir ces phénomènes s'accroître en fréquence et en intensité, il sera nécessaire d'adapter la gestion des prélèvements d'eau, non seulement pour préserver la disponibilité quantitative, mais aussi l'intégrité qualitative des sources et des bassins versants.

- Lors d'épisodes de forts débits, les **inondations** et l'**érosion** du lit ou des berges d'un cours d'eau peuvent porter atteinte à la sécurité des personnes, des habitations et des infrastructures riveraines. Les mesures d'adaptation se discutent autour de projets de stabilisation des berges, de mesures d'immunisation des propriétés situées en zones inondables et de mesures de gestion adaptée de l'aménagement du territoire. L'étendue et l'efficacité de ces mesures pourraient devoir être revues à la lumière des impacts potentiels des changements climatiques sur l'intensité et la fréquence de ces phénomènes.
- La **gestion des barrages** nécessite souvent une gestion des volumes stockés, tant pour réduire les risques d'inondation que pour pouvoir disposer des réserves suffisantes au maintien des divers usages en eau en période de faibles débits et de sécheresse. Or, cette gestion se fait avec une incertitude sur l'ampleur et le moment d'apparition des forts débits au cours de l'année, ainsi que sur la possibilité de crues exceptionnelles qui soulèvent chaque fois l'enjeu de la sécurité et de la protection des ouvrages eux-mêmes. À ce contexte s'ajoute aussi l'incertitude en raison des changements climatiques et quant à la nécessité d'analyser les besoins d'adapter tant la gestion que la conception de ces ouvrages.
- La **conception d'ouvrages de drainage** (fossés, ponceaux, ponts routiers, etc.) nécessite l'évaluation des débits de crue et la vérification de leur adéquation aux normes. Compte tenu de l'incertitude liée à la détermination des changements attendus, dont ceux relatifs à l'amplitude et la fréquence des forts débits, il est notamment recommandé d'adopter une bonne pratique de conception, classique en ingénierie, consistant à valider la sensibilité de la conception d'un ouvrage à différents scénarios de débits. Cette approche prudente permet d'élargir le spectre des conditions possibles auxquelles l'ouvrage pourrait être soumis et pour lesquelles il devra maintenir le niveau de service visé.
- La variabilité des débits et des niveaux des cours d'eau est en général essentielle à la santé des **écosystèmes**. Les épisodes de hauts niveaux peuvent, par exemple, contribuer au maintien et à la régénération de milieux humides riverains, de même que procurer des vitesses d'écoulement élevées favorisant un nettoyage naturel des lits des cours d'eau. Par contre, les impacts de crues exceptionnelles peuvent se révéler négatifs si celles-ci conduisent à l'altération ou à la destruction d'habitats. Il en

va de même des épisodes d'étiage. Bien que des périodes occasionnelles de basses eaux puissent avoir certains effets bénéfiques sur la biodiversité, des sécheresses extrêmes et prolongées peuvent porter atteinte à la survie de certaines espèces ou de certains habitats. Or, les changements climatiques, en apportant des modifications au régime des crues et des étiages estivaux, pourraient influencer sur les cycles naturels de certaines espèces fauniques ou floristiques, aquatiques ou riveraines.

Dans cette perspective, la prise en compte de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique s'impose comme un facteur incontournable pour s'assurer d'une meilleure évaluation des solutions et favoriser la mise en place de mesures cohérentes d'adaptation qui soutiendront au mieux la résilience des collectivités et des écosystèmes.

C'est en réponse à ce besoin que le MDDELCC, par l'entremise de son Plan d'action sur les changements climatiques, œuvre à la production d'un Atlas hydroclimatique dont la première version a été produite en 2013.

1.3. Comment l'Atlas est-il produit?

La production de l'Atlas hydroclimatique repose, dans un premier temps, sur l'utilisation de plusieurs simulations de l'évolution du climat réalisées par différents groupes de modélisation climatique de partout dans le monde. Ces simulations servent à établir des scénarios climatiques plausibles pour le futur. Elles produisent, sur de longues périodes de temps s'étendant généralement jusqu'à la fin du siècle, des séquences d'événements météorologiques qui sont possibles en fonction des concentrations de gaz à effet de serre anticipées. Elles ne servent pas à prévoir spécifiquement ce qui se passera à un jour donné dans le futur, mais plutôt à évaluer différentes trajectoires possibles. L'utilisation d'une diversité de scénarios est un élément essentiel de l'analyse, car elle permet ainsi une certaine prise en compte de l'incertitude inhérente à l'exercice de projection de l'impact des changements climatiques. En faisant des statistiques sur ces différents scénarios, il est possible de dégager les grandes tendances qui correspondent aux signaux de changements climatiques.

Dans un deuxième temps, les différents scénarios climatiques sont utilisés pour alimenter un modèle hydrologique implanté sur l'ensemble du Québec méridional. Le rôle du modèle hydrologique est de reproduire les principaux processus physiques agissant à l'échelle du bassin versant et essentiellement de traduire les scénarios climatiques en scénarios de

débits d'eau en rivières. Ainsi, on en arrive à produire des simulations de débits journaliers moyens en rivières pour une période de temps s'étendant de 1970 à 2100 et pour laquelle, à l'aide de statistiques, il est possible d'illustrer l'évolution des tendances actuelles et futures de ces débits. Les deuxième et troisième parties du présent document décriront, dans de plus amples détails, les différentes étapes suivies pour en arriver aux résultats présentés dans l'Atlas.

1.4. L'Atlas Hydroclimatique, un produit évolutif

Depuis ses premières parutions en 2013 et en 2015 sous forme d'un rapport en ligne, le contenu de l'Atlas hydroclimatique a constamment évolué. Il est important de mentionner que les différentes versions de l'Atlas ont toujours été produites avec un souci de continuité et d'évolution. Les mises à jour sont nécessaires avec l'avancement de la



science en modélisation climatique et rendues possibles grâce à l'amélioration des capacités techniques, telle l'utilisation de superordinateurs. Les messages des versions précédentes de l'Atlas sont toujours valides. Les mises à jour permettent d'ajouter de l'information (nouveaux horizons de projection, couverture de nouvelles régions, etc.), de mieux définir notre niveau de confiance et de mieux cerner les composantes d'incertitude. Avec la mise à jour 2018, l'Atlas couvre aujourd'hui l'ensemble du Québec méridional et intègre la cinquième génération des simulations du climat proposées par le GIEC. L'édition 2018 de l'Atlas hydroclimatique se distingue notamment par sa cartographie Web dynamique d'où il est possible de consulter plus de 28 indicateurs statistiques sur les débits d'eau de plus de 1 500 tronçons de rivières du Québec méridional, et ce, pour les horizons 2030, 2050 et 2080.

D'ici la prochaine édition en 2020, les principaux efforts déployés viseront à augmenter le nombre de rivières modélisées et à améliorer l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les crues menant aux inondations riveraines les plus importantes.

Ces améliorations constantes visent à mieux répondre aux besoins des usagers. Ceux-ci ont notamment été identifiés dans le cadre d'une phase de consultation qui a précédé l'élaboration de la version 2018 de l'Atlas hydroclimatique. Des séances de consultation

tenues à l'automne 2016 ont permis de recueillir les avis de divers utilisateurs provenant de ministères et organismes québécois, d'organismes sans but lucratif ayant des mandats en gestion intégrée de l'eau et de firmes de génie-conseil actives dans le domaine.

Pour atteindre son objectif, l'Atlas doit être un outil utile, mais surtout utilisé. L'Atlas propose de précieuses données sur les régimes hydrologiques futurs, mais c'est l'appropriation de ces connaissances par tous les niveaux d'acteurs en lien avec les usages de l'eau qui peut permettre la multiplication des actions d'adaptation.

Les nouveautés en 2018

Par rapport aux éditions précédentes (CEHQ, 2013 et 2015), les principales nouveautés de la mise à jour 2018 sont les suivantes :

1. La couverture complète de la Côte-Nord par la plateforme de modélisation et **l'augmentation de sa résolution spatiale** sur la portion de la rive sud du fleuve Saint-Laurent;
2. La mise en place et l'usage de deux variantes de la plateforme afin d'inclure des éléments de l'incertitude associée aux choix méthodologiques hydrologiques;
3. L'**interpolation spatiale des indicateurs hydrologiques** sur le domaine non jaugé;

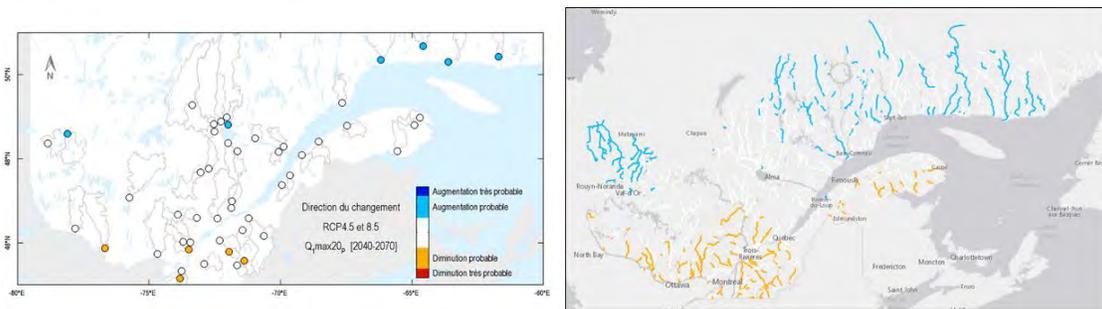


Figure 1. Comparaison de l'Atlas 2015 (à gauche) et de l'Atlas 2018 (à droite) pour l'indicateur $Q_{1max20p}$ (débit journalier maximal annuel de récurrence de 20 ans au printemps). Le message général n'a pas changé, mais l'information est maintenant disponible sur un plus grand territoire.

4. La projection des indicateurs hydrologiques en valeur absolue (en mètre cube par seconde);
5. L'**ajout des horizons** 2030 (période 2021-2050) et 2080 (période 2071-2100), en plus de l'**horizon** 2050 (période 2041-2070) pour les projections;
6. La diffusion de l'Atlas via une interface géographique Web.

2. L'estimation du débit des rivières en climat futur

La partie 2 présente un survol des différentes étapes franchies pour produire des scénarios de débit en climat futur. Elle vise à expliquer au lecteur le « comment » de l'Atlas hydroclimatique. Dans un premier temps, on y aborde la question de la production de scénarios climatiques, puis, dans un second temps, la façon dont ces scénarios sont utilisés afin de projeter l'écoulement de l'eau en rivière au cours du prochain siècle.

2.1. Simuler le climat futur

L'Atlas hydroclimatique s'appuie sur des simulations climatiques réalisées par différents centres de modélisation de partout dans le monde. Coordonnés par le World Climate Research Programme (WCRP), ces centres ont collaboré à la création d'un ensemble de simulations nommé CMIP5, acronyme anglais *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5* (Taylor et coll., 2012). Les scénarios climatiques de l'ensemble CMIP5 ont notamment été utilisés par le GIEC pour la rédaction du cinquième rapport d'évaluation (AR5) sur les changements climatiques.

Pour la production de l'Atlas hydroclimatique 2018, 98 simulations climatiques de l'ensemble CMIP5, produites par 29 modèles climatiques de circulation générale différents, ont été utilisées (Tableau 1).

Tableau 1 – Simulations climatiques de l'ensemble climatique CMIP5 utilisées pour produire l'Atlas hydroclimatique 2018

Modèle	Institution	RCP4.5*	RCP8.5*
ACCESS1.0	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) et BOM (Bureau of Meteorology), Australie	1	1
ACCESS1.3		1	1
BCC-CSM1.1(m)	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, Chine	1	1
BCC-CSM1.1		1	1
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Chine	1	1
CanESM2	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique , Canada	5	5
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italie	0	1
CMCC-CM		1	1
CMCC-CMS		1	1
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique, France	1	1
CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, en collaboration avec le Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australie	10	10
FGOALS-g2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, et CESS, Tsinghua University, Chine	1	1
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, États-Unis	3	1
GFDL-ESM2G		1	1
GFDL-ESM2M		1	1
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies, États-Unis	1	0
GISS-E2-R		1	0
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	4	4
IPSL-CM5A-MR		1	1
IPSL-CM5B-LR		1	1
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics, Russie	1	1
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies et Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japon	3	3
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) et National Institute for Environmental Studies, Japon	1	1
MIROC-ESM		1	1
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Allemagne	3	3
MPI-ESM-MR		3	1
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japon	1	1
MRI-ESM1		0	1
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norvège	1	1
	Total	51	47

* Nombre de membres par simulation. Les RCP4.5 et RCP8.5 sont expliqués à la section 2.1.2.

2.2. Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des représentations numériques des interactions et des rétroactions entre l'atmosphère, les océans, les eaux douces, la cryosphère, les terres émergées et la biosphère (Figure 2). Les modèles climatiques dits globaux ont une résolution spatiale généralement grossière, leur maillage étant composé de colonnes verticales structurées sur une base sphérique à l'échelle de la planète. Les modèles climatiques jouent un rôle important dans l'analyse des changements climatiques en permettant de simuler l'impact de l'augmentation des GES sur le climat. Ces modèles simulent des variables météorologiques (p. ex., température, précipitations, pression atmosphérique, humidité, ensoleillement) sur de longues périodes continues. Les changements climatiques sont déterminés en comparant les propriétés statistiques de ces variables sur des périodes distinctes et suffisamment longues, généralement 30 ans (p. ex., au cours de la période de 2041 à 2070, la température moyenne en janvier augmenterait de quatre degrés Celsius par rapport à la période de 1970 à 2000). L'étude du climat se distingue donc de la météorologie, une science dont l'objectif consiste à prédire les conditions de l'atmosphère sur un court horizon de temps (quelques heures à environ dix jours). Plusieurs sources d'incertitude sont à considérer lors de l'utilisation de modèles climatiques. Une première source, dite irréductible, émane de la nature chaotique et aléatoire des phénomènes atmosphériques. Cette incertitude est estimée par la production de membres climatiques, c'est-à-dire des simulations produites par un même modèle climatique et un même RCP (présenté à la section suivante) à partir de conditions initiales légèrement différentes. Une deuxième source d'incertitude est liée à la trajectoire future d'émissions de GES qui dépendra de choix humains et politiques difficiles à prédire. L'incertitude émane finalement du fait que les modèles climatiques sont des approximations de la réalité et que leur représentation des processus atmosphériques et océaniques est incomplète. Ces deux derniers types d'incertitude sont évalués en recourant à des ensembles climatiques composés de plusieurs modèles et RCP.

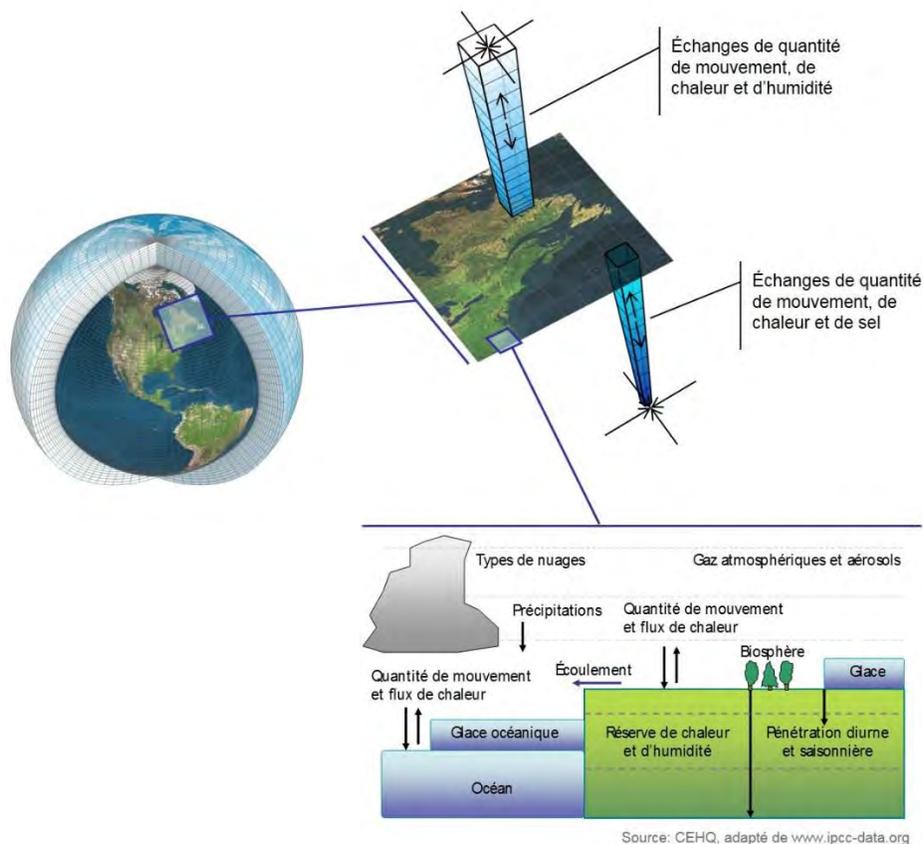


Figure 2. Schématisation d'un modèle de climat global

2.3. Les gaz à effet de serre : les scénarios de concentrations RCP4.5 et RCP8.5

Pour simuler un climat en changement, les modèles ont besoin de connaître l'évolution des GES atmosphériques. Pour le passé, les observations de GES sont utilisées. Pour le futur, une série d'évolutions probables, ou de scénarios d'émissions, a été produite selon des recommandations de l'Organisation des Nations Unies, reflétant les différentes trajectoires de développement que pourra suivre notre civilisation particulièrement jusqu'en 2100. Deux des familles de scénarios retenus par le GIEC ont été considérées pour l'Atlas, soit les scénarios nommés RCP4.5 et RCP8.5. Les RCP sont des scénarios de *trajectoires représentatives de l'évolution des concentrations* (« Representative Concentration Pathways » en anglais). Les valeurs numériques accolées à l'acronyme (4.5 et 8.5) expriment la perturbation du bilan radiatif (forçage radiatif) en watt par mètre carré (W/m^2) du système climatique terrestre à l'horizon 2100 par rapport à une référence

préindustrielle (~1800). Le RCP8.5 correspond donc à un système climatique plus perturbé, avec des émissions et des concentrations de GES plus élevées que celles considérées dans le RCP4.5.

Le RCP4.5 (4,5 W/m²) est généralement considéré comme un scénario « relativement optimiste », n'arrivant toutefois pas à limiter le réchauffement aux cibles fixées par l'accord de Paris sur le climat (sous la barre des 2 °C à l'échelle mondiale par rapport à ~1800). Il conduit à une hausse limitée de la température globale moyenne québécoise de 3,3 °C si l'on compare la période allant de 1981 à 2010 à celle allant de 2071 à 2100 (en bleu sur la Figure 3). Le RCP8.5 est quant à lui considéré comme étant un scénario « pessimiste » correspondant à une croissance soutenue des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il conduit à une hausse de la température globale moyenne québécoise de 6,3 °C si l'on compare les mêmes périodes (en rouge sur la Figure 3). Les RCP4.5 et RCP8.5 induisent des augmentations de températures assez similaires jusqu'en 2040, mais divergentes par la suite.

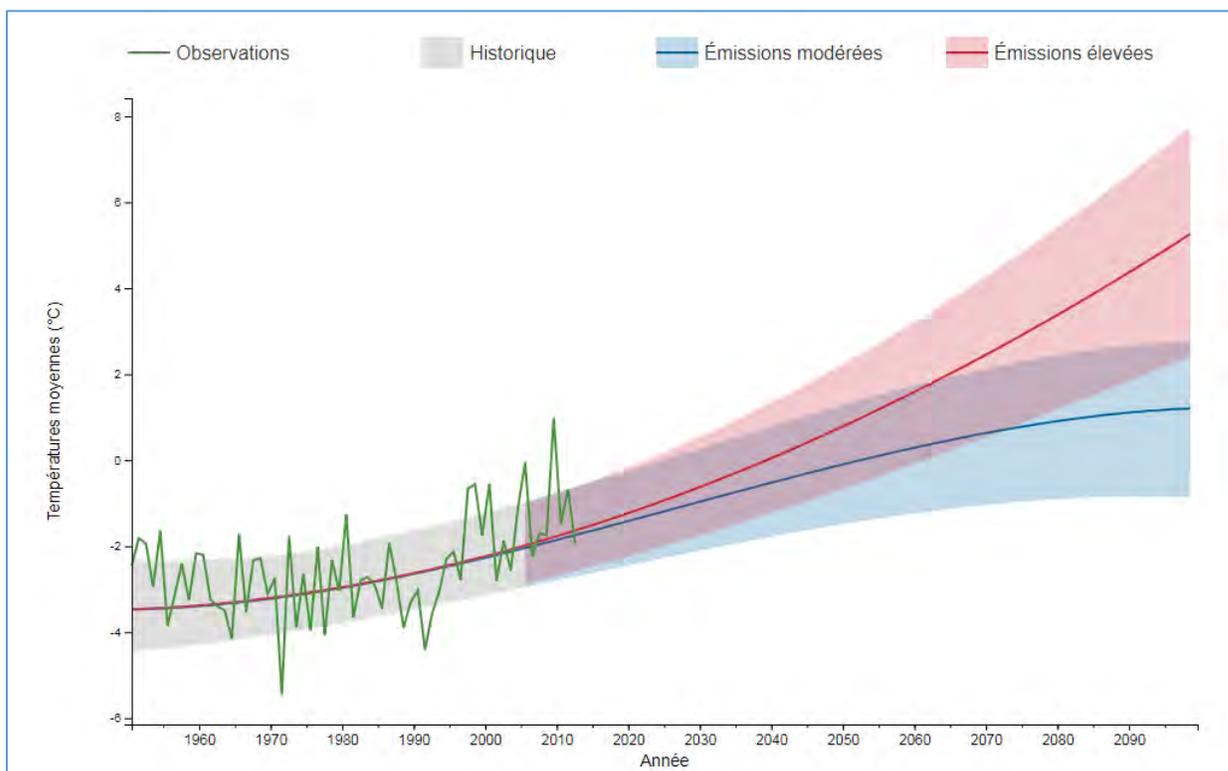


Figure 3. Moyenne annuelle des températures pour le Québec
(Source : Ouranos, <https://www.ouranos.ca/portraitsclimatiques/#/regions/0>)

2.4. Post-traitement des simulations climatiques

Les variables simulées par les modèles climatiques présentent généralement des biais statistiques plus ou moins importants lorsqu'on les compare aux observations. Ces biais se manifestent entre autres par des températures moyennes trop froides ou un nombre excessif de jours pluvieux. Les causes de ces biais sont multiples : résolution spatiale limitée, représentation numérique simplifiée, voire incomplète, des processus physiques et thermodynamiques, etc. Pour la production de l'Atlas hydroclimatique 2018, les biais des simulations climatiques ont été corrigés à l'aide de deux méthodes² de post-traitement : la correction par quantiles et la perturbation par quantiles des séries observées. Les simulations climatiques ayant subi un post-traitement sont généralement désignées sous le terme de scénario climatique.

2.5. Du climat au débit des rivières

Pour passer d'un scénario climatique à des données de débit en rivière, il faut partir des données climatiques de précipitations et de températures et simuler le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Plus techniquement, il s'agit de représenter les principaux processus responsables de la circulation de l'eau sur le territoire, tout en



tenant compte des caractéristiques physiographiques particulières de chacun des bassins versants. L'accumulation et la fonte du couvert de neige, l'évapotranspiration, l'écoulement de surface, l'écoulement dans le sol et l'écoulement en rivière sont des exemples de ces processus.

Ces différents processus ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques et un bon nombre d'entre eux sont bien connus et caractérisés. Plusieurs modèles ont été développés afin de les représenter sous forme d'algorithmes mathématiques. Mises bout à bout, ces représentations numériques constituent un modèle hydrologique, c'est-à-dire

² Pour la description de ces méthodes, se référer à la section « Éléments méthodologiques » de la mise à jour 2015 de l'Atlas hydroclimatique (CEHQ, 2015).

un programme informatique permettant de simuler numériquement l'écoulement des débits en rivières.

Pour produire l'Atlas hydroclimatique 2018, une implantation du modèle hydrologique Hydrotel (Fortin et coll., 2001) a été réalisée sur un territoire de 726 000 km² couvrant les bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais, de la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord ainsi qu'une portion de l'Abitibi-Jamésie (Figure 4).

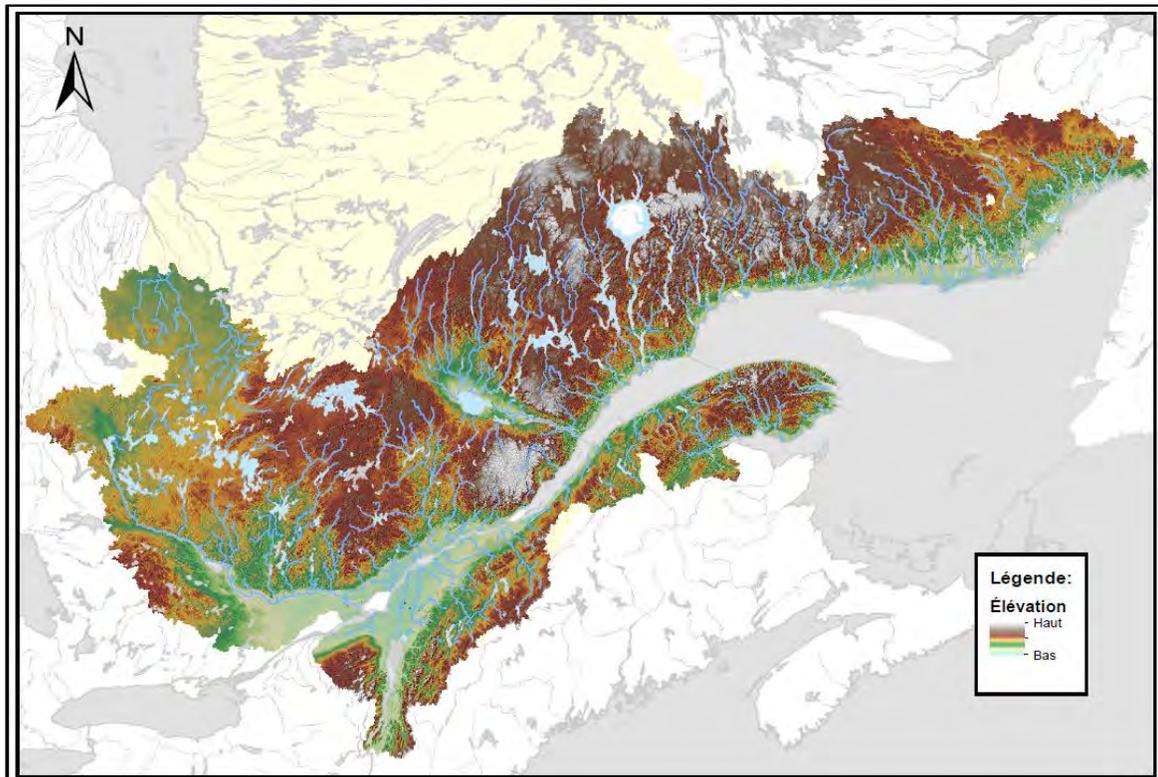


Figure 4. Réseau hydrographique modélisé

Les données de débits observés de plus de 50 stations hydrométriques en régime naturel, c'est-à-dire non-influencées par l'opération de barrages, ont été utilisées afin d'ajuster le modèle hydrologique. Cette étape d'ajustement du modèle, que l'on appelle calage, vise à ce que les débits simulés par le modèle concordent avec les débits mesurés aux différentes stations du réseau hydrométrique québécois.

Les différents scénarios climatiques de l'ensemble CMIP5 ont donc été utilisés afin d'alimenter en données de températures et de précipitations le modèle hydrologique. Au final, ce sont près de 200 scénarios hydrologiques, soit des séries journalières de débits couvrant la période de 1970 à 2100, qui sont obtenus pour chacun des 1 500 tronçons de

rivière modélisés. Ces scénarios permettent d'évaluer la gamme de variabilité possible des débits en fonction des concentrations de gaz à effet de serre du passé et des concentrations futures étudiées (RCP4.5 et RCP8.5). Il est donc possible, en comparant statistiquement passé et futur, d'évaluer les modifications possibles du cycle hydrologique en réponse aux changements climatiques appréhendés.

Cette deuxième partie du guide présentait une très brève introduction à la science des changements climatiques et aux méthodes en usage pour parvenir à des projections de débits en rivières aux horizons 2030, 2050 et 2080. En résumé, la chaîne de modélisation climatique et hydrologique vise simplement à reproduire, au mieux et dans certaines limites, les phénomènes physiques et les interactions qui se produisent naturellement dans l'environnement, à la différence qu'on peut le faire en accéléré tout en contrôlant certains paramètres.

La partie 3 poursuit en approfondissant certaines notions d'hydrologie pour comprendre entre autres comment extraire, de la variabilité naturelle du débit, des variables significatives comme des indicateurs statistiques.

3. Des débits actuels aux débits futurs : extraire le signal de changement

Cette partie vise à permettre une meilleure compréhension de la nature de l'information présentée dans l'Atlas hydroclimatique 2018. Pour y parvenir, on reviendra d'abord sur des notions générales en hydrologie avant d'expliquer au lecteur ce que sont les indicateurs hydrologiques et la manière dont ceux-ci sont utilisés pour caractériser les changements anticipés du régime hydrique.

3.1. Le régime hydrique des cours d'eau : des hauts et des bas

L'une des principales variables étudiées en hydrologie est le débit d'eau en rivière. Un débit d'eau est un volume d'eau s'écoulant par unité de temps. Le débit est généralement exprimé en mètre cube par seconde (m^3/s). L'hydrométrie est la branche de l'hydrologie ayant comme objet la mesure des débits et des niveaux d'eau. Le Québec compte sur un réseau hydrométrique



d'environ 230 stations mesurant les débits et/ou les niveaux de différents cours d'eau. Ces données d'observations constituent de précieuses informations pour comprendre les caractéristiques d'écoulement d'un bassin versant et évaluer les aléas hydrologiques comme le risque d'inondation. Elles sont aussi indispensables pour valider les modèles hydrologiques, c'est-à-dire s'assurer que les débits reproduits par les modèles correspondent bel et bien aux débits observés dans la réalité.

Au fil d'une année, les débits d'une rivière fluctuent énormément entre des périodes de forts et de faibles débits. Ces fluctuations sont le résultat des conditions météorologiques qui sévissent sur le bassin versant. En hydrologie, on utilise le terme « crue » pour désigner les épisodes de fort débit et le mot « étiage » pour parler des périodes de faible débit. Pour illustrer ces notions, la Figure 5 montre le débit de la rivière Chaudière mesuré par la station 023402 située à Saint-Lambert-de-Lauzon de septembre 2017 à septembre 2018. Ce type de figure (débit en fonction du temps) est nommé hydrogramme. Pour la station 023402, on constate qu'en 2017-2018, il y a eu un épisode d'étiage en décembre ainsi que de juin à septembre. Des épisodes de crues sont observés en novembre ainsi qu'au printemps (avril-mai) et ponctuellement durant les mois d'été.

À noter que la crue de la mi-janvier 2018 (plus de dix fois le débit moyen pour cette période) est particulière et liée à un embâcle.

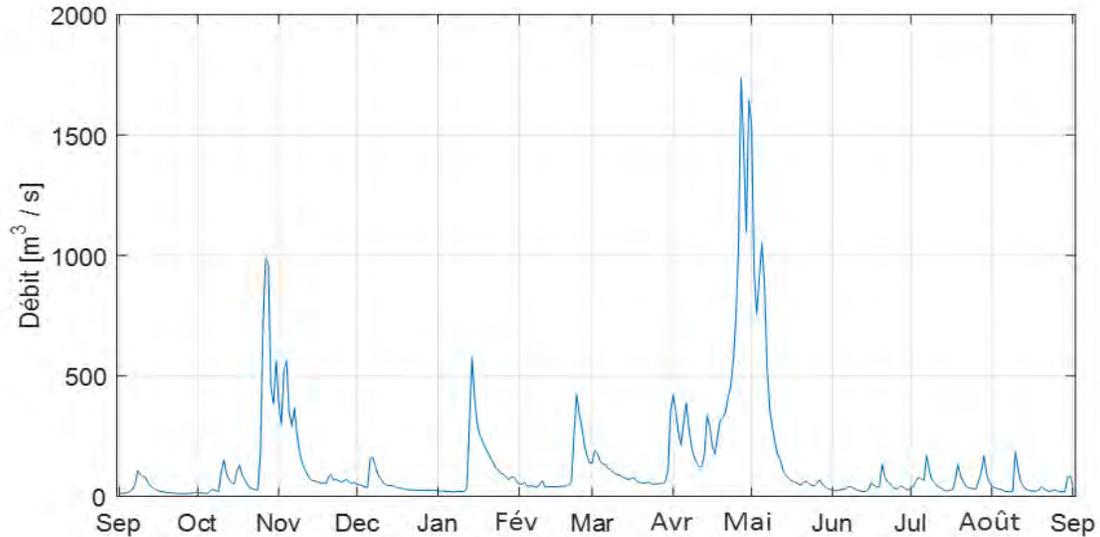


Figure 5. Débit observé (hydrogramme) à la station 023402 située sur la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon de septembre 2017 à septembre 2018

Au Québec, c'est souvent au printemps que l'on observe les débits les plus forts. Ceux-ci sont en grande partie provoqués par les apports en eau provenant de la fonte du couvert de neige. Au printemps, les événements hydrologiques extrêmes, comme les inondations du Richelieu en 2011 et celles du printemps 2017, sont en général causés par une fonte soutenue combinée à d'importantes quantités de précipitations liquides.

Bien que le printemps soit la saison la plus « active » hydrologiquement parlant, il n'est pas rare d'observer des crues au courant de l'été et de l'automne. Typiquement, pour les cours d'eau de moyenne à grande taille, les hausses de débits sont alors la cause de systèmes météorologiques d'envergure apportant des pluies abondantes de façon prolongée et sur d'assez larges portions du territoire. On peut citer à titre d'exemple le déluge du Saguenay à l'été 1996 ou, plus récemment, les inondations causées par la queue de l'ouragan Irène en août 2011. Les orages, souvent observés à l'été, peuvent également provoquer des crues rapides. Toutefois, étant donné la taille limitée des cellules orageuses, ce sont principalement les petits cours d'eau qui sont à risque de générer ce type d'événement. L'exemple de la Figure 5 est pour un grand bassin versant (superficie de 5 820 km²), ce qui explique que les crues estivales sont relativement petites comparativement à la crue printanière.

Lorsque le débit devient trop fort, il y a un risque d'inondation, car l'important volume d'eau n'arrive plus à s'écouler par le lit principal de la rivière. Le niveau d'eau augmente alors jusqu'à ce que l'écoulement puisse se poursuivre en empruntant la plaine de débordement du cours d'eau, inondant au passage les zones riveraines. Il importe de noter que l'usage des expressions « forts débits » ou « crues » n'implique pas nécessairement des impacts d'inondations sur le territoire. De nombreux facteurs tels que la forme du lit de la rivière, l'aménagement du territoire, le design des infrastructures comme les digues et routes ainsi que l'opération des barrages sont également des facteurs qui influencent le niveau de vulnérabilité et le risque d'inondation en un lieu donné.

En fait, on pourrait résumer la distinction entre les deux en disant que la crue est une « affaire de débit » et que l'inondation est une « affaire de niveau ». Dans certaines circonstances, il est d'ailleurs possible d'observer des inondations même si le débit d'une rivière n'est pas particulièrement élevé. C'est le cas par exemple des inondations causées par des embâcles de glaces, phénomène relativement courant au Québec.

À l'autre bout du spectre, lorsque ce ne sont pas les riverains qui craignent une surabondance d'eau, ce sont parfois les agriculteurs et les municipalités qui, eux, peuvent s'inquiéter du manque d'eau. Les périodes de faibles débits peuvent s'observer en été comme en hiver. En hiver, celles-ci sont provoquées par une absence prolongée d'apports en eau en raison des températures froides. En été, les températures chaudes et l'importante activité végétale sont la cause d'une évapotranspiration importante qui extrait l'eau contenue dans le sol pour la retourner vers l'atmosphère, sous forme de vapeur. Une période prolongée de température chaude et d'absence de précipitations est cause de sécheresse.

Bien que les étiages hivernaux soient plus sévères que les étiages estivaux pour un grand nombre de rivières, surtout celles situées au nord du fleuve Saint-Laurent, c'est principalement en été que surviennent les problématiques de pénurie d'eau, notamment en raison d'une demande accrue pour la ressource. Les faibles débits en été favorisent aussi un réchauffement de la température de l'eau, ce qui peut être dommageable, par exemple, pour des espèces et écosystèmes adaptés à des eaux plus froides.

3.2. Des indicateurs hydrologiques : un peu de statistiques pour décrire le régime hydrique

D'année en année, les hivers, printemps, étés et automnes chauds, froids, humides et secs se commutent au gré de la variabilité naturelle du climat. Ces fluctuations font en sorte que d'une année à l'autre, les débits moyens ainsi que les débits de crue et d'étiage qui sont observés sur nos rivières sont rarement les mêmes. La figure 6 illustre à titre d'exemple les valeurs de débits printaniers maximaux enregistrés depuis 1970 à la station 050304 située sur la rivière Batiscan. Elle fait état d'une grande variabilité dans les pointes de crues printanières, celles-ci variant entre 300 et 850 m³/s.

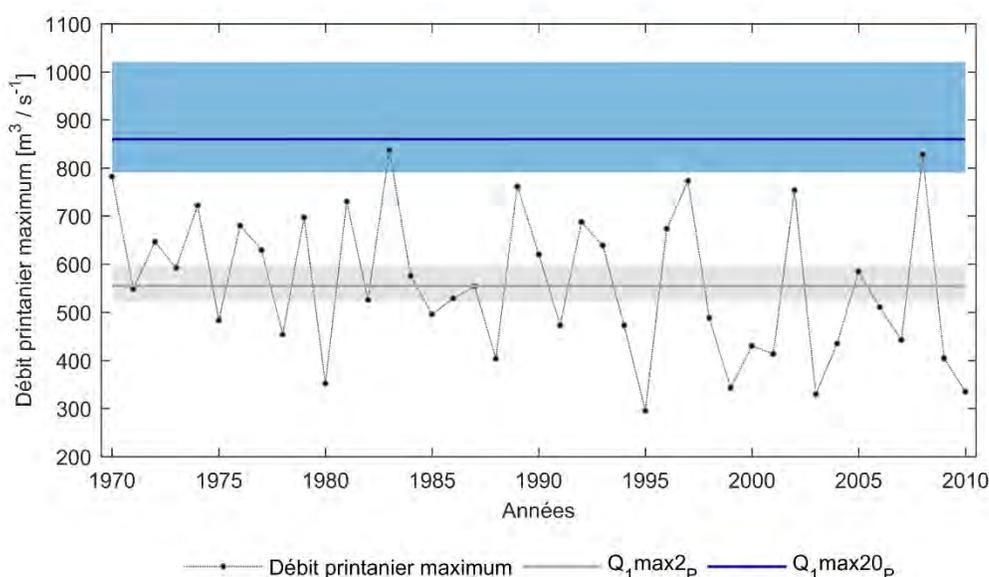


Figure 6. Série des maximas annuels de débit journalier observé au printemps [Q_1max_P] à la station hydrométrique 050304

Afin de brosser un portrait du régime hydrique et de ses fluctuations, on a recours à différents indicateurs hydrologiques. Un indicateur hydrologique est une statistique visant à caractériser différents aspects du régime hydrique, comme un étiage d'été sévère, une crue printanière extrême ou le débit moyen du mois de juin. Les indicateurs hydrologiques doivent être évalués sur d'assez longues périodes, idéalement d'au moins 30 ans, afin d'échantillonner suffisamment bien la variabilité du processus à l'étude.

Pour caractériser le niveau de « rareté » d'un extrême hydrologique, on emploie généralement le concept de **période de retour**. La période de retour exprime la fréquence moyenne d'occurrence d'un événement. Par exemple, lorsque l'historique des données de débits enregistrés dans une rivière est suffisamment long, il est possible d'extraire d'un

échantillon de valeurs de forts débits celles qui sont susceptibles d'être dépassées en moyenne une fois aux 2, 5, 10, 20 ans, etc. Par ailleurs, ce n'est pas parce qu'un débit a été déterminé comme ayant une période de retour de 20 ans qu'il est impossible de l'observer consécutivement sur quelques années. Une période de retour de 20 ans correspond à une probabilité annuelle de dépassement de 5 % et cette probabilité demeure la même chaque année, même lorsque, à l'occasion, cette valeur de débit est observée plus fréquemment.

Par exemple, l'indicateur $Q_{1\max 2P}$ (débit journalier [Q_1] maximal annuel [\max] de période de retour de deux ans [2] au printemps [P]) est la valeur du débit printanier maximal qui sera dépassée en moyenne une fois tous les deux ans. Cet indicateur est illustré par la bande grise à la Figure 6. L'indicateur $Q_{1\max 20P}$ (débit journalier [Q_1] maximal annuel [\max] de période de retour de 20 ans [20] au printemps [P]) est la valeur du débit printanier maximal qui sera dépassée en moyenne une fois tous les 20 ans. Cet indicateur est illustré par la bande bleue à la Figure 6. Le $Q_{1\max 20P}$ est le débit caractéristique d'une crue beaucoup plus rare (probabilité de dépassement annuelle de 5 %) que le $Q_{1\max 2P}$ (probabilité de dépassement annuelle de 50 %), plutôt représentatif d'une crue « normale ». Les largeurs de bandes sur la Figure 6 indiquent l'incertitude statistique obtenue lorsqu'on réalise une analyse statistique des débits extrêmes. Plus la récurrence recherchée est élevée (p. ex., 50, 100, 1 000 ans), plus l'incertitude augmente. Cela est dû au fait qu'on a un échantillon de données limitées (47 années d'observations dans l'exemple de la Figure 6) pour évaluer un phénomène très rare et qui, selon toute probabilité, n'a jamais été observé.

Il existe plus de 28 indicateurs statistiques dans l'Atlas qui caractérisent typiquement, de manière conjointe, l'hiver et le printemps, d'une part, et l'été et l'automne, d'autre part. Le Tableau 2 présente la liste et la définition de ces indicateurs.

Tableau 2 – Indicateurs hydrologiques

Phénomène hydrologique	Question	Indicateurs	Description
Crues printanières	En climat futur, la pointe des crues printanières sera-t-elle plus élevée?	Q_{1max2P}	Débit journalier [Q_1] maximal annuel [max] de récurrence de 2 ans [2] au printemps [P]
		$Q_{1max20P}$	Débit journalier [Q_1] maximal annuel [max] de récurrence de 20 ans [20] au printemps [P]
	En climat futur, le volume des crues printanières sera-t-il plus fort?	$Q_{14max2P}$	Débit moyen sur 14 jours [Q_{14}] maximal annuel [max] de récurrence de 2 ans [2] au printemps [P]
		$Q_{14max20P}$	Débit moyen sur 14 jours [Q_{14}] maximal annuel [max] de récurrence de 20 ans [20] au printemps [P]
	En climat futur, les crues printanières seront-elles plus hâtives?	$J[Q_{1maxP}]$	Jour d'occurrence moyen [J] du débit journalier [Q_1] maximal annuel [max] au printemps [P]
Crues estivales et automnales	En climat futur, la pointe des crues estivales et automnales sera-t-elle plus élevée?	$Q_{1max2EA}$	Débit journalier [Q_1] maximal annuel [max] de récurrence de 2 ans [2] à l'été et à l'automne [EA]
		$Q_{1max20EA}$	Débit journalier [Q_1] maximal annuel [max] de récurrence de 20 ans [20] à l'été et à l'automne [EA]
Étiages hivernaux	En climat futur, les étiages hivernaux seront-ils plus sévères?	Q_{7min2E}	Débit moyen sur 7 jours [Q_7] minimal annuel [min] de récurrence de 2 ans [2] à l'été [E]
		$Q_{7min10E}$	Débit moyen sur 7 jours [Q_7] minimal annuel [min] de récurrence de 10 ans [10] à l'été [E]
		$Q_{30min5E}$	Débit moyen sur 30 jours [Q_{30}] minimal annuel [min] de récurrence de 5 ans [5] à l'été [E]
Étiages estivaux	En climat futur, les étiages estivaux seront-ils plus sévères?	Q_{7min2H}	Débit moyen sur 7 jours [Q_7] minimal annuel [min] de récurrence de 2 ans [2] à l'hiver [H]
		$Q_{7min10H}$	Débit moyen sur 7 jours [Q_7] minimal annuel [min] de récurrence de 10 ans [10] à l'hiver [H]
		$Q_{30min5H}$	Débit moyen sur 30 jours [Q_7] minimal annuel [min] de récurrence de 5 ans [5] à l'hiver [H]
Hydraulicité	En climat futur, l'hydraulicité sera-t-elle modifiée?	Q_{moy}	Débit moyen [Q_{moy}] annuel
		Q_{moyHP}	Débit moyen [Q_{moy}] annuel sur la période hiver-printemps [HP]
		Q_{moyEA}	Débit moyen [Q_{moy}] annuel sur la période été-automne [EA]
		$Q_{moy1-12}$	Débit moyen [Q_{moy}] mensuel pour les différents mois de l'année [1-12]

3.3. Les signaux de changement des indicateurs hydrologiques

Les sections précédentes ont permis de mettre en évidence le lien entre les conditions climatiques et la variabilité des phénomènes hydrologiques que l'on caractérise à l'aide de différents indicateurs. Sachant que le climat changera au cours des prochaines décennies, on comprend mieux pourquoi on anticipe également des changements du régime hydrique. Pour « évaluer » ce changement, on a recours à la chaîne de modélisation présentée à la partie 2 qui aboutit à des simulations de débits sur une période de référence, définie de 1970 à 2000, et des périodes futures allant de 2021 à 2050 pour l'horizon 2030, de 2041 à 2070 pour l'horizon 2050 et de 2071 à 2100 pour l'horizon 2080. Pour chacune de ces périodes, les indicateurs hydrologiques présentés à la section 3.2 ont été évalués. Les valeurs obtenues sur les horizons futurs ont ensuite été comparées aux valeurs de la période de référence. Puisque cet exercice a été répété pour plus de 200 scénarios hydroclimatiques, on obtient au final une distribution des valeurs de changement probables.

Bien que l'on conçoive assez bien le recours à la simulation de multiples scénarios (ici, 200) lorsqu'il s'agit de projections dans le futur, le fait que chacune de ces simulations inclue également la période historique (1970-2000) peut apparaître contre-intuitif. Pour comprendre la justification de cette approche, on doit se rappeler deux choses :

- Comme il a déjà été mentionné à la section 2.1.1, le système climatique planétaire et les phénomènes atmosphériques sont de nature chaotique. De ce fait, il existe plusieurs possibilités de trajectoires, en termes de variabilité journalière, mensuelle et même annuelle, par lesquelles se dessine la tendance à long terme qu'on cherche à estimer à l'aide des modèles. Cela est vrai pour les caractéristiques du climat qu'on cherche à estimer, comme la température et la précipitation, de même que pour des caractéristiques qui en dépendent, comme le débit des rivières. Ainsi, différentes simulations climatiques issues d'une même projection d'évolution de concentration de gaz à effet de serre pour la période 2021-2100 peuvent produire des scénarios présentant des variations quotidiennes ou annuelles de températures ou de précipitations qui diffèrent tout en s'inscrivant dans un même patron global d'évolution à long terme.

- Cette caractéristique dite chaotique du système climatique, sur laquelle s'appuie l'approche de simulation de multiples scénarios d'évolution future du climat, a aussi été à l'œuvre dans la façon dont s'est réalisée la manifestation du climat passé, en l'occurrence celle de la période de référence 1970-2000, telle qu'elle a pu être observée et enregistrée. En théorie, si l'on possédait les données de concentration de gaz à effet de serre pour cette période avec un très haut niveau de détails et si les modèles climatiques existants reproduisaient fidèlement tous les phénomènes en cause, il serait possible de reproduire numériquement toutes les caractéristiques climatiques de cette période, notamment toutes les variations quotidiennes de température ou de précipitations. Ce qui est particulièrement intéressant, c'est que, en modifiant très légèrement un détail au départ de cette simulation (condition initiale), il serait possible d'obtenir une trajectoire de variation quotidienne qui différerait de celle qui a été observée et de pouvoir en tirer quand même des statistiques de tendance globale très similaires.

En réalité, les modèles climatiques ne peuvent reproduire parfaitement l'ensemble des phénomènes simulés et les données d'entrée ne sont pas non plus suffisamment détaillées pour y parvenir. Cependant, tout imparfaits qu'ils soient, les modèles ont cet avantage de pouvoir produire différentes variantes « possibles » et équiprobables de la façon dont peut se manifester le climat soumis à un même scénario d'évolution de concentration de gaz à effet de serre. De l'ensemble de ces simulations et variantes, on peut donc tirer des statistiques descriptives pour chacune des trois périodes futures d'intérêt, de même que pour la période de référence 1970-2000. Ensuite, c'est en comparant les propriétés statistiques obtenues pour les périodes futures à celles obtenues des simulations de la période de référence 1970-2000 qu'on tire les signaux de changement.

Pour les débits des rivières, l'approche est la même : les résultats de chacun des 200 scénarios climatiques simulés sont introduits dans le modèle hydrologique pour produire autant de scénarios de débits qui sont analysés statistiquement par la suite afin d'en tirer les signaux de changement présentés au Tableau 2 de la section précédente. L'estimation du signal de changement ne consiste donc pas à déterminer comment pourrait évoluer chaque valeur de débit journalier au cours d'une année future donnée, mais bien comment pourrait, plus globalement, évoluer le régime hydrique, caractérisé au

moyen d'indicateurs statistiques (p. ex., indicateurs de crues, d'étiages, moyennes mensuelles, saisonnières, annuelles, etc.).

Le signal de changement d'un indicateur statistique est caractérisé par sa direction, son ampleur et son incertitude. La direction indique si le changement concerne une augmentation ou une diminution de la valeur de l'indicateur. Elle est établie en examinant le nombre de résultats se plaçant du côté de l'augmentation ou de la diminution. L'ampleur indique la valeur en pourcentage de l'augmentation ou de la diminution de l'indicateur. Elle est établie par rapport à la médiane de la distribution. La notion d'incertitude est présentée en plus amples détails à la section suivante.

L'Atlas hydroclimatique 2018 exploite la cartographie Web dynamique pour présenter pour chacun des 1 500 tronçons de rivières du Québec méridional les signaux de changement de 28 indicateurs statistiques, et ce, pour les horizons 2030, 2050 et 2080. (voir à la Figure 7)

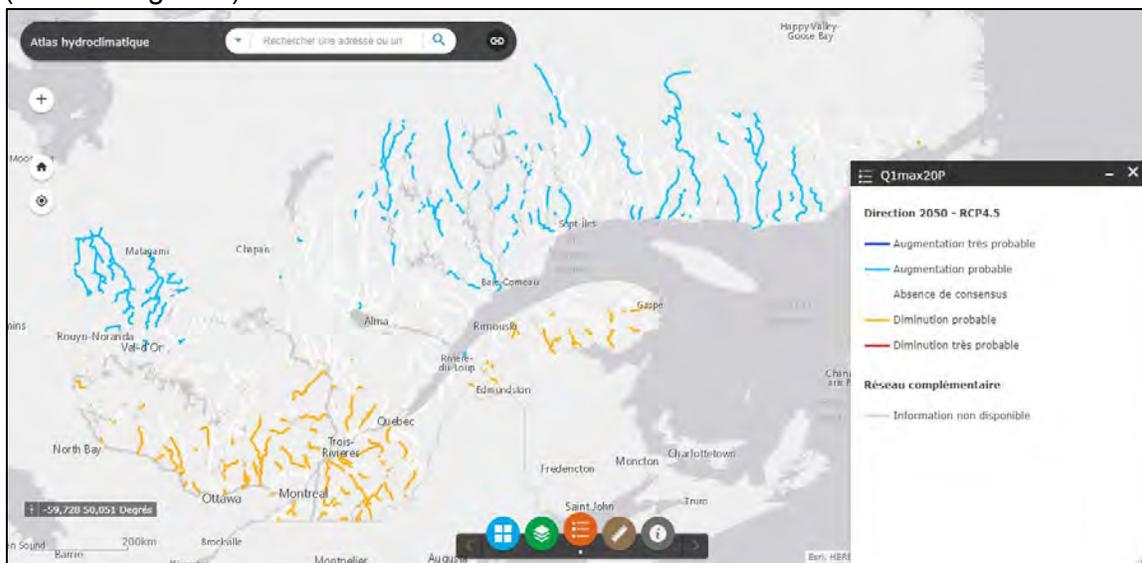


Figure 7. Exemple d'indicateur (Q1max20P) présenté dans l'outil Web de l'Atlas 2018

3.4. Incertitude et niveaux de confiance sur le signal de changement

Dans un contexte où les acteurs sont susceptibles d'utiliser les données de l'Atlas pour décider d'actions d'adaptation sur des enjeux et que ces derniers feront inévitablement l'objet de discussion, de négociation et de planification, il est important que ces acteurs interprètent adéquatement les incertitudes et niveaux de confiance liés aux signaux de changement et comprennent également les limitations ou contextes que l'Atlas ne couvre pas. Certaines situations où les enjeux sont importants pourraient également, par principe

de précaution, appeler à l'action, même si l'incertitude ou le niveau de confiance actuel sont encore limités.

Répetons-le, les modèles climatiques et hydrologiques sont des approximations de la réalité. Les projections hydroclimatiques produites à partir de ces modèles comportent donc des **incertitudes**. Ces incertitudes dépendent des choix méthodologiques définis pour produire ces projections et des limites actuelles de la connaissance. L'utilisation d'un grand ensemble de projections permet d'évaluer une portion de cette incertitude en tenant compte, par exemple, d'un éventail de scénarios envisageables. Pour des raisons pratiques, il n'est pas possible d'évaluer exhaustivement l'incertitude de toute la chaîne de modélisation. Celle-ci est donc appelée à évoluer au cours des prochaines années avec l'ajout d'informations telles que de nouvelles données d'observations, une meilleure compréhension théorique des processus hydroclimatiques et une amélioration des modèles hydrologiques et climatiques.

Complémentaire à l'incertitude, le **niveau de confiance** est un jugement d'expert indiquant si les choix méthodologiques sous-jacents à la réalisation de l'Atlas permettent de reproduire adéquatement les principaux processus physiques en lien avec un indicateur donné. Il exprime en quelque sorte la probabilité de se retrouver en dehors de l'incertitude présentée. Le niveau de confiance peut être limité, modéré ou élevé. Un niveau de confiance limité signifie que l'information présentée est suffisamment bonne et utile pour être diffusée et servir de point de départ à des démarches d'adaptation, mais qu'il est vraisemblable que les conclusions se précisent, voire changent avec une amélioration de la chaîne de modélisation. Typiquement, le niveau de confiance limité est attribué lorsque l'on considère que la modélisation de certains processus clés devrait être améliorée. Un niveau de confiance modéré signifie que globalement, les conclusions et valeurs présentées ne devraient pas changer de façon importante. Toutefois, il se pourrait qu'à l'échelle locale, une amélioration de la chaîne de modélisation conduise à des résultats modérément différents. Enfin, un niveau de confiance élevé signifie que les conclusions et valeurs présentées devraient peu changer, voire ne pas changer et que les processus clé liés à l'indicateur concerné sont adéquatement modélisés.

3.5. Limitations de l'Atlas 2018

L'information présentée dans l'Atlas 2018 vise à appuyer des démarches d'adaptation dans le domaine des ressources hydriques. Les principaux constats sont essentiellement les mêmes que ceux présentés dans les éditions précédentes. Ces documents demeurent scientifiquement valides et complémentaires à la présente mise à jour. Les nouveautés présentées précédemment permettent toutefois de préciser ces constats et d'apprécier davantage la confiance accordée aux différents signaux de changement hydrologique.

L'utilisation de l'information présentée dans l'Atlas doit être conditionnelle à une interprétation adéquate des limites méthodologiques suivantes :

- L'Atlas s'intéresse aux indicateurs statistiques de débits uniquement;
- Les projections hydrologiques se limitent au régime naturel d'écoulement en surface des cours d'eau et ne peuvent être généralisées à des bassins versants d'une superficie inférieure à 250 km² ainsi qu'à quelques grands cours d'eau tels que la rivière Saguenay, la rivière Outaouais, la rivière St-Maurice et le fleuve St-Laurent;
- Les projections hydrologiques ne considèrent pas l'effet local découlant de l'opération de barrages sur le signal de changement;
- Les projections hydrologiques simulent les débits en eau libre. Les résultats ne couvrent donc pas les phénomènes liés à la glace comme les embâcles.

Selon le degré de complexité d'une problématique d'intérêt, l'évaluation précise de l'impact des changements climatiques peut nécessiter des analyses détaillées dépassant le cadre de l'Atlas hydroclimatique. Néanmoins, tout acteur du domaine de l'eau pourra trouver dans l'Atlas les informations de base lui permettant d'entamer une réflexion vers l'adaptation aux changements climatiques. Le lecteur désirant une compréhension plus approfondie est invité à prendre connaissance de l'information présentée à la section « Principaux éléments méthodologiques » de l'Atlas 2015 (CEHQ, 2015). Enfin, le rapport technique³ de l'Atlas 2018 décrit plus en détail les pratiques de modélisation mises en œuvre pour la production de l'Atlas.

³ Disponible sur demande à atlas.hydroclimatique@mddelcc.gouv.qc.ca.

En présentant quelques notions d'hydrologie, cette dernière partie permettait de familiariser le lecteur au concept d'indicateur statistique de débit, mais aussi de l'aider à comprendre les informations fournies par l'Atlas hydroclimatique et leurs limites.

Conclusion

L'Atlas hydroclimatique 2018 du Québec méridional fournit des données essentielles pour anticiper les impacts des changements climatiques sur le débit des rivières, pour planifier des mesures d'adaptation durables et pour favoriser la résilience de la société québécoise aux changements climatiques dans une perspective de développement durable. Cette nouvelle édition se retrouve sur une plateforme Web dynamique et est accompagnée du présent guide visant à vulgariser les données fournies par l'Atlas et à en favoriser sa diffusion. Enfin, pour les experts du domaine de l'hydrologie, des données brutes sont également disponibles auprès de la Direction de l'expertise hydrique.

Pour conclure, mentionnons que la prochaine version de l'Atlas est déjà prévue. L'Atlas 2020 consistera principalement en l'ajout d'un modèle de haute résolution (CLIMEX). Cette plus haute résolution s'effectue par un découpage en mailles tridimensionnelles plus fines (résolution spatiale), mais aussi par des pas de temps aux 3 heures plutôt qu'aux 24 heures (résolution temporelle). Cela va permettre une meilleure modélisation des extrêmes hydrologiques pour des périodes de retour de l'ordre de 50 et 100 ans.



Références

- CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ), 2013. *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Québec, 51 p.
- CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ), 2015. *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Québec, 81 p.
- FORTIN, J.-P., R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA ET J. FITZBACK, 2001. « A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1: Description of the model ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 6, n° 2, p. 91-99.
- GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC), 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 p.
- OURANOS, 2015. *Vers l'adaptation – Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec*. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.
- TAYLOR, K. E., R. J. STOUFFER ET G. A. MEEHL, 2012. « An overview of CMIP5 and the experiment design ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, n° 4, p. 485-498.

Remerciements

Nous remercions le World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling, responsable de l'initiative CMIP, et les équipes de modélisation (voir la liste au Tableau 1) pour la production et la diffusion des simulations climatiques. Pour l'initiative CMIP, le Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison de l'U.S. Department of Energy soutient la coordination et le développement des infrastructures informatiques en collaboration avec Global Organization for Earth System Science Portals.

Nos remerciements vont également aux organisations membres de la collaboration cQ2 (Ouranos, Hydro-Québec et Rio Tinto) ainsi qu'au Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique, à l'École de technologie supérieure et à l'Université Laval. Nous remercions également l'Université de Munich et l'Agence bavaroise pour l'environnement engagées dans la collaboration QBic3 (*Quebec-Bavaria International Collaboration on Climate Change*) pour leur contribution scientifique et technique.

Nous remercions aussi les membres du comité scientifique pour leurs commentaires éclairés sur la détermination des bonnes pratiques de modélisation qui ont mené à la production de l'Atlas. Nous soulignons enfin le caractère crucial des banques de données d'observations du climat et du débit des rivières du Québec sans lesquelles la réalisation du présent ouvrage aurait été impossible.

Les coûts relatifs à la réalisation de l'Atlas sont assumés par le Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

L'information présentée dans ce document est de nature générale et globale et est mise à votre disposition à titre informatif seulement. La Direction de l'expertise hydrique (DEH) et les auteurs ne garantissent pas l'exactitude, l'exhaustivité et l'actualité des données et des renseignements présentés dans le document ni leur utilité aux fins d'un usage particulier. La personne faisant usage du document assume l'entière responsabilité de cet usage. Toute personne utilisant les données et l'information contenues dans ce document 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 ce document à une situation précise, il est recommandé de faire appel à un spécialiste. Les auteurs, la DEH ainsi que ses employés, fonctionnaires ou agents n'assument aucune responsabilité pour toute action, erreur, omission, utilisation et pour tout résultat découlant de l'utilisation totale ou partielle de ce document. En conséquence, la DEH 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 ce document.

Le gouvernement du Québec est titulaire des droits d'auteur sur tout document qu'il réalise. Dans l'éventualité où vous souhaitez reproduire ce document, veuillez adresser une demande écrite à l'adresse suivante :

droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca



**Ministère
du Développement durable,
de l'Environnement
et de la Lutte contre les
changements climatiques**

Québec 