

Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique

Guide sur l'intégration
des données climatiques
dans la production
d'énergie aux fins de
modélisation de la valeur



Responsables

Élyse Fournier, Ouranos

Katherine Pineault, Ouranos
(maintenant chez Dunsky Expertise
en énergie)

Auteurs

Élyse Fournier, Ouranos

Annabelle Lamy, Ouranos

Katherine Pineault, Ouranos
(maintenant chez Dunsky Expertise
en énergie)

Léa Braschi, CBCL Limited

Kurt Kornelsen, Ontario Power Generation

Alexis Hannart, Ouranos
(maintenant chez Axionable)

Isabelle Chartier,
Institut de recherche d'Hydro-Québec

Guillaume Jean Tarel, Hydro-Québec

Marie Minville,
Institut de recherche d'Hydro-Québec

James Merleau,
Institut de recherche d'Hydro-Québec

Collaborateurs

Richard Arsenault,
École de technologie supérieure

Bruno Benedetti,
Brookfield Renewable Power

Richard Blanchet,
Innergex Énergie renouvelable inc.

Pierre-Olivier Caron-Périgny, Hydro-Québec

Kevin Sagan, Manitoba Hydro

Ali Sajid, Ontario Power Generation

Michael Vieira, Manitoba Hydro

Réviseur

Peter McKinnon, pmck.ca

Infographie

Pro-Actif

Citation suggérée

Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, A., Chartier, I., Tarel, G., Minville, M. et Merleau, J. (2020) Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur, Ouranos, Montréal, 208 pages.

Pour toute question concernant ce rapport :

Fournier.Elyse@ouranos.ca

Lamy.Annabelle@ouranos.ca

Octobre 2020

Révision

Richard Arsenault,
École de technologie supérieure
Jon Aske, CBCL
Bruno Benedetti,
Brookfield Renewable Power
Ryan Bernier, Manitoba Hydro
Richard Blanchet, Innergex énergie
renouvelable inc.
Marco Braun, Ouranos
Diane Chaumont, Ouranos
Jacinthe Clavet-Gaumont, Ouranos
Charles-Antoine Gosselin, Ouranos
David Huard, Ouranos
Nelson Jia, Brookfield Renewable Power
Jason Mahmoudi, anciennement à CBCL
Carolyn Mann, Ressources naturelles Canada
Michael Morris, Manitoba Hydro
Marcel-Paul Raymond, MPR
Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos
Kevin Sagan, Manitoba Hydro
Caroline Simard, Ouranos
Marie-Claude Simard, Hydro-Québec
Marc St. Laurent, Manitoba Hydro
Michael Vieira, Manitoba Hydro
Graham Waugh, CBCL

Comité consultatif

Richard Blanchet,
Innergex Énergie renouvelable inc.
Thierry Bourduas,
Caisse de dépôt et placement du Québec
Jacinthe Clavet-Gaumont, Ouranos
James Falzon, Banque européenne pour
la reconstruction et le développement
Chris Hayes, CEATI
David Huard, Ouranos
Kristina Koenig, Manitoba Hydro
Kurt Kornelsen, Ontario Power Generation
Kelly O'Neil, TD Canada Trust
Pierre-Olivier Pineau,
Chaire en gestion de l'énergie HEC
Marcel Paul Raymond, MPR Énergie
Odrey Robillard, Caisse de dépôt et
placement du Québec (maintenant
au Fonds de solidarité FTQ)
Marie-Claude Simard, Hydro-Québec
Lizzie Smith, CEATI
Richard St-Jean, Brookfield Renewable Power



Intégrer le changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques

Par : Jacob Irving

Président, Conseil canadien de l'énergie

Certains aspects du secteur canadien de l'énergie ne sont pas particulièrement uniques ou exceptionnels. D'autres sont tout à fait remarquables et de calibre mondial. Ainsi, le Canada est un chef de file mondial de l'hydroélectricité, soit la plus grande source de production d'électricité du pays. Grâce à l'hydroélectricité, le secteur canadien est l'un des moins émetteurs et des plus renouvelables du monde.

La position unique et éminente du Canada dans le domaine de l'énergie hydroélectrique exige toutefois un leadership tenace. Le Canada ne peut pas attendre que d'autres pays relèvent les défis et saisissent les occasions qui se présentent. En fait, de nombreux pays se tournent vers des exemples canadiens lorsqu'ils développent leurs propres ressources hydrauliques.

La complaisance est l'une des plus grandes difficultés auxquelles est confronté le secteur de l'hydroélectricité. Les entreprises qui exploitent des installations hydroélectriques comprennent pleinement les importants avantages qu'elles offrent. Cependant, au fil du temps, ces mêmes avantages risquent d'être simplement présumés, puis tenus pour acquis. Le secteur est bien au fait que l'énergie hydraulique combat actuellement les changements climatiques et qu'elle pourra continuer à le faire à l'avenir. Toutefois, est-ce qu'il est à même d'établir dans quelle mesure les installations

hydroélectriques pourraient elles-mêmes être avantagées ou désavantagées par les perturbations physiques actuelles et futures dues aux changements climatiques ?

Ce guide pratique préparé par Ouranos, en partenariat avec les exploitants d'hydroélectricité canadiens, s'appuie sur des travaux fondamentaux plus larges menés par des organisations mondiales telles que l'International Hydropower Association (IHA) et la Commission internationale des grands barrages (CIGB). Il aidera les exploitants et les parties prenantes concernés à évaluer correctement les caractéristiques de l'hydroélectricité qui ont, pendant trop longtemps, été acceptées et pourtant négligées, alors que cette source d'énergie est inestimable. Il aidera aussi les ingénieurs, les financiers, les prêteurs et les assureurs à acquérir une plus grande confiance et à prendre de meilleures décisions en matière d'hydroélectricité compte tenu des changements climatiques.

Enfin, les avantages de l'hydroélectricité ne doivent plus être compris uniquement par les acteurs du secteur. Ce guide d'Ouranos contribuera grandement à communiquer la nature spécifique de la capacité hydroélectrique à des publics importants, plus larges et influents. Il pourra également permettre à d'autres exploitants et sociétés d'énergie à mieux comprendre et gérer leurs propres actifs et passifs dans le contexte actuel marqué par les changements climatiques. Je suis heureux d'avoir l'occasion de vous faire part de l'appui du Conseil de l'énergie du Canada à cette démarche importante, pratique et utile.

Remerciements

La présente étude a été réalisée avec le soutien des groupes de travail de la Plateforme d'adaptation aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada. Les entreprises suivantes y ont également contribué : Brookfield Renewable Power, Hydro-Québec, Innergex Énergie renouvelable inc., Manitoba Hydro, Ontario Power Generation et Ouranos.

Les entrevues réalisées auprès des personnes suivantes ont permis d'assurer la pertinence du Guide pour leurs entreprises respectives. Nous remercions chaleureusement Pierre Biederman (Alpage et IHA); Thierry Borduas et Michel Léveillé (Caisse de dépôt et placement du Québec); Ali Nazemi (Université Concordia); Jason Shaw, Mark Stirrup et Nikou Jalayeri (Hatch); Gord McPhail, David Brown et Dave MacMillan (KGS); François Groux, Vincent Mercier, Julian Gacek, Yann Chavaillaz et Douglas Sparks (WSP).

Nous soulignons également la contribution de tous les collaborateurs qui ont participé aux études de cas : Nelson Jia (Brookfield); Guillaume Jean Tarel (Hydro-Québec); Richard Blanchet (Innergex Énergie renouvelable inc.); Ariel Brawerman, Adam Moore, Michael Morris, Smrita Rajbhandary, Kevin Sagan, Marc St-Laurent, Michael Vieira et Zsolt Zrinyi (Manitoba Hydro); Gurmit Bhathal, Svetlana Helc, Kurt Kornelsen, Konhee Lee, Rob Priller et Connor Werstuck (Ontario Power Generation); Élyse Fournier et Annabelle Lamy (Ouranos).

Nous soulignons enfin l'apport et le soutien de nos collègues d'Ouranos, notamment : Angelica Alberti-Dufort, Nathalie Aerens, Marco Braun, Margarita Caycedo, Isabelle Charron, Jacinthe Clavet-Gaumont, Anne Frigon, Charles-Antoine Gosselin, Patrick Grenier, David Huard, Caroline Larrivée, Dominique Lenoir, Travis Logan, Gabriel Rondeau-Genesse, Agnès Rossignol, Caroline Simard et Trevor Smith..



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



Brookfield
Renewable

INNERGEX



ONTARIOPOWER
GENERATION

Acronymes

CC	Changement climatique
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i> (Projet d'intercomparaison des modèles couplés)
CRIDA	<i>Climate Risk Informed Decision Analysis</i> (Analyse décisionnelle fondée sur le risque climatique)
DSST	<i>Differential Split-Sample Test</i> (Test différentiel par échantillon séparé)
ESGF	<i>Earth System Grid Federation</i>
MCG	Modèle climatique global
MIG	Modèle d'impact global
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
IAMC	<i>Integrated Assessment Modelling Consortium</i>
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i> (Commission internationale des grands barrages)
IHA	<i>International Hydropower Association</i> (Association internationale de l'hydroélectricité)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC)
ISIMIP	<i>Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project</i> (Projet d'intercomparaison de modèles d'impact intersectoriels)
VAN	Valeur actuelle nette
MCR	Modèle climatique régional
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Trajectoire de concentration représentative)
EQM	Erreur quadratique moyenne
NSE	<i>Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient</i> (Coefficient d'efficacité du modèle Nash-Sutcliffe)
TCFD	<i>Task Force on Climate-related Financial Disclosures</i> (Groupe de travail sur l'information financière relative aux changements climatiques, GIFCC)
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

Table des matières

Introduction	14
Contexte	14
Objectifs	15
Vue d'ensemble et public visé	15
Champ d'application, forces et faiblesses	17
Démarche	18
Comment utiliser le Guide	20
1. Évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique	24
1.1. Contexte de l'évaluation	25
1.2. Types de valeurs et possibilités d'intégration du changement climatique	27
1.3. Impacts du changement climatique	29
2. Méthodes d'évaluation de la valeur fondées sur les bénéfices et leurs incertitudes	34
2.1. Méthode d'évaluation traditionnelle	35
2.2. Méthode d'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique	37
2.3. Sources d'incertitude	43
3. Méthodes de transformation des données	50
3.1. Méthode directe	52
3.2. Méthode de réduction	52
3.3. Méthode d'ajustement	54
3.4. Méthode de prolongement	56
3.5. Méthode delta	60
3.6. Méthode de correction de biais	63
4. Options de la base de référence	66
4.1. Base de référence climatique	69
4.2. Base de référence hydrologique	74
5. Options des données de changement climatique	78
5.1. Simulations climatiques brutes	81
5.2. Simulations climatiques post-traitées	83
5.3. Générateurs de conditions météorologiques	86
5.4. Résultats précalculés de simulations climatiques	88
5.5. Simulations hydrologiques	90
5.6. Jeux de données globaux et approximations	92
5.7. Résultats précalculés de simulations hydrologiques	96

6. Intégration de la ou des bases de référence et des données de changement climatique dans la chaîne de modélisation	98
6.1. Cas particuliers d'intégration	99
6.2. Du climat à l'hydrologie	101
6.3. De l'hydrologie à l'énergie	104
6.4. De l'énergie à la valeur	109
6.5. Exemples	110
7. Questions transversales et lignes directrices pour la chaîne de modélisation	118
7.1. Gestion du changement dans les pratiques organisationnelles	119
7.2. Considérations pour la sélection et le moyennage de simulations	120
7.3. Considérations pour la présentation des résultats	120
7.4. Cohérence des données climatiques et des périodes temporelles	121
7.5. Transformation des données	124
7.6. Cohérence des comparaisons	128
7.7. Mise à l'échelle d'un modèle	129
7.8. Avantages de la modélisation de l'hydrologie et de la gestion de l'eau	130
Conclusion	132
Références	134
Annexe A – Glossaire	152
Annexe B – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique	154
B.1 Définition de la détection et de l'attribution	154
B.2 Importance de la détection et de l'attribution des tendances	155
B.3 Articulation de la théorie causale – Causalité nécessaire et suffisante	157
B.4 Importance de bien comprendre les mécanismes	157
B.5 Attribution en une étape par rapport à deux étapes	158
B.6 Exemples	159
Annexe C – Méthodes de sélection de MCG	160
C.1 Besoins en matière de sélection	160
C.2 Ensembles de MCG – Principaux concepts	160
C.3 Besoin #1 – Maximiser l'incertitude	161
C.4 Besoin #2 – Optimiser l'incertitude	162
C.5 Besoin #3 – Composer avec les contraintes pratiques	163

Annexe D – Transférabilité des données et des résultats	164
D.1 Transférabilité entre bassins versants	164
D.2 Transférabilité de résolutions spatiales	166
D.3 Transférabilité des périodes temporelles	167
D.4 Transférabilité de résolutions temporelles	169
Annexe E – Validation de produits climatiques	170
E.1 Concepts généraux	170
E.2 Limites	171
E.3 Méthodes	172
E.4 Exemples	178
Annexe F – Sélection et calage d'un modèle hydrologique	180
F.1 Sélection du modèle hydrologique	180
F.2 Calage des paramètres d'un modèle hydrologique	181
F.3 Calage d'un bassin versant non jaugé	185
Annexe G – Validation des simulations hydrologiques	186
G.1 Concepts généraux	186
G.2 Limites	188
G.3 Méthodologie	189
Annexe H – Analyse de sensibilité	193
Annexe I – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble	195
Annexe J – Études de cas	197
Étude de cas de Brookfield Renewable	198
Étude de cas d'Hydro Québec	200
Étude de cas de Manitoba Hydro	202
Étude de cas d'Ontario Power Generation	204

Liste des figures

Figure 1	Vue d'ensemble du Guide et de ses objectifs	16
Figure 2	Cadre de travail pour l'intégration du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques	26
Figure 3	Chaîne de modélisation type de la méthode traditionnelle d'évaluation de la valeur	35
Figure 4	Exemple de la méthode d'évaluation traditionnelle	36
Figure 5	Chaîne de modélisation type pour l'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique	37
Figure 6	Exemple de l'évaluation intégrant le changement climatique, avec les apports, l'énergie et les revenus du passé	41
Figure 7	Hydrogramme annuel de la base de référence hydrologique et simulations	42
Figure 8	Changement dans la distribution des sources d'incertitude du ruissellement annuel médian	49
Figure 9	Distribution des sources d'incertitude des projections climatiques décennales mondiales moyennes	49
Figure 10	Exemple de la méthode de réduction	53
Figure 11	Exemple de la méthode d'ajustement où le facteur de correction est calculé à même la base de référence	55
Figure 12	Exemple de la méthode d'ajustement où le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant le changement climatique	56
Figure 13	Exemple de la méthode de prolongement où le facteur de correction est calculé à partir de la base de référence	58
Figure 14	Exemple de la méthode de prolongement où le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant le changement climatique	59
Figure 15	Exemple de la méthode delta au moyen du calcul de la moyenne	61
Figure 16	Exemple de la méthode de correction de biais	64
Figure 17	Aperçu des critères de sélection pour le type de base de référence	68
Figure 18	Aperçu des critères de sélection pour le type de données de changement climatique	80
Figure 19	Exemple des incohérences entre le routage de l'eau dans la réalité et le schéma de routage dans le modèle hydrologique global	93
Figure 20	Les trois types d'intégration dans la chaîne de modélisation selon le type de base de référence et de données de changement climatique	100
Figure 21	Exemple de l'impact des décisions en matière de gestion de l'eau sur une série temporelle	106

Figure 22	Exemple de la chaîne de modélisation avec application de la méthode delta sur la base de référence hydrologique	110
Figure 23	Exemple de résultats obtenus avec application de la méthode delta sur la base de référence hydrologique	112
Figure 24	Exemple de simulations hydrologiques en continu (en gris) à partir desquelles un delta peut être calculé	113
Figure 25	Comparaison des revenus simulés fondés sur la base de référence (en noir), sur la méthode traditionnelle (en rose) et sur les simulations intégrant le changement climatique avec application de la méthode de delta sur la base de référence hydrologique (en gris)	113
Figure 26	Comparaison de la VAN fondée sur une simulation utilisant la méthode traditionnelle et sur les simulations intégrant le changement climatique	113
Figure 27	Exemple de la chaîne de modélisation utilisant comme intrants les bases de référence climatique et hydrologique ainsi que les simulations climatiques brutes	114
Figure 28	Exemple de résultats obtenus par les simulations climatiques débiaisées, avec application de la méthode directe sur les bases de référence hydrologique et climatique	116
Figure 29	Comparaison de la moyenne pour les apports (A), l'énergie (B) et les revenus (C) des simulations fondées sur les bases de référence hydrologique (en noir) et climatique (en vert), et les simulations intégrant le changement climatique	117
Figure 30	Précipitations accumulées selon trois produits climatiques	122
Figure 31	Illustration de l'impact d'une tendance dans un jeu de données synthétiques sur la variabilité statistique (min./max. dans ce cas-ci) des données	126
Figure 32	Exemple de surapprentissage	127
Figure B1	Exemple des résultats de l'étude de Luke <i>et al.</i> (2017)	156
Figure B2	Débit de pointe annuel de la Rivière Rouge du Nord à Fargo (Dakota du Nord)	156
Figure E1	Exemple de profil annuel pour MA-Xobs et MA-Xsim en fonction du temps. MA-Xsim a été calculée sur une simulation climatique post-traitée	178
Figure E2	Exemple de cycle annuel pour la moyenne (climatologie) de MT-Xobs et la moyenne de MT-Xsim.	178
Figure E3	Exemple d'une carte de précipitations quotidiennes montrant des patrons spatiaux ne correspondant pas à des patrons météorologiques typiques	179
Figure E4	Exemple d'une carte thermique pour plusieurs indices climatiques (à gauche) et pour plusieurs simulations de MCG et MCR (en-dessous)	179
Figure H1	Exemple d'une analyse de sensibilité relative à la base de référence hydrologique pour : la VAN par rapport aux apports annuels (A); les revenus annuels moyens par rapport aux apports annuels (B); et les revenus annuels moyens par rapport aux faibles débits (C)	194

Liste des tableaux

Tableau 1	Étapes de l'intégration des données de changement climatique dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur selon la base de référence et les options de données de changement climatique	22
Tableau 2	Périodes d'évaluation de diverses activités	26
Tableau 3	Principaux impacts du changement climatique sur la valeur des sous-composantes des actifs hydroélectriques	31
Tableau 4	Sources d'incertitude dans chaque étape de la chaîne de modélisation	44
Tableau 5	Description des critères pour la sélection de la base de référence et des données de changement climatique	68
Tableau 6	Exemple de données hydrologiques disponibles dans la littérature pour les rivières Chute-à-la-Savane et Passes-Dangeureuses	96
Tableau 7	Méthodes de transformation des données pour la base de référence et pour les données de changement climatique, pour l'intégration des données de changement climatique/résultats dans un modèle hydrologique	101
Tableau 8	Méthodes de transformation des données pour la base de référence et pour les données de changement climatique, pour l'intégration des données/résultats hydrologiques dans un modèle énergétique	105
Tableau E1	Indicateurs présentant un intérêt, dénomination et exemples pour la validation générale	173
Tableau E2	Indicateurs d'intérêt, dénomination et exemple de la validation de simulations pour tous les indices climatiques à l'étude	175
Tableau G1	Critères d'élimination suggérés pour divers indices hydrologiques pour les méthodes delta, de correction de biais et de prolongement	190
Tableau I1	Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble	196

Introduction

Contexte

Les propriétaires et les gestionnaires d'actifs hydroélectriques ainsi que d'autres parties prenantes de l'industrie, prennent des décisions financières et économiques qui reposent sur la valeur projetée de leurs actifs de production hydroélectrique. Cette valeur repose, entre autres facteurs, sur la productivité et l'efficacité des actifs, les contraintes environnementales et réglementaires, les coûts d'exploitation et les investissements nécessaires pour maintenir l'intégrité, la sécurité et l'adaptabilité des actifs. Le changement climatique aura un impact sur ces facteurs, car en plus d'accroître la température de l'air partout dans le monde, il modifiera aussi les processus naturels, dont la disponibilité des ressources en eau, les inondations, les étiages, la formation de glace et de frasil, l'érosion, le transport de sédiments, les glissements de terrain, les feux de forêt, etc.

À ce jour, de nombreux documents ont indirectement abordé cette question. Dans son bulletin intitulé *Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources*, la Commission internationale des grands barrages évalue « le rôle joué par les barrages et les réservoirs dans l'adaptation au changement climatique, détermine les menaces et les opportunités potentielles auxquelles ceux-ci sont exposés et recommande des mesures visant à atténuer les effets du changement climatique mondial ou à s'y adapter », puis décrit « diverses méthodes et approches permettant aux propriétaires de barrages et de réservoirs d'analyser les répercussions potentielles du changement climatique sur leurs systèmes hydriques. » (ICOLD, 2016)

Dans son document intitulé *Hydropower Sector Climate Resilience Guide*, l'International Hydropower Association (IHA) propose « une approche pratique pour déterminer, évaluer et gérer les risques climatiques en vue de renforcer la résilience au changement climatique des projets hydroélectriques actuels et à venir », et « vise à évoluer non seulement en délaissant l'utilisation par défaut des données historiques et l'hypothèse voulant que la variabilité hydrologique demeure inchangée sur la durée de vie d'un projet, mais aussi en ne s'accommodant plus des connaissances limitées quant à la meilleure façon d'obtenir, d'utiliser et d'interpréter les observations climatiques et les données de la modélisation du changement climatique. » (IHA, 2019)

Le *Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future* présente dans son manuel *Climate Risk Informed Decision Analysis* (CRIDA) « un processus de collaboration pour la prise de décision éclairée tenant compte du risque, à savoir évaluer, gérer et communiquer efficacement les risques aux parties prenantes et aux décideurs, y compris les risques évités avec succès ainsi que les risques résiduels qui ne peuvent être évités ni quantifiés ou isolés. » (Mendoza et al., 2018)

Autant que nous sachions, les liens particuliers entre la valeur des actifs de production hydroélectrique et les impacts physiques du changement climatique ne sont pas encore clairement établis à ce jour. En outre, l'une des principales préoccupations concernant les impacts du changement climatique est de savoir comment l'évolution de la disponibilité et du moment d'occurrence des ressources hydriques affectera les revenus et, conséquemment, la valeur des actifs de production hydroélectrique. À l'heure actuelle, on ne trouve pas dans la littérature de lignes directrices satisfaisantes sur l'intégration des données de changement climatique dans l'établissement de la valeur des actifs, plus particulièrement en ce qui a trait à la priorité qu'il faudrait accorder aux impacts du changement climatique parallèlement aux autres préoccupations des entreprises du secteur hydroélectrique, allant de l'intégration de l'énergie renouvelable dans le réseau aux enjeux de la sécurité énergétique. La complexité et le coût de ce travail devraient être balancés en fonction des résultats potentiels et d'autres incertitudes liées aux décisions d'affaires.

Objectifs

Le Guide propose des lignes directrices sur l'intégration des impacts physiques du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques. Ses objectifs sont les suivants :

Objectif 1

Illustrer les liens potentiels entre l'évaluation de la valeur des actifs de production hydroélectrique et les impacts physiques du changement climatique.

Objectif 2

Proposer des méthodes d'intégration des données de changement climatique dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur. Les méthodes :

- s'appliquent à tous les types d'activités, de décisions d'affaires, d'entreprises hydroélectriques et d'actifs de production;
- sont valables pour les projections de valeur des 5, 10, 20, 50 et 100 années à venir;
- sont conformes aux méthodes de travail des entreprises hydroélectriques;
- prennent en compte les contraintes organisationnelles, dont le temps, les ressources et le budget.

Vue d'ensemble et public visé

La **Figure 1** donne une vue d'ensemble du Guide. La **Section 1** se rapporte au premier objectif et décrit en termes généraux diverses méthodes d'intégration des impacts physiques du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs et en explique l'importance. Elle pourrait être utile aux équipes responsables de portefeuilles de placement qui détiennent des actifs hydroélectriques.

Les **Sections 2 à 7** portent sur le second objectif et présentent des méthodes d'intégration des données de changement climatique dans la production hydroélectrique aux fins de modélisation de la valeur. La **Section 2** vise le secteur hydroélectrique en général et décrit la méthode traditionnelle d'évaluation ainsi qu'une méthode prenant en compte le changement climatique et les incertitudes qui y sont liées. Les **Sections 3 à 7** examinent de façon plus approfondie les méthodes d'évaluation de la valeur des actifs dans le contexte d'un climat changeant. Destinées au personnel technique, elles se penchent sur diverses options et en précisent les avantages, les inconvénients et les enjeux particuliers. Par exemple, ces sections pourraient intéresser les équipes responsables de l'adaptation au changement climatique, de la gestion de l'eau et de la sécurité. Des applications concrètes des méthodes utilisées par les partenaires du projet sont présentées dans l'**Annexe J** – Études de cas.

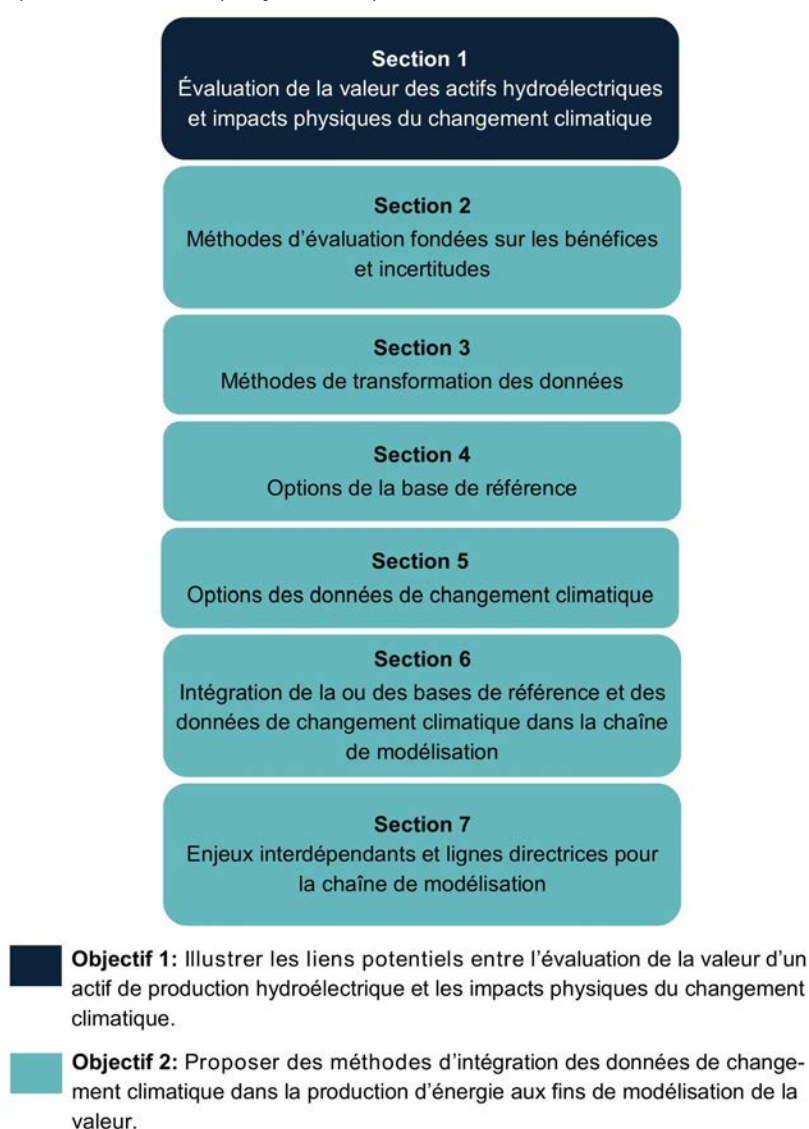


Figure 1 Vue d'ensemble du Guide et de ses objectifs

Champ d'application, forces et faiblesses

L'intégration des impacts physiques du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs de production hydroélectrique est un sujet trop vaste et complexe pour être traité dans un seul guide. De plus, aucune norme en matière d'intégration du changement climatique n'a été acceptée à ce jour, que ce soit dans la littérature ou dans la pratique.

- En s'appuyant sur les catégories de risques (TCFD, 2017) établies dans les recommandations de la *Task Force on Climate-related Financial Disclosures* (TCFD), le Guide met l'accent sur le risque physique chronique et les opportunités liées au climat et à l'hydrologie. La [Section 1](#) – Évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique donne un aperçu du risque de transition (politique, juridique, technologique, commercial et réputationnel) et du risque physique aigu (déclenché par des événements extrêmes).
- Le changement climatique altérera de nombreux processus naturels et ses impacts, qui varieront selon les régions et les périodes temporelles, auront des conséquences sur la valeur des actifs de production hydroélectrique. Pour cette raison, le Guide montre les liens potentiels entre l'évaluation de la valeur des actifs de production hydroélectrique et les impacts du changement climatique sans les quantifier (voir la [Section 1](#)).
- Le Guide présente plusieurs méthodes d'évaluation intégrant les impacts du changement climatique (voir la [Section 1](#)), mais se concentre sur l'approche bénéfiques, car celle-ci convient à bon nombre d'activités et est largement utilisée dans le secteur de l'hydroélectricité (voir les [Sections 2 à 7](#)).
- Le Guide met l'accent sur l'intégration des données de changement climatique dans la chaîne de modélisation actuellement utilisée pour évaluer les actifs. Il s'attarde particulièrement à l'hydrologie étant donné l'importance de ses effets sur la valeur des actifs. Il ne prend pas en compte :
 - ♦ les impacts du changement climatique sur les coûts et la demande d'électricité;
 - ♦ les impacts d'autres processus naturels sur la valeur des actifs;
 - ♦ diverses hypothèses et complexités relatives à la modélisation de l'énergie et de la valeur. Cette modélisation comporte de nombreuses variables, dont certaines affichent une large gamme d'incertitudes futures.

- Le Guide n'est pas prescriptif; il présente plutôt diverses options ainsi que les avantages, inconvénients et enjeux particuliers de chacune. Il s'applique à tous les types d'activités et de décisions d'affaires des entreprises hydroélectriques. Parmi ces options, aucune n'est idéale pour toutes les entreprises, mais toutes peuvent s'adapter aux circonstances et aux contraintes propres à chacune. Le recours à un vocabulaire non prescriptif (p. ex., « devrait » au lieu de « doit ») vise à respecter les contraintes organisationnelles.
- Le Guide s'appuie sur la science du climat et les études sur le changement climatique, et fait mention des limites scientifiques dans certains cas. Il repose également sur des études de cas réalisées conjointement avec des entreprises hydroélectriques dont les données climatiques ont été intégrées à l'évaluation de la valeur de leurs actifs ([Annexe J](#) – Études de cas).
- Le Guide ne propose pas de lignes directrices sur la prise de décision tenant compte du climat (p. ex., le choix d'une turbine basé sur l'incertitude du climat futur). D'autres ouvrages –Hydropower Sector Climate Resilience Guide (IHA, 2019), CRIDA (Mendoza *et al.*, 2018), Projet de prise de décision d'Ouranos (Ouranos, 2015) – seront plus utiles à cette fin.
- Bien que les exemples et les ressources du Guide se rapportent principalement à l'Amérique du Nord, les méthodes qui intègrent les données climatiques dans l'hydrologie aux fins de modélisation de la valeur s'appliquent à l'échelle internationale.

Démarche

Le Guide est le résultat d'une collaboration dirigée par Ouranos, à laquelle ont participé Brookfield Renewable, Hydro-Québec, Innergex Énergie renouvelable inc., Manitoba Hydro, Ontario Power Generation et l'École de technologie supérieure, avec le soutien et le financement de Ressources naturelles Canada. Toutes les entreprises ont participé à chaque étape du projet, de sa conception jusqu'à la diffusion des résultats.

Plusieurs activités ont concouru à l'élaboration du Guide. Entre autres, nous avons organisé un atelier avec chaque partenaire hydroélectrique et des entrevues téléphoniques avec des intervenants internationaux pour mieux comprendre leurs besoins et contraintes. Nous avons consulté des publications revues par les pairs ainsi que de la littérature grise. Nous avons enfin réalisé des études de cas avec chacun des partenaires afin de déterminer et de tester les méthodes d'intégration des données climatiques dans l'évaluation de la valeur de leurs actifs respectifs ([Annexe J](#) – Études de cas).



Comment utiliser le Guide

La présente section fournit au praticien la marche à suivre pour utiliser le Guide. L'évaluation de la valeur des actifs n'est pas nécessairement un processus simple et linéaire, de sorte qu'il faudra peut-être en adapter les étapes en fonction de la situation et des contraintes particulières du praticien.

Les étapes préliminaires de l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur sont les suivantes :

1. Définir les objectifs et les contraintes du projet (décision d'affaires, calendrier, budget, période d'évaluation, tolérance au changement, à l'innovation, etc.).
2. Déterminer le type de valeur à utiliser pour la décision (voir la [Section 1](#)).
 - a. Si la juste valeur et l'approche fondée sur les bénéfices sont appropriées, passer à l'étape suivante.
 - b. Sinon, le Guide ne s'applique pas.
3. Survoler les [Sections 2 à 7](#) pour avoir une vue d'ensemble du processus.
4. Constituer l'équipe du projet et déterminer les modèles numériques à utiliser (voir la [Section 2](#)).
5. Amorcer le processus de gestion du changement dans les pratiques organisationnelles ([Section 7.1](#) – Gérer le changement dans les pratiques organisationnelles).

Le [Tableau 1](#) résume les trois étapes proposées dans le Guide : sélection et développement de la ou des bases de référence (voir la [Section 4](#)); détermination et sélection des données de changement climatique (voir la [Section 5](#)); et intégration de la ou des bases de référence et des données de changement climatique dans la chaîne de modélisation (voir la [Section 6](#)). Le [Tableau 1](#) indique les sections du Guide se rapportant aux étapes du processus en fonction des options choisies (dans la première rangée du [Tableau 1](#)) pour la ou les bases de référence et les données de changement climatique. Les étapes obligatoires comportent un cercle plein (●) et les étapes facultatives, un cercle vide (○). Les résultats des étapes (dans la dernière rangée) sont les simulations fondées sur la ou les bases de référence et les simulations intégrant le changement climatique.

Tableau 1 Étapes de l'intégration des données de changement climatique dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur selon la base de référence et les options de données de changement climatique

Groupe d'étapes	No de l'étape	Étape	Sections et annexes du Guide	Options de la base de référence		Options de données de changement climatique							
				Base de référence climatique et hydrologique	Base de référence hydrologique seulement	Simulations climatiques brutes	Post-traitement des simulations climatiques	Générateurs de conditions météo-rologiques	Résultats de simulations climatiques	Simulations hydrologiques	Jeux de données globaux et approximations	Résultats de simulations précalsés de hydrologiques	
Sélection et développement de la base de référence	1.01	Sélectionner la base de référence	Section 4	●	●								
	1.02	Réaliser une évaluation générale des données	-	●	●								
	1.03	Évaluer l'adéquation de la base de référence climatique	Annexe E	○									
	1.04	Effectuer une étude de détection et d'attribution (si nécessaire)	Annexe B	○									
	1.05	Appliquer la transformation des données (si nécessaire)	Section 6.2.1/6.2.2	○	○								
	1.06	Sélectionner et calibrer le modèle hydrologique	Annexe F	●									
	1.07	Lancer une simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique	-	●									
	1.08	Évaluer l'adéquation de la simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique	Annexe G	○									
	1.09	Réaliser une étude de sensibilité relative à la chaîne de modélisation	Annexe H	○									
	Détermination et sélection des données de changement climatique	2.01	Déterminer l'information de changement climatique	Section 5			●	●	●	●	●	●	●
2.02		Sassurer de choisir « Base de référence climatique et hydrologique »	Section 4			●	●	●	●	●			
2.03		Sassurer de respecter les meilleures/bonnes pratiques de l'approche par ensemble	Annexe I			○	○	○	○	○	○	○	○
2.04		Sélectionner le modèle climatique global (si nécessaire)	Annexe C			○							
2.05		Évaluer la transférabilité des données et des résultats (si nécessaire)	Annexe D				○	○	○	○			○
2.06		Évaluer l'adéquation des simulations climatiques	Annexe E				○	○					
Intégration de la ou des bases de référence et des données de modélisation	Du climat à l'hydrologie												
	3.01	Appliquer la transformation des données (si nécessaire)	Section 6.1			○	○	○	○	○			
	3.02	Évaluer l'adéquation des simulations climatiques	Annexe E			○	○	○	○	○			
	3.03	Lancer les simulations hydrologiques alimentées par les scénarios climatiques	-			●	●	●	●	●			
	De l'hydrologie à l'énergie												
	3.04	Évaluer l'adéquation des simulations hydrologiques	Annexe G			○	○	○	○	○	○	○	
	3.05	Appliquer la transformation des données (si nécessaire)	Section 6.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.06	Évaluer l'adéquation des scénarios hydrologiques	Annexe G	○		○	○	○	○	○	○	○	
	3.07	Lancer les simulations énergétiques alimentées par les scénarios hydrologiques	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	De l'énergie à la valeur												
Résultat	3.08	Évaluer l'adéquation des simulations énergétiques	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.09	Appliquer la transformation des données (si nécessaire)	Section 6.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.10	Évaluer l'adéquation des scénarios énergétiques	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.11	Lancer les simulations de valeur alimentées par les scénarios énergétiques	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
				Simulations fondées sur la base de référence		Simulations intégrant le changement climatique							



1

Évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique

L'intégration du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques constitue un défi de taille, à la fois complexe et essentiel. Pour aider le praticien à le relever, la **Figure 2** présente les liens potentiels entre l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques et les impacts physiques du changement climatique dans des contextes particuliers. Cette section-ci indique comment utiliser la **Figure 2**. La **Section 1.1** décrit des contextes et des périodes d'évaluation appropriés. La **Section 1.2** présente les principaux types de valeur et de méthodes d'évaluation utilisées dans le secteur hydroélectrique, ainsi que les possibilités d'y intégrer les impacts du changement climatique. Enfin, la **Section 1.3** énumère les sous-composantes sensibles au climat relatives au calcul des revenus, des coûts et de la vie utile de l'actif. Elle se concentre sur le second objectif, qui constitue le thème principal du Guide, soit de fournir des méthodes d'intégration des données de changement climatique dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur au moyen de l'approche fondée sur les bénéfices (trajectoire surlignée en jaune dans la **Figure 2**).

1.1. Contexte de l'évaluation

Une information précise et actualisée sur la valeur des actifs soutient deux des principales activités de l'entreprise, soit la prise de décision et la présentation de l'information (**Figure 2**, colonnes 1 et 2). En connaissant la valeur d'un actif, le praticien peut prendre des décisions éclairées au sujet d'un projet de développement; de l'acquisition, de la vente ou de la mise à niveau d'actifs actuels; ou d'un contrat de production d'énergie. L'évaluation contribue aussi à la présentation d'une information financière et économique précise aux entités externes, dont les organismes de réglementation chargés de l'application des règles environnementales et sociales; les autorités qui délivrent des licences et des permis; les parties à un contrat de vente ou d'achat; les prêteurs et assureurs (Benedetti *et al.*, 2018; Blanchet *et al.*, 2018; C. Kornelsen *et al.*, 2019; Caron-Périgny *et al.*, 2019; Sagan *et al.*, 2019). De plus, la valeur des actifs figure souvent dans les déclarations de revenus et les communications aux actionnaires. L'information financière peut à son tour éclairer les décisions d'affaires de l'entreprise. L'évaluation des actifs peut aussi contribuer à l'examen des risques et de la résilience.

Le contexte déterminera la fréquence d'évaluation de la valeur des actifs. Par exemple, l'entreprise qui envisage un investissement voudra connaître la valeur d'un actif particulier à un moment donné. L'évaluation peut aussi être cyclique, notamment pour appuyer la présentation d'information financière ou fiscale ou se conformer aux exigences réglementaires. Le contexte déterminera aussi le temps nécessaire à la réalisation de l'évaluation : plusieurs mois ou années pour un projet de développement ou quelques semaines pour l'exercice de la diligence raisonnable requise en vue de l'achat d'un actif. L'entreprise peut aussi vouloir connaître la valeur d'actifs sur une période donnée, comme le montre le **Tableau 2**.

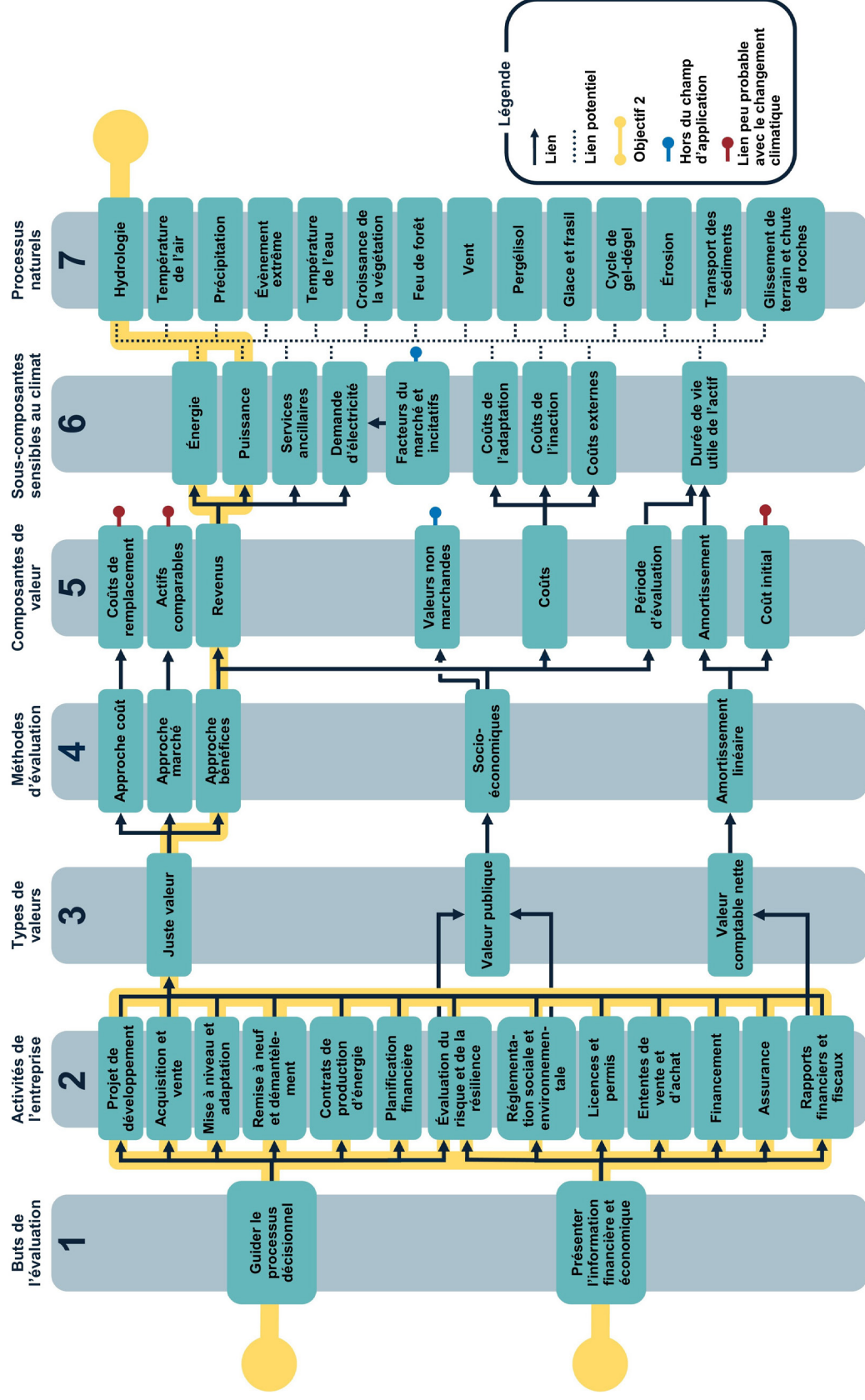


Figure 2 Cadre de travail pour l'intégration du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques

Tableau 2 Périodes d'évaluation de diverses activités (Benedetti *et al.*, 2018; Blanchet *et al.*, 2018; C. Kornelsen *et al.*, 2019; Caron-Périgny *et al.*, 2019; Sagan *et al.*, 2019)

Période (années)	Activité
5-15	Financement; acquisition et vente; contrat de production d'énergie
20-30	Planification financière, acquisition et vente; projet de développement; mise à niveau et adaptation, contrat de production d'énergie
50-100	Licences et permis; réglementation environnementale et sociale; projet de développement; mise à niveau et adaptation; évaluation du risque et de la résilience; remise à neuf et démantèlement

1.2. Types de valeurs et possibilités d'intégration du changement climatique

Selon les contraintes de temps et la nature de l'activité, le praticien a le choix de trois types de valeurs, soit la juste valeur, la valeur publique et la valeur comptable nette. La [Section 1.2](#) présente ces types de valeurs, les méthodes d'évaluation pratiquées dans le secteur et les possibilités d'intégration des impacts du changement climatique.

1.2.1. Juste valeur

La juste valeur correspond au prix qui serait obtenu pour la vente d'un actif dans le cadre d'une transaction régulière entre participants du marché à la date d'évaluation. Elle se calcule au moyen de trois approches, soit l'approche coût, l'approche marché et l'approche bénéfiques. Dans la pratique cependant, on utilise plusieurs approches pour obtenir une évaluation finale ayant un niveau de confiance adéquat.

1.2.1.1. Approche coût

Cette approche offre peu de possibilités d'intégration du changement climatique. Elle vise à déterminer le coût de remplacement, soit la somme requise pour remplacer ou reproduire la capacité de service d'un actif. Elle ne considère aucune source de revenus générés par l'actif et met plutôt l'accent sur les coûts de construction. À mesure que les pratiques d'ingénierie, les facteurs socio-environnementaux et les prix des intrants s'adapteront au changement climatique, celui-ci pourra être pris en compte dans les coûts de construction. Le symbole en rouge dans la colonne 5 de la [Figure 2](#) indique la difficulté d'intégrer les impacts du changement climatique dans l'évaluation des coûts de remplacement.

1.2.1.2. Approche marché

Cette approche offre peu de possibilités d'intégration des impacts du changement climatique. Elle s'appuie sur les prix et d'autres informations relatives à des transactions passées comportant des actifs identiques ou comparables. Le symbole en rouge dans la colonne 5 de la [Figure 2](#) indique que la valeur des actifs actuellement négociés sur le

marché pourrait ne pas encore prendre en compte les impacts du changement climatique, surtout si l'on s'attend à ce que ceux-ci réduisent la valeur globale de l'entreprise. Cette approche comporte une autre contrainte, à savoir que les installations hydro-électriques sont rarement mises sur le marché, d'où la grande difficulté de calculer des valeurs précises. D'ici à ce que l'intégration du changement climatique dans la valeur du marché des actifs devienne une pratique courante, l'approche marché ne sera pas utile pour la prise en compte du changement climatique.

1.2.1.3. Approche bénéfices

Cette approche offre des possibilités d'évaluation des impacts du changement climatique sur les revenus, les coûts et la durée de vie utile de l'actif, contrairement aux deux approches précédentes. Elle considère les revenus générés et les coûts engagés au cours de la vie utile d'un actif pour calculer un coût unique et actuel, soit la valeur actuelle nette (VAN). Les entreprises tiennent compte de la VAN dans divers processus décisionnels et mesures de déclaration, dont le taux de rendement interne, les exigences en matière de revenus et le ratio de couverture de la dette. La [Section 1.3](#) vise à établir les liens entre les impacts du changement climatique et les revenus, les coûts et la durée de vie utile de l'actif.

1.2.2. Valeur publique

Aux fins du Guide, la valeur publique correspond aux avantages nets que l'actif procure aux individus, aux communautés et aux entreprises. Elle diffère de la juste valeur qui, elle, ne considère que les coûts et les avantages socio-environnementaux dans des contextes particuliers, par exemple si les revenus de l'entreprise sont touchés, s'il s'agit d'une exigence des organismes de réglementation ou s'ils sont intégrés dans le cadre d'une responsabilité sociale. Certains coûts et avantages sont difficiles à quantifier, surtout s'il s'agit de biens non commercialisables ou s'ils touchent des personnes n'étant pas directement visées par l'actif. Les approches d'évaluation socioéconomique conviennent aux aspects non commercialisables, dont la sécurité publique, les avantages de la fiabilité énergétique pour la société et les impacts environnementaux, historiques et culturels. Par exemple, une évaluation du risque et de la résilience tiendrait compte de l'impact éventuel d'une inondation sur la sécurité publique. Les organismes de réglementation peuvent exiger une évaluation socioéconomique des impacts environnementaux pour le renouvellement d'un permis ou pour la relocalisation d'une population dans le cadre d'un projet de développement. Les impacts du changement climatique pourraient être incorporés dans l'évaluation de ces aspects non commercialisables et pris en compte par les organismes de réglementation, mais cela dépasse la portée du Guide (symbole en bleu de la colonne 5 de la [Figure 2](#)). La [Section 1.3](#) examine les sous-composantes sensibles au climat relatives aux revenus, aux coûts et à la durée de vie utile de l'actif.

1.2.3. Valeur comptable nette

La valeur comptable nette pourrait intégrer les impacts du changement climatique si elle tenait compte de l'effet du changement climatique sur la durée de vie utile d'un actif hydroélectrique. Cette valeur correspond au montant que l'entreprise inscrit comme étant la valeur de l'actif pour les besoins de la comptabilité, notamment la présentation de l'information fiscale et financière. Il s'agit du coût initial de l'actif moins l'amortissement accumulé, établi selon la méthode linéaire sur la durée de vie utile de l'actif. Comme la vie utile des centrales, des barrages et des réservoirs est longue – de 40 à 125 ans –, le changement climatique peut influencer sur leur capacité à long terme. Cette question est abordée dans la [Section 1.3](#). Le coût initial comprend les dépenses directement attribuables à l'acquisition, dont les coûts des matériaux, les services contractuels, la main-d'œuvre directe, les intérêts et les emprunts. Le symbole en rouge dans la colonne 5 de la [Figure 2](#) indique que les dépenses passées – le coût initial – n'auront pas pleinement intégré les impacts du changement climatique, surtout pour les actifs plus vieux.

1.3. Impacts du changement climatique

Les impacts du changement climatique varient selon les régions, de sorte qu'il est impossible d'en généraliser l'effet sur la valeur des actifs hydroélectriques. Par exemple, on s'attend à ce que les températures augmentent plus rapidement dans les latitudes septentrionales qu'équatoriales. De même, certaines régions connaîtront des précipitations plus élevées et d'autres, plus faibles. Même si on parle souvent de l'aspect mondial du changement climatique, par exemple une hausse mondiale de température moyenne de 4,9°C (Moss *et al.*, 2010) d'ici la fin du siècle (selon le pire scénario d'émissions), chaque processus naturel doit être évalué à l'échelle régionale pour bien comprendre les impacts du changement climatique sur la valeur d'un actif. Le [Tableau 3](#) peut faciliter de telles évaluations; il montre les liens potentiels entre les sous-composantes sensibles au climat (colonne 6 de la [Figure 2](#)), les processus naturels (colonne 7 de la [Figure 2](#)) et le changement climatique.

1.3.1. Impacts du changement climatique sur les revenus

Selon le type d'actif (au fil de l'eau ou réservoir) et l'ampleur de la tâche d'évaluation (actif unique ou parc hydroélectrique), l'estimation des revenus futurs prend en compte les projections d'énergie, de puissance et de services auxiliaires. Par exemple, la capacité de stockage d'un réservoir peut créer une valeur additionnelle découlant de la puissance disponible et des services auxiliaires au réseau. La quantification précise des revenus potentiels d'un actif hydroélectrique doit tenir compte de la gamme complète des produits hydroélectriques et inclure la demande d'électricité attendue. Les projections de la demande sont

particulièrement importantes dans l'estimation des revenus futurs des centrales ayant la souplesse opérationnelle voulue pour produire de l'électricité lorsque la demande est élevée (pointe). Comme le montre le **Tableau 3**, les impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la température de l'air peuvent être évalués en étudiant les impacts sur l'offre et la demande régionales et, par conséquent, sur les revenus futurs.

Les enjeux relatifs au changement climatique dans l'ensemble de l'économie favorisent des changements dans les facteurs du marché et les incitatifs, ce qui se répercute sur la demande future d'hydroélectricité. Par exemple, des changements dans les politiques publiques, les habitudes de consommation et les tendances du marché favorables à l'énergie renouvelable affecteront les revenus futurs. Comme ce seront des préoccupations générales plutôt que des processus naturels précis qui entraîneront ces changements, le symbole en bleu dans la colonne 6 de la **Figure 2** indique que les facteurs du marché et les incitatifs dépassent le champ d'application du Guide.

1.3.2. Impacts du changement climatique sur les coûts

Les coûts sensibles au changement climatique se répartissent en trois sous-composantes – coûts de l'adaptation, coûts de l'inaction et coûts externes. Pour l'entreprise, le coût de l'adaptation est le coût à payer pour gérer le risque ou tirer parti d'une opportunité découlant de la modification d'un changement climatique affectant un ou plusieurs processus naturels (voir la colonne 7 de la **Figure 2**). Le coût de l'inaction correspond aux dépenses supplémentaires engagées pour atténuer les dommages ou les pertes résultant du fait de ne pas mettre en œuvre une adaptation ou de ne pas en tirer parti. Bien que les stratégies d'adaptation comportent des coûts de mise en œuvre, des preuves de plus en plus nombreuses indiquent que l'inaction est plus coûteuse (Canadian Electricity Association, 2016). L'**Annexe C** du *Hydropower Sector Climate Resilience Guide* (IHA, 2019) documente divers impacts potentiels du changement climatique sur les composantes d'un projet qui peuvent faciliter l'évaluation des coûts futurs.

Les coûts externes sont les coûts imposés par une tierce partie qui échappent au contrôle du propriétaire de l'actif. Ils sont indépendants des efforts de l'entreprise déployés pour l'adaptation et comprennent des coûts relatifs aux contraintes socio-environnementales, à l'assurance, aux permis d'utilisation des eaux, aux taux d'intérêt, etc. Le **Tableau 3** précise les impacts potentiels du changement climatique sur les coûts externes.

1.3.3. Impacts du changement climatique sur la durée de vie utile d'un actif

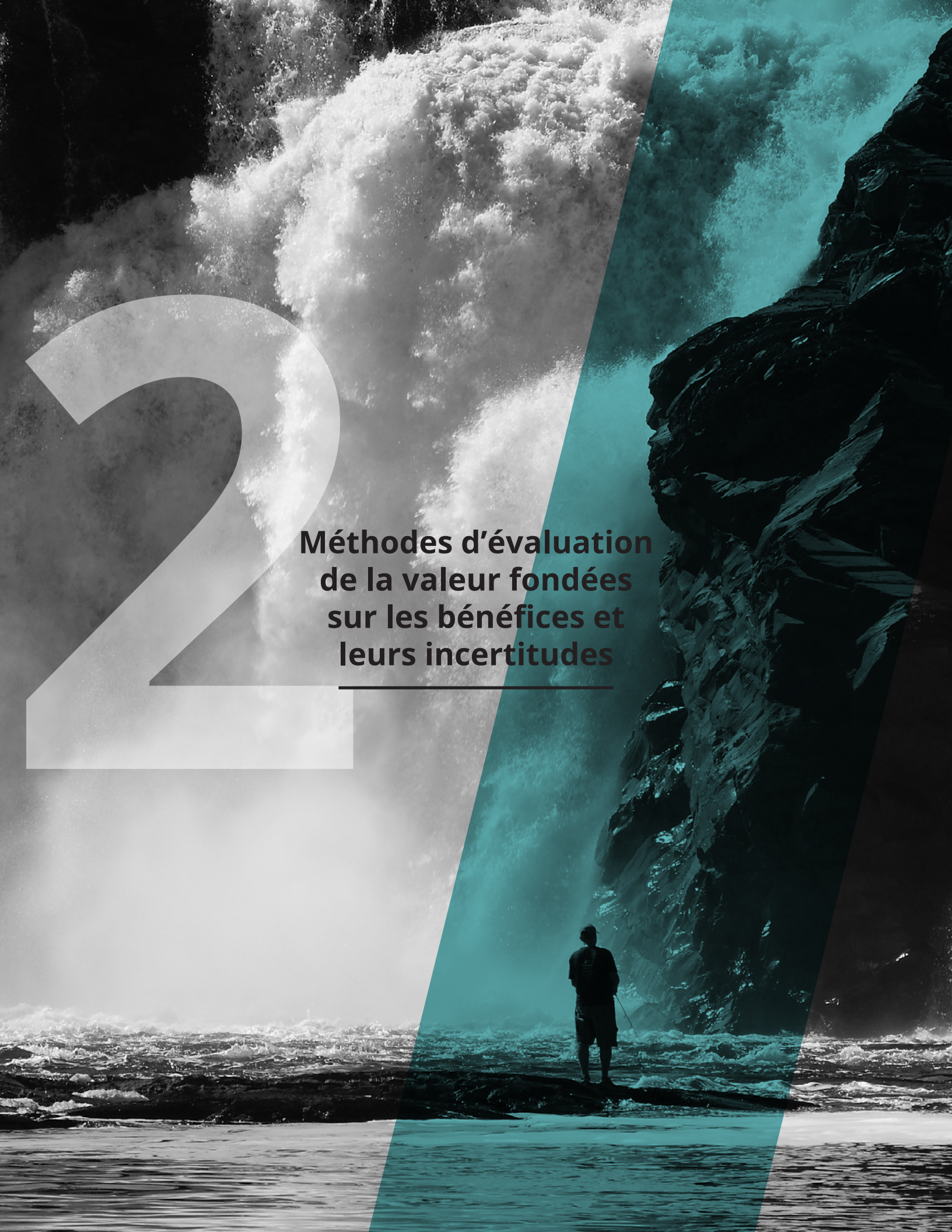
Les centrales hydroélectriques sont fréquemment citées comme étant un type d'infrastructure particulièrement vulnérable aux impacts du changement climatique (Boyle *et al.*, 2013; Canadian Electricity Association, 2016). Des événements extrêmes de courte durée, tels que les fortes tempêtes, combinés à un changement climatique incrémentiel, peuvent affecter la durée de vie fonctionnelle d'un actif s'ils dépassent les critères de conception, ce qui endommagera la structure ou altérera les pratiques de maintenance. Par exemple, il se peut que les matériaux de fondation soient inadéquats pour les conditions futures. Le **Tableau 3** montre les liens entre les processus naturels et les impacts potentiels du changement climatique sur la durée de vie utile d'un actif.

Tableau 3 Principaux impacts du changement climatique sur la valeur des sous-composantes des actifs hydroélectriques

Sous-composante sensible au climat	Processus naturel	Impacts du changement climatique	Référence
Revenus			
Énergie	Hydrologie	Changement dans les apports; les schémas saisonniers, mensuels et quotidiens peuvent influencer sur la quantité et le moment d'occurrence de la production d'énergie.	(Arsenault <i>et al.</i> , 2013; Haguma <i>et al.</i> , 2017; Kao <i>et al.</i> , 2015; Madani et Lund, 2010; Marie Minville <i>et al.</i> , 2009)
Puissance		Changement dans les apports; les schémas saisonniers, mensuels et quotidiens peuvent influencer sur la disponibilité en eau pour la production d'électricité.	(Caron-Périgny <i>et al.</i> , 2019)
Services ancillaires		Changement dans les apports; les schémas saisonniers, mensuels et quotidiens peuvent influencer sur la disponibilité en eau pour le soutien du réseau.	(Benedetti <i>et al.</i> , 2018; Forrest <i>et al.</i> , 2018)
Demande d'électricité	Température de l'air	La hausse des températures de l'air peut modifier la demande d'énergie pour la climatisation en été et le chauffage en hiver, modifiant ainsi le profil de la demande quotidienne.	(Isaac et Van Vuuren, 2009; Jaglom <i>et al.</i> , 2014; Lafrance <i>et al.</i> , 2016; Manitoba Hydro, 2015; Mideksa et Kallbekken, 2010)
Coûts			
Coûts de l'adaptation	Tous	Impacts du changement climatique sur les composantes du projet exigeant des mesures d'adaptation structurelles et fonctionnelles. Chaque mesure peut représenter un coût futur.	Annexe C du <i>Hydropower Sector Climate Resilience Guide</i> (IHA, 2019); (C. Kornelsen <i>et al.</i> , 2019; Caron-Périgny <i>et al.</i> , 2019)
Coûts de l'inaction	Tous	L'inaction – ne pas mettre en œuvre des mesures d'adaptation – peut entraîner des coûts futurs en raison des impacts du changement climatique sur les composantes du projet.	Annexe C du <i>Hydropower Sector Climate Resilience Guide</i> (IHA, 2019)
Coûts externes	Hydrologie	Un changement dans l'hydrologie peut influencer sur les contraintes socio-environnementales des débits régularisés et accroître ou diminuer les coûts de production.	(Caron-Périgny <i>et al.</i> , 2019)
		Dans les régions où le risque d'inondation augmente, la perte potentielle d'une réserve utile causée par des mesures de protection contre les crues peut réduire la production d'énergie et le potentiel de puissance.	(IHA, 2019)
		Un changement dans les apports et la disponibilité en eau peuvent augmenter/diminuer les coûts des permis d'utilisation des eaux.	(Benedetti <i>et al.</i> , 2018; Blanchet <i>et al.</i> , 2018)
		Un changement dans les apports et la disponibilité en eau peut influencer sur la perception du risque par les prêteurs et faire grimper les taux d'intérêt.	(Benedetti <i>et al.</i> , 2018; Blanchet <i>et al.</i> , 2018)
	Événement extrême	Un changement dans l'intensité et la fréquence des événements extrêmes peut faire grimper les primes d'assurance.	(Benedetti <i>et al.</i> , 2018; Blanchet <i>et al.</i> , 2018; Caron-Périgny <i>et al.</i> , 2019)
Période d'évaluation et amortissement			
Durée de vie utile de l'actif	Hydrologie	Un changement dans le cycle hydrologique peut modifier les critères de conception d'un barrage.	(Groulx <i>et al.</i> , 2019; Sagan <i>et al.</i> , 2019)
	Cycle de gel/dégel	Un changement dans le cycle de gel-dégel peut influencer sur la durabilité des matériaux de fondation et des composantes.	(Groulx <i>et al.</i> , 2019)
	Événement extrême	Un changement dans l'intensité et la fréquence d'événements extrêmes peut accroître le risque de bris et menacer l'intégrité de l'actif.	(Caron-Périgny <i>et al.</i> , 2019; Sagan <i>et al.</i> , 2019)

1.3.4. La nécessité d'une méthode efficace

La suite du Guide porte sur le second objectif, à savoir les méthodes d'intégration des données de changement climatique dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur selon l'approche bénéfiques, comme le montre la trajectoire en jaune de la **Figure 2**. D'autres méthodes d'intégration des impacts du changement climatique sont cependant nécessaires pour les autres sous-composantes sensibles au climat identifiées au **Tableau 3** : la puissance, les services ancillaires, la demande d'électricité, les coûts de l'adaptation, les coûts de l'inaction, les coûts externes et la durée de vie utile des actifs. Toutefois, l'étendue des connaissances scientifiques sur les impacts des processus naturels varie en fonction des sous-composantes. Il existe un corpus considérable sur l'effet de la température de l'air sur la demande d'électricité (p. ex., Isaac et Van Vuuren, 2009; Jaglom *et al.*, 2014; Lafrance *et al.*, 2016; Manitoba Hydro, 2015; Mideksa et Kallbekken, 2010), tandis que peu de recherches ont abordé les impacts du changement climatique sur les glissements de terrain et les coûts s'y rapportant (Cloutier *et al.*, 2016). Il est avant tout nécessaire de faire le point sur les processus naturels qui déclencheront probablement des changements dans la valeur d'un actif, car cela favorisera la mise au point de méthodes fiables pour l'intégration de données climatiques.



2

**Méthodes d'évaluation
de la valeur fondées
sur les bénéfices et
leurs incertitudes**

La présente section donne un aperçu d'ensemble de l'évaluation de la valeur d'un actif au moyen de l'approche bénéfices et porte essentiellement sur le climat et l'hydrologie. La [Section 2.1](#) se penche sur la méthode traditionnelle d'évaluation de la valeur d'un actif; la [Section 2.2](#) explique la méthode d'intégration du changement climatique au moyen de l'approche bénéfices; et la [Section 2.3](#) examine les incertitudes s'y rapportant.

2.1. Méthode d'évaluation traditionnelle

La méthode traditionnelle s'appuie sur une base de référence hydrologique qui consiste en observations de débits effectuées sur place, transposées depuis un autre site ou reconstituées à partir du bilan hydrique (apports). Elle est traditionnellement considérée comme étant la meilleure représentation du futur. Comme le montre la [Figure 3](#), la base de référence hydrologique lance la chaîne de modélisation, alimente un modèle énergétique et fournit une projection énergétique, c'est-à-dire une série temporelle au pas de temps quotidien, mensuel ou saisonnier (pour en savoir plus sur les modèles énergétiques, voir *Stoll et al.*, 2017). Pour calculer la projection, le modèle énergétique prend en compte les caractéristiques de l'actif, les règles et les contraintes de gestion opérationnelle ainsi que la demande d'énergie. Des statistiques telles que la moyenne à long terme sont calculées à partir de la projection énergétique quotidienne et servent d'intrants à une projection de valeur réalisée au moyen du modèle de valeur. Celui-ci peut aussi utiliser comme intrants les percentiles médians, faibles et élevés de la production annuelle et mensuelle.

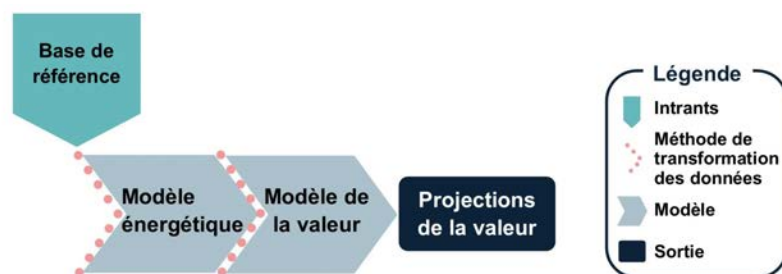


Figure 3 Chaîne de modélisation type de la méthode traditionnelle d'évaluation de la valeur

La [Figure 4](#) montre la méthode d'évaluation traditionnelle. Dans cet exemple, la base de référence hydrologique consiste en des données de débits sur 30 ans (de 1986 à 2015). Elle est recopiée trois fois pour produire un scénario de 90 ans, de 2016 à 2105. L'énergie et les revenus générés par ce scénario sont calculés pour la période future (2016 à 2105) et reposent, à titre illustratif uniquement, sur des hypothèses de modélisation simplistes.

Remarque – La chaîne de modélisation complète décrite ci-dessus ne sera pas forcément nécessaire pour toutes les activités de l'entreprise. Par exemple, l'entreprise qui négocie des ententes de production d'énergie ne peut vouloir que les données annuelles d'énergie.

Le cas échéant, elle utilisera la base de référence hydrologique pour alimenter le modèle énergétique et générer une projection énergétique pour le calcul de l'énergie annuelle, sans utiliser un modèle de valeur à la fin de la chaîne de modélisation.

LA MÉTHODE TRADITIONNELLE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Comme le changement climatique est déjà enclenché et que ses impacts se font déjà sentir sur la base de référence hydrologique, la méthode traditionnelle ne peut plus être considérée comme étant une méthode d'évaluation sans changement climatique : de par sa conception, elle considère intrinsèquement les changements qui se sont déjà produits. La méthode doit toutefois être mise à jour pour prendre en compte les changements futurs qui différeront des changements récents, car la base de référence hydrologique n'est peut-être plus la meilleure représentation du futur.

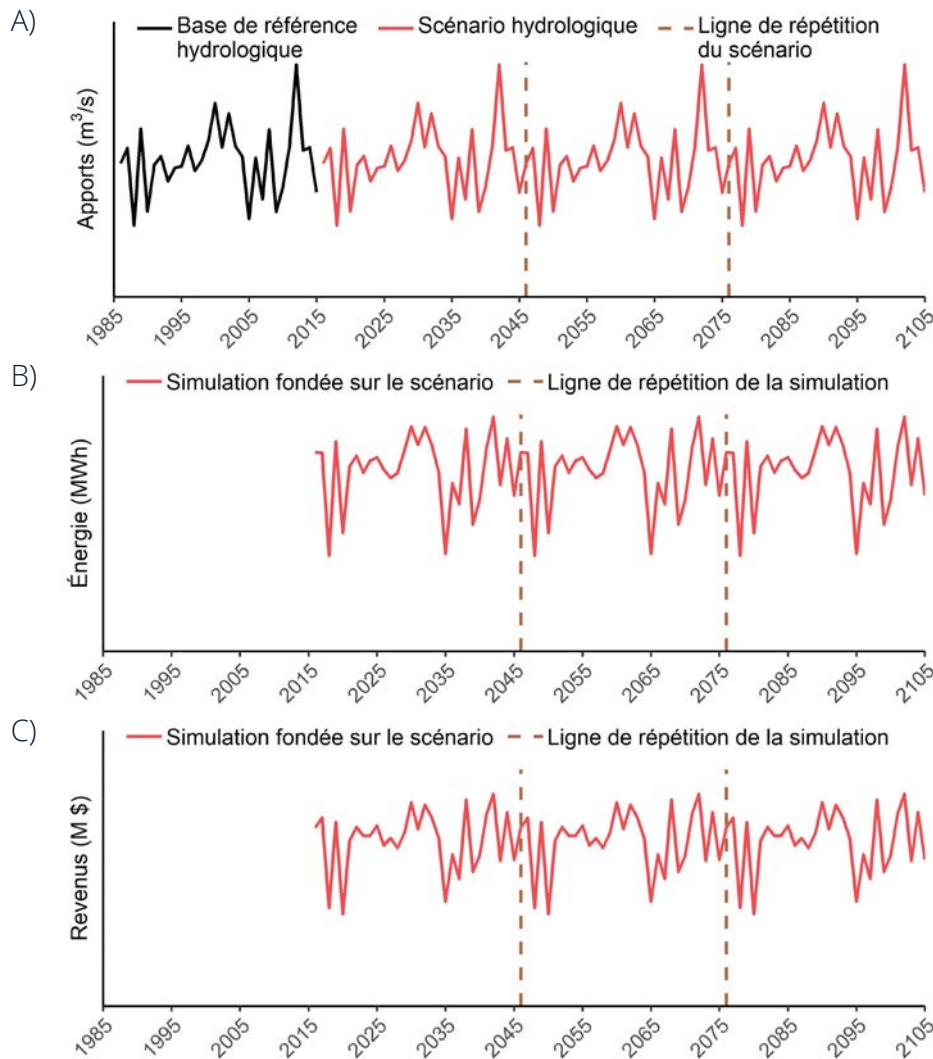


Figure 4 Exemple de la méthode d'évaluation traditionnelle; A) Apports; B) Énergie; C) Revenus

2.2. Méthode d'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique

Pour inclure le changement climatique dans l'évaluation de la valeur d'un actif, on doit reconsidérer l'hypothèse voulant que la base de référence hydrologique (hydrologie passée) soit la meilleure représentation du futur. Ne considérer que la base de référence hydrologique n'est peut-être plus la meilleure option. Il faudrait plutôt lui adjoindre des simulations hydrologiques prenant en compte les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, ainsi que les simulations climatiques. La **Figure 5** montre la chaîne de modélisation alimentée par les scénarios d'émissions pour produire une évaluation intégrant le changement climatique.

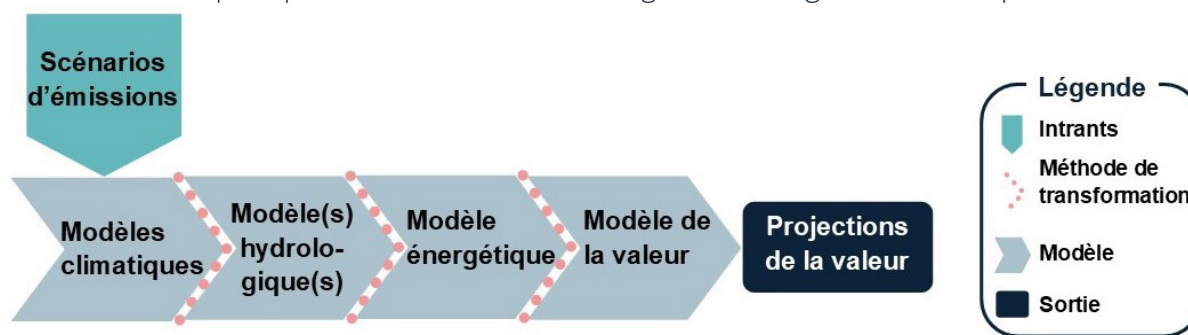


Figure 5 Chaîne de modélisation type pour l'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique

L'un des principaux défis de l'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique est que le praticien doit combiner deux séries de simulations : l'une fondée sur la base de référence (ligne noire dans la **Figure 6**) et l'autre, sur le changement climatique (lignes grises dans la **Figure 6**). Les deux séries fournissent de l'information pertinente, et les prochaines sections du Guide proposent des lignes directrices sur le traitement de cette information.

Comme d'autres documents expliquent très bien plusieurs concepts présentés dans cette section-ci, le Guide fournit de brèves descriptions et des références à des documents complémentaires. Le *Guide sur les scénarios climatiques – Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation* (Charron, 2016) est une lecture recommandée pour se familiariser avec les scénarios climatiques scientifiquement valables (le début de la chaîne de modélisation).

Scénarios d'émissions : Comme le montre la **Figure 5**, les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols sont le point de départ de la méthode intégrant le changement climatique. Il existe de nombreux scénarios représentant la gamme d'émissions futures, établies au moyen de variables telles que la croissance démographique et économique, les politiques gouvernementales, etc. L'*Integrated Assessment Modelling Consortium* (IAMC) développe ces scénarios à la demande du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et les met à jour après quelques années pour tenir compte des développements

socioéconomiques et scientifiques. À la publication du Guide, les scénarios les plus récents étaient des trajectoires de concentration représentatives (RCP – *Representative concentration pathways*) (Moss *et al.*, 2010). La prochaine famille de scénarios portera plutôt le nom de trajectoires socioéconomiques partagées (Sanderson *et al.*, 2018; O'Neill *et al.*, 2014; Hausfather, 2018).

- **Modèles de climat :** Plusieurs centres de modélisation climatique dans le monde participent au projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP – *Coupled Model Intercomparison Project*) et utilisent les scénarios d'émissions du GIEC pour produire des projections climatiques du climat futur en plus des simulations du passé récent, remontant à 1850. Les projections climatiques de CMIP5, la cinquième et précédente phase du projet, s'appuient ainsi sur plus de 20 différents modèles et couvrent les années 2005 à 2100 (Taylor *et al.*, 2012). De nombreuses variables quotidiennes – température, précipitation, ruissellement, humidité relative, vent, etc. sont disponibles librement pour des analyses. De nouvelles simulations climatiques produites par des versions mises à jour des modèles climatiques et utilisant des scénarios d'émissions tenant compte des développements socio-économiques sont périodiquement rendues publiques lors des différentes phases de CMIP. Au moment de la publication du Guide, les projections climatiques de CMIP6, qui couvrent de 2015 à 2100, sont désormais complétées et disponibles, bien que de nombreuses analyses restent à faire.
- **Méthode de transformation des données :** De par leur nature, les modèles de la chaîne de modélisation (climatiques et autres) constituent une simplification et, par conséquent, produisent des simulations imparfaites (voir l'encadré La nécessité des méthodes de transformation des données à la fin de cette sous-section). Des méthodes de transformation des données modélisées peuvent donc être nécessaires à diverses étapes de la chaîne, comme le montrent les points de chevron roses de la **Figure 5**. La **Section 3** présente les méthodes de transformation des données les plus couramment utilisées. Des techniques de mise à l'échelle sont parfois nécessaires, plus particulièrement pour les simulations climatiques. Le Guide n'aborde pas ces techniques, car celles-ci sont amplement décrites dans de nombreux documents (p. ex., Maraun et Widmann, 2018).
- **Simulations climatiques :** À cette étape de la chaîne de modélisation, le praticien a deux options pour les simulations climatiques, chacune offrant des avantages dans des circonstances particulières. La première option consiste à utiliser les simulations climatiques fondées sur des modèles climatiques et une méthode de transformation des données appropriée. La seconde consiste à utiliser un générateur de conditions météorologiques pour produire des simulations climatiques prenant en compte les

tendances dans les modèles climatiques. Le générateur est un modèle numérique qui produit des simulations climatiques synthétiques fondées sur les caractéristiques statistiques des observations météorologiques.

- **Modèle hydrologique :** Les simulations climatiques servent à piloter un modèle hydrologique pour produire des simulations hydrologiques. Après avoir été correctement calibré et validé au moyen d'observations (voir les [annexes F et G](#)), le modèle hydrologique est habituellement piloté au moyen de données de température et de précipitation provenant des simulations climatiques, mais, pour des modèles plus complexes, d'autres variables climatiques peuvent parfois être nécessaires. Différents types de modélisation hydrologique conviennent à différents objectifs; aux fins du processus d'évaluation de la valeur, il faut une modélisation hydrologique en continu (Beven, 2011; Hingray *et al.*, 2015), plutôt qu'une modélisation de la crue de conception, qui est principalement utilisée lors de la conception des infrastructures.
- **Modèles d'énergie et de valeur :** Les simulations hydrologiques sont ensuite entrées dans le modèle d'énergie pour produire des simulations énergétiques. Les statistiques de la méthode traditionnelle sont utilisées pour piloter le modèle de valeur.

La [Figure 6](#) montre un exemple de la mise en œuvre de la chaîne de modélisation intégrant le changement climatique, où la base de référence hydrologique est transformée en énergie, puis en revenus. Il s'agit d'une simulation que l'on dit fondée sur la base de référence : elle est réalisée à partir d'un ou de plusieurs modèles et alimentée par la base de référence, et ne couvre que les années comprises dans la base de référence. La [Figure 6](#) montre aussi des simulations d'hydrologie, d'énergie et de revenus fondées sur des scénarios d'émissions et des simulations climatiques. Il s'agit de simulations intégrant le changement climatique : elles peuvent être réalisées pour le passé et pour le futur, car elles s'appuient sur des modèles climatiques/générateurs de conditions météorologiques et non sur la seule base de référence.

La [Figure 6](#) illustre également un défi important de l'évaluation de la valeur intégrant le changement climatique. Dans cet exemple, les simulations d'hydrologie, d'énergie et de revenus comportent un biais négatif. Celui-ci est plus évident dans les simulations d'énergie et de revenus, où la simulation fondée sur la base de référence (en bleu) se situe au-dessus des simulations intégrant le changement climatique (en gris). Dans cet exemple, le biais provient du modèle hydrologique et se propage dans le reste de la chaîne de modélisation, ce qui pose problème pour la comparaison de la méthode d'évaluation traditionnelle et la méthode d'évaluation intégrant le changement climatique. Cela peut aussi entraîner une perte de confiance à l'égard de la méthode d'évaluation intégrant le changement climatique.

L'une des principales différences entre les deux méthodes d'évaluation tient au nombre de séries temporelles climatiques/hydrologiques qu'il faut utiliser. Avec la méthode traditionnelle, le nombre de séries temporelles climatiques/hydrologiques est habituellement limité (voir la **Figure 4** de la **Section 2.1**), même s'il peut y avoir des exceptions si l'entreprise utilise des approches stochastiques et de rééchantillonnage. Avec la méthode intégrant le changement climatique, l'approche par ensemble est habituellement utilisée pour tenir compte d'incertitudes relatives à des événements et processus futurs inconnus (voir la **Section 2.3** – Sources d'incertitude). L'approche par ensemble consiste à utiliser diverses options et combinaisons à chaque étape de la chaîne de modélisation (scénarios d'émissions, modèles climatiques, techniques de post-traitement, etc.). Les études sur le changement climatique peuvent dès lors se transformer en projets à grand volume de données, et le praticien devra composer avec plusieurs scénarios d'émissions, possiblement les résultats de dizaines de modèles climatiques globaux (MCG) pour des dizaines de bassins versants (p. ex., Guay, Minville et Braun, 2015). La **Figure 6** montre seulement trois simulations, mais il y en a généralement beaucoup plus. L'approche par ensemble permet de prendre en compte et d'intégrer les incertitudes liées aux simulations d'énergie et de revenus. La prochaine section examine l'importance de l'approche par ensemble et les incertitudes liées à la chaîne de modélisation de la valeur.

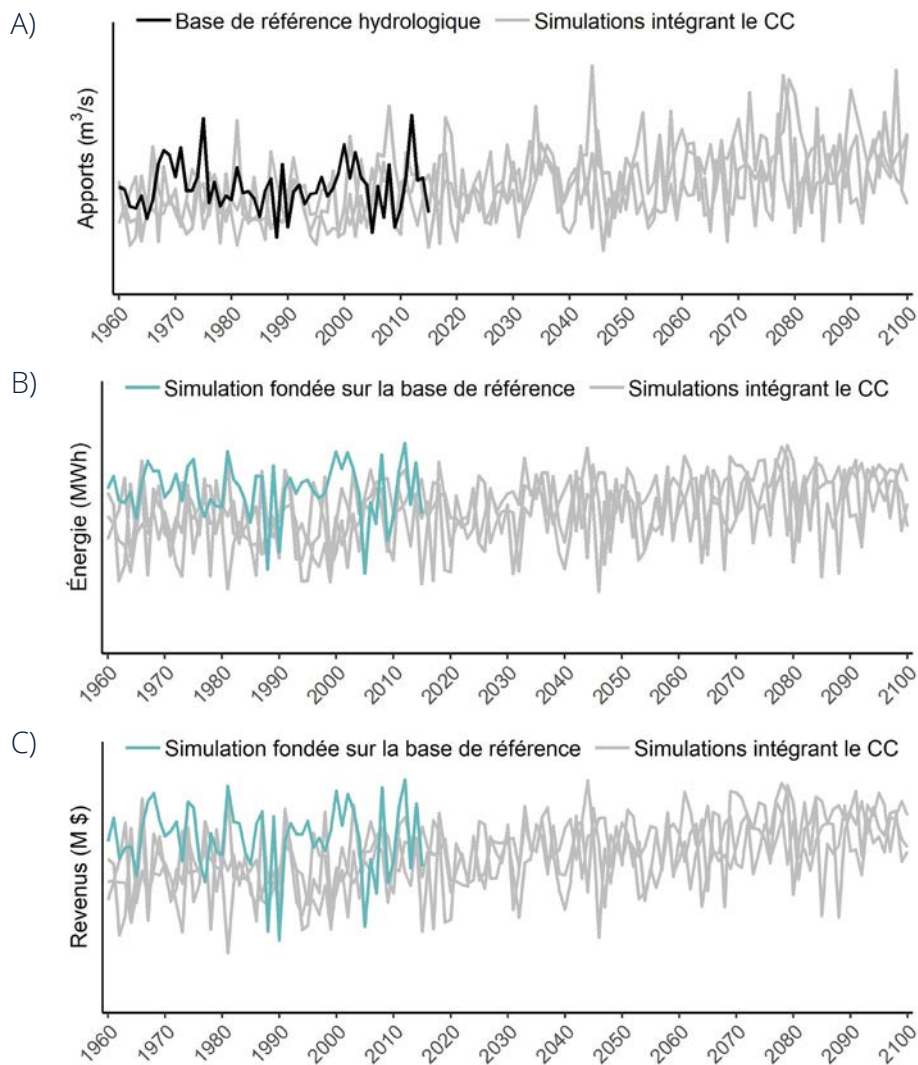


Figure 6 Exemple de l'évaluation intégrant le changement climatique, avec les apports, l'énergie et les revenus du passé. A) Apports; B) Énergie; C) Revenus.

LA NÉCESSITÉ DES MÉTHODES DE TRANSFORMATION DES DONNÉES

Dans un monde idéal, les sorties de modèles de climat, d'hydrologie, d'énergie et de valeur simuleraient exactement la physique du monde réel. Dans la réalité, cependant, un modèle est une abstraction de la réalité – une réalité plausible. La physique du monde réel est simplifiée au moyen de plusieurs équations numériques. Par conséquent, le modèle est une simplification du système et produit des simulations imparfaites et biaisées.

Pour mieux expliquer le biais d'un modèle et la nécessité des méthodes de transformation de données, la **Figure 7** montre la base de référence hydrologique, ainsi que des simulations hydrologiques alimentées par des simulations climatiques brutes (sorties directes des modèles climatiques) et par des simulations climatiques débiaisées (sorties des modèles climatiques avec transformation des données) couvrant les années concomitantes. Les simulations hydrologiques alimentées par des simulations climatiques brutes présentent d'importants biais (surestimation des débits, dans ce cas), qui entraînent par la suite des problèmes dans le reste de la chaîne de modélisation, tandis que les simulations débiaisées concordent bien avec la base de référence hydrologique.

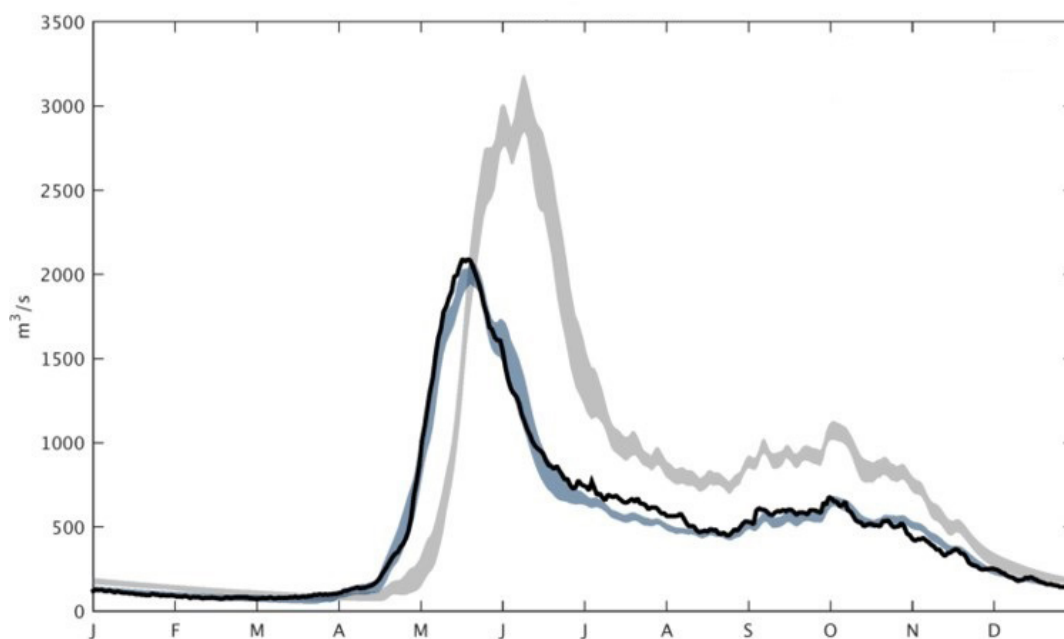


Figure 7 Hydrogramme annuel de la base de référence hydrologique et simulations. La figure montre les débits dans le temps de la base de référence hydrologique (en noir), les simulations hydrologiques produites au moyen de simulations climatiques brutes (en gris) et les simulations hydrologiques alimentées par des simulations climatiques débiaisées (en bleu) couvrant les années concomitantes. Cet exemple montre que la forme de la courbe en noir est bien représentée par la forme de la courbe en gris, mais celle-ci est biaisée à la hausse. Une fois le biais éliminé dans les simulations climatiques, la projection du modèle (en bleu) est assez représentative des observations.

2.3. Sources d'incertitude

Les scientifiques s'accordent pour dire que le climat mondial change et continuera de changer. Malgré cette certitude, des incertitudes demeurent quant à l'ampleur de l'augmentation future des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, à la réponse du système climatique à ces émissions et à la façon dont les changements climatiques se traduiront dans les changements hydrologiques. Ces incertitudes s'amplifient à chaque étape de la chaîne de modélisation, ce que Jones (2000) a surnommé la « cascade d'incertitudes ». Il en résulte un degré important d'incertitude inhérente. Même si le praticien en établit les caractéristiques et en tient compte, l'incertitude demeurera.

Bien que les décisions soient plus faciles à prendre si le processus décisionnel ne tient pas compte d'une certaine incertitude, cela ne garantit pas qu'il s'agira de bonnes décisions. Par exemple, en tenant compte d'un seul scénario d'émissions ou de quelques MCG seulement, le praticien risque de passer à côté de ce qu'il adviendra réellement dans l'avenir et des conséquences résultantes. Ce risque sera moins grand si le praticien explore toutes les combinaisons possibles de scénarios d'émissions, de modèles et de méthodes.

L'approche par ensemble (combinaisons de scénarios d'émissions, de modèles et de méthodes) permet d'évaluer la cascade d'incertitudes. Cependant, cette approche peut devenir problématique en raison de la hausse rapide du nombre de combinaisons, et leur intégration dans la chaîne de modélisation peut devenir irréaliste en raison de contraintes telles que le temps de calcul.

Comprendre l'incertitude inhérente dans chaque étape de la chaîne est la première étape de l'approche par ensemble : on peut ainsi affecter plus de ressources à la caractérisation des sources d'incertitude les plus importantes. La [Section 2.3.1](#) définit les sources d'incertitude dans la chaîne, et la [Section 2.3.2](#) examine l'ampleur relative de diverses sources d'incertitude. L'incertitude liée à certaines méthodes présentées dans la [Section 3](#) est également traitée ici par souci de clarté. D'autres stratégies se rapportant à l'approche par ensemble sont examinées dans l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble et l'[Annexe C](#) – Méthodes de sélection de MCG.

2.3.1. Quelles sont les sources d'incertitude

Le [Tableau 4](#) présente les sources d'incertitude dans la chaîne de modélisation ainsi que les approches permettant de les quantifier (voir la [Section 2.3.2](#) pour l'ampleur relative de l'incertitude).

Tableau 4 Sources d'incertitude dans chaque étape de la chaîne de modélisation

Objet	Quelles sont les sources d'incertitude ?	Comment l'incertitude est-elle quantifiée ?
Scénarios d'émissions	- Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre reflètent notre compréhension et nos connaissances actuelles sur la croissance démographique et économique, les conflits, la technologie et les politiques internationales (GIEC, 2013). - Ces facteurs sont d'importantes sources d'incertitude; par exemple, les politiques d'atténuation peuvent jouer un rôle important dans la réglementation des émissions anthropiques (Charron, 2016), et il n'est pas évident d'établir des projections sur l'émergence d'une technologie qui n'existe pas encore.	- Le GIEC a défini un éventail de scénarios d'émissions afin de refléter une variété de visions de ce que l'avenir peut avoir en réserve (GIEC, 2013). - L'incertitude liée aux scénarios d'émissions est habituellement quantifiée à partir de l'éventail de résultats obtenus par l'ensemble des scénarios.
Projections climatiques : Modèles climatiques	- Les MCG divisent la terre en cellules 3D et utilisent des équations pour approximer la réalité (GIEC, 2013). Le nombre de processus ne cesse d'augmenter en raison des progrès de la science, mais des approximations et des hypothèses demeurent nécessaires, car la terre est trop complexe et chaotique pour qu'on puisse en représenter tous les aspects de façon scientifique (Wilby, 2010). Cela crée une source importante d'incertitude. - En outre, les modèles climatiques doivent paramétrer (simplifier) les processus qui se produisent sur de petites échelles spatiales et temporelles, ce qui entraîne une source additionnelle d'incertitude. Par exemple, les MCG ne modélisent pas explicitement les nuages (Sillmann <i>et al.</i>, 2017).	CMIP regroupe des douzaines de MCG de centres partout dans le monde. Ces modèles comportent divers processus et paramétrages. L'incertitude liée aux modèles climatiques est habituellement approximée au moyen de l'éventail des résultats obtenus par CMIP (GIEC, 2013).
Projections climatiques : Variabilité naturelle	- Même si les scientifiques comprenaient parfaitement le système Terre et que les capacités de calcul étaient illimitées, il y aurait encore de l'incertitude dans les simulations du système climatique étant donné son comportement chaotique. Celui-ci crée une variabilité naturelle (Deser, Knutti <i>et al.</i>, 2012; Giuntoli <i>et al.</i>, 2018). - La variabilité naturelle contribue à l'incertitude des projections climatiques; par exemple, les tendances climatiques à l'échelle décennale peuvent afficher des tendances contraires à celles des changements climatiques globaux (Charron, 2016; Deser, Phillips <i>et al.</i>, 2012; Evin <i>et al.</i>, 2019).	- La variabilité naturelle des ensembles CMIP est représentée par la diversité des conditions initiales des divers modèles (Deser <i>et al.</i>, 2014; Hawkins <i>et al.</i>, 2016). - Certains centres de modélisation ont lancé des modèles climatiques uniques à plusieurs reprises en introduisant de légères perturbations dans les conditions initiales (p. ex., en modifiant la date de début de la simulation, voir Charron, 2016). Ce type de grand ensemble peut servir à évaluer l'incertitude résultant de la nature chaotique du climat (Giuntoli <i>et al.</i>, 2018).
Post-traitement : Méthodes et ensembles de données d'observation	- L'élimination de biais dans les modèles climatiques exige un post-traitement (GIEC, 2013). Les analyses d'impacts climatiques peuvent aussi exiger une mise à l'échelle pour convertir l'échelle des cellules du modèle à celle du modèle d'impacts. Ces méthodes formulent des hypothèses quant à la distribution des données et supposent que certains aspects du climat ne changeront pas dans l'avenir (Maraun et Widmann, 2018), mais certaines de ces hypothèses sont discutables. - Les méthodes de post-traitement utilisent des observations. Or, celles-ci comportent des incertitudes liées aux : changements dans l'emplacement de la station climatique; pratiques en matière d'observations et de prise de mesure; caractéristiques du site et régimes d'échantillonnage; problèmes liés à l'interpolation et aux biais relatifs aux sites urbains, côtiers et en basse altitude (Wilby, 2010).	- On peut évaluer l'incertitude liée au post-traitement en comparant diverses méthodes ou en les testant en regard à de multiples jeux de données (Maraun et Widmann, 2018; Annexe E – Validation de produits climatiques). - La meilleure façon d'évaluer l'incertitude liée aux jeux de données consiste à comparer les projections produites par différents jeux de données (p. ex. Gao <i>et al.</i>, 2019) ou à comparer directement les jeux de données (Annexe E – Validation de produits climatiques).

Objet	Quelles sont les sources d'incertitude ?	Comment l'incertitude est-elle quantifiée ?
Projections hydrologiques	▪ Dans la pratique, il est impossible de mesurer tout ce que nous aimerions savoir au sujet du système hydrologique, surtout à cause des variations spatiales et des limites des techniques de mesure (Pechlivanidis <i>et al.</i>, 2011). Par ailleurs, il est difficile d'établir un lien entre les propriétés physiques mesurées sur le terrain et les valeurs paramétriques utilisées dans les modèles pour représenter le comportement de l'ensemble du territoire (Wilby, 2010). Tous les modèles hydrologiques demeurent donc conceptuels et empiriques dans une certaine mesure et dépendent fortement des paramètres et de la calibration (Coron <i>et al.</i>, 2012). Ce caractère empirique signifie qu'un modèle performant dans le climat actuel pourrait ne pas l'être dans un climat futur (Lofgren <i>et al.</i>, 2011). ▪ Les incertitudes liées aux modèles hydrologiques ont trait à la structure, aux paramètres et aux observations (Chen, Brissette, Poulin, <i>et al.</i>, 2011; Motavita <i>et al.</i>, 2019; Schaefli, 2015).	▪ On estime l'incertitude liée aux modèles hydrologiques soit en testant le modèle face à plusieurs jeux de données, soit en comparant les projections hydrologiques obtenues de différents modèles (Pechlivanidis <i>et al.</i>, 2011). La seconde méthode permet de tester l'équifinalité, à savoir si plusieurs modèles ou ensembles de paramètres produisent les mêmes résultats dans la calibration (débits dans le cas de l'hydrologie), mais non dans la capacité de projeter les changements (Her <i>et al.</i>, 2019; Poulin <i>et al.</i>, 2011).
Projections énergétiques	▪ Étant donné leur nature, les opérations hydroélectriques sont complexes à modéliser par rapport à d'autres méthodes de production d'électricité (Stoll <i>et al.</i>, 2017) pour les raisons suivantes : • Manque de données sur les caractéristiques du système • Contraintes de temps de calcul • Capacité limitée de prendre en compte toutes les contraintes applicables (contraintes environnementales, opérationnelles et réglementaires). ▪ Ces sources de complexité s'ajoutent à l'incertitude des projections énergétiques : les caractéristiques et les contraintes applicables sont difficiles à prendre en compte et peuvent changer à l'avenir. Entre autres les paramètres suivants : • Caractéristiques et disponibilité du système de production (arrêts forcés et planifiés des unités, transformateurs et lignes) • Contraintes environnementales (élévation maximale du réservoir, limites de rejet, etc.) • Contraintes réglementaires	▪ La précision du modèle peut être évaluée par rapport à la production générée dans le passé. ▪ L'impact des contraintes changeantes et de la disponibilité des composantes du système de production peut être simulé.
Évaluation de la valeur des actifs	▪ En plus de la volatilité du marché et de la disponibilité de l'information, les sources d'incertitude liées à l'évaluation de la valeur d'un actif proviennent d'hypothèses établies à partir d'une combinaison des conditions futures du marché, par exemple : • Prix et tarifs de l'énergie • Coûts d'investissement • Vie financière du projet • Inflation • Impôts, subventions, politiques ▪ Une autre source d'incertitude découle de l'estimation de paramètres clés, dont le taux d'actualisation et le coût moyen pondéré du capital fondés sur les éléments suivants : • Profil de risque de l'actif • Structure du capital • Coût du capital	▪ L'incertitude liée à l'évaluation de la valeur d'un actif peut s'évaluer au moyen d'une analyse de sensibilité partielle en testant l'impact de chaque hypothèse sur la valeur globale (Malovic <i>et al.</i>, 2015). ▪ Des approches probabilistes telles que les simulations de Monte Carlo (Haguma <i>et al.</i>, 2017) et l'analyse de scénarios (Manitoba Hydro, 2013) considèrent simultanément une combinaison de conditions futures. Les résultats obtenus sont associés à un degré de confiance statistique. ▪ L'analyse par les options réelles permet aux décideurs d'évaluer un investissement dans des conditions de marché incertaines (Kim <i>et al.</i>, 2017). Elle estime la volatilité de la valeur du projet.

Remarque – L’approche conventionnelle de la quantification de l’incertitude, c’est-à-dire de prendre un ensemble de simulations et de répartir la variance en diverses composantes, (p. ex., Giuntoli *et al.*, 2018) est une démarche informative et peut, par conséquent, sous-estimer l’incertitude totale en raison d’un échantillonnage insuffisant des résultats de modèles et de scénarios possibles (Bosshard *et al.*, 2013; Schaepli, 2015).

2.3.2. Comparaison des sources d’incertitude dans les projections de débits

Cette section examine l’importance des sources d’incertitude pour les projections de débits et la contribution de chacune aux variations observées dans les projections. Elle ne porte pas sur les incertitudes liées aux modèles d’énergie et de valeur, puisque les modèles climatiques et hydrologiques constituent généralement les sources d’incertitude les plus importantes pour les projections de débits. Une courte section à la fin porte sur d’autres variables climatiques et sur la dépendance temporelle de l’incertitude relative.

Modèles climatiques et modèles hydrologiques

On considère généralement que la source d’incertitude la plus importante de la chaîne de modélisation provient du modèle climatique (Bastola *et al.*, 2011; De Niel *et al.*, 2019; Feng, 2018; Kay *et al.*, 2009; Prudhomme et Davies, 2009; Vetter *et al.*, 2017; Wilby et Harris, 2006). Toutefois, l’incertitude du modèle hydrologique peut être plus importante dans les saisons et les régions dominées par des processus qui compliquent la modélisation hydrologique, par exemple les processus touchant la neige et la glace (Bosshard *et al.*, 2013; I Giuntoli *et al.*, 2015; Troin *et al.*, 2018; Vidal *et al.*, 2016), l’humidité du sol, les eaux souterraines (Her *et al.*, 2019) et l’évapotranspiration (Hattermann *et al.*, 2018; Sellami *et al.*, 2016).

Scénarios d’émissions

Les scénarios d’émissions sont très incertains; pour CMIP5, par exemple, le scénario RCP 8.5 («*business as usual*») a une concentration équivalente en CO₂ supérieure à 1 370 ppm, comparativement à environ 650 ppm pour le scénario modéré (RCP 4.5; Charron, 2016). L’éventail des projections correspondant à chaque scénario d’émissions peut varier. Shen *et al.*, (2018) ont montré que l’incertitude hydrologique d’un scénario d’émissions élevées (RCP 8.5) est plus importante que celle d’un scénario d’émissions modérées (RCP 4.5). Cela survient parce que l’éventail de réponses de la chaîne de modélisation est plus grand pour le scénario d’émissions élevées. Néanmoins, pour les projections de débits, des études ont montré que la contribution du RCP à l’incertitude est faible en comparaison d’autres sources d’incertitude (pour les horizons temporels analysés), et ce, étant donné la prédominance d’autres sources d’incertitude (Arnell et Gosling, 2013; Chen, Brissette et Leconte, 2011; Gao *et al.*, 2019; Giuntoli *et al.*, 2018; Wada *et al.*, 2013).

Variabilité naturelle

Il est difficile de tirer des conclusions au sujet de la contribution de la variabilité naturelle aux projections de débits, car les quelques études pertinentes ayant examiné cette question ont dégagé des résultats contradictoires. Chen *et al.*, (2011) ont trouvé que les conditions initiales du MCG (qui représentent la variabilité naturelle) étaient une importante source d'incertitude en lien avec certaines variables hydrologiques. En revanche, Giuntoli *et al.*, (2018) ont trouvé que la variabilité naturelle contribuait peu à l'incertitude, mais dans cette étude, des moyennes décennales ont été utilisées, ce qui a réduit la variabilité naturelle.

Une autre difficulté dans la comparaison d'études qui évaluent les degrés d'incertitude découlant de la variabilité naturelle tient à ce que l'ampleur de l'incertitude dépend de plusieurs facteurs.

- **Échelle temporelle.** L'incertitude due à la variabilité naturelle a tendance à être plus forte, et son moment d'émergence plus long, aux petites échelles temporelles (Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017; Van Uytven et Willems, 2018; Vidal *et al.*, 2016). Le moment d'émergence correspond au moment où le signal de changement climatique émerge du bruit de fond de la variabilité naturelle.
- **Échelle spatiale.** La variabilité a tendance à être plus élevée aux petites échelles spatiales. Par exemple, les projections régionales ont tendance à afficher une variabilité naturelle plus élevée que les moyennes mondiales et, dans certains cas, l'agrégation spatiale élimine la variabilité (Evin *et al.*, 2019; Fischer *et al.*, 2013).
- **Géographie et climat.** Par exemple, l'incertitude relative aux projections de température est moins forte aux pôles en raison d'un signal de changement plus élevé (Fischer *et al.*, 2013).
- **Variable hydrologique.** L'ampleur relative de l'incertitude liée à la variabilité naturelle varie selon la variable hydrologique (Chen, Brissette, Poulin *et al.*, 2011; Hawkins et Sutton, 2009; Vidal *et al.*, 2016).

Le changement dans la dynamique de l'atmosphère pourra entraîner un changement dans la variabilité naturelle future. Par exemple, différentes oscillations pourront se comporter différemment dans l'avenir. Selon les projections d'ensemble de certaines études, la variabilité interannuelle de la température pourrait diminuer dans les latitudes nordiques (Carter *et al.*, 2007; Hawkins *et al.*, 2016). Néanmoins, la plupart des études indiquent que la quantité totale de variabilité naturelle demeurera constante dans le futur (p. ex., Chen, Brissette et Leconte, 2011; Giuntoli *et al.*, 2018).

Post-traitement

Bien que les modèles climatiques et hydrologiques soient les principaux responsables de l'incertitude dans la chaîne de modélisation, l'incertitude découlant du post-traitement (mise à l'échelle, correction de biais) représente une part importante de l'incertitude dans la projection de débits élevés et extrêmes (Chen, Brissette et Leconte, 2011; De Niel *et al.*, 2019; Mandal et Simonovic, 2017). Gao *et al.* (2019) ont trouvé que l'incertitude liée aux débits mensuels et annuels moyens résultant d'une correction de biais dans les données est supérieure à celle des scénarios d'émissions et inférieure à celle des MCG pour les horizons temporels analysés.

Dépendance temporelle

L'ampleur relative des sources d'incertitude décrites ci-dessus varie en fonction de l'horizon de la projection (Giuntoli *et al.*, 2018; **Figure 8**). Par exemple, à mesure que le siècle avance, les impacts hydrologiques résultant de changements dans les scénarios d'émissions sont de plus en plus importants en comparaison au bruit de fond de la variabilité naturelle (Giuntoli *et al.*, 2018). À l'inverse, pour des simulations sur quelques décennies seulement, le signal de changement climatique n'a peut-être pas le temps d'émerger du bruit de fond de la variabilité naturelle (Charron, 2016). Le moment d'émergence dépend de la force du signal de changement climatique (p. ex., il peut être plus fort pour certaines variables hydrologiques) et de l'ampleur de la variabilité naturelle (p. ex., qui dépend de l'échelle temporelle et spatiale, de la saison, du climat, etc.; Bosshard *et al.*, 2013).

Le graphique ci-dessous montre la distribution dans le temps de l'incertitude attribuable à diverses sources en fonction de l'horizon projeté. Par exemple, dans le cadre du Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP), Giuntoli *et al.*, (2018) ont examiné l'évolution de l'ampleur relative de l'incertitude des projections de ruissellement aux États-Unis pour le 21^e siècle (**Figure 8**). Les auteurs ont trouvé que la contribution relative de la variabilité naturelle (orangé) diminue avec le temps, tandis que l'incertitude des modèles d'impacts globaux augmente considérablement (vert). Ces résultats seraient probablement différents dans une autre géographie et échelle spatiale. Un modèle hydrologique global est un type de modèle d'impact global; il utilise les projections de changement climatique comme intrants et modélise les impacts sur d'autres variables.

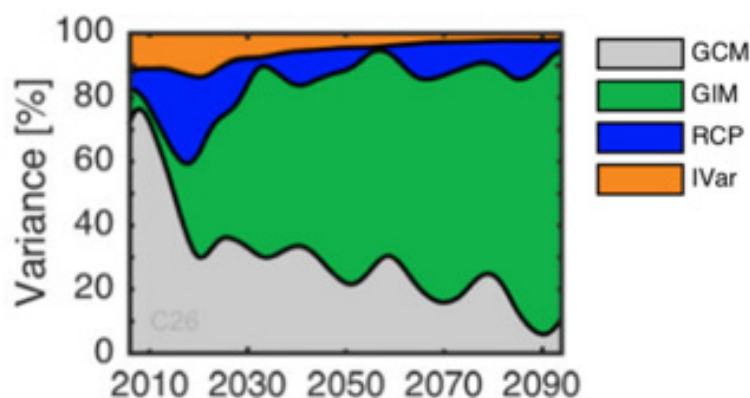


Figure 8 Changement dans la distribution des sources d'incertitude du ruissellement annuel médian (calculé à partir du ruissellement quotidien) pour une cellule sélectionnée (42,7° N-73,9° E; Albany, NY). Légende : modèle climatique global (GCM), modèle d'impact global (GIM), trajectoire de concentration représentative (RCP), variabilité interne (IVar). La période de référence est 1971–2005, et des moyennes mobiles sur 10 ans ont été utilisées (Giuntoli *et al.*, 2018). Ces résultats seraient probablement différents dans une autre géographie et échelle spatiale.

Ampleur de l'incertitude liée à d'autres variables

L'ampleur relative de diverses sources d'incertitude dépend des variables à l'étude. Le praticien peut vouloir des projections de température ou de précipitation, y compris la neige (p. ex., pour un modèle élaboré à l'interne). Le cas échéant, nous invitons le lecteur à consulter la littérature sur la distribution de l'incertitude pour la température et la précipitation (p. ex., Hawkins et Sutton, 2011; Fischer, Beyerle et Knutti, 2013; Hawkins *et al.*, 2016; Hosseinzadehtalaei, Tabari et Willems, 2017; Van Uytven et Willems, 2018; Evin *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2019).

La **Figure 9** montre l'évolution dans le temps des sources d'incertitude pour la température et la précipitation (semblable à la **Figure 8**, qui montre la même chose pour le ruissellement). Les scénarios d'émissions semblent être une source d'incertitude relative plus importante pour la température que pour les projections de précipitation (Giuntoli *et al.*, 2018), tandis que les projections de précipitation sont généralement dominées par l'incertitude et la variabilité naturelle des MCG plutôt que des scénarios d'émissions (p. ex., Hawkins et Sutton, 2011).

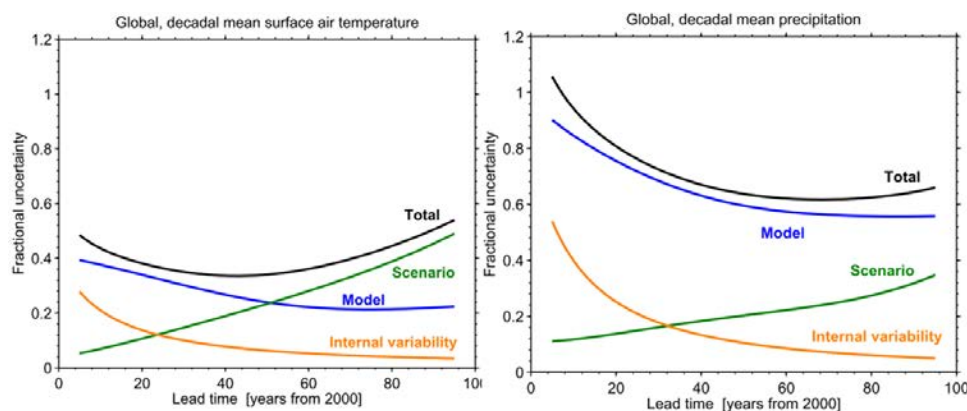
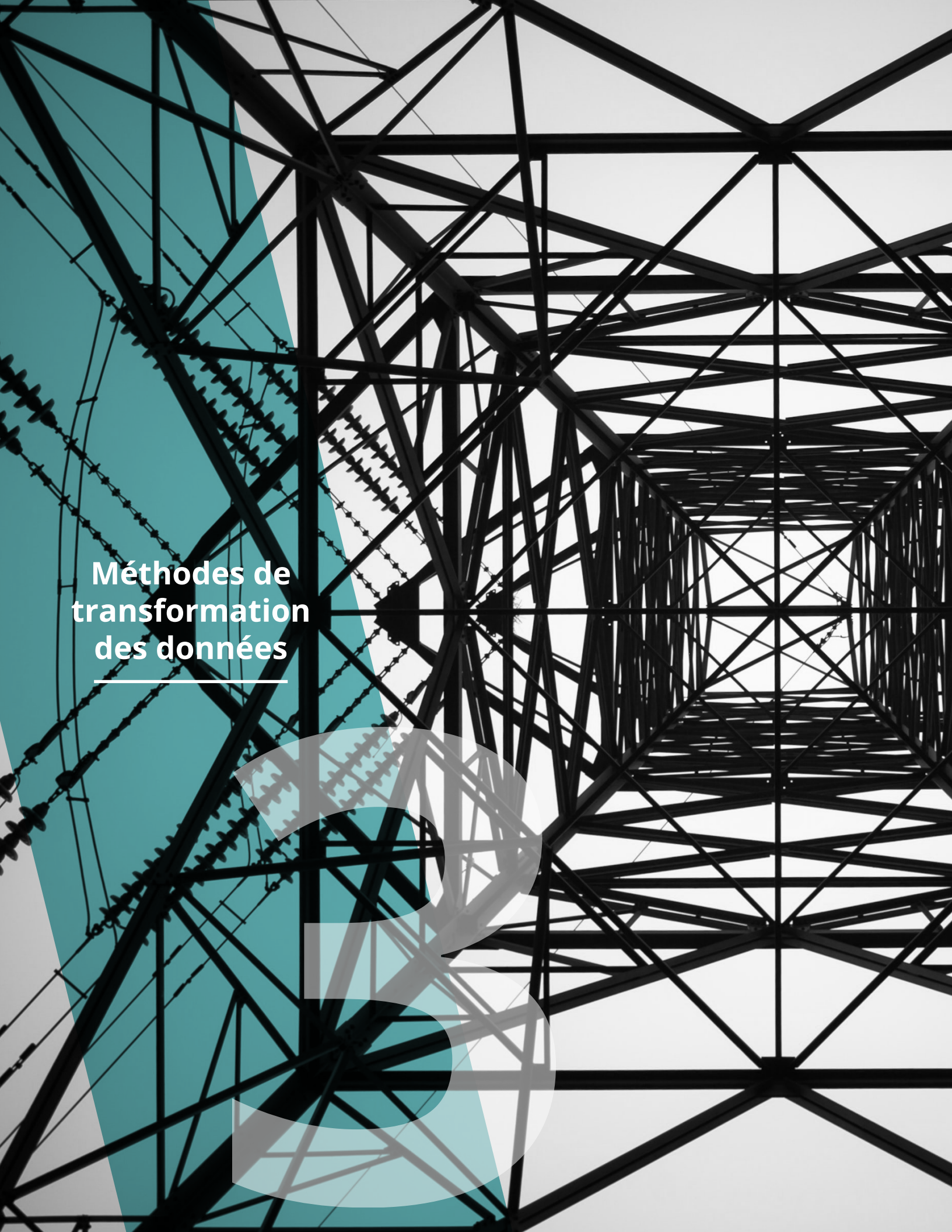


Figure 9 Distribution des sources d'incertitude des projections climatiques décennales mondiales moyennes, l'incertitude étant divisée par le changement moyen attendu pour la température (gauche) et la précipitation (droite) (tiré de Hawkins et Sutton, 2011)



Méthodes de transformation des données

Cette section porte sur les méthodes de transformation de données qu'il faut parfois appliquer entre chaque étape de la chaîne de modélisation décrite dans la [Section 2](#). Ces méthodes s'appliquent à deux types de séries temporelles : la base de référence (les données considérées comme étant la meilleure représentation de l'état passé ou actuel d'un système) et la simulation (la sortie directe d'un modèle). Le résultat de la transformation des données est un scénario.

La [Section 3.1](#) porte sur la méthode directe, qui s'applique à la base de référence et à la simulation. Les méthodes de réduction et d'ajustement, présentées respectivement dans les [Sections 3.2](#) et [3.3](#), s'appliquent habituellement à une base de référence pour traiter les erreurs, les tendances, les biais et les hétérogénéités dans les données. Les méthodes de prolongement, de delta et de correction de biais, décrites aux [Sections 3.4](#) à [3.6](#), utilisent la base de référence et les simulations pour produire un scénario futur. En théorie, ces méthodes peuvent être appliquées dans toutes les étapes de la chaîne de modélisation et à plusieurs reprises. Les [Sections 6](#) et [7](#) fournissent des lignes directrices sur leur utilisation aux fins de l'évaluation de la valeur des actifs. Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs définitions de ces méthodes, et nous définirons chacune en temps opportun.

ÉVALUATION GÉNÉRALE DES DONNÉES

Une analyse rigoureuse des données doit être réalisée avant la transformation des données. Le praticien pourra ainsi se familiariser avec les données et mieux comprendre les biais et les imperfections dans celles-ci. S'il omet cette étape et examine seulement le résultat obtenu à la fin de la chaîne de modélisation, il pourrait passer à côté d'importants éléments d'information. À cet égard, les statistiques descriptives (p. ex., moyenne, écart-type) et les méthodes de classification constituent de bons points de départ.

3.1. Méthode directe

Dans la méthode directe, qui est la plus simple, aucune modification n'est appliquée aux données (base de référence et simulation) avant de les intégrer dans le prochain modèle de la chaîne de modélisation.

3.1.1. Avantages de la méthode

- Facilité de mise en œuvre
- Aucune perte d'information due à la transformation des données

3.1.2. Inconvénients de la méthode directe

- Toutes les caractéristiques de la base de référence et de la simulation sont transmises à la prochaine étape de la chaîne de modélisation.

3.2. Méthode de réduction

Cette méthode, qui consiste à raccourcir la période de base (voir la [Figure 10](#)), s'applique quand une partie de la série temporelle est considérée comme étant non représentative de la période actuelle. Cela peut se produire si la période de base comporte une tendance statistiquement significative ou des hétérogénéités statistiques (p. ex., brusque changement dans la moyenne ou hétéroscédasticité).

Avant la réduction de la période de base, il est important d'effectuer les tests statistiques appropriés. Idéalement, il faut également déterminer la ou les causes de la tendance et des hétérogénéités statistiques au moyen d'une étude de détection et d'attribution (voir l'[Annexe B](#) – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique). Comme mentionné dans la [Section 4](#), de nombreux facteurs autres que le changement climatique peuvent donner lieu à une tendance ou à des hétérogénéités.

3.2.1. Avantages de la méthode de réduction

- Échantillon plus représentatif des conditions actuelles
- Obtention d'un échantillon homogène, en présence d'hétérogénéités statistiques

3.2.2. Inconvénients de la méthode de réduction

- Perte d'importantes données de la partie non utilisée de la série temporelle (p. ex., variabilité interannuelle et événements extrêmes survenus dans la partie non utilisée)
- Il est recommandé de mener une étude de détection et d'attribution avant d'appliquer cette méthode, mais celles-ci sont toutefois longues et complexes.

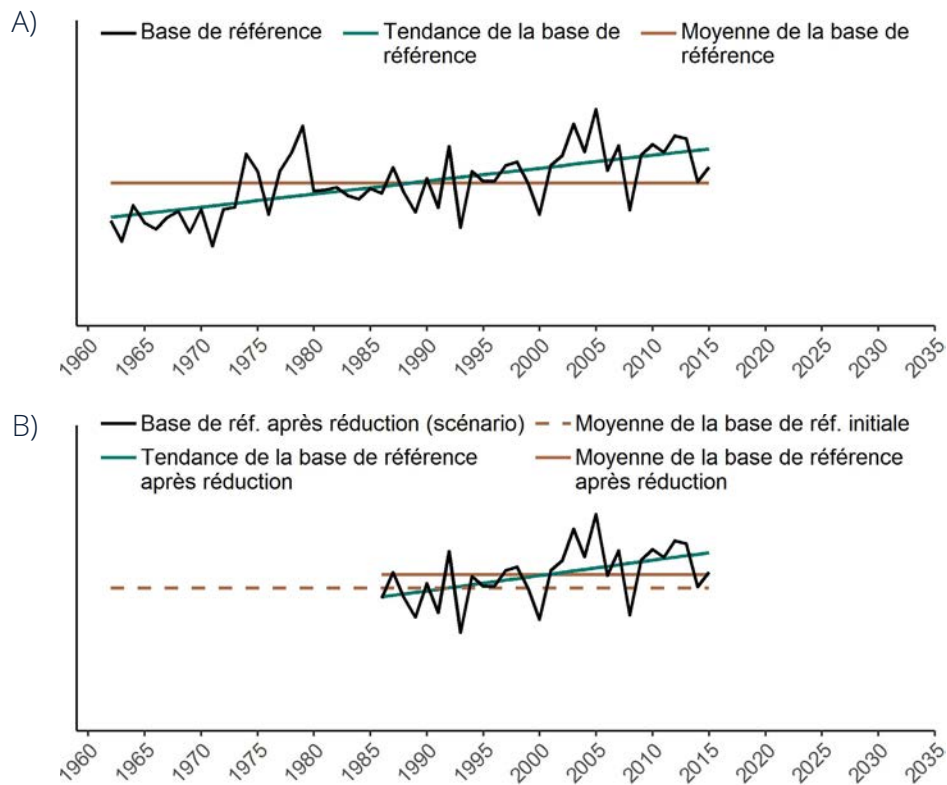


Figure 10 Exemple de la méthode de réduction. A) Base de référence au complet; B) Années prises en compte après réduction (les 30 dernières de la base de référence).

3.3. Méthode d'ajustement

Cette méthode, aussi appelée méthode d'élimination de tendance, consiste à ajuster la base de référence de manière à éliminer toute tendance statistiquement significative et la rendre représentative des conditions actuelles. Cela peut se faire au moyen d'un facteur de correction proportionnel au temps. Comme le montre la [Figure 11](#), ce facteur peut être directement calculé à partir de la base de référence. On peut aussi le calculer à partir des simulations intégrant le changement climatique et d'autres facteurs pertinents (voir la [Section 4](#)), comme le montre la [Figure 12](#). Cette deuxième option offre un moyen intéressant d'isoler l'effet d'un seul facteur au sein de la base de référence, dans ce cas-ci le changement climatique.

Le facteur de correction proportionnel au temps se calcule sur des valeurs moyennes ou des quantiles (voir la [Section 3.5 – Méthode delta](#)) à l'échelle annuelle, saisonnière, mensuelle et quotidienne.

Cette méthode peut être utilisée de manière complémentaire à d'autres méthodes. Par exemple, la combinaison des méthodes de correction de biais ou de delta, basées sur des quantiles, et la méthode d'ajustement peut être avantageuse. La [Section 7](#) examine cette question en détail.

Avant d'effectuer l'ajustement, il y a lieu de mener une étude de détection et d'attribution (voir la [Section 4](#) et l'[Annexe B – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique](#)), car celle-ci aidera le praticien à mieux comprendre la base physique de la tendance.

3.3.1. Avantages de la méthode d'ajustement

- Conserve la séquence des événements tout en éliminant la tendance, ce qui peut être particulièrement intéressant pour comparer le passé, le présent et l'avenir (Snover *et al.*, 2003).

3.3.2. Inconvénients de la méthode d'ajustement

- L'application de cette méthode avec un facteur de correction fondé sur les valeurs de la base de référence, sans une étude préalable de détection et d'attribution (voir l'[Annexe B](#) – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique), peut entraîner des ajustements ayant une cohérence physique réduite.
- Il est recommandé de mener une étude de détection et d'attribution avant d'appliquer cette méthode, mais celles-ci sont toutefois longues et complexes.
- Modifie la moyenne ou les quantiles de la base de référence et ne tient pas compte d'autres processus, dont la modification de séquences ou la variabilité interannuelle.
- Cette méthode peut affecter d'importantes données relatives aux événements extrêmes historiques.
- Il y a un risque de surapprentissage (voir la [Section 7.5.3](#) – Surapprentissage).

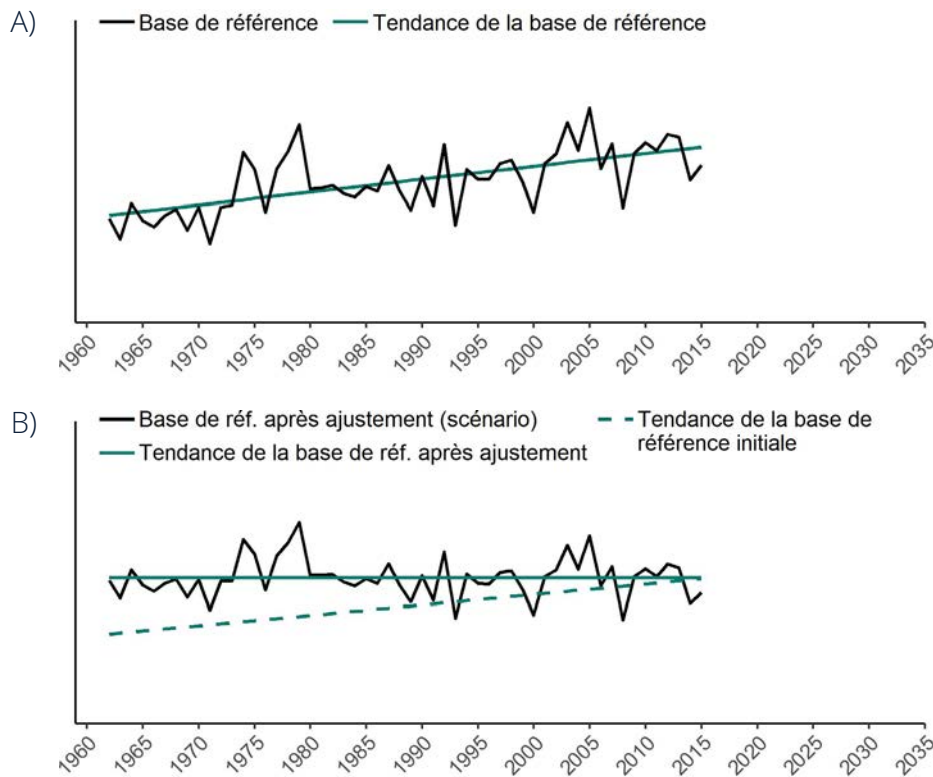


Figure 11 Exemple de la méthode d'ajustement où le facteur de correction est calculé à même la base de référence. A) Base de référence au complet et sa tendance; B) Base de référence après ajustement.

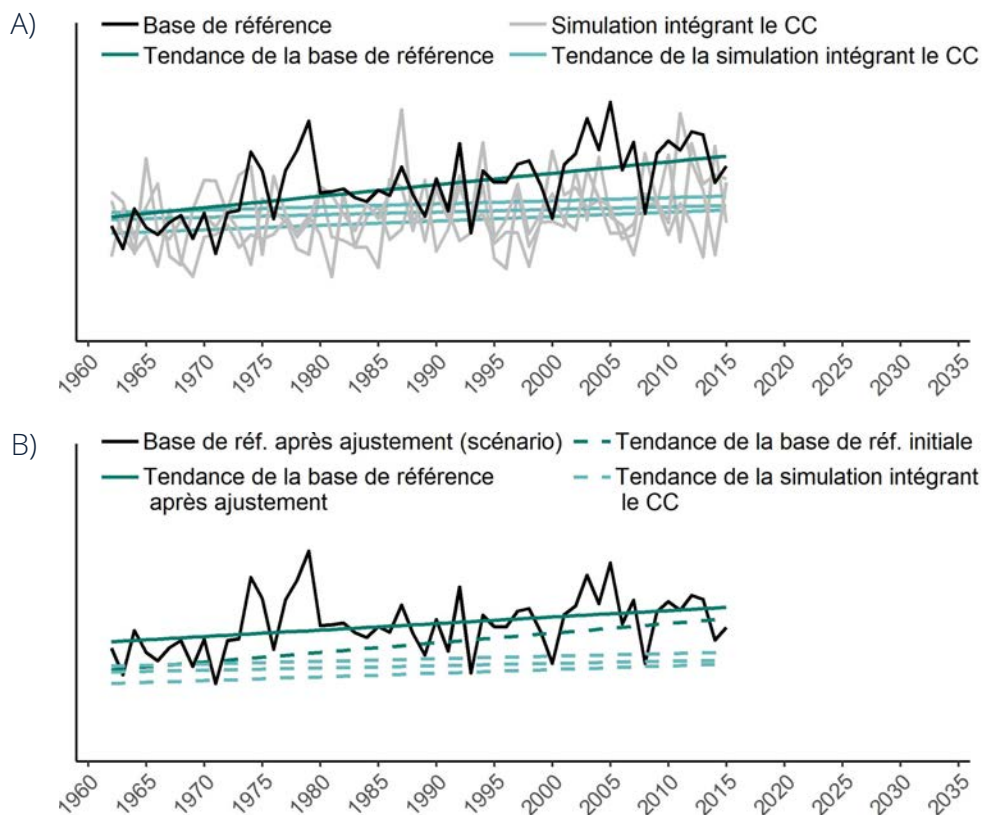


Figure 12 Exemple de la méthode d'ajustement où le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant le changement climatique. A) Base de référence et sa tendance et simulations intégrant le changement climatique et leurs tendances respectives. Le facteur de correction est calculé à partir de la tendance moyenne des simulations climatiques; B) Base de référence après ajustement.

3.4. Méthode de prolongement

Si la base de référence affiche une tendance statistiquement significative, on peut utiliser la méthode de prolongement pour la rendre représentative des conditions futures, et ce, au moyen d'un facteur de correction proportionnel au temps (voir la [Figure 13](#)) ou de simulations intégrant le changement climatique ou d'autres facteurs pertinents (voir la [Figure 14](#)). Cette seconde option offre un moyen intéressant d'isoler l'effet d'un facteur unique au sein de la base de référence, dans ce cas-ci le changement climatique.

Le facteur de correction proportionnel au temps se calcule sur les valeurs moyennes ou les quantiles (voir la [Section 3.5 – Méthode delta](#)). Il peut aussi se calculer à l'échelle annuelle, saisonnière, mensuelle et quotidienne.

Il est fortement recommandé de mener une étude de détection et d'attribution avant de calculer le facteur de correction de la base de référence (voir la [Section 4](#) et l'[Annexe B](#) – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique). Si le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant le changement climatique et d'autres facteurs, l'étude sera aussi utile.

3.4.1. Avantages de la méthode de prolongement

- Permet de comparer les années passées avec une année semblable intégrant le changement climatique.
- Conserve la séquence des événements, ce qui peut avoir un intérêt particulier pour la comparaison du passé, du présent et de l'avenir (Snover *et al.*, 2003).

3.4.2. Inconvénients de la méthode de prolongement

- Des erreurs dans le produit de base, dans les tendances, dans les cycles et dans les sauts, ainsi que les changements abrupts touchant des facteurs de changement passés ou exerçant une influence sur ceux-ci, sont projetées dans le futur et transmises à la prochaine étape de la chaîne de modélisation.
- L'application de cette méthode avec un facteur de correction basé sur les valeurs de la base de référence, sans une étude préalable de détection et d'attribution (voir l'[Annexe B](#) – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique), peut donner lieu à des projections ayant une cohérence physique réduite.
- Il est recommandé de mener une étude de détection et d'attribution avant d'appliquer cette méthode, mais celles-ci toutefois longues et complexes.
- Modifie la moyenne ou les quantiles de la base de référence et ne tient pas compte d'autres processus, dont la modification des séquences ou la variabilité interannuelle.
- Ne tient pas compte des changements abrupts futurs potentiels.

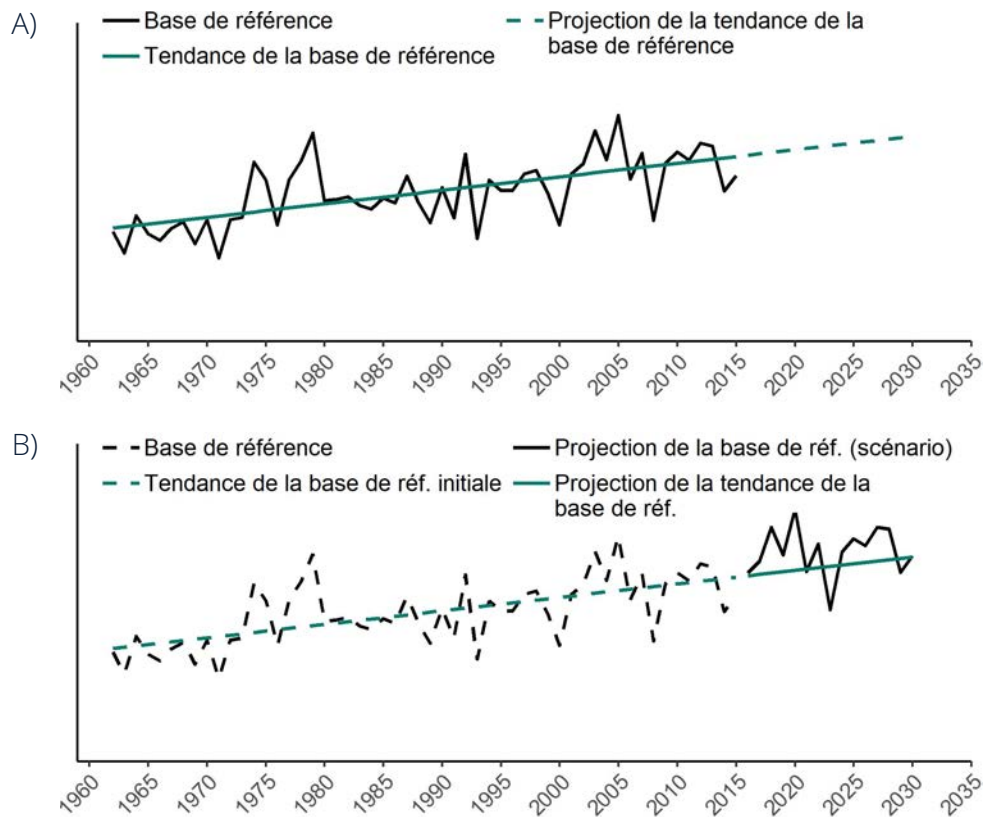


Figure 13 Exemple de la méthode de prolongement où le facteur de correction est calculé à partir de la base de référence. A) Base de référence au complet avec sa tendance et sa projection dans le futur. B) Base de référence après ajustement. Seules les 15 dernières années sont projetées dans le futur.

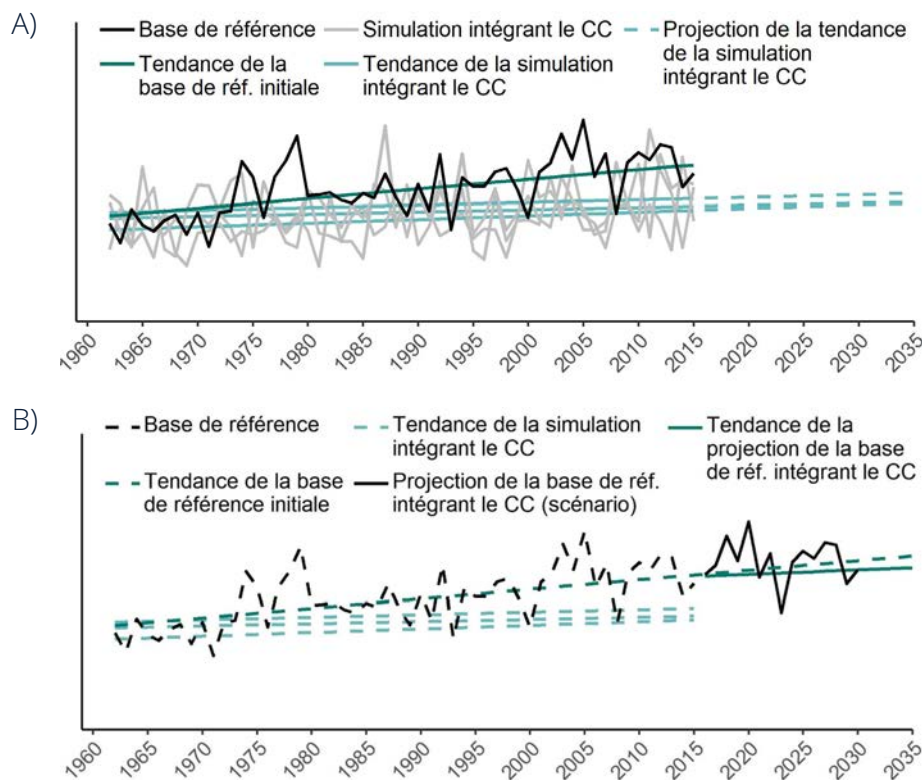


Figure 14 Exemple de la méthode de prolongement où le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant le changement climatique. A) Base de référence et sa tendance et simulations intégrant le changement climatique et leurs tendances respectives. Le facteur de correction est calculé à partir de la tendance moyenne des simulations climatiques; B) Base de référence prolongée sur 15 ans.

3.5. Méthode delta

La méthode delta, aussi appelée méthode de mise à l'échelle ou de perturbation, est décrite dans Charron (2016) pour les données climatiques. La définition ci-dessous est adaptée aux besoins de la chaîne de modélisation.

Cette méthode implique une perturbation de la base de référence à partir du changement relatif ou absolu entre la période de référence simulée et la période future simulée (simulation intégrant le changement climatique). Le changement absolu ou relatif est d'abord calculé entre la période de référence et la période future (voir la **Figure 15A**) et ce changement (delta) est ensuite appliqué à la base de référence (voir la **Figure 15B**).

Cette méthode peut se faire en utilisant deux approches : en calculant un changement moyen (**Figure 15A**) sur l'ensemble de la distribution des observations ou en utilisant les quantiles de la distribution (pour un exemple de correction par quantiles, voir Gennaretti, Sangelanton et Grenier, 2015). La seconde approche permet d'utiliser un facteur de correction différent pour les queues de distribution, de sorte qu'il est possible de changer les extrêmes de la distribution différemment du reste. Un point important ici est que cette technique est appliquée à des horizons temporels déterminés, tels que les périodes de 30 ans, et non pas à l'ensemble de la série temporelle. (Repris et adapté de Charron 2016 – 1.10.1)

Le delta absolu (addition/soustraction) s'utilise habituellement pour les variables n'ayant pas un zéro absolu (p. ex., la température). Le delta relatif (ratio) s'utilise habituellement pour les variables ayant un zéro absolu (p. ex., la précipitation).

Le changement moyen ou les quantiles (c.-à-d., la fonction de distribution de la probabilité) se calculent à l'échelle annuelle, saisonnière, mensuelle ou quotidienne. En règle générale, un changement annuel moyen sera appliqué sur les valeurs annuelles moyennes, et ainsi de suite.

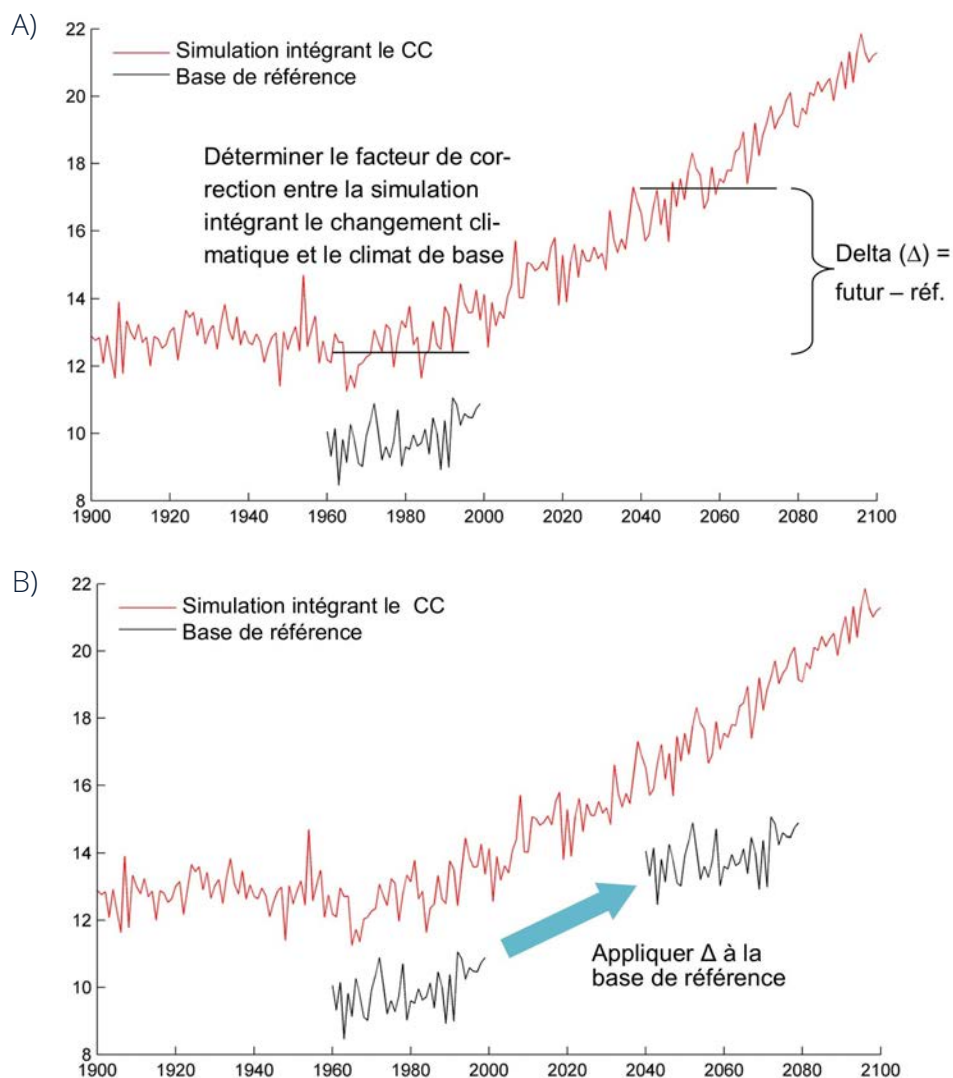


Figure 15 Exemple de la méthode delta au moyen du calcul de la moyenne. A) Le changement relatif est d'abord calculé entre la période de référence simulée et la période future simulée. B) Le changement est ensuite appliqué à la base de référence (adapté de Charron, 2016).

3.5.1. Avantages de la méthode delta

- Méthode simple si on calcule un changement moyen sur toute la distribution des observations, car un seul facteur est calculé et ajouté aux observations sur des horizons temporels déterminés (p. ex., 30 ans).
- Méthode de complexité moyenne si on utilise les quantiles correspondants de la distribution, car il faut comparer les distributions (c.-à-d., les fonctions de distribution de la probabilité). Cependant, les distributions sont obtenues pour des horizons temporels déterminés (p. ex., 30 ans), ce qui simplifie le processus.
- Permet de comparer les années passées avec une année future similaire intégrant le changement climatique. Conserve la séquence des événements, ce qui peut être utile pour la comparaison du passé et du futur (Snover *et al.*, 2003).

3.5.2. Inconvénients de la méthode delta

- Des erreurs dans le produit de base, dans les tendances, dans les cycles et dans les sauts, ainsi que les changements abrupts touchant des facteurs passés ou exerçant une influence sur ceux-ci, sont projetées dans le futur et transmises à la prochaine étape de la chaîne de modélisation.
- Des données temporelles peuvent être absentes du résultat final. Par exemple, dans la **Figure 15B**, il manque les années 2000 à 2040.
- La méthode modifie seulement les moyennes et les quantiles de la base de référence (ou la simulation fondée sur celle-ci). Toutes les autres données de la simulation intégrant le changement climatique, dont la modification des séquences de jours secs et de jours humides ou la durée des périodes sèches, ne sont pas incluses dans le scénario.
- Ne tient pas compte des changements abrupts futurs potentiels.

3.6. Méthode de correction de biais

La méthode de correction de biais est décrite dans Charron (2016) pour les données climatiques. La définition ci-dessous est adaptée aux besoins de la chaîne de modélisation.

Cette méthode utilise un ajustement ou une correction de l'ensemble de la simulation intégrant le changement climatique au moyen d'un biais ou d'un facteur de correction, de sorte que les données de la période de référence simulée et les valeurs de la base de référence deviennent plus équivalentes. Le facteur de correction est premièrement calculé à partir d'une comparaison entre la période de référence simulée et les valeurs de la base de référence sur la même période, par exemple 1961-1990 (**Figure 16A**). La correction est ensuite appliquée sur l'ensemble de la simulation intégrant le changement climatique (**Figure 16B**). Tout comme la méthode delta, cette technique peut être basée sur une correction moyenne ou sur les quantiles. Mais, contrairement à la méthode delta où la correction est appliquée sur un horizon temporel donné, le biais ici peut être retiré de l'ensemble de la simulation intégrant le changement climatique. (Repris et adapté de Charron 2016, 1.10.2)

Le facteur de correction absolu (addition/soustraction) s'utilise habituellement pour les variables n'ayant pas un zéro absolu (p. ex., la température). Le facteur de correction relatif (ratio) s'utilise habituellement pour les variables ayant un zéro absolu (p. ex., la précipitation).

Comme dans le cas de la méthode delta, le changement moyen ou les quantiles se calculent à l'échelle annuelle, saisonnière, mensuelle ou quotidienne. En règle générale, un changement annuel moyen sera appliqué sur les valeurs annuelles moyennes, et ainsi de suite.

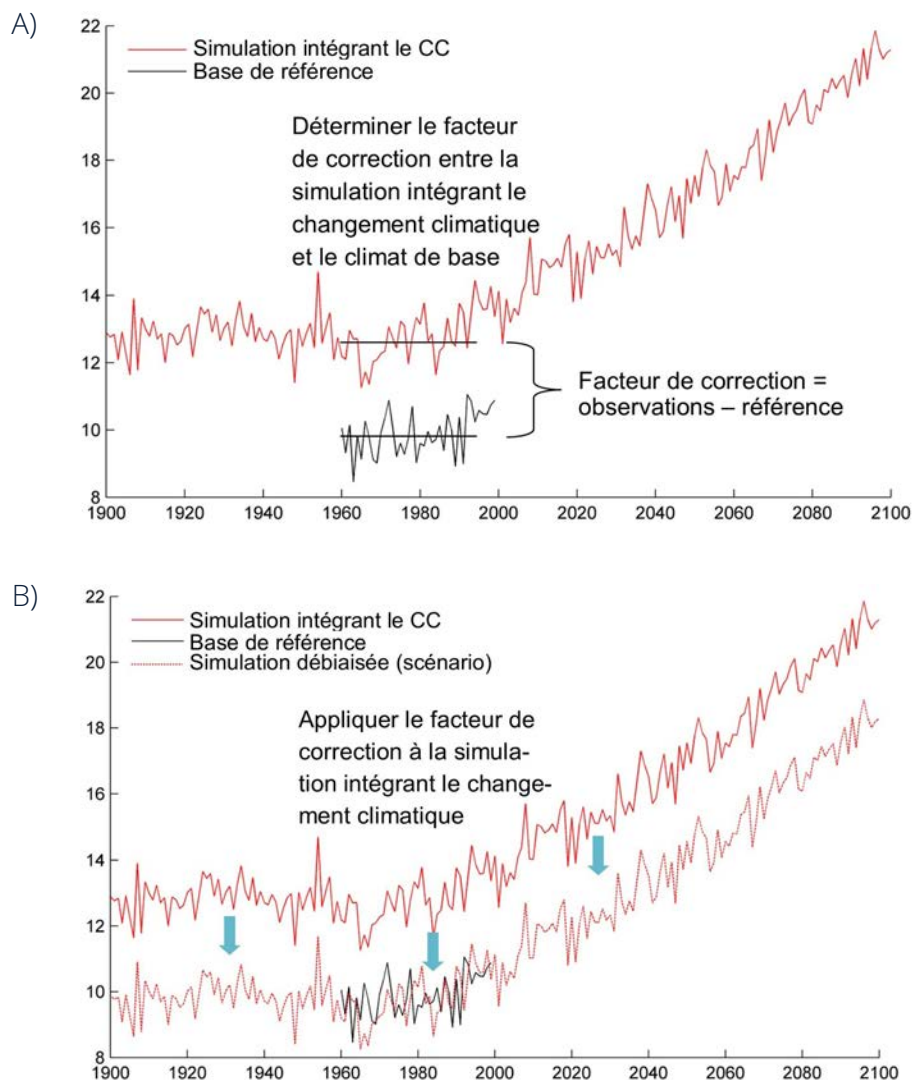


Figure 16 Exemple de la méthode de correction de biais. A) Le changement relatif est d'abord calculé entre la période de référence simulée et les valeurs de la base de référence. B) Le changement est ensuite appliqué à la série temporelle simulée (adapté de Charron, 2016).

3.6.1. Avantages de la méthode de correction de biais

- Cette méthode est simple : il s'agit de calculer un facteur unique et de l'ajouter aux observations sur des horizons temporels déterminés (p. ex., 30 ans).
- Comme la simulation est modifiée de manière à correspondre aux observations (plutôt que le contraire), toute l'information de la simulation intégrant le changement climatique, comme la modification de la séquence de jours secs et de jours humides ou la durée des périodes sèches, est conservée.
- Cette méthode permet d'utiliser plusieurs simulations intégrant le changement climatique et d'obtenir ainsi différentes réalisations ou séquences d'événements.
- Elle dégage des résultats continus dans le temps plutôt que sur des horizons temporels déterminés (p. ex., 30 ans).

3.6.2. Inconvénients de la méthode de correction de biais correction

- Cette méthode est très complexe si on l'applique sur les quantiles correspondants de la distribution, car il faut comparer les distributions (c.-à-d. les fonctions de distribution de la probabilité). De plus, les changements sont appliqués sur la simulation au complet, ce qui complique le processus.
- Les faiblesses de la simulation ne sont pas corrigées (c.-à-d. des séquences d'événements non représentatives) et sont transmises à la prochaine étape de la chaîne de modélisation.
- La méthode ne conserve pas la séquence historique des événements, ce qui élimine la comparaison directe entre le passé et le futur, contrairement à la méthode delta.

4

**Options
de la base
de référence**



Cette section passe en revue d'importants concepts relatifs à la sélection et à l'élaboration d'une base de référence. Aux fins du Guide, la base de référence correspond aux données considérées comme étant la meilleure représentation de l'état passé ou actuel d'un système. On l'utilise dans le cadre de la méthode d'évaluation de la valeur des actifs intégrant le changement climatique pour : produire des simulations fondées sur la base de référence (le premier type de simulations expliqué dans la [Section 2](#)), appliquer des méthodes de transformation des données et calibrer les modèles hydrologiques.

Deux types de bases de référence sont proposés : la base de référence hydrologique seule ou la combinaison des bases de référence climatique et hydrologique. Dans le second cas, les deux sont nécessaires pour, à tout le moins, calibrer et valider le modèle hydrologique.

- La base de référence climatique, présentée dans la [Section 4.1](#), est composée de données historiques de précipitations et de températures minimales et maximales (et, potentiellement, d'autres variables hydroclimatiques nécessaires au modèle hydrologique).
- La base de référence hydrologique, présentée dans la [Section 4.2](#), se compose de données hydrologiques historiques.

Parmi les nombreux critères qui doivent être pris en compte dans la sélection de la base de référence, les plus importants sont les suivants : la disponibilité d'un modèle hydrologique et d'un modèle de gestion de l'eau; le temps minimum nécessaire pour réaliser l'évaluation; le coût et l'expertise requise; et le niveau de contrôle voulu sur la chaîne de modélisation. Le [Tableau 5](#) décrit chaque critère de sélection et la [Figure 17](#) énumère les exigences propres à chaque option.

Comme le montre la [Figure 17](#), si l'évaluation est réalisée avec les deux bases de référence, il faut un modèle hydrologique et, possiblement, un modèle de gestion de l'eau (tout dépendant du bassin versant en amont du barrage et du type de régime – régulé ou naturalisé). L'évaluation prendra plus de trois mois, coûtera cher, exigera une expertise pointue et le niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation sera élevé.

Dans le cas d'une base de référence hydrologique seule, un modèle hydrologique est possiblement nécessaire (tout dépendant du résultat de l'analyse décrite dans la [Section 5](#)), tout comme un modèle de gestion de l'eau. L'évaluation prendra moins d'un mois et le coût, l'expertise et le niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation seront modérés.

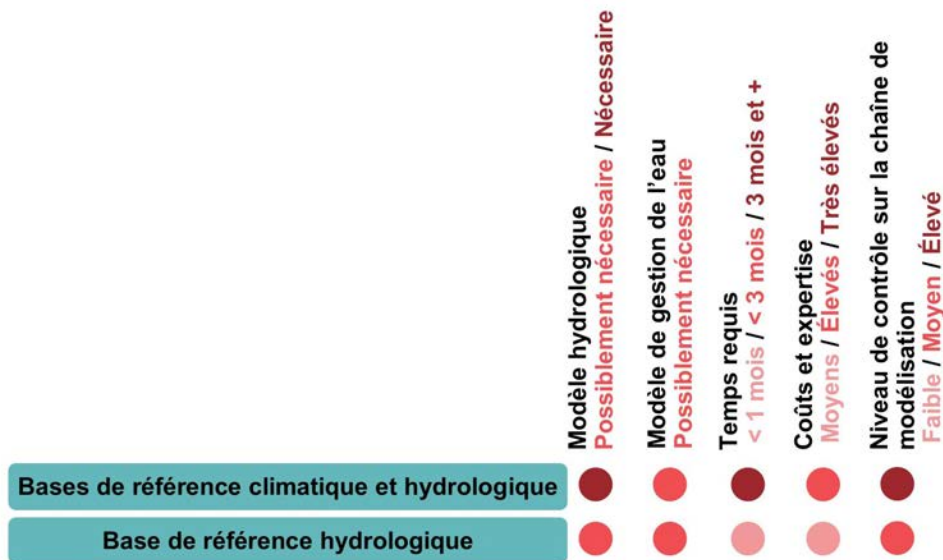


Figure 17 Aperçu des critères de sélection pour le type de base de référence (voir le [Tableau 5](#) pour les définitions)

Tableau 5 Description des critères pour la sélection de la base de référence et des données de changement climatique

Critère de sélection	Description
Modèle hydrologique	Cette option requiert qu'un modèle hydrologique soit calibré, validé et roulé pour produire des données de débit; la calibration du modèle requiert de bonnes données climatiques.
Modèle de gestion de l'eau	Cette option requiert un modèle qui utilise les apports du modèle hydrologique et qui inclut une routine pour le routage adéquat de l'eau entre les sous-bassins versants et à travers les réservoirs, barrages et structures hydrauliques. Ce modèle fournit une représentation explicite des décisions relatives au stockage et à l'évacuation de l'eau. Il y a plusieurs options, allant de modèles simples suivant des courbes de niveau et des consignes d'exploitation à des modèles plus complexes possédant des routines d'optimisation avancées qui visent explicitement à maximiser certains critères tout en respectant une série de contraintes, comme des limites réglementaires. Ces modèles sont parfois intégrés aux modèles hydrologiques ou énergétiques. Ce type de modèle est nécessaire pour produire des simulations avec des débits régularisés et les représenter dans un régime effectivement régularisé (voir la Section 6.3.1 – Considérations particulières – Débits régularisés versus régimes naturalisés).
Temps requis	Estimation du délai minimal requis pour la mise en œuvre de l'option.
Coûts et expertise	Estimation du coût et de l'expertise requise pour la mise en œuvre de l'option. Voir les Sections 4.1 – Base de référence climatique et 4.2 – Base de référence hydrologique pour en savoir plus sur l'expertise nécessaire.
Niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation	Estimation du niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation. Habituellement, plus le niveau de contrôle est élevé, plus les résultats seront détaillés.

AVERTISSEMENT CONCERNANT LES RESSOURCES PROPOSÉES

Remarque : Chaque section fournit des ressources afin d'aider le praticien à faire des exercices d'évaluation de la valeur. Comme celles-ci n'ont pas été validées, il doit en évaluer l'adéquation avant d'intégrer quelque ressource que ce soit dans la chaîne de modélisation.

4.1. Base de référence climatique

La base de référence climatique consiste généralement en données historiques de précipitations et de températures minimales et maximales (et, potentiellement, d'autres variables hydroclimatiques nécessaires au modèle hydrologique).

Pour la plupart des entreprises hydroélectriques, cette base de référence est une nouveauté. Elle est conforme aux lignes directrices du *Hydropower Sector Climate Resilience Guide* (IHA, 2019) et offre de nombreux avantages aux entreprises qui se familiarisent avec le changement climatique.

Les données climatiques historiques peuvent provenir des stations météorologiques du bassin versant, d'observations sur grille ou d'une réanalyse. Afin d'assurer la cohérence spatio-temporelle, il est préférable d'utiliser un seul jeu de données pour toutes les variables, sinon il pourrait y avoir des incohérences dans la chaîne de modélisation.

La période minimale requise pour représenter les cycles de variabilité naturelle est de 30 ans. Une période plus longue permet de rendre compte de cycles climatiques plus longs, par exemple ceux du bassin des Grands Lacs (Hanrahan *et al.*, 2010), et cela vaut la peine d'envisager cette option. Il est important de souligner qu'il se peut que la densité du réseau de stations météorologiques ainsi que la qualité des observations sur grille et de la réanalyse ne soient pas acceptables pour passer à la prochaine étape de la chaîne. Voir l'encadré Facteurs climatiques et limites de la base de référence climatique.

Il est important de bien choisir la base de référence climatique et de s'assurer qu'elle est compatible avec les données de changement climatique et les méthodes de transformation des données choisies, car cela évitera d'éventuelles incohérences dans la chaîne de modélisation. Pour en savoir plus sur cette question, voir la [Section 7.4 – Cohérence des données climatiques et des périodes temporelles](#).

FACTEURS CLIMATIQUES ET LIMITES DE LA BASE DE RÉFÉRENCE CLIMATIQUE

En quoi consistent les facteurs climatiques de changement?

La base de référence climatique incorpore la variabilité naturelle, les catastrophes naturelles, ainsi que le changement climatique tout à la fois – ce sont des facteurs de changement. La variabilité naturelle est le résultat de cycles climatiques tels que El Niño et La Niña, qui exercent une influence sur la température et la précipitation du bassin versant et se répercutent directement sur les débits. Les catastrophes naturelles, comme de violentes éruptions volcaniques, ont aussi d'importants impacts sur un bassin versant, car elles peuvent faire chuter temporairement les températures à l'échelle du globe. Le changement climatique, soit un changement dans la moyenne à long terme des conditions météorologiques, a également des impacts considérables sur un bassin versant.

Erreurs, hétérogénéités, biais et incertitudes

La qualité de la base de référence climatique pour un bassin versant dépend souvent de la densité de son réseau de stations météorologiques. Par exemple, un réseau de faible densité n'échantillonne que quelques points dans l'espace, et bien qu'il puisse détecter d'intenses tempêtes confinées, il se peut qu'une tempête qui touche la presque totalité du bassin versant ne soit pas observée.

Des erreurs, des hétérogénéités, des biais et des incertitudes peuvent se glisser dans la base de référence climatique. De même, les données de stations météorologiques contiennent des erreurs de mesure et des hétérogénéités : un changement dans les instruments de mesure ou l'emplacement de la station peut créer une discontinuité dans les jeux de données et indiquer de fausses tendances dans les séries temporelles.

Les observations sur grille et les réanalyses sont également sujettes aux biais et aux erreurs. Par exemple, les observations sur grille, en plus de dépendre de la densité du réseau de stations météorologiques, peuvent aplanir et diminuer le pic de tempêtes convectives en raison du moyennage par région (points de grille). Les réanalyses combinent des données de modèles et des observations, profitant de leurs forces respectives.

Les limites inhérentes à la base de référence climatique peuvent se retrouver dans les simulations hydrologiques – et le reste de la chaîne de modélisation – en raison du modèle hydrologique et de son processus de calibration. La calibration permet en effet de régler le modèle pour qu'il dégage des résultats adéquats, mais celui-ci se trouve à être conditionné par certaines caractéristiques du produit de précipitation sélectionné.

4.1.1. Critères pour la sélection de la base de référence climatique

- Les jeux de données climatiques et hydrologiques disponibles sont convenables et couvrent une période suffisamment longue.
- Un modèle hydrologique en continu adéquatement calibré est disponible ou peut être élaboré (voir l'**Annexe F** – Sélection et calibration d'un modèle hydrologique).
- Si le bassin versant en amont est fortement régularisé (voir **Section 6.3.1** – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés), un modèle de gestion de l'eau est possiblement requis.

- Plus de trois mois sont disponibles pour mener à terme le processus d'évaluation de la valeur
- L'entreprise a accès à des ressources humaines ayant une expertise pointue en hydrologie et acceptable en climat et en changement climatique

4.1.2. Pourquoi choisir une base de référence climatique ?

- L'entreprise veut mieux comprendre l'hydrologie du bassin versant.
- Elle souhaite comparer l'impact relatif du changement climatique aux impacts d'autres facteurs hydrologiques de changement.
- Elle veut appliquer les méthodes du *Hydropower Sector Climate Resilience Guide* (IHA, 2019).

4.1.3. Avantages de la base de référence climatique

- Cette option offre une plus grande souplesse pour les analyses. Le praticien est en mesure d'analyser et de mieux comprendre chaque facteur hydrologique de changement (voir la [Section 4.2](#) – Base de référence hydrologique). Les quatre méthodes suivantes amélioreront la compréhension de l'importance relative de chaque facteur hydrologique de changement :
 - ♦ Forcer le modèle hydrologique au moyen d'un scénario climatique stationnaire, pour comprendre la variabilité naturelle.
 - ♦ Forcer le modèle hydrologique au moyen de différents scénarios climatiques, pour comprendre l'impact du changement climatique dans un passé récent.
 - ♦ Forcer le modèle hydrologique au moyen de différentes utilisations des terres, pour comprendre les impacts de changements dans l'utilisation des terres dans un passé récent.
 - ♦ Forcer le modèle de gestion de l'eau au moyen de différentes règles d'exploitation, pour comprendre les impacts de changements de ces règles dans un passé récent.
- Le praticien peut utiliser un modèle de gestion de l'eau pour que le scénario futur concorde mieux avec la base de référence (voir la [Section 7.8](#) – Avantages de la modélisation de l'hydrologie et de la gestion de l'eau).
- La recherche de littérature est plus facile, car il y a plus d'information sur le climat régional futur (p. ex., température et précipitation) que sur l'hydrologie régionale future (p. ex., le débit) (voir la [Section 5](#)).
- Les observations climatiques comportent moins de sources de non-stationnarité (changements dans le temps) que les observations hydrologiques. Il peut donc être plus facile d'ajuster une base de référence climatique qu'une base hydrologique (voir la [Section 6.3](#) – De l'hydrologie à l'énergie).

4.1.4. Inconvénients de la base de référence climatique

- Le fait de s'appuyer sur une simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique implique une très forte hypothèse voulant que le modèle représente adéquatement l'hydrologie du bassin versant. Même de petits biais dans la simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique peuvent avoir de sérieuses implications pour la modélisation énergétique réalisée plus tard dans la chaîne de modélisation. Les étapes présentées dans l'**Annexe G** – Validation de simulations hydrologiques permettent de vérifier cette hypothèse.
- Pour les bassins versants affectés par une régularisation en amont, il se peut qu'un modèle de gestion de l'eau ne réussisse pas à reproduire les caractéristiques de régularisation en raison d'un manque de données ou de connaissances au sujet des barrages en amont (p. ex., les barrages se trouvent dans un autre pays) ou de la complexité de la régularisation. Le cas échéant, la simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique peut poser problème pour le reste de la chaîne. Une solution de remplacement consisterait à choisir une échelle temporelle plus grossière (voir la **Section 7.7** – Mise à l'échelle d'un modèle).

4.1.5. Prochaines étapes

- a) Évaluer l'adéquation de la base de référence climatique (voir l'**Annexe E** – Validation de produits climatiques).
- b) Mener une étude de détection et d'attribution, si nécessaire (voir l'**Annexe B** – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique)
- c) Appliquer une transformation des données, si nécessaire (voir la **Section 6.2** – Du climat à l'hydrologie).
- d) Sélectionner et calibrer le modèle hydrologique (voir l'**Annexe F** – Sélection et calibration d'un modèle hydrologique).
- e) Lancer la simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique.
- f) Évaluer l'adéquation de la simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique (voir l'**Annexe G** – Validation de simulations hydrologiques).
- g) Réaliser une analyse de sensibilité relative à la chaîne de modélisation (voir l'**Annexe H** – Analyse de sensibilité)
- h) Aller à la **Section 5**.

4.1.6. Exemples de ressources pour la base de référence climatique

Observations sur grille

Données canadiennes quotidiennes sur grille – Ressources naturelles Canada

<https://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/4>

Livneh gridded precipitation and other meteorological variables for continental US, Mexico and Southern Canada – National Center for Atmospheric Research (NCAR)

<https://climatedataguide.ucar.edu/>

Daymet – NASA

<https://daymet.ornl.gov/>

Daily Gridded Meteorological Datasets – Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC)

https://data.pacificclimate.org/portal/gridded_observations/map/

Prism Recent Past – PRISM Climate Group

<http://prism.oregonstate.edu/>

Climatic Research Unit Time-Series (CRU TS) – Climatic Research Unit (CRU)

<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>

Réanalyses

The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 5th generation reanalysis

(ERA5) – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

ERA5-Land – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>

Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) – National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

[https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/
climate-forecast-system-reanalysis-cfsr](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr)

WATCH-Forcing-Data-ERA-Interim – Water and Global Change (WATCH)

http://www.eu-watch.org/data_availability

Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) – NASA

<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>

Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications,

Version 2 (MERRA-2) – NASA

<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

AgMERRA – NASA

<https://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra/>

North American Regional Reanalysis (NARR) – National Centers for Environmental Information (NOAA)

<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/north-american-regional-reanalysis-narr>

JRA55 – National Center for Atmospheric Research (NCAR)

<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/jra-55>

Produits mixtes

Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) – Princeton University

<http://www.gloh2o.org/>

Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modelling (GMFD) – Princeton University

<http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php>

WFDEI-GEM-CaPA – Federated Research Data Repository

<https://www.frdr-dfdr.ca/repo/handle/doi:10.20383/101.0111>

4.2. Base de référence hydrologique

La base de référence hydrologique consiste en données hydrologiques historiques et correspond à la base de référence que la plupart des entreprises utilisent habituellement pour évaluer la valeur des actifs (voir la [Section 2.1](#) – Méthode d'évaluation traditionnelle).

Les données hydrologiques historiques sont obtenues à partir d'observations de débits qui : proviennent de sites à proximité; sont transposées depuis un autre site; sont établies au moyen de techniques de régionalisation (Razavi et Coulibaly, 2013); ou sont reconstituées par le bilan hydrique (reconstitution des apports dans un réservoir fondée sur des changements de niveau et d'autres variables).

Comme dans le cas de la base de référence climatique, il est recommandé d'utiliser des données sur au moins 30 ans. Il peut être judicieux d'envisager une période plus longue (voir la [Section 4.1](#) – Base de référence climatique).

Les mesures de débits historiques sont influencées non seulement par le climat, mais aussi par d'autres facteurs, dont des changements dans l'instrumentation (p. ex., le type de débitmètre), des changements à l'échelle du bassin versant (p. ex., des changements dans l'utilisation des terres), etc. Cela veut dire que les tendances du changement climatique dans les données de débit peuvent être exacerbées, neutralisées ou inversées par d'autres des facteurs de changement. Il est donc important de bien comprendre les facteurs influençant les données de débit dans le cadre du changement climatique (voir l'encadré Facteurs hydrologiques de changement et limites de la base de référence hydrologique).

FACTEURS DE CHANGEMENTS HYDROLOGIQUES ET LIMITES DE LA BASE DE RÉFÉRENCE HYDROLOGIQUE

En quoi consistent les facteurs hydrologiques de changement?

Les bases de référence climatique et hydrologique incorporent toutes deux la variabilité naturelle et les catastrophes naturelles, ainsi que le changement climatique. En fait, quand la température et la précipitation sur un bassin versant sont influencées, le débit est directement touché. D'autres facteurs se répercutent seulement sur la base de référence hydrologique, notamment des changements dans l'utilisation des terres, dont l'urbanisation, la déforestation et les feux de forêt. Ces facteurs peuvent considérablement modifier les processus hydrologiques tels que la capacité d'infiltration et l'évapotranspiration. Enfin, la base de référence hydrologique incorpore aussi les changements dans la régularisation des réservoirs et des structures hydrauliques en amont, tel que la construction ou la remise à neuf de structures hydrauliques ou des changements dans l'ajustement de la régularisation des structures existantes. Ce sont tous des facteurs de changement. Ceux-ci agissent simultanément sur la quantité et le moment d'occurrence des apports.

Erreurs, hétérogénéités, biais et incertitudes

Au même titre que la base de référence climatique, la base de référence hydrologique est sujette à des erreurs, hétérogénéités, biais et incertitudes. Les observations de débit sont sujettes à des erreurs de mesure et des incertitudes liées aux instruments, aux conditions lors de la prise de mesure, aux courbes de tarage et à leur évolution dans le temps (Horner *et al.*, 2018). Ces observations comportent aussi des hétérogénéités s'il y a des changements dans l'instrument de mesure utilisé et dans son emplacement. Les hétérogénéités peuvent donner lieu à des discontinuités ou à de fausses tendances dans les séries temporelles. Les observations de débit provenant ou étant transposées d'un autre site subissent aussi les effets de l'incertitude liée à la méthode de transposition. De façon similaire, la reconstitution par le bilan hydrique comportera des incertitudes dues à la méthode de reconstitution.

4.2.1. Critères pour la sélection de la base de référence hydrologique

- Le jeu de données hydrologiques disponible est convenable et couvre une période suffisamment longue
- L'entreprise a accès à des ressources humaines ayant une expertise acceptable en hydrologie, en climat et en changement climatique.

4.2.2. Pourquoi choisir la base de référence hydrologique ?

- L'entreprise se penche sur le changement climatique pour la première fois et veut évaluer le niveau d'effort requis.
- Elle est soumise à des contraintes de temps (moins d'un mois) et de ressources. Remarque – L'élaboration d'une base de référence hydrologique peut prendre plus d'un mois, tout dépendant de la taille du bassin versant, de la disponibilité des données et d'autres facteurs.
- Il n'existe pas de modèle hydrologique en continu adéquat. L'entreprise n'a peut-être pas identifié des besoins qui justifieraient l'élaboration d'un modèle, ou est en voie d'en élaborer un.
- Les apports du barrage à l'étude proviennent d'un bassin versant fortement régularisé (voir la [Section 6.3.1](#) – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés). Il existe très peu de données pour modéliser adéquatement les débits du bassin versant régularisé en amont.
- Il n'y a pas de stations météorologiques dans le bassin versant à l'étude ou à proximité, ce qui complique l'utilisation d'une base de référence climatique.
- La période couverte par les observations hydrologiques est plus longue que celle des observations météorologiques (voir la [Section 4.1](#) – Base de référence climatique).
- Les processus de l'entreprise et les hypothèses de planification sont fortement liés à une base de référence hydrologique déjà existante.

4.2.3. Avantages de la base de référence hydrologique

- Comme la base de référence hydrologique est souvent utilisée dans le secteur de l'hydroélectricité pour l'évaluation de la valeur des actifs, il pourrait être plus acceptable pour l'entreprise de l'utiliser pour évaluer les impacts du changement climatique. Cette base de référence offre un niveau élevé de continuité avec les analyses précédentes du système hydroélectrique.
- Les observations hydrologiques d'un bassin versant intègrent les facteurs hydrologiques de changement pour de grands domaines spatiaux (p. ex., le climat et l'utilisation des sols).

4.2.4. Inconvénients de la base de référence hydrologique

- La base de référence hydrologique comporte de nombreuses sources de non-stationnarité (soit des facteurs hydrologiques de changement qui entraînent des changements dans le temps). Le praticien peut ne pas avoir une compréhension suffisante des processus en cours dans le bassin versant.

4.2.5. Prochaines étapes

- a) Appliquer la transformation des données, si nécessaire (voir la [Section 6.3](#) – De l'hydrologie à l'énergie).
- b) Réaliser une étude de sensibilité relative à la chaîne de modélisation (voir l'[Annexe H](#) – Analyse de sensibilité).
- c) Aller à la [Section 5](#).

4.2.6. Exemples de ressources pour la base de référence hydrologique

Données hydrométriques historiques – Gouvernement du Canada

https://eau.ec.gc.ca/mainmenu/historical_data_index_f.html

National Water Information System – United States Geological Survey (USGS)

<https://waterdata.usgs.gov/nwis>

Niveau d'eau et débit – Gouvernement du Québec

<https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm>

5

**Options
des données
de changement
climatique**

Cette section donne une vue d'ensemble des divers types et sources de données que le praticien peut utiliser pour représenter les conditions de changement climatique. Les données de changement climatique permettent de produire des simulations intégrant le changement climatique (la deuxième série de simulations expliquée dans la [Section 2](#)) et/ou d'appliquer les méthodes de transformation des données.

Toutes les options présentées ici sont fondées sur des scénarios d'émissions et des modèles climatiques. Par exemple, le praticien peut travailler avec des simulations climatiques brutes (sortie directe des modèles climatiques) provenant d'expériences CMIP. Cette option est avantageuse à plusieurs égards, mais exige beaucoup de travail et une expertise pointue pour produire un résultat final plausible. Une autre option consiste à compter sur l'expertise d'organismes gouvernementaux, de centres climatiques, d'universités, de firmes d'ingénierie, de consultants, etc., qui ont déjà accompli une bonne partie du travail. Le praticien pourra ainsi économiser du temps et de l'argent tout en obtenant de solides résultats.

Les [Sections 5.1 à 5.7](#) présentent divers types et sources de données. Avant de poursuivre, veuillez consulter l'encadré Avertissement concernant les exemples de ressources dans la [Section 4](#).

De nombreux critères doivent être pris en compte dans la sélection des données de changement climatique, dont les principaux sont les mêmes que ceux de la sélection de la base de référence. Il s'agit de : l'accès à un modèle hydrologique et à un modèle de gestion de l'eau; le temps minimum requis pour réaliser l'évaluation; le coût et l'expertise requise; et le niveau de contrôle voulu sur la chaîne de modélisation. Le [Tableau 5](#) décrit chaque critère et la [Figure 18](#) énumère les critères propres à chaque option de données de changement climatique.

Comme le montre la [Figure 18](#), pour utiliser des résultats précalculés de simulations climatiques, il faut un modèle hydrologique et, possiblement, un modèle de gestion de l'eau (ce qui dépendra aussi des apports – régularisés ou naturalisés – du bassin versant en amont du barrage). L'évaluation peut prendre moins de trois mois, le coût et l'expertise requise sont considérables et le niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation est acceptable.

	Modèle hydrologique Non nécessaire / Nécessaire	Modèle de gestion de l'eau Possiblement nécessaire	Temps requis < 1 mois / < 3 mois / 3 mois et +	Coûts et expertise Moyens / Élevés / Très élevés	Niveau de contrôle sur la chaîne de modélisation Faible / Moyen / Élevé
Simulations climatiques brutes	●	●	●	●	●
Simulations climatiques post-traitées	●	●	●	●	●
Générateurs de conditions météorologiques	●	●	●	●	●
Résultats précalculés de simulations climatiques	●	●	●	●	●
Simulations hydrologiques	●	●	●	●	●
Jeux de données globaux et approximations	●	●	●	●	●
Résultats précalculés de simulations hydrologiques	●	●	●	●	●

Figure 18 Aperçu des critères de sélection pour le type de données de changement climatique (voir les définitions dans le [Tableau 5](#))

5.1. Simulations climatiques brutes

La plupart des simulations climatiques brutes de MCG et de MCR sont accessibles au public. La précipitation ainsi que la température minimale et maximale sont importantes pour la modélisation hydrologique, bien que d'autres variables telles que le vent et la radiation solaire deviennent plus communes depuis quelques années pour évaluer l'évapotranspiration au moyen de formules plus complexes. Les mesures peuvent être prises à divers pas de temps, allant de sous-journaliers à mensuels. La résolution spatiale des données varie généralement en fonction du modèle : une grille de 10 à 45 kilomètres pour les MCR et de 90 à 350 kilomètres pour les MCG. Par ailleurs, les calendriers des MCR et des MCG ne suivent pas nécessairement le calendrier grégorien (certains MCG excluent les années bissextiles et d'autres ont une année de 360 jours).

RÉSOLUTION, BIAIS ET EXTRACTION DES SIMULATIONS CLIMATIQUES BRUTES

Malgré la résolution grossière et les biais, les données de simulations climatiques brutes demeurent utilisables. Cependant, il faut effectuer des manipulations supplémentaires sur les données avant de les intégrer dans la chaîne de modélisation. On peut traiter la résolution grossière au moyen de méthodes de mise à l'échelle (voir Charron, 2016 et Maraun et Widmann, 2018) et corriger les biais au moyen des méthodes delta ([Section 3.5](#)) et de correction de biais ([Section 3.6](#)).

Le téléchargement de ces jeux de données et l'extraction des variables pertinentes sont des processus qui peuvent être longs et délicats. Les jeux de données se trouvent sur des serveurs publics internationaux (p. ex., nœuds de la *Earth System Grid Federation* (ESGF)) dans un format que la plupart des gestionnaires de ressources en eau connaissent mal (p. ex., les fichiers NetCDF), et ces fichiers sont souvent volumineux (plusieurs gigaoctets par variable par année). Les fournisseurs de services climatiques possèdent souvent les compétences voulues pour traiter ces fichiers et peuvent apporter une aide précieuse.

5.1.1. Critères pour la sélection de simulations climatiques brutes

- Bases de référence climatique et hydrologique de qualité
- Modèle hydrologique en continu correctement calibré
- Si le bassin versant en amont est fortement régularisé (voir la [Section 6.3.1](#) – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés), possiblement un modèle de gestion de l'eau.
- Plus de trois mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie, climat, changement climatique et programmation (les simulations climatiques brutes sont des produits sur grille dans des fichiers en format NetCDF).

5.1.2. Pourquoi choisir des simulations climatiques brutes ?

- L'entreprise a besoin d'une information détaillée pour réaliser ses activités (p. ex., analyse de risque, stade avancé du projet de développement, remise à neuf, etc.).
- Elle n'a pas facilement accès à des jeux de données robustes et performants (p. ex., simulations climatiques post-traitées ([Section 5.2](#)) ou simulations hydrologiques ([Section 5.5](#)) pour le bassin versant à l'étude).
- Le post-traitement et l'application d'une méthode de transformation des données à l'interne en vue d'une utilisation ultérieure dans la chaîne de modélisation peuvent être préférables aux produits post-traités existants (p. ex., les stations climatiques privées offrent des données de qualité qui ne sont pas utilisées dans les produits post-traités existants).
- Le praticien veut explorer une question très précise et les données climatiques ne sont pas déjà mises à l'échelle ni débiaisées.

5.1.3. Avantages des simulations climatiques brutes

- Contrôle total de l'entreprise sur la chaîne de modélisation
- Possibilité de produire plusieurs simulations représentant des événements rares

5.1.4. Inconvénients des simulations climatiques brutes

- Complexité
- Il faut beaucoup de temps et une expertise considérable pour effectuer le post-traitement des simulations brutes. La courbe d'apprentissage pour les nouveaux venus est abrupte.

5.1.5. Prochaines étapes

- a) S'assurer de choisir une base de référence climatique et hydrologique (voir la [Section 4](#)).
- b) Suivre les lignes directrices de l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- c) Sélectionner les MCG, si nécessaire (voir l'[Annexe C](#) – Méthodes de sélection de MCG).
- d) Aller à la [Section 6.2](#) – Du climat à l'hydrologie

5.1.6. Exemples de ressources pour les simulations climatiques brutes

CMIP – World Climate Research Programme

<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>

Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) – World Climate Research Programme

<https://www.cordex.org/>

Dynamically-downscaled climate projections – Climate Change Data Portal

<http://ccdp.network/>

Climate Change Knowledge Portal – World Bank Group

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data>

UKCP18 – Met Office

<https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/collaboration/ukcp/about>

5.2. Simulations climatiques post-traitées

Des simulations climatiques post-traitées (mises à l'échelle et débiaisées) prêtes à alimenter le modèle hydrologique sont aussi disponibles. De nombreux centres climatiques publient de tels jeux de données; le praticien peut aussi choisir de travailler en partenariat avec un centre climatique pour les obtenir.

Ces jeux de données doivent comprendre les intrants appropriés pour le modèle hydrologique (précipitation, température minimale et maximale). Certains de ces jeux de données possèdent de nombreux MCR et MCG, sur une grille régulière à 10 kilomètres de résolution spatiale et à un pas de temps journalier.

ADÉQUATION DES SIMULATIONS CLIMATIQUES POST-TRAITÉES

Les simulations climatiques mises à l'échelle et débiaisées ne sont pas encore de parfaites représentations du climat, car les techniques utilisées ne corrigent pas tous les aspects des simulations climatiques brutes. Avant de les intégrer dans la chaîne de modélisation, il faut en évaluer soigneusement l'adéquation et les limites (**Annexe E** – Validation de produits climatiques).

5.2.1. Critères pour la sélection de simulations climatiques post-traitées

- Jeu de données adéquat (voir la [Section 5.2.6](#) – Exemples de ressources pour les simulations climatiques post-traitées et la [Section 5.2.5](#) – Prochaines étapes), car des projections climatiques mises à l'échelle et débiaisées sont difficiles à obtenir.
- Modèle hydrologique en continu correctement calibré
- Dans le cas d'un bassin versant fortement régularisé (voir la [Section 6.3.1](#) – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés), possiblement un modèle de gestion de l'eau.
- Plus de trois mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie, climat, changement climatique et programmation (les simulations climatiques post-traitées sont des produits sur grille dans des fichiers en format NetCDF).

5.2.2. Pourquoi choisir les simulations climatiques post-traitées ?

- L'entreprise a besoin d'une information détaillée pour réaliser ses activités (p. ex., analyse de risque, stade avancé du projet de développement, remise à neuf, etc.).
- Économies de temps et de ressources considérables comparativement aux simulations brutes, s'il y a un jeu de données adéquat pour le bassin versant à l'étude.

5.2.3. Avantages des simulations climatiques post-traitées

- Bon contrôle de l'entreprise sur la chaîne de modélisation
- Les jeux de données post-traités peuvent avoir été créés au moyen de techniques de post-traitement plus avancées que celles qui seraient utilisées à l'interne.

5.2.4. Inconvénients des simulations climatiques post-traitées

- La documentation sur les jeux de données n'est pas toujours claire et les limites d'utilisation sont mal définies.
- Le praticien pourrait mettre en doute la qualité des données produites à l'externe.
- Le post-traitement sur de grandes régions (p. ex., à l'échelle du Canada) s'effectue habituellement au moyen d'observations sur grille ou de réanalyses, dont la performance varie en fonction de la localisation.

5.2.5. Prochaines étapes

- a) S'assurer de choisir une base de référence climatique et hydrologique (voir la [Section 4](#)).
- b) Suivre les lignes directrices de l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- c) Évaluer la transférabilité des données et des résultats, si nécessaire (voir l'[Annexe D](#) – Transférabilité des données et des résultats)
- d) Évaluer l'adéquation des simulations climatiques (voir l'[Annexe E](#) – Validation de produits climatiques).
- e) Aller à la [Section 6.2](#) – Du climat à l'hydrologie.

5.2.6. Exemples de ressources pour les simulations climatiques post-traitées

Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) – NASA

<https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>

Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) – World Climate Research Programme

<http://www.cordex.org/data-access/bias-adjusted-rcm-data/>

The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)

<https://www.isimip.org/>

Scénarios génériques v1.0 – Ouranos

Site Web en cours de développement

Statistically downscaled climate scenarios – Pacific Climate Impacts Consortium

<https://pacificclimate.org/data/statistically-downscaled-climate-scenarios>

Projections for Australia's NRM's Regions – Climate change In Australia

<https://www.climatechangeinaustralia.gov.au/en/climate-projections/explore-data/about-data/data-availability/>

Dynamically-downscaled climate projections – Climate Change Data Portal

<http://ccdp.network/>

Spatial Downscaling Data – Climate change, agriculture and Food security (CCAFS)

http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/

5.3. Générateurs de conditions météorologiques

Un générateur de conditions météorologiques est un modèle numérique qui produit des simulations climatiques synthétiques fondées sur les caractéristiques statistiques des observations météorologiques. Il en existe des versions commerciales, mais le praticien peut en développer un lui-même. Le générateur peut soit produire un climat stationnaire, soit intégrer directement les tendances des MCG.

L'ADÉQUATION DES SIMULATIONS CLIMATIQUES PRODUITES PAR DES GÉNÉRATEURS DE CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

L'adéquation et la qualité des générateurs de conditions météorologiques varient de médiocres à acceptables. D'ailleurs, dans les études portant sur les impacts du changement climatique, l'utilisation de générateurs est moins répandue que l'utilisation des simulations climatiques de MCG accompagnées de méthodes de transformation des données appropriées, et ce, en raison de leur base statistique plutôt que physique.

De plus, peu de générateurs réussissent à adéquatement et simultanément conserver la cohérence spatiale entre plusieurs sous-bassins.

5.3.1. Critères pour la sélection de générateurs de conditions météorologiques

- Base de référence climatique et hydrologique de qualité
- Modèle hydrologique en continu adéquatement calibré
- Dans le cas d'un bassin versant en amont fortement régularisé (voir la [Section 6.3.1 – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés](#)), possiblement un modèle de gestion de l'eau.
- Plus de trois mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie, climat, changement climatique, statistique et programmation

5.3.2. Pourquoi choisir des générateurs de conditions météorologiques ?

- L'entreprise a besoin d'une information détaillée pour réaliser ses activités (p. ex., analyse de risque, stade avancé du projet de développement, remise à neuf, etc.).
- Elle souhaite produire de nombreuses simulations et recréer des événements rares.

5.3.3. Avantages des générateurs de conditions météorologiques

- Bon contrôle de l'entreprise sur la chaîne de modélisation
- Les séries temporelles générées conservent certains paramètres statistiques clés (p. ex., la durée des périodes humides et sèches; Hayhoe, 2000).

5.3.4. Inconvénients des générateurs de conditions météorologiques

- Complexité
- Le développement de générateurs de conditions météorologiques convenant à l'hydrologie, surtout s'il y a plusieurs variables sur plusieurs sites, est une tâche longue et exigeante que peu de statisticiens peuvent accomplir. Il y a toutefois quelques exemples de réussite (p. ex., Abbasnezhadi, 2017).
- Procédure purement statistique (Wilks et Wilby, 1999)
- La qualité de la sortie est parfois limitée par la capacité du modèle statistique à produire un résultat satisfaisant (Wilks et Wilby, 1999).

5.3.5. Prochaines étapes

- a) S'assurer de choisir une base climatique et hydrologique (voir la [Section 4](#)).
- b) Suivre les lignes directrices de l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- c) Évaluer la transférabilité des données et des résultats, si nécessaire (voir l'[Annexe D](#) – Transférabilité des données et des résultats)
- d) Évaluer l'adéquation des simulations climatiques (voir l'[Annexe E](#) – Validation de produits climatiques).
- e) Aller à la [Section 6.2](#) – Du climat à l'hydrologie.

5.3.6. Exemples de ressources pour les générateurs de conditions climatiques

KnnCAD Version 4 – University of Western Ontario
(King *et al.*, 2014)

Multi-site stochastic weather generator (MulGETS) – Matlab
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47537-multi-site-stochastic-weather-generator-mulgets>
*** *Integration of multi-annual cycles* : (Chen *et al.*, 2019)

OSSE-based algorithm – Université du Manitoba
(Abbasnezhadi, 2017)

5.4. Résultats précalculés de simulations climatiques

On retrouve des résultats précalculés de simulations climatiques sur des sites web, des portails de données et dans des rapports et articles scientifiques. Ils contiennent de l'information pertinente sur la température moyenne et les niveaux de précipitation quotidienne, mensuelle et annuelle pour divers horizons temporels (présents et futurs, pour appliquer la méthode delta sur la base de référence climatique), ainsi que sur les tendances de ces variables climatiques (pour appliquer la méthode de prolongement sur la période de référence climatique). Les résultats se présentent sous forme de cartes, de tableaux, de figures, etc.

5.4.1. Critères pour la sélection des résultats précalculés de simulations climatiques

- Résultats pertinents pour la même période que celle de la base de référence climatique et pour la période future à l'étude, au minimum (voir les Exemples de ressources et Prochaines étapes.)
- Base de référence climatique et hydrologique de qualité
- Modèle hydrologique en continu adéquatement calibré
- Dans le cas d'un bassin versant en amont fortement régularisé (voir la [Section 6.3.1 – Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés](#)), possiblement un modèle de gestion de l'eau.
- Au moins un mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie et expertise acceptable en climat et changement climatique

5.4.2. Pourquoi choisir des résultats précalculés de simulations climatiques ?

- L'entreprise commence à travailler avec la base de référence climatique, se penche peut-être sur le changement climatique pour la première fois et veut évaluer le niveau d'effort requis.

5.4.3. Avantages des résultats précalculés de simulations climatiques

- Un minimum d'effort peut donner lieu à des résultats robustes.
- Il est possible d'avoir accès à des données régionales, si les données locales sont limitées.

5.4.4. Inconvénients des résultats précalculés de simulations climatiques

- Le praticien se voit limité par la quantité et le type d'information disponible et il pourrait être difficile d'obtenir les données brutes pour produire des figures, tableaux et cartes. Le cas échéant, le reste de la chaîne de modélisation dégagera des résultats très sommaires.
- Le praticien doit presque obligatoirement appliquer la méthode delta.
- L'information disponible n'est peut-être pas à la bonne échelle spatiale/temporelle ou n'existe pas pour le bassin versant.
- Plusieurs études portant sur le même bassin versant peuvent donner des résultats différents, ce qui prêterait à confusion.

5.4.5. Prochaines étapes

- a) S'assurer de choisir une base de référence climatique et hydrologique (voir la [Section 4](#)).
- b) Suivre les lignes directrices de l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- c) Évaluer la transférabilité des données et des résultats, si nécessaire (voir l'[Annexe D](#) – Transférabilité des données et des résultats).
- d) Aller à la [Section 6.2](#) – Du climat à l'hydrologie.

5.4.6. Exemples de ressources pour les résultats précalculés de simulations climatiques

Atlas of Global and Regional Climatic simulations – IPCC

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/atlas-of-global-and-regional-climate-projections/>

Climate Change Knowledge Portal – World Bank Group

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

Données climatiques Canada – Environnement et Changement climatique Canada

<https://climatedata.ca/>

Portraits climatiques – Ouranos

<https://www.ouranos.ca/climateportraits/#/>

Statistical DownScaling Model (SDSM) – Loughborough University

<https://sdsml.org.uk/sdsmlmain.html>

LARS-WG – Long Ashton Research Station

https://www.researchgate.net/publication/268304865_LARS-WG_A_Stochastic_Weather_Generator_for_Use_in_Climate_Impact_Studies

CLimate GENerator (CLIGEN) – USA ARS

<https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/cligen/>

CLIMGEN – UK Climatic Research Unit

<https://crudata.uea.ac.uk/~timo/climgen/>

<http://modeling.bsyse.wsu.edu/rnelson/registration/ClimGen.htm>

WeaGETS – Jie Chen

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29136-stochastic-weather-generator-weagets>

WGEN, GEM, agGEM – USDA

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/?cid=stelprdb1043533>

5.5. Simulations hydrologiques

Les jeux de données de simulations hydrologiques intégrant le changement climatique sont plus facilement accessibles qu'avant. Les tâches de mise à l'échelle et de correction de biais de simulations climatiques, de sélection et de calibration d'un modèle hydrologique et de lancement des simulations climatiques sont déjà effectuées. Le praticien a donc directement accès à des simulations hydrologiques pour un bassin versant en particulier ou pour des bassins versants avoisinants. Si ces jeux de données n'existent pas, certains organismes et consultants sont également capables de les produire.

LIMITES DES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES

Les simulations hydrologiques sont des représentations imparfaites de l'hydrologie d'un bassin versant en raison des limites des jeux de données. Il est important de les évaluer avant de les intégrer dans la chaîne de modélisation.

5.5.1. Critères pour la sélection de simulations hydrologiques

- Jeu de données adéquat (voir la [Section 5.5.6](#) – Exemples de ressources pour les simulations hydrologiques et la [Section 5.5.5](#) – Prochaines étapes). Des simulations hydrologiques adéquates peuvent être difficiles à obtenir.
- Bonne base de référence hydrologique
- Au moins un mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie et expertise acceptable en climat et changement climatique

5.5.2. Pourquoi choisir les simulations hydrologiques

- Économie de temps et de ressources considérable si un jeu de données adéquat est disponible pour le bassin versant à l'étude ou pour un bassin versant avoisinant.
- Il n'existe pas de modèle hydrologique en continu adéquat. L'entreprise n'a peut-être pas identifié des besoins qui justifieraient l'élaboration d'un modèle, ou est en voie d'en élaborer un.

5.5.3. Avantages des simulations hydrologiques

- Des simulations hydrologiques intégrant le changement climatique ont été déjà été produites pour plusieurs RCP, MCG et modèles hydrologiques, dans certains cas.

5.5.4. Inconvénients des simulations hydrologiques

- La documentation sur les jeux de données n'est pas toujours claire et les limites d'utilisation sont mal définies.

- Capacité limitée d'adapter l'information en vue d'un but précis, le praticien n'ayant pas calibré le modèle hydrologique.
- Le praticien peut mettre en doute la qualité des données produites à l'externe.

5.5.5. Prochaines étapes

- a) Suivre les lignes directrices de l'**Annexe I** – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- b) Évaluer la transférabilité des données et résultats, si nécessaire (voir l'**Annexe D** – Transférabilité des données et des résultats).
- c) Aller à la **Section 6.2** – Du climat à l'hydrologie ou **Section 6.3** – De l'hydrologie à l'énergie.

5.5.6. Exemples de ressources pour les simulations hydrologiques

NAC2H :The North-American Climate Change and hydroclimatology dataset –

Richard Arsenault, François Brissette, Jie Chen

<http://doi.org/10.17605/OSF.IO/S97CD>

PAVICS-HYDRO – ÉTS et Ouranos

<https://pavics-raven.readthedocs.io>

Note : Cette ressource ne fournit pas directement de simulations hydrologiques, mais elle peut être utilisée pour en produire.

PAVICS-Données de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional

<https://pavics.ouranos.ca/twitcher/ows/proxy/thredds/catalog/birdhouse/mddelcc/>

[PROJECTIONS_HYDROCLIMATIQUES/catalog.html](https://pavics.ouranos.ca/twitcher/ows/proxy/thredds/catalog/birdhouse/mddelcc/PROJECTIONS_HYDROCLIMATIQUES/catalog.html)

Station hydrologic model output – Pacific Climate Impacts Consortium

<https://pacificclimate.org/data/station-hydrologic-model-output>

Gridded hydrologic model output – Pacific Climate Impacts Consortium

<https://pacificclimate.org/data/gridded-hydrologic-model-output>

Hydrologic Response of the Columbia River Basin to Climate Change – UW Hydro

<https://www.hydro.washington.edu/CRCC/>

Water quantity indicators for Europe – Copernicus

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/sis-water-quantity-swicca?tab=overview>

Projected Changes in Streamflow – Skagit Climate Science Consortium

<http://www.skagitclimatescience.org/projected-changes-in-streamflow/>

5.6. Jeux de données globaux et approximations

Les jeux de données globaux, qui sont de plus en plus disponibles, consistent en simulations hydrologiques produites par des modèles hydrologiques globaux qui utilisent comme intrants des simulations climatiques brutes ou mises à l'échelle et débiaisées. Les approximations sont des variables autres que les débits que l'on peut modifier pour se faire une idée du comportement des débits futurs, tel que la variable de ruissellement dans les MCG et MCR.

JEUX DE DONNÉES GLOBAUX ET APPROXIMATIONS – CE QU'IL FAUT SAVOIR

Adéquation

L'adéquation et la qualité des jeux de données et des approximations varient de médiocres à acceptables à l'échelle spatiale requise pour la plupart des évaluations. Leur applicabilité doit être examinée attentivement en vue de leur utilisation dans l'évaluation de la valeur des actifs.

Ruissellement ou débit?

- Dans un modèle hydrologique, ce qui différencie le ruissellement du débit, c'est que le débit est routé vers l'exutoire du bassin versant. Le ruissellement est réparti sur toute la superficie du bassin, tandis que le débit est canalisé (concentré) et affecté par l'hydraulique (p. ex., restrictions d'écoulement).
- Certains jeux de données n'incluent que le ruissellement en raison du coûteux temps de calcul du module de routage. Le ruissellement permet d'approximer les débits, artificiellement routé vers l'exutoire et transformé en débits en le multipliant par la superficie du bassin versant et en apportant le changement d'unité approprié.
- Si les données de ruissellement et de débit sont disponibles, le débit ne sera pas nécessairement la meilleure option, car cela dépend du schéma de routage. Comme le montre la [Figure 19](#), le routage de l'eau dans certains modèles hydrologiques ne correspond pas à la réalité (p. ex., en raison de la résolution grossière et de la difficulté à représenter la topographie dans les modèles).
- L'utilisation du ruissellement et sa transformation en débits constituent une approche valable si le temps de concentration du bassin versant est du même ordre de grandeur que celui de la résolution temporelle des données.

Processus naturels à l'étude

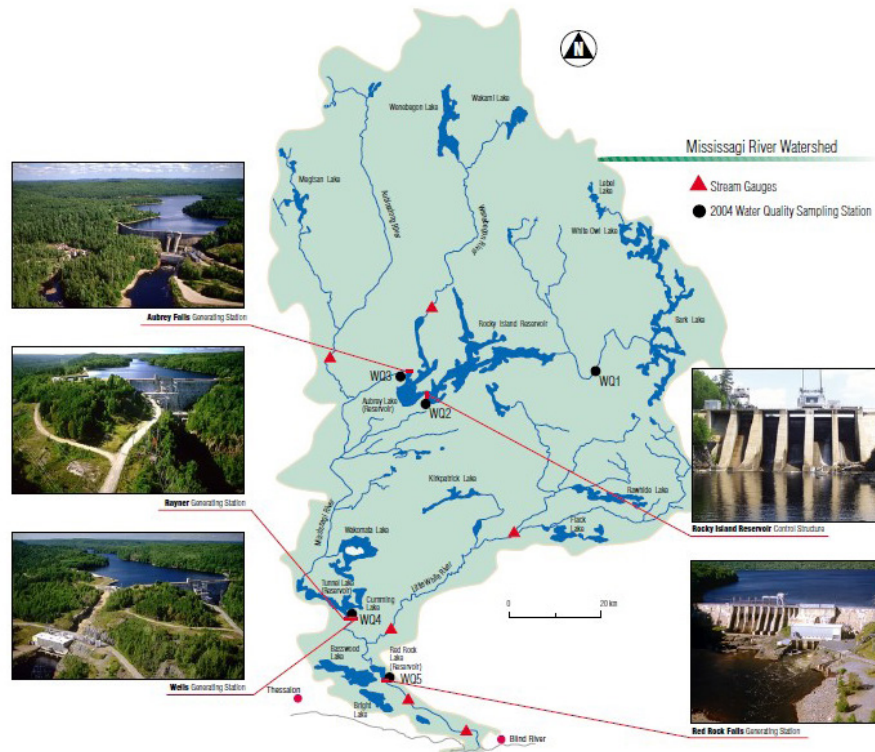
Ces jeux de données ne représentent pas systématiquement tous les processus naturels; par exemple, le traitement des glaciers de montagne dans les modèles climatiques n'est pas satisfaisant (Randall *et al.*, 2007). De plus, certains modèles climatiques ne considèrent pas explicitement les processus hydrologiques latéraux et l'hétérogénéité des surfaces (Davison *et al.*, 2016). Le praticien qui choisit cette option devrait d'abord s'assurer de bien comprendre le jeu de données et en valider l'adéquation ([Annexe G](#) – Validation de simulations hydrologiques).

Téléchargement et extraction

Voir l'encadré Résolution, biais et extraction de simulations climatiques brutes dans la [Section 5.1](#) – Simulations climatiques brutes.

Pour l'extraction du ruissellement, une bonne pratique consiste à extraire les données de tous les points du bassin versant. L'extraction du débit est un peu plus délicate en raison du schéma de routage. Cette étape devrait être soigneusement menée en tenant compte de la carte du schéma de routage.

A



B

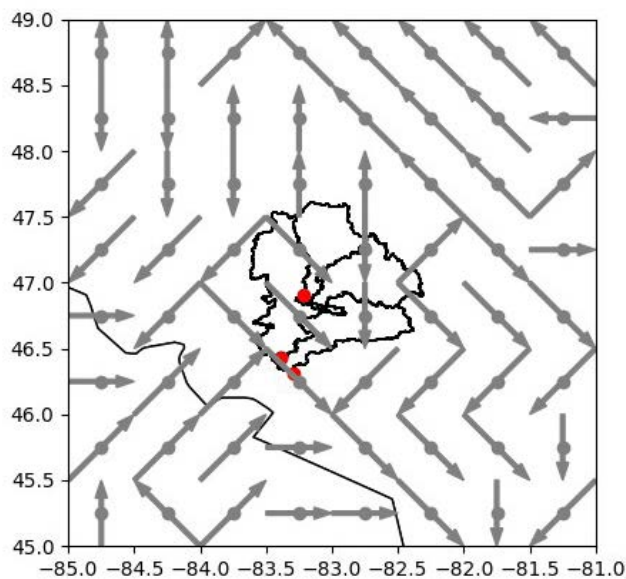


Figure 19 Exemple des incohérences entre le routage de l'eau dans la réalité et le schéma de routage dans le modèle hydrologique global. A) Carte du bassin versant de la Mississagi (produite par Hatch pour le compte de Brookfield Renewable Power). Dans des environnements naturels, le débit est dirigé le long des rivières. B) Carte du schéma de routage de l'ensemble ISI-MIP. Dans les modèles, le routage des débits est simplifié; dans cet exemple, ils sont dirigés le long des trajectoires des flèches en gris, qui ne sont pas représentatives du routage réel des débits en raison de sa résolution grossière.

5.6.1. Critères pour la sélection de jeux de données globaux et d'approximations

- Jeu de données adéquat dont la résolution spatiale est, au minimum, du même ordre de grandeur que celle du bassin versant à l'étude (voir les exemples dans la [Section 5.6.6](#) – Exemples de ressources pour les jeux de données globaux et les approximations et la [Section 5.6.5](#) – Prochaines étapes)
- Base de référence hydrologique de qualité
- Modèle hydrologique en continu calibré
- Plus de trois mois pour mener le processus d'évaluation de la valeur
- Solide expertise en hydrologie, climat, changement climatique et programmation (fichiers NetCDF et produits sur grille)

5.6.2. Pourquoi choisir des jeux de données globaux et des approximations ?

- Un jeu de données global est approprié dans le cas d'un bassin versant situé dans une région pauvre en données (pour les observations météorologiques et hydrologiques) (Krysanova *et al.*, 2018).
- L'entreprise n'a pas de modèle hydrologique en continu adéquat pour le bassin versant. Elle n'a peut-être pas identifié des besoins qui justifieraient l'élaboration d'un modèle, ou est en voie d'en élaborer un. De plus, aucun jeu de simulations n'est disponible (voir la [Section 5.5](#) – Simulations hydrologiques).
- L'entreprise souhaite mieux comprendre le changement climatique (Krysanova *et al.*, 2018) et veut manipuler des données afin de produire des figures et graphiques personnalisés.
- Le bassin versant est suffisamment grand pour que des jeux de données globaux plus grossiers puissent fournir de l'information adéquate sur les changements dans le bilan hydrique à large échelle.

5.6.3. Avantages des jeux de données globaux et des approximations

- Les simulations hydrologiques intégrant le changement climatique sont disponibles pour plusieurs RCP, MCG et modèles hydrologiques, dans certains cas.
- Le jeu de données peut comprendre plusieurs scénarios de facteurs hydrologiques de changement, comme l'utilisation des sols et diverses utilisations de l'eau.

5.6.4. Inconvénients des jeux de données globaux et des approximations

- La documentation sur les jeux de données n'est pas toujours claire et les limites d'utilisation sont mal définies.
- Le praticien peut mettre en doute la qualité des données produites à l'externe.
- Les jeux de données ne conviennent peut-être pas au bassin à l'étude. La performance de ces jeux va d'excellente à médiocre et varie en fonction de l'emplacement et de la taille du bassin versant (Krysanova *et al.*, 2018). Il est donc préférable de choisir un modèle hydrologique calibré, si disponible, plutôt que des jeux de données globaux et des approximations ([Section 5.5](#) – Simulations hydrologiques).
- Le jeu de données peut avoir une résolution très grossière, inférieure à celle du bassin versant à l'étude.

5.6.5. Prochaines étapes

- a) Suivre les lignes directrices de l'[Annexe I](#) – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- b) Aller à la [Section 6.2](#) – Du climat à l'hydrologie ou à la [Section 6.3](#) – De l'hydrologie à l'énergie.

5.6.6. Exemples de ressources pour les jeux de données globaux et les approximations

CMIP5 – World Climate Research Programme

<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>

Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) –

World Climate Research Programme

<https://www.cordex.org/>

The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)

<https://www.isimip.org/>

5.7. Résultats précalculés de simulations hydrologiques

On retrouve des résultats précalculés de simulations hydrologiques sur des sites web, des portails de données et dans des rapports et articles scientifiques. Ils contiennent de l'information pertinente sur le débit moyen à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle pour différents horizons temporels (présents et passés, pour appliquer la méthode delta sur la base de référence hydrologique), ainsi que des tendances du débit moyen (pour appliquer la méthode de prolongement sur la base de référence hydrologique). Les résultats se présentent sous forme de cartes, de tableaux, de figures, etc. Le **Tableau 6** montre un exemple tiré de la littérature du type de données disponibles à l'échelle annuelle et saisonnière.

Tableau 6 Exemple de données hydrologiques disponibles dans la littérature pour les rivières Chute-à-la-Savane et Passes-Dangeureuses. Le tableau montre la moyenne annuelle et saisonnière (printemps, été-automne et hiver) ainsi que l'écart-type pour quatre périodes allant de 1961 à 2099. Les valeurs en gras indiquent un changement statistiquement significatif par rapport à la période de référence (1961-1990).

	Mean (standard deviation) (mm)			
	Annual	Spring (AMJ)	Summer–autumn (JASON)	Winter (DJFM)
1961–1990	892 (103)	221 (45)	405 (57)	264 (49)
2010–2039	917 (109)	235 (45)	391 (62)	289 (63)
2040–2069	1,015 (102)	256 (52)	414 (72)	344 (65)
2070–2099	1,107 (112)	273 (65)	436 (74)	396 (67)

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

5.7.1. Critères pour la sélection de résultats précalculés de simulations hydrologiques

- Au minimum, des résultats pertinents pour la période correspondant à celle de la base de référence climatique et la période future à l'étude (voir la **Section 5.7.6** – Exemple de résultats précalculés des simulations hydrologiques et la **Section 5.7.5** – Prochaines étapes).
- Base de référence hydrologique de qualité
- Expertise acceptable en hydrologie, climat et changement climatique

5.7.2. Pourquoi choisir des résultats précalculés de simulations hydrologiques

- L'entreprise se penche sur le changement climatique pour la première fois et veut évaluer le niveau d'effort à investir.
- Elle dispose de peu de temps (moins d'un mois) et de ressources.
- Il n'y a pas de modèle hydrologique en continu adéquat pour le bassin versant. Elle n'a peut-être pas identifié des besoins qui justifieraient l'élaboration d'un modèle, ou est en voie d'en élaborer un.
- L'entreprise a réalisé des simulations hydrologiques intégrant le changement climatique et veut les comparer à d'autres études.

5.7.3. Avantages des résultats précalculés des simulations hydrologiques

- Un effort minimal peut donner lieu à des résultats robustes.
- Il est possible d'avoir accès à des données régionales, si les données locales sont limitées.

5.7.4. Inconvénients de résultats précalculés des simulations hydrologiques

- Le praticien se voit limité par la quantité et le type de données disponibles, et il pourrait être difficile d'obtenir des données brutes pour produire des figures, tableaux et cartes. Le cas échéant, le reste de la chaîne de modélisation dégagera des résultats très sommaires.
- L'information disponible n'est peut-être pas à la bonne échelle spatiale/temporelle ou n'existe pas pour le bassin versant.
- Plusieurs études portant sur le même bassin versant peuvent donner des résultats différents, ce qui prêterait à confusion.
- Les impacts non corrélés avec le débit annuel moyen (p. ex., événements extrêmes ou changements abrupts) sont difficiles à évaluer sans les données complètes (série temporelle).

5.7.5. Prochaines étapes

- a) Suivre les lignes directrices de l'**Annexe I** – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble.
- b) Évaluer la transférabilité des données et des résultats, si nécessaire (voir l'**Annexe D** – Transférabilité des données et des résultats).
- c) Aller à la **Section 6.2** – Du climat à l'hydrologie ou **Section 6.3** – De l'hydrologie à l'énergie.

5.7.6. Exemples de résultats précalculés des simulations hydrologiques

Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Gouvernement du Québec – Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
<http://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/>

Water quantity indicators for Europe – Copernicus
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-quantity-swicca?tab=overview>



**Intégration de la ou
des bases de référence et
des données de changement
climatique dans la chaîne
de modélisation**

Cette section explique quand et comment intégrer la ou les bases de référence et les données de changement climatique dans la chaîne de modélisation et tient compte des enjeux particuliers des méthodes de transformation des données à chaque étape de la chaîne.

La [Section 6.1](#) explique les trois types d'intégration ([Figure 20](#)). Les [Sections 6.2, 6.3 et 6.4](#) portent sur l'intersection de chaque modèle dans la chaîne de modélisation : « Du climat à l'hydrologie »; « De l'hydrologie à l'énergie »; et « De l'énergie à la valeur ». La [Section 6.5](#) fournit deux exemples illustrant les concepts présentés et, finalement, l'[Annexe J – Études de cas](#), présente des exemples concrets d'intégration réalisés par des entreprises hydroélectriques.

6.1. Cas particuliers d'intégration

La [Figure 20](#) illustre trois types particuliers d'intégration de la base de référence et des données de changement climatique dans la chaîne de modélisation, qui varient selon l'option de la base de référence ([Section 4](#)) et des données de changement climatique ([Section 5](#)). Pour chaque type, la transformation des données peut se faire au début de chaque étape ou entre les étapes de la chaîne (voir la [Section 7.5.1](#) – Quelle méthode appliquer et à quelle étape ?).

- a) La base de référence climatique et les données de changement climatique alimentent le modèle hydrologique après transformation des données, si nécessaire. De la même façon, la base de référence hydrologique alimente le modèle énergétique après transformation des données, si nécessaire. Ce type d'intégration produit : une simulation de la valeur fondée sur la base de référence climatique; une simulation de la valeur fondée sur la base de référence hydrologique; et des simulations de valeur intégrant le changement climatique.
- b) La base de référence climatique alimente le modèle hydrologique après transformation des données, si nécessaire. La base de référence hydrologique et les données de changement climatique alimentent le modèle énergétique après transformation des données, si nécessaire. Ce type d'intégration produit les mêmes résultats que le type A.
- c) Il n'y a pas de modèle hydrologique dans la chaîne de modélisation. La base de référence hydrologique et les données de changement climatique alimentent le modèle énergétique après transformation des données, si nécessaire. Ce type d'intégration produit une simulation de la valeur fondée sur la base de référence hydrologique et des simulations de valeur intégrant le changement climatique.

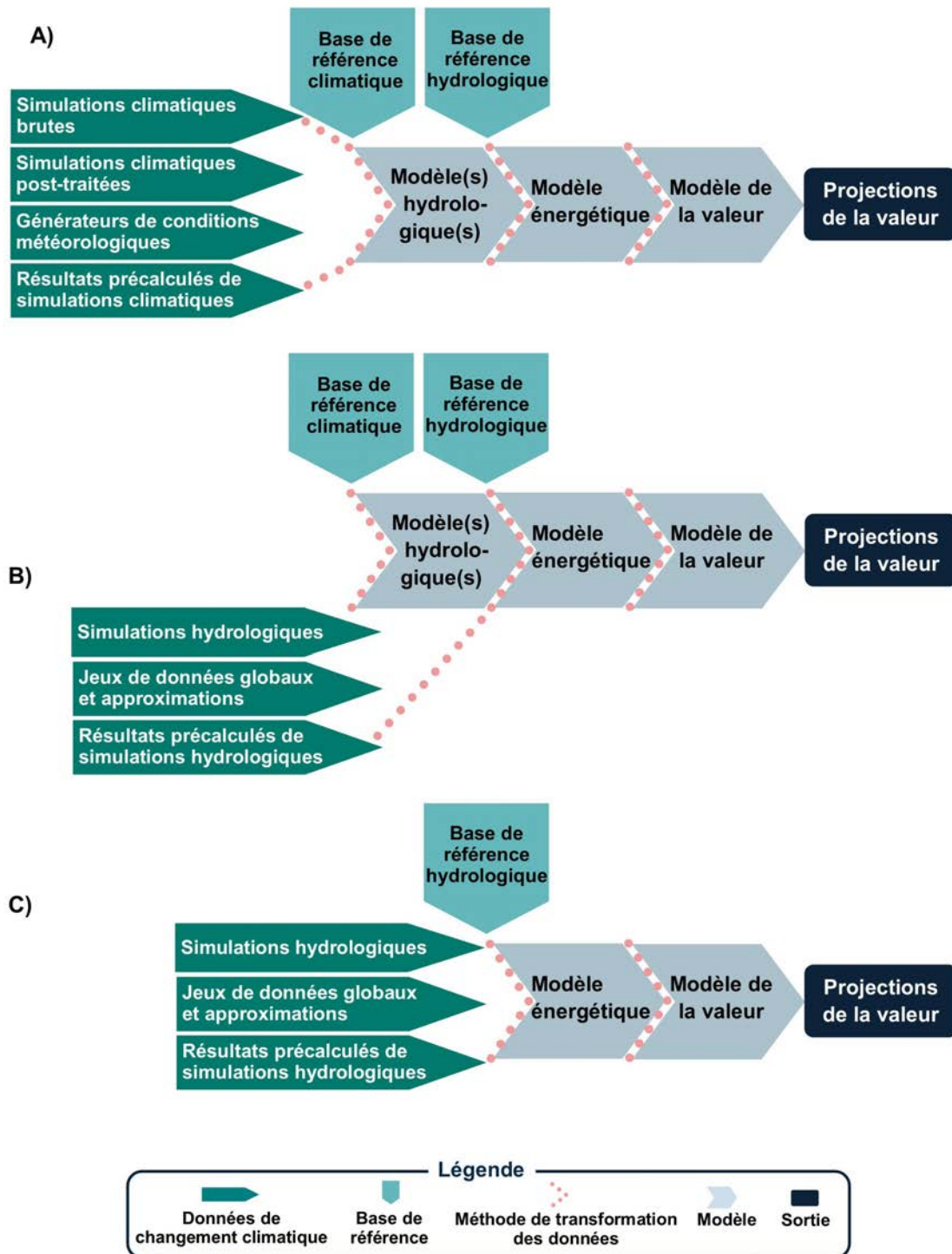


Figure 20 Les trois types d'intégration dans la chaîne de modélisation selon le type de base de référence et de données de changement climatique. A) Données de changement climatique alimentant le modèle hydrologique après transformation des données, si nécessaire, et utilisant la base de référence climatique et hydrologique. B) Données de changement climatique alimentant le modèle énergétique après transformation des données, si nécessaire, et utilisant la base de référence climatique et hydrologique. C) Données de changement climatique alimentant le modèle énergétique après transformation des données, si nécessaire, et utilisant seulement la base de référence hydrologique.

6.2. Du climat à l'hydrologie

Cette section explique comment intégrer la base de référence climatique et les données de changement climatique relatives au climat ([Sections 5.1 à 5.4](#)) dans le modèle hydrologique (voir la [Figure 20](#)). Elle présente d'abord les méthodes de transformation des données les plus courantes et pertinentes pour les simulations/résultats climatiques dans le [Tableau 7](#), puis donne un aperçu des considérations particulières pour cette étape de la chaîne de modélisation ([Section 6.2.1](#)). La [Section 6.2.2](#) souligne les considérations particulières pour les méthodes de réduction et d'ajustement sur la base de référence climatique, et les [Sections 6.2.3 à 6.2.5](#) portent sur les méthodes de prolongement, de delta et de correction des biais. La méthode directe n'est pas abordée, car sa mise en œuvre ne comporte aucune considération particulière. Remarque : comme les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont mentionnés dans la [Section 3](#), ils ne sont pas répétés ici. La [Section 6.2.6](#) présente les prochaines étapes.

Le [Tableau 7](#) présente les méthodes de transformation des données les plus courantes et pertinentes sur la base de référence climatique et les données de changement climatique avant leur intégration dans la chaîne de modélisation à cette étape-ci. Voir la [Section 3](#) pour la description des méthodes directe, de réduction, d'ajustement, de prolongement, de delta et de correction de biais.

Tableau 7 Méthodes de transformation des données pour la base de référence et pour les données de changement climatique, pour l'intégration des données de changement climatique/résultats dans un modèle hydrologique

	Directe	Réduction	Ajustement	Prolongement	Delta	Correction de biais
Base de référence climatique	●	●	●	●	●	●
Simulations climatiques brutes				●	●	●
Simulations climatiques post-traitées	●			●	●*	
Générateurs de conditions météorologiques	●			●		
Résultats précalculés de données climatiques				●	●	

* Cette option est à prendre en considération s'il y a des incohérences entre la base de référence climatique à partir de laquelle le modèle hydrologique est calibré et les simulations climatiques brutes post-traitées (voir la [Section 7.4](#) – Cohérence des données climatiques et des périodes temporelles).

6.2.1. Considération particulière pour la cohérence du jeu de données

À cette étape-ci, on considère généralement trois variables : la précipitation, la température minimale et la température maximale. Il est préférable d'alimenter le modèle hydrologique avec les trois variables provenant toutes de la même simulation ou du même produit climatique. Étant donné la cohérence temporelle et spatiale d'une simulation ou d'un produit climatique, l'utilisation de variables provenant de différentes simulations dans le modèle hydrologique produira des incohérences physiques.

6.2.2. Considérations particulières pour la réduction et l'ajustement de la base de référence

Si l'on sait que le changement climatique a un impact sur le bassin versant et que les observations sont disponibles pour une période de plus de 30 ans, la réduction des observations – par exemple, pour sélectionner la période de 30 ans la plus récente – est tout à fait indiquée puisque le passé récent représente mieux les conditions actuelles. Cependant, il peut y avoir une perte d'information importante. Voir d'autres avantages et inconvénients dans la [Section 3.2 – Réduction](#).

Une tendance statistiquement significative attribuable au changement climatique dans les données peut poser problème pour la suite. Le praticien pourrait opter pour une base de référence sans tendance de changement climatique, ou pourrait éliminer la tendance de changement climatique avant d'appliquer d'autres méthodes de transformation des données. Dans ces situations, la base de référence peut être ajustée (voir la [Section 3.3 – Ajustement](#)).

6.2.3. Considérations particulières pour le prolongement de la base de référence

Utiliser la base de référence climatique et y appliquer la méthode de prolongement est un moyen intéressant de produire un scénario futur. Voir les recommandations, avantages et inconvénients dans la [Section 3.4 – Prolongement](#).

Si le facteur de correction est calculé à partir de la base de référence et est attribuable au changement climatique ([Annexe B – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique](#)), il est raisonnable de prolonger la tendance d'environ 15 ans. À cet horizon temporel, les scénarios d'émissions demeurent semblables. Comme mentionné dans la [Section 3.4 – Extension](#), il est fortement conseillé de mener une étude de détection et d'attribution afin de déterminer si le facteur de correction peut être attribué au changement climatique (voir l'[Annexe B – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique](#)).

Voir également la première considération mentionnée dans la [Section 6.2.4 – Considérations particulières pour la méthode delta](#).

6.2.4. Considérations particulières pour la méthode delta

Trois considérations s'imposent si l'on choisit la méthode delta à cette étape-ci de la chaîne de modélisation.

Première considération – Comme mentionné dans la [Section 3.5](#) – Méthode delta, la méthode delta projetera dans le futur les cycles et les tendances climatiques du passé. Or, cela peut poser problème pour les bases de référence ayant de fortes tendances (p. ex., la température). La [Figure 15](#) de la [Section 3.5](#) (méthode delta) illustre ce concept : la projection de la base de référence (en noir) n'affiche pas la même tendance que la simulation climatique (en rouge). L'ajustement de la base de référence avant l'application de la méthode delta règlera une partie du problème.

Deuxième considération – La méthode delta s'applique généralement aux périodes de 30 ans, et on choisit cet horizon temporel pour trois raisons : il couvre en grande partie la variabilité naturelle; il permet de calculer les statistiques les plus pertinentes (car il respecte le nombre minimal de données nécessaires à l'analyse statistique); et il atténue le risque de trouver une tendance significative dans les données. Pour l'évaluation de la valeur d'actifs, une période de 30 ans n'est pas suffisante dans certains cas (p. ex., le calcul de la VAN sur plus de 90 ans). Le praticien peut utiliser des périodes futures et des périodes de référence plus longues si les données sont disponibles (voir l'exemple dans la [Section 6.5.1](#) – Application de la méthode delta sur une base de référence hydrologique). Sinon, il devra adapter l'approche et en documenter les limites.

Troisième considération – Après avoir appliqué la méthode delta, le praticien pourrait utiliser la méthode directe pour les étapes suivantes de la chaîne ou utiliser de nouveau la méthode delta pour l'étape « De l'hydrologie à l'énergie ». Dans ce deuxième cas, il serait préférable que les périodes de référence de la base climatique et hydrologique soient cohérentes ou comparées statistiquement.

6.2.5. Considérations particulières pour la correction de biais

Il faut garder à l'esprit de nombreuses considérations techniques lorsqu'on applique la correction de biais sur des simulations climatiques brutes. Tout d'abord, il faut déterminer s'il est nécessaire de faire une mise à l'échelle avant ou pendant le processus de correction de biais. Ensuite, il faut possiblement : sélectionner les MCG (voir l'[Annexe C](#) – Méthodes de sélection de GCM); déterminer s'il est nécessaire d'ajuster les calendriers pour les besoins du modèle hydrologique (pour les MCG qui n'utilisent pas un calendrier standard); traiter adéquatement les valeurs en dehors de la fourchette de la distribution historique; conserver la tendance de la simulation climatique; éviter les incohérences physiques entre les variables de la même simulation (p. ex., température minimale et maximale); et appliquer la correction de biais à différentes échelles temporelles. Ces considérations sont bien documentées dans la littérature (Agbazo et Grenier, 2019; Cannon *et al.*, 2015; Haerter *et al.*, 2011; Hempel *et al.*, 2013; Maraun et Widmann, 2018).

À cette étape-ci, il est important de considérer que même si la méthode de correction de biais offre plusieurs avantages, les simulations débiaisées et mises à l'échelle comportent encore des limites qui doivent être documentées et prises en compte dans les étapes suivantes la chaîne.

6.2.6. Prochaines étapes

- a) Appliquer la transformation des données, si nécessaire.
- b) Évaluer l'adéquation des scénarios climatiques (voir l'[Annexe E](#) – Validation de produits climatiques).
- c) Lancer les simulations hydrologiques au moyen des scénarios climatiques.
- d) Aller à la [Section 6.3](#) – De l'hydrologie à l'énergie.

6.3. De l'hydrologie à l'énergie

Cette section explique comment intégrer la base de référence hydrologique et les données de changement climatique relatives à l'hydrologie ([Sections 5.5 à 5.7](#)) dans le modèle énergétique, comme le montre la [Figure 20](#). Le [Tableau 8](#) présente les méthodes de transformation des données les plus courantes et pertinentes pour les simulations/résultats hydrologiques. La [Section 6.3.1](#) précise les considérations particulières pour cette étape-ci de la chaîne de modélisation. La [Section 6.3.2](#) a trait aux méthodes de réduction et d'ajustement de la base de référence hydrologique, et les [Sections 6.3.3 à 6.3.5](#) portent sur les méthodes de prolongement, de delta et de correction de biais. La méthode directe n'est pas abordée, car elle ne comporte aucune considération particulière. Remarque : comme les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont mentionnés dans la [Section 3](#), ils ne sont pas répétés ici. La [Section 6.3.6](#) présente les prochaines étapes.

Tableau 8 Méthodes de transformation des données pour la base de référence et pour les données de changement climatique, pour l'intégration des données/résultats hydrologiques dans un modèle énergétique

	Directe	Réduction	Ajustement	Prolongement	Delta	Correction de biais
Base de référence hydrologique	●	●	●	●	●	
Simulation fondée sur la base de référence climatique	●			●	●	
Simulations hydrologiques (Section 5.5 ou 6.2)	●			●	●*	●
Ensembles de données globaux et approximations				●	●	
Résultats précalculés de données hydrologiques				●	●	

* À cette étape-ci, il faudrait utiliser la méthode delta s'il y a des incohérences entre le ou les modèles hydrologiques utilisés pour intégrer la base de référence climatique (simulation fondée sur la base de référence climatique) et les simulations hydrologiques.

6.3.1. Considérations particulières – Débits régularisés versus débits naturalisés

À cette étape-ci, il s'agit avant tout de considérer l'incohérence potentielle entre la base de référence hydrologique et les simulations hydrologiques (p. ex., simulation fondée sur la base de référence climatique, simulations hydrologiques, jeux de données globaux et approximations et, le plus souvent, résultats précalculés des données hydrologiques). La base hydrologique est biaisée par des erreurs et des hétérogénéités (voir l'encadré Facteurs hydrologiques de changement et limites de la base de référence hydrologique dans la [Section 4.2](#)) et est influencée par tous les réservoirs régularisés et les structures hydrauliques en amont. Autrement dit, elle tient compte de façon inhérente de toutes les décisions en matière de gestion de l'eau ou de régularisation dans les réservoirs et dans les structures hydrauliques en amont. Au contraire, les simulations sont souvent naturalisées, ce qui signifie qu'elles ne prennent pas en compte les décisions en matière de gestion de l'eau dans les réservoirs et structures hydrauliques. La [Figure 21](#) montre un exemple de l'impact des décisions en matière de gestion de l'eau sur une série temporelle de débits. L'ampleur de ce problème dépend, entre autres, de la capacité de stockage du réservoir en amont et du pas de temps utilisés pour l'évaluation. Par exemple, les réservoirs en amont dont la capacité de stockage est moyenne peuvent avoir un impact sur le moment d'occurrence mensuel des débits, mais pas sur le volume moyen. Voir les [Section 7.7](#) – Mise à l'échelle d'un modèle et [Section 7.8](#) – Avantages de la modélisation de l'hydrologie et de la gestion de l'eau.

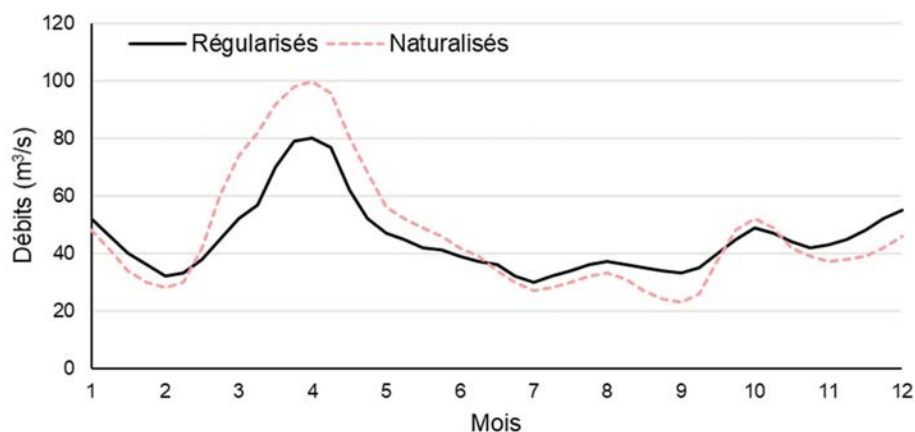


Figure 21 Exemple de l'impact des décisions en matière de gestion de l'eau sur une série temporelle

6.3.2. Considérations particulières pour la réduction et l'ajustement de la base de référence

En ce qui concerne la réduction de la base de référence hydrologique, les considérations mentionnées dans la [Section 6.2.2](#) – Considérations particulières pour la réduction et l'ajustement de la base de référence, s'appliquent ici aussi.

Comme c'est le cas pour la base de référence climatique, la présence d'une tendance statistiquement significative dans la base de référence hydrologique peut poser problème lors de l'utilisation ultérieure dans la chaîne de modélisation (p. ex., la projection d'une tendance de changement dans l'utilisation des terres dans le futur au moyen de la méthode delta). L'ajustement d'une base de référence hydrologique est plus délicat que celui d'une base de référence climatique, étant donné le nombre plus élevé de facteurs hydrologiques de changement.

- Si le facteur de correction est calculé à partir d'une simulation, l'intégration d'un seul facteur hydrologique de changement (p. ex., changement climatique) n'éliminera que ce seul facteur (c.-à-d., l'impact du changement dans l'utilisation des terres ne serait pas éliminé).

6.3.3. Considérations particulières pour le prolongement de la base de référence

L'utilisation de la base de référence hydrologique et de la méthode de prolongement est une option intéressante pour produire une projection hydrologique. Voir les recommandations, avantages et inconvénients dans la [Section 3.4](#) – Prolongement. Toutefois, le prolongement d'une base de référence hydrologique est plus complexe que celui d'une base de référence climatique étant donné le nombre plus élevé de facteurs hydrologiques de changement.

- Si le facteur de correction est calculé à partir de la base de référence, et ce, même si une étude de détection et d'attribution a été effectuée, il se pourrait que la base de référence prolongée extrapole une tendance causée simultanément par de multiples facteurs hydrologiques de changement (p. ex., changement climatique et changement dans l'utilisation des terres). Voir aussi la [Section 6.2.3](#) – Considérations particulières pour le prolongement de la base de référence pour les considérations concernant la limite de l'horizon temporel.
- Si le facteur de correction est calculé à partir de simulations intégrant un seul facteur hydrologique de changement (p. ex., changement climatique), la projection hydrologique résultante ne tiendra pas compte de l'impact futur potentiel d'autres facteurs de changement (p. ex., changements dans l'utilisation des terres).

Voir aussi la première considération mentionnée dans la [Section 6.2.4](#) – Considérations particulières pour la méthode delta.

6.3.4. Considérations particulières pour la méthode delta

En utilisant la méthode delta à cette étape-ci de la chaîne de modélisation, les deux premières considérations mentionnées dans la [Section 6.2.4](#) – Considérations particulières pour la méthode delta s'appliquent.

La première considération, soit la projection de cycles et de tendances climatiques passés dans le futur, est exacerbée pour la base de référence hydrologique en raison du nombre élevé de facteurs hydrologiques de changement. Les changements dans l'utilisation des terres, la régularisation des réservoirs et des structures hydrauliques en amont dans le temps sont aussi projetés dans le futur. Voir la [Section 7.5](#) – Transformation des données.

La question des simulations hydrologiques de débits régularisés par rapport aux débits naturalisés est délicate à cette étape-ci, car la régularisation peut avoir un effet sur les volumes mensuels et annuels. Voir la [Section 7.7](#) – Mise à l'échelle d'un modèle.

6.3.5. Considérations particulières pour la correction de biais

Contrairement à la correction de biais des simulations climatiques, celle des simulations hydrologiques est moins bien comprise et peu documentée dans la littérature. La correction de biais est utilisée pour la prévision hydrologique à court terme (ex., prévision d'ensemble des débits), mais rarement pour des simulations hydrologiques à long terme intégrant le changement climatique.

Pour la correction de biais des simulations hydrologiques, les considérations particulières mentionnées dans les rares articles scientifiques sont les suivantes : le besoin de traiter correctement les valeurs situées en dehors de la fourchette de la distribution historique; et le besoin de respecter le bilan de masse aux différents emplacements du bassin versant et selon les saisons (Snover *et al.*, 2003). Le besoin de conserver la tendance de la simulation hydrologique, comme c'est le cas pour les simulations climatiques, s'applique ici aussi (voir la [Section 6.2.5](#) – Considérations particulières pour la correction de biais).

Le praticien pourrait se retrouver dans la délicate position de devoir se résoudre à utiliser la correction de biais pour les simulations hydrologiques, malgré le manque de littérature. Par exemple, ce pourrait être le cas si le biais de la simulation hydrologique est un peu trop élevé pour la méthode directe, mais que la méthode delta entraînerait une perte d'information importante (p. ex., changements dans les séquences). Le cas échéant, les méthodes décrites dans la [Section 3.6](#) – Correction de biais sont applicables, mais le praticien devrait porter une attention particulière aux considérations mentionnées dans le paragraphe précédent.

6.3.6. Prochaines étapes

- a) Évaluer l'adéquation des simulations hydrologiques (voir l'[Annexe G](#) – Validation de simulations hydrologiques).
- b) Appliquer la transformation des données, si nécessaire.
- c) Évaluer l'adéquation des scénarios hydrologiques, sauf pour les simulations hydrologiques et les résultats précalculés à partir de la base de référence hydrologique. Voir l'[Annexe G](#) – Validation de simulations hydrologiques.
- d) Lancer les simulations énergétiques avec les scénarios hydrologiques.
- e) Aller à la [Section 6.4](#) – De l'énergie à la valeur.

6.4. De l'énergie à la valeur

À cette étape-ci, le praticien devrait avoir en main une simulation énergétique fondée sur la base de référence, ainsi que des simulations énergétiques intégrant le changement climatique.

La méthode directe est habituellement la plus utile à cette étape de la chaîne de modélisation. Même si d'autres méthodes de transformation des données mentionnées à la [Section 3](#) sont numériquement applicables, il n'est généralement plus recommandé de les appliquer, car elles contourneraient la réalité physique et les contraintes du bassin versant, dont la capacité de stockage et la puissance des turbines. Cela modifierait à l'insu du praticien le moment d'occurrence et la quantité d'énergie produite, ce qui aurait pour effet de directement affecter l'évaluation de la valeur de l'actif.

Néanmoins, les simulations énergétiques intégrant le changement climatique peuvent être biaisées, par rapport aux simulations énergétiques fondées sur la base de référence. Comme il en est question dans la [Section 7](#), cela peut poser problème puisque les entreprises cherchent souvent à comparer les simulations intégrant le changement climatique aux simulations fondées sur la base de référence.

Ainsi, la prochaine section présente les considérations générales pour le praticien qui doit encore appliquer des méthodes de transformation des données à cette étape-ci de la chaîne.

6.4.1. Considérations générales

Le praticien devrait garder à l'esprit que les valeurs énergétiques historiques fournissent des données sur les interruptions, la maintenance et la régularisation des barrages. Certains modèles énergétiques représentent les interruptions et la maintenance au moyen d'un facteur d'interruption, et la régularisation du barrage au moyen de règles de régularisation automatisées.

Le praticien qui prévoit d'utiliser la méthode de prolongement ou de delta avec les valeurs énergétiques historiques projettera donc les interruptions, la maintenance et la régularisation dans le futur.

6.4.2. Prochaines étapes

- a) Évaluer l'adéquation des simulations énergétiques.
- b) Appliquer la transformation des données, si nécessaire.
- c) Évaluer l'adéquation des scénarios énergétiques.
- d) Lancer les simulations de valeur avec les scénarios énergétiques.

6.5. Exemples

6.5.1. Application de la méthode delta à une base de référence hydrologique

La **Figure 22** fournit un exemple de la méthode delta appliquée sur une base de référence hydrologique dans la chaîne de modélisation. Le delta de cet exemple peut provenir de plusieurs sources, et la base de référence climatique n'est utilisée qu'à l'étape de la calibration du modèle hydrologique.

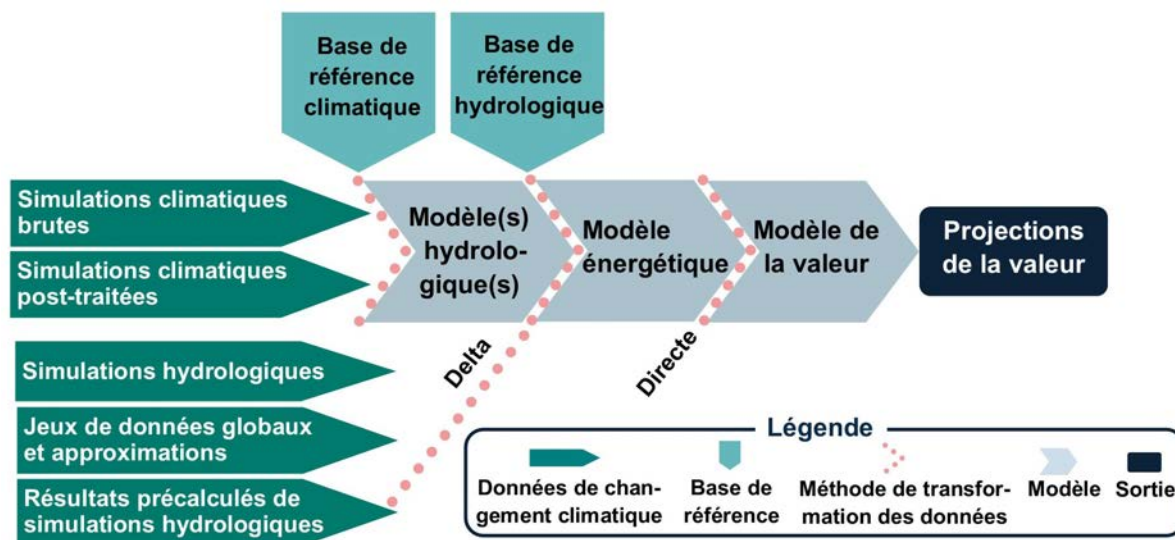


Figure 22 Exemple de la chaîne de modélisation avec application de la méthode delta sur la base de référence hydrologique. Le delta peut se calculer au moyen de divers types de données de changement climatique. La méthode directe est utilisée dans le reste de la chaîne de modélisation. Dans cet exemple, la base de référence climatique n'est utilisée qu'à l'étape de la calibration du modèle hydrologique.

Le graphique A de la **Figure 23** montre la base de référence hydrologique (en noir) et les scénarios hydrologiques (en gris) obtenus au moyen de la méthode delta pour 10 simulations hydrologiques (RCP 4.5). Les deltas de chaque simulation hydrologique sont calculés entre le futur (2016–2070) et les périodes de référence (1961–2015) à l'échelle annuelle et sont appliqués à la base de référence hydrologique pour produire 10 scénarios hydrologiques. Dans cet exemple, il est possible de calculer le delta pour des périodes de 55 ans, puisqu'ils proviennent des simulations hydrologiques en continu présentées dans la **Figure 24**. Ce type d'information n'est pas toujours disponible. Par exemple, si le praticien utilise l'information présentée dans le **Tableau 6** (Section 5.7 – Résultats précalculés de simulations hydrologiques), il n'aura des données que pour les seules périodes de 30 ans indiquées : 1961–1990, 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099. Aussi, il faut savoir que l'utilisation d'une seule trajectoire de concentration représentative (RPC) n'est pas une pratique judicieuse, comme mentionné dans l'**Annexe I** – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble. On l'utilise dans cet exemple par souci de clarté et pour limiter le nombre de figures dans le Guide.

Le graphique B de la **Figure 23** montre les simulations énergétiques fondées sur la base de référence hydrologique et sur les scénarios hydrologiques (simulations fondées sur le changement climatique), et le graphique C montre les revenus. La méthode directe est utilisée entre les étapes de l'énergie et de la valeur.

La **Figure 25** montre la comparaison entre la méthode traditionnelle et la méthode intégrant le changement climatique pour les revenus et la **Figure 26** pour la VAN. Cette comparaison est possible puisque la méthode delta est utilisée à l'étape de l'hydrologie et que la méthode directe est appliquée par la suite (voir la **Section 7.6 – Cohérence des comparaisons**). Les mêmes hypothèses ont été formulées pour la simulation fondée sur la base de référence et pour la simulation fondée sur la méthode traditionnelle (prix de l'électricité, coût des opérations, etc.).

En comparaison de la méthode traditionnelle, les simulations intégrant le changement climatique donnent un résultat favorable pour les revenus (**Figure 25**) et pour la VAN (**Figure 26**). L'incertitude constatée dans les deux graphiques, comme le montre la dispersion des simulations intégrant le changement climatique, est attribuable à la variabilité naturelle (implicitement représentée au moyen de conditions initiales différentes pour chaque modèle climatique) et aux différentes réponses des modèles climatiques lorsque le même scénario d'émissions est utilisé.

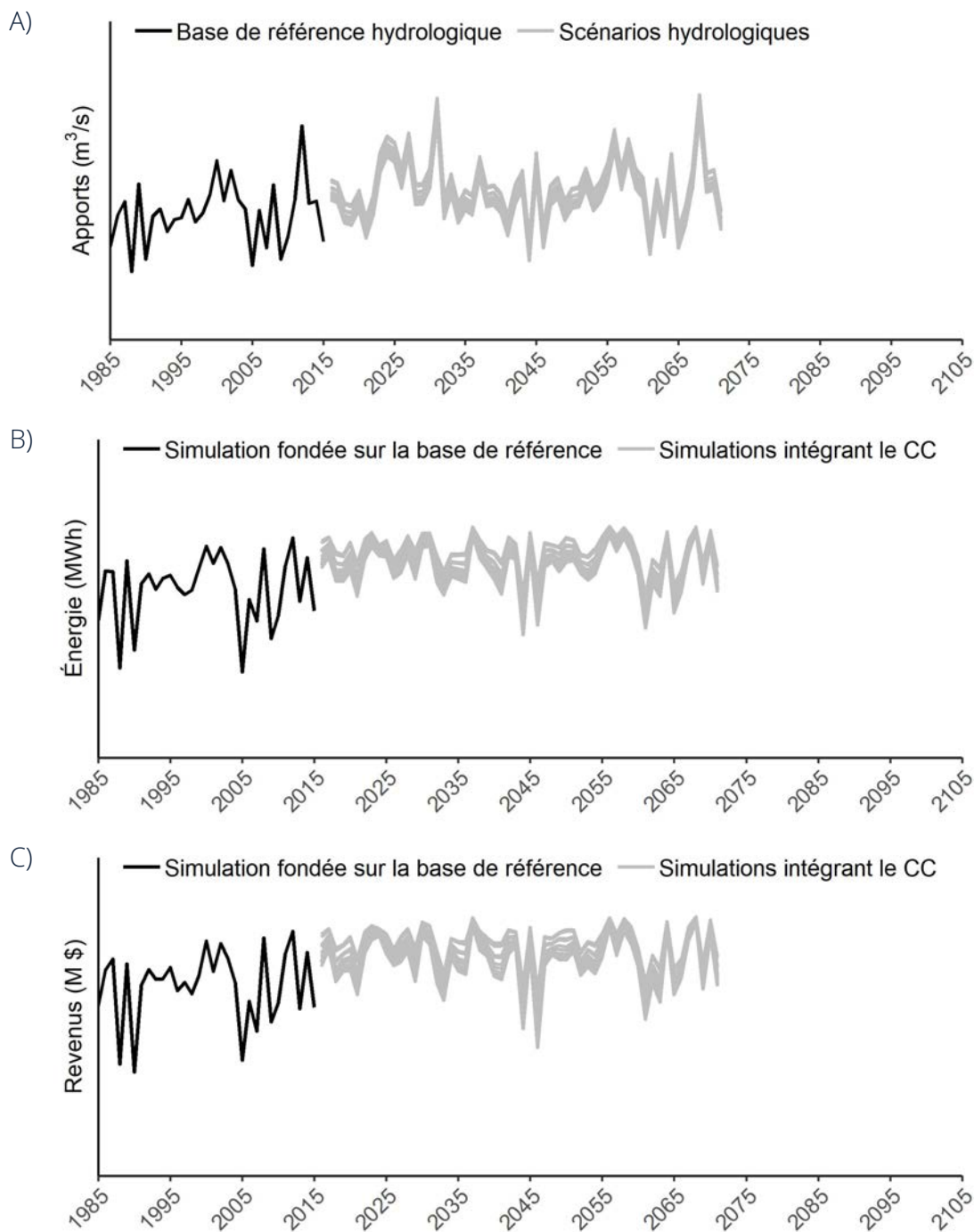


Figure 23 Exemple de résultats obtenus avec application de la méthode delta sur la base de référence hydrologique. A) Apports, B) Énergie et C) Revenus. La méthode delta a été appliquée à la base de référence hydrologique (en noir). Le delta a été calculé à partir de 10 simulations hydrologiques pour produire des scénarios hydrologiques (10 courbes en gris). La méthode directe est utilisée pour les étapes suivantes de la chaîne de modélisation pour produire des simulations fondées sur la base de référence (en noir) et des simulations intégrant le changement climatique.

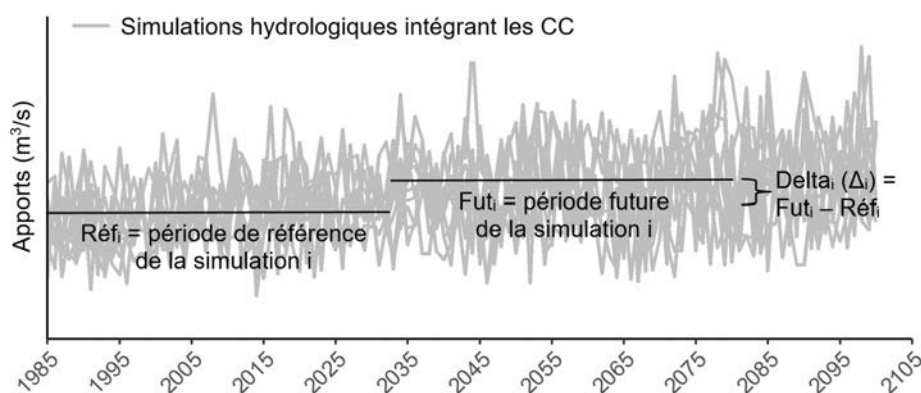


Figure 24 Exemple de simulations hydrologiques en continu (en gris) à partir desquelles un delta peut être calculé. Les simulations hydrologiques ont été produites avec un modèle hydrologique et des simulations climatiques de 10 modèles climatiques pour un RCP. Le delta a été calculé entre la période future et la période de référence de la simulation hydrologique (pour produire 10 deltas).

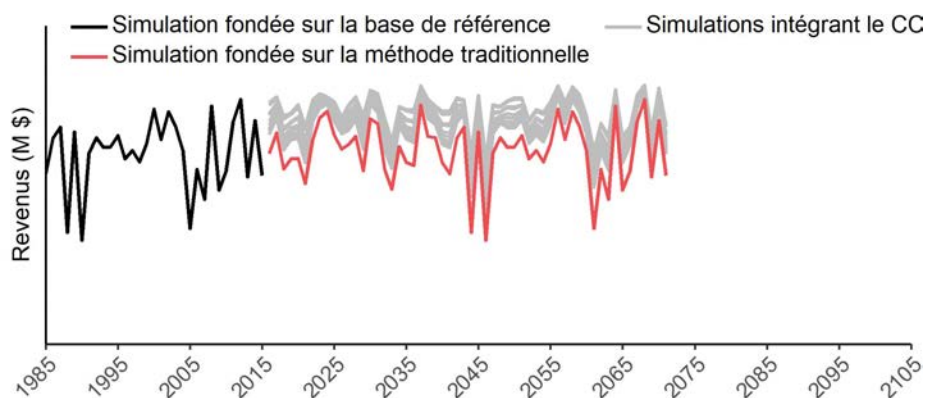


Figure 25 Comparaison des revenus simulés fondés sur la base de référence (en noir), sur la méthode traditionnelle (en rose) et sur les simulations intégrant le changement climatique avec application de la méthode de delta sur la base de référence hydrologique (en gris).

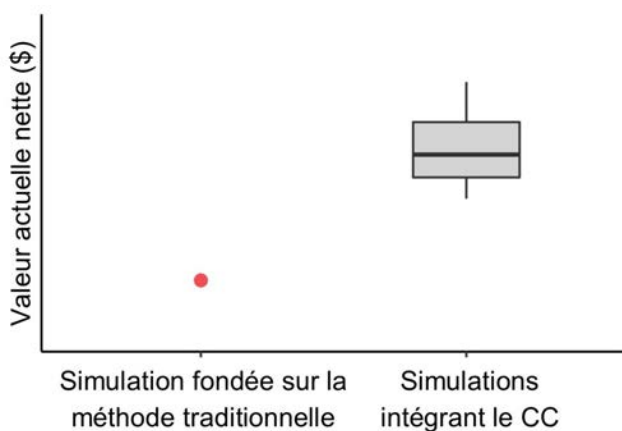


Figure 26 Comparaison de la VAN fondée sur une simulation utilisant la méthode traditionnelle et sur les simulations intégrant le changement climatique.

6.5.2. Correction de biais de simulations climatiques et méthode directe avec la base de référence hydrologique et la base de référence climatique

L'exemple présenté dans la **Figure 27** montre trois types d'intrants, soit les bases de référence climatique et hydrologique ainsi que les simulations climatiques brutes. Le modèle hydrologique est d'abord calibré avec les bases de référence climatique et hydrologique. Les simulations climatiques brutes sont ensuite mises à l'échelle et débiaisées au moyen de la base de référence climatique. Les bases de référence climatique et hydrologique, ainsi que les simulations climatiques post-traitées, alimentent la suite de la chaîne de modélisation afin de produire les résultats présentés dans la **Figure 28**.

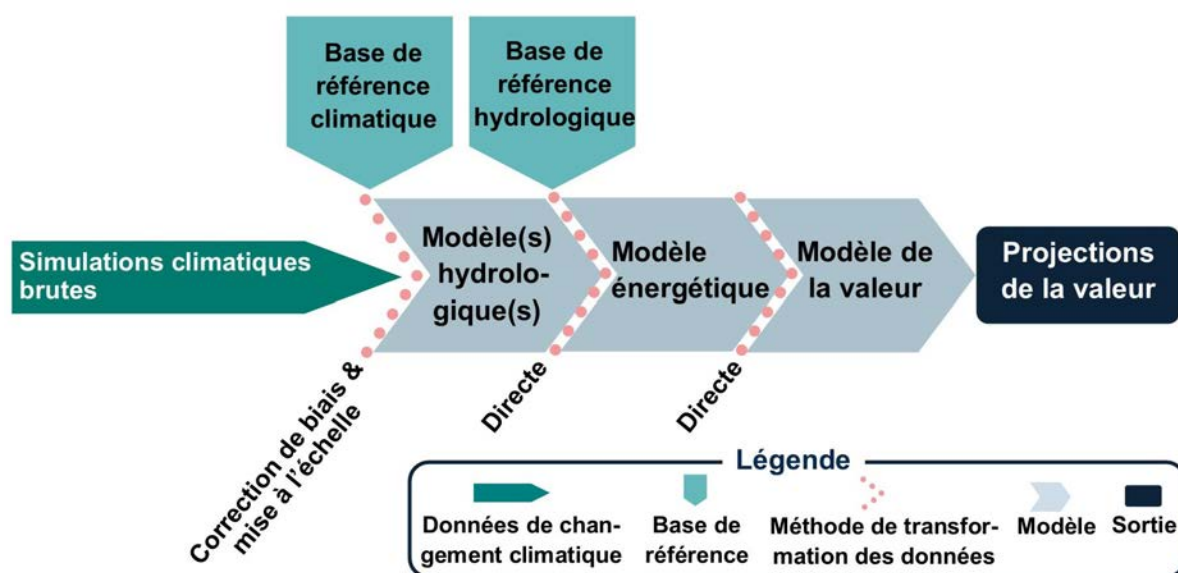


Figure 27 Exemple de la chaîne de modélisation utilisant comme intrants les bases de référence climatique et hydrologique ainsi que les simulations climatiques brutes. La correction de biais et la mise à l'échelle sont appliquées aux simulations climatiques brutes avant leur intégration dans la chaîne de modélisation.

Le graphique A de la **Figure 28** montre la base de référence climatique (en vert), la base de référence hydrologique (en noir) et les simulations hydrologiques alimentées par 10 simulations de MCG pour le RCP4.5, mises à l'échelle et débiaisées (en gris). Les graphiques B et C montrent l'énergie et les revenus, avec application de la méthode directe. L'utilisation d'un seul RCP n'est pas une pratique judicieuse, comme il est mentionné dans l'**Annexe I** – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble. Cela est utilisé par souci de clarté et pour limiter le nombre de figures dans le Guide. La **Figure 29** compare les apports annuels moyens, l'énergie et les revenus pour la période de référence (1984–2015) et pour la période future (2016–2045) pour les simulations fondées sur la base de référence hydrologique, les simulations fondées sur la base de référence climatique et les simulations intégrant le changement climatique.

La **Figure 28** et la **Figure 29** illustrent quelques-uns des défis posés par la chaîne de modélisation auxquels le praticien doit faire face. D'abord, la simulation fondée sur la base de référence climatique (hydrologie reconstituée) semble biaisée en comparaison à la base de référence hydrologique. Ce biais peut avoir plusieurs causes, dont la calibration du modèle hydrologique ou la période temporelle utilisée pour la calibration. Un défi semblable se pose entre la simulation fondée sur la base de référence climatique et les simulations intégrant le changement climatique, pendant la période de référence (1984–2015). Ce biais peut aussi avoir plusieurs causes, dont le post-traitement des données climatiques ou la période temporelle utilisée pour le post-traitement. Les biais sont transmis au reste de la chaîne, car la méthode directe est utilisée, et les valeurs d'énergie et de revenus produites par les simulations intégrant le changement climatique sont donc inférieures à celles des bases de référence. Compte tenu de ces biais, le praticien ne peut pas comparer directement les simulations fondées sur les bases de référence hydrologique et climatique avec les simulations de la période future intégrant le changement climatique, car cela brouillerait le signal de changement climatique. Le praticien pourrait comparer les périodes futures et les périodes de référence des simulations intégrant le changement climatique ou appliquer une autre méthode de transformation des données (delta ou correction du biais).

En effet, même si les valeurs absolues sont inférieures en raison des biais, il faudrait conclure de cet exemple que si l'on compare la période de référence (1984–2015) et la période future (2016–2045), le changement climatique augmente les apports, l'énergie et les revenus (**Figure 29**). L'incertitude suggérée par la dispersion des boîtes à moustaches des simulations est causée par la variabilité naturelle (implicitement représentée au moyen de différentes conditions initiales pour chaque modèle climatique) et les réponses des modèles climatiques pour un même scénario d'émissions.

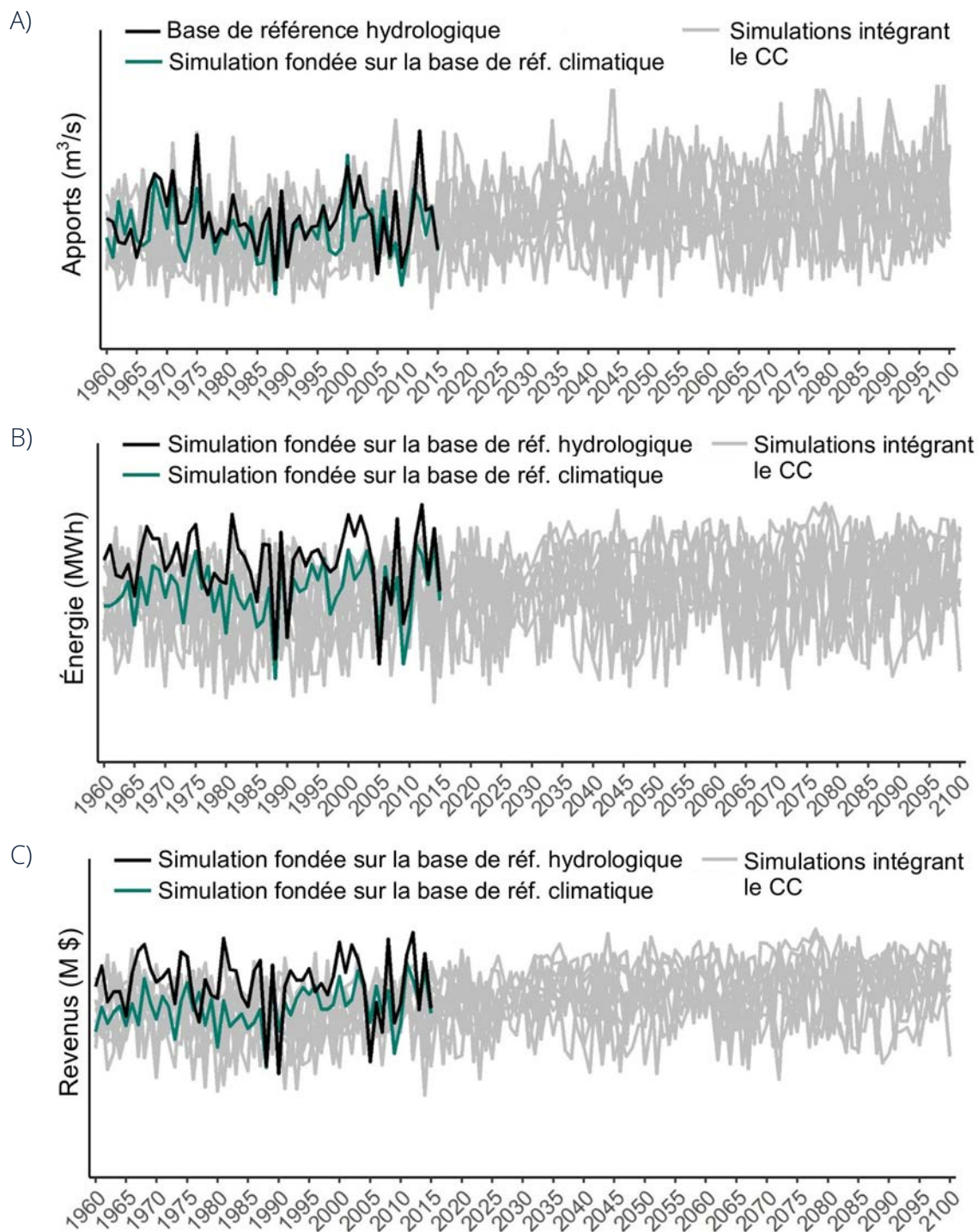


Figure 28 Exemple de résultats obtenus par les simulations climatiques débiaisées, avec application de la méthode directe sur les bases de référence hydrologique et climatique. A) Apports, B) Énergie et C) Revenus. La base de référence climatique (en vert), la base de référence hydrologique (en noir) et les simulations climatiques post-traitées (en gris) alimentent la chaîne de modélisation. La méthode directe est utilisée entre les étapes de l'hydrologie, de l'énergie et de la valeur. Les résultats sont présentés pour un RCP et 10 modèles climatiques (10 simulations).

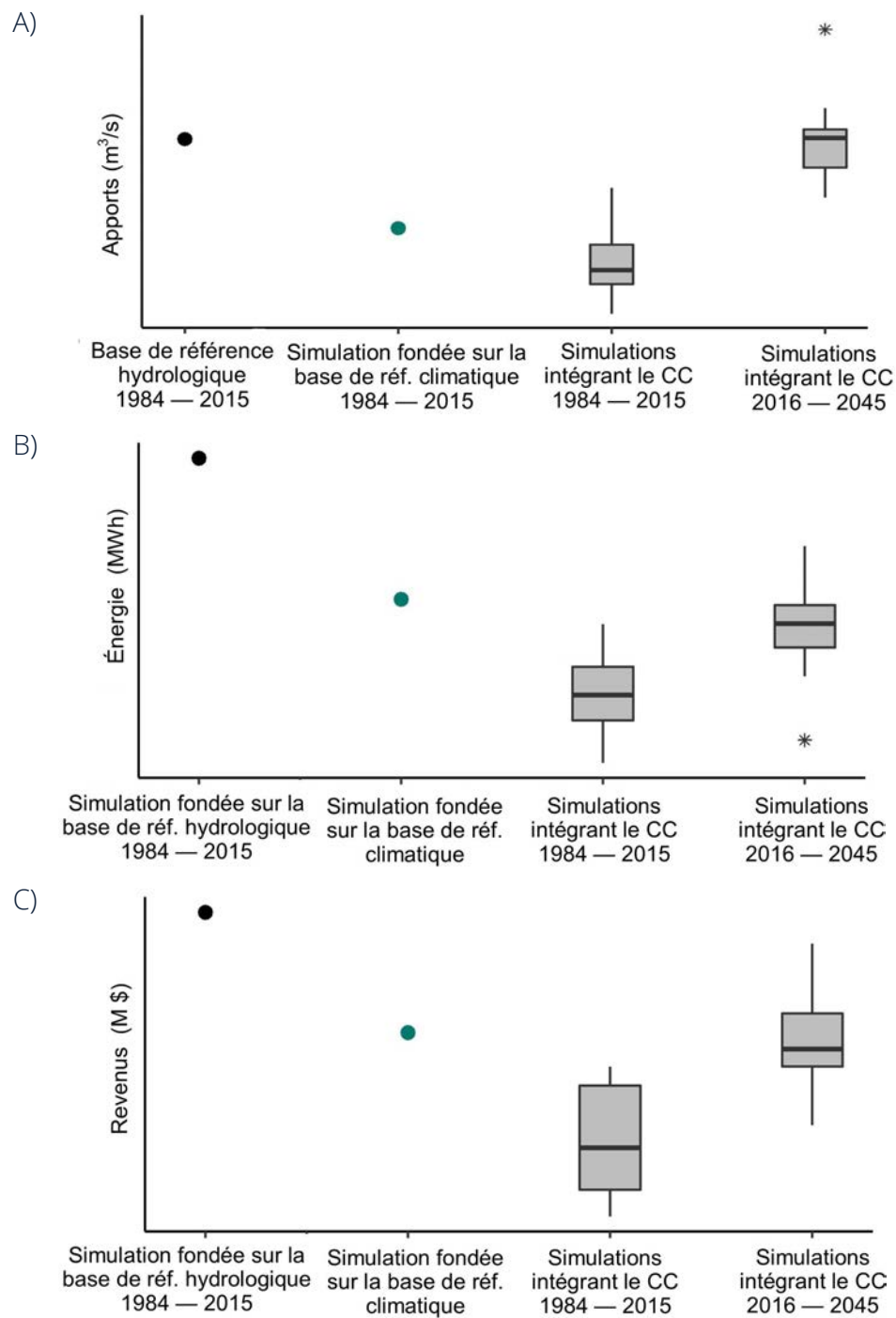


Figure 29 Comparaison de la moyenne pour les apports (A), l'énergie (B) et les revenus (C) des simulations fondées sur les bases de référence hydrologique (en noir) et climatique (en vert), et les simulations intégrant le changement climatique (période de référence 1984–2015 et période future 2016–2045). Les valeurs en dehors de la fourchette sont indiquées par un astérisque.

**Questions transversales
et lignes directrices
pour la chaîne
de modélisation**

Cette section se penche sur les questions transversales s'appliquant à plusieurs étapes de l'intégration des données de changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques. Elle examine la cohérence de l'information utilisée tout au long de l'évaluation, les concepts utiles à la planification préalable et la sélection judicieuse des options présentées dans les [Sections 3 à 6](#). La planification préalable n'élimine pas tous les problèmes techniques ni les surprises, mais permet d'éviter certains pièges et incohérences.

La [Section 7](#) fournit également des lignes directrices sur la façon d'intégrer tous les éléments des chaînes de modélisation illustrées dans la [Figure 20](#) de la [Section 6.1](#). Cependant, de nombreuses considérations en matière d'intégration et de cohérence dépendent des besoins et de l'expertise du praticien, et ce, d'autant plus qu'aucune norme encadrant l'intégration du changement climatique n'a été proposée à ce jour, que ce soit dans la littérature, dans la réglementation ou dans la pratique.

La [Section 7.1](#) expose les considérations organisationnelles pour l'intégration du changement climatique; les [Sections 7.2](#) et [7.3](#) portent sur les considérations ayant trait lorsqu'il faut moyenner, sélectionner et présenter des résultats. La [Section 7.4](#) examine les données de la chaîne de modélisation et décrit comment s'assurer de la cohérence de l'évaluation. La [Section 7.5](#) concerne la transformation des données et la [Section 7.6](#) souligne l'importance d'effectuer des comparaisons cohérentes entre les bases de référence historiques et les projections du futur. Les dernières sections abordent des considérations propres à l'échelle spatiale et temporelle du modèle ([Section 7.7](#)) et les avantages de la modélisation hydrologique et de la modélisation de la gestion de l'eau ([Section 7.8](#)).

7.1. Gestion du changement dans les pratiques organisationnelles

Le praticien qui utilise les données climatiques pour la première fois doit s'attendre à affronter des obstacles au sein de son entreprise, et une bonne planification est donc essentielle.

Comme il l'est mentionné dans la [Section 2](#) – Méthodes d'évaluation de la valeur fondées sur les bénéfices et incertitudes, la pratique traditionnelle au sein de l'industrie est d'utiliser la base de référence hydrologique (observations) qui, croit-on fermement, est à même de représenter adéquatement les conditions futures, malgré ses lacunes (voir la [Section 4.2](#) – Base de référence hydrologique). Or, commencer à penser en termes de base de référence climatique est une démarche importante pour les entreprises. Il faut reconnaître que les deux types de bases de référence ont leurs mérites et leurs faiblesses propres, qui devraient être prises en compte dans le processus d'évaluation de la valeur.

Enfin, comme l'industrie ne possède pas de bonnes pratiques généralement acceptées, le praticien devrait dès le départ acquérir une bonne compréhension des options décrites dans les [Sections 3 à 6](#) et les communiquer sans tarder, puis consulter des experts au besoin.

7.2. Considérations pour la sélection et le moyennage de simulations

La chaîne de modélisation oblige le praticien à composer avec plusieurs défis et contraintes (temps de calcul, ressources humaines, complexité, taille du jeu de données, etc.). Comme il n'est pas toujours possible d'utiliser ou d'analyser toutes les données; il faut faire des compromis entre analyser toutes les données possibles, faire des choix éclairés et/ou utiliser des moyennes. Le changement climatique vient davantage compliquer le problème, puisqu'il faut travailler avec de volumineux jeux de données et un climat non-stationnaire.

Il se peut qu'une certaine forme de sélection de données soit nécessaire avant d'entrer celles-ci dans la chaîne de modélisation. Il n'y a aucune méthode universelle à cet égard, mais voici quelques lignes directrices pour diverses étapes de l'évaluation.

- Les simulations ne devraient être moyennées qu'à la toute dernière étape de la chaîne de modélisation, et uniquement aux fins de présentation. Cette recommandation s'applique également pour le moyennage de simulations d'un même scénario d'émissions (p. ex., plusieurs MCG) ou d'un même MCG (p. ex, plusieurs membres/réalisations d'un même MCG). Le moyennage de simulations aplatit des caractéristiques utiles de la série temporelle et implique une perte importante d'information.
- Si la complexité et la taille du jeu de données posent un réel problème, il est préférable de faire une sélection éclairée de quelques simulations représentatives, plutôt que moyenner des simulations avant leur intégration dans la chaîne de modélisation.
- Il est important de toujours considérer la variabilité des résultats, que ce soit pour la sélection des simulations ou l'évaluation elle-même, par exemple en analysant les 5^e, 50^e et 95^e percentiles. Il est généralement conseillé d'exclure les scénarios les plus extrêmes, sauf si c'est nécessaire pour l'évaluation.

7.3. Considérations pour la présentation des résultats

Pour communiquer les résultats de son étude, le praticien devra probablement présenter des descriptions ou des graphiques simples capables d'illustrer l'éventail complet des résultats obtenus.

- Le praticien peut :
 - ♦ présenter tous les résultats de l'approche par ensemble et expliquer l'éventail de résultats (plusieurs scénarios d'émissions, MCG, réalisations, etc.);
 - ♦ présenter les résultats par scénario d'émissions, par MCG, etc.

- Les modèles peuvent être moyennés aux fins de la présentation. Cependant, il est important de présenter la variabilité des résultats (p. ex., les 5^e, 50^e et 95^e percentiles de l'ensemble). Le rapport 2007 du GIEC offre un bon exemple du vocabulaire adapté à la présentation des résultats d'études sur le changement climatique (IPCC, 2007).
- Le praticien peut aussi présenter les percentiles d'indices particuliers (p. ex., le changement dans les débits annuels).
- Il doit aussi déterminer s'il utilise des nombres absolus (p. ex., la production augmentera de 1 GWh/année) ou relatifs (p. ex., la production augmentera de 5 %).
- Dans la comparaison des deux périodes (période de référence et périodes futures dans des boîtes à moustaches), il est important :
 - ♦ d'utiliser la même période (p. ex, 30 ans);
 - ♦ d'utiliser une période d'au moins 30 ans pour atténuer l'impact des fluctuations attribuables à la variabilité naturelle.
- La présentation de simulations individuelles peut dégager de l'information intéressante.

7.4. Cohérence des données climatiques et des périodes temporelles

Pour éviter d'introduire des incohérences et des biais dans l'évaluation de la valeur, il est essentiel que les données climatiques demeurent cohérentes tout au long de la chaîne de modélisation. Comme il l'est mentionné dans la [Section 6.2.1](#) – Considération particulière pour la cohérence du jeu de données, il ne faut pas interchanger les données de précipitation et de température de différents produits ou de différentes simulations, car ces données font partie d'un système physique cohérent. Pour cette raison, chaque produit ou simulation doit être traité de façon indépendante.

La cohérence de la base de référence climatique est également importante. Celle-ci est utilisée dans plusieurs étapes de l'évaluation de la valeur, soient : la calibration et la validation du modèle hydrologique, le post-traitement des données climatiques et la réalisation de simulations (hydrologie reconstituée). Aux fins de discussion, le Guide met l'accent sur la précipitation, car il s'agit d'un important facteur hydrologique de changement et, par conséquent, de la production hydroélectrique. Comme il l'est indiqué dans l'encadré Variation dans les données de précipitation, chaque produit de précipitation possède des caractéristiques propres à son développement. Les mêmes concepts s'appliquent à la température.

VARIATION DANS LES DONNÉES DE PRÉCIPITATION

En règle générale, les produits de précipitation ont des caractéristiques propres à leur développement. La **Figure 30** montre les données de précipitations accumulées en un emplacement unique pour la période 2007–2012, provenant de plusieurs produits. La ligne brune montre les observations d'une station météorologique avoisinante. La ligne verte correspond aux Données canadiennes quotidiennes sur grille de Ressources naturelles Canada (*NRCan Canada daily* - Hutchinson *et al.*, 2009), soit un jeu de données sur grille qui interpole spatialement les données de stations météorologiques et prend en compte le sous-captage. La courbe noire correspond au produit *Canadian Precipitation Analysis* (CaPA - Mahfouf, Brasnett et Gagnon, 2007), qui utilise un algorithme d'interpolation optimale pour fusionner les observations météorologiques et le radar sur un produit de prévisions météorologiques à court terme. Bien que les trois courbes proviennent des mêmes observations de précipitation, les différences dans les méthodologies et dans les algorithmes utilisés donnent lieu à des données nominalement différentes, ce qui peut influencer la simulation du modèle. Par exemple, le produit CaPA montre clairement une précipitation hivernale plus élevée qui, à cet emplacement particulier, indique une accumulation de neige plus élevée. Ces produits représentent également de façon différente les événements de précipitations intenses, dont les tempêtes convectives (non montrées). Une tempête peut manquer ou frapper directement une station météorologique, ce qui causera des différences marquées par rapport aux produits sur grille. Un phénomène semblable peut se produire avec l'interpolation ANUSLIN utilisée entre les stations météorologiques par Hutchinson *et al.*, (2009), tandis que le produit CaPA pourrait quant à lui détecter une tempête non-observée à l'aide de son modèle numérique de prévisions météorologiques. Ces incohérences peuvent s'aggraver si la densité du réseau de stations météorologiques est faible.

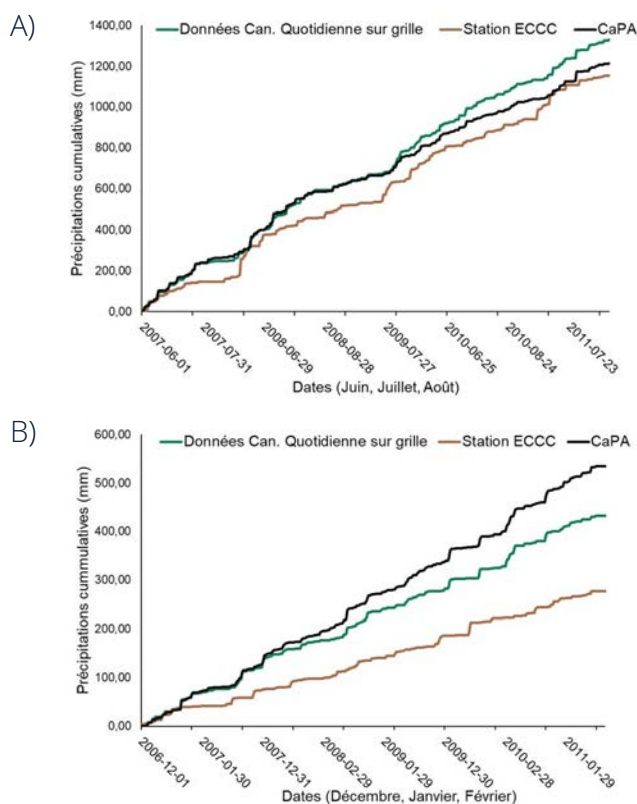


Figure 30 Précipitations accumulées selon trois produits climatiques en été (A) et en hiver (B).

Il pourrait y avoir des biais systématiques, particulièrement dans les simulations hydrologiques, si la cohérence de la base de référence climatique n'est pas conservée tout au long de la chaîne de modélisation. Le modèle hydrologique aurait pu être calibré au moyen de n'importe quel des trois produits de la [Figure 30](#). Avec une seule base de référence hydrologique, les paramètres du modèle seraient ajustés pendant le processus de calibration pour prendre en compte les particularités de chaque jeu de données de précipitation, et simuleraient la même série temporelle hydrologique. La simulation hydrologique varierait considérablement si les différences dans les paramètres étaient suffisamment importantes et que le praticien décidait d'interchanger les produits de précipitation. Pour cette raison et dans la mesure du possible, le même produit de précipitation devrait être utilisé tout au long de la chaîne (calibration du modèle, post-traitement des simulations climatiques et reconstitution de l'hydrologie). Par exemple, si on utilise les Données canadiennes quotidiennes sur grille de Ressources naturelles Canada (Hutchinson *et al.*, 2009) pour le post-traitement des simulations climatiques, il faut aussi l'utiliser pour la calibration du modèle et la reconstitution de l'hydrologie. Sinon, il pourrait y avoir une incohérence entre l'hydrologie reconstituée et les simulations hydrologiques intégrant le changement climatique (fondées sur les scénarios climatiques) lorsque ces simulations sont comparées pour la même période (voir la [Section 7.6](#) – Cohérence des comparaisons).

La sélection d'une période représentative (p. ex., période sèche, humide ou tempérée) peut aussi avoir un impact sur les caractéristiques du modèle en influençant les paramètres choisis pendant le processus de calibration (Klemeš, 1986; Merz *et al.*, 2011). Par exemple, si le modèle est calibré à l'aide d'une période courte, chaude et sèche, et que les simulations climatiques sont post-traitées avec une période courte, froide et humide, il y aura une incohérence dans la chaîne de modélisation : les simulations hydrologiques intégrant le changement climatique (fondées sur des scénarios climatiques) afficheront peut-être un biais humide. Étant donné la sensibilité potentielle des résultats du modèle à la précipitation, il vaut mieux sélectionner une période suffisamment longue pour couvrir la plus grande partie de la variabilité naturelle et pour demeurer cohérent tout au long de la chaîne de modélisation (scénarios climatiques, calibration du modèle hydrologique, reconstitution de l'hydrologie).

À défaut de pouvoir assurer la cohérence à travers la période temporelle ou la base de référence climatique, la méthode delta sera probablement mieux adaptée à l'évaluation de la valeur. Ou encore, il est possible de tester la sensibilité de la production énergétique à plusieurs bases de référence climatiques pour voir si les résultats sont cohérents.

7.5. Transformation des données

Comme mentionné dans la [Section 2](#), le résultat des trois modèles – climatique, hydrologique et énergétique – devrait idéalement produire une simulation précise de la physique du monde réel. Dans la pratique, le modèle est plutôt une abstraction de la réalité, ou une réalité plausible, où une certaine forme de transformation ou de manipulation des données est nécessaire pour refléter plus précisément des résultats réalistes.

La [Section 7.5.1](#) fournit des lignes directrices sur l'application des méthodes de transformation des données dans la chaîne de modélisation; la [Section 7.5.2](#) traite de la présence de tendances dans la base de référence du jeu de données; et la [Section 7.5.3](#) examine le danger potentiel de surapprentissage des fonctions statistiques utilisées dans la transformation des données.

7.5.1. Quelle méthode appliquer et à quelle étape ?

À chaque étape de la chaîne de modélisation, le praticien doit déterminer la méthode de transformation des données qu'il utilisera (directe, prolongement, delta, correction de biais) avant d'intégrer celles-ci dans la prochaine étape de la chaîne de modélisation. L'adéquation de la simulation avant la transformation des données, comparativement à la base de référence, peut lui fournir des indices quant au choix de la méthode.

La méthode directe convient surtout aux simulations qui ont des biais mineurs dans chaque indice à l'étude, selon les critères mentionnés à l'[Annexe G.3.2](#) – Validation de simulations hydrologiques. Cela représente un scénario quasiment idéal pour le praticien. La méthode delta est conseillée si la performance de la simulation est acceptable selon les critères de l'[Annexe G](#) – Validation de simulations hydrologiques, mais qu'il reste des biais (entre les simulations et la base de référence) qui ne peuvent être raisonnablement modélisés ou corrigés. Par exemple, il peut s'agir de tendances inexplicables dans la base de référence ou d'une influence hydrologique qui ne peut être raisonnablement prolongée dans les périodes futures. La correction de biais est recommandée si les incohérences dans la simulation des données, comparativement à la base de référence, peuvent être bien décrites statistiquement et que la correction peut être appliquée efficacement à la période future (voir les considérations particulières pour la correction de biais dans les [Sections 6.2.5](#) et [6.3.5](#)). En considérant ces options, le praticien doit garder à l'esprit qu'il existe plusieurs méthodes de correction de biais et de delta, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients, et qu'elles sont bien documentées dans la littérature scientifique (Chen *et al.*, 2013a; Maraun et Widmann, 2018). Voir l'[Annexe E](#) – Validation de produits climatiques pour évaluer les forces et les faiblesses des simulations climatiques.

Le praticien doit aussi tenir compte du ou des types de transformation à appliquer. Par exemple, est-il judicieux d'appliquer une simple transformation pour une différence dans la

moyenne, ou faudrait-il appliquer la méthode sur plusieurs quantiles (voir la [Section 3.5](#) – Méthode delta et la [Section 3.6](#) – Correction de biais)? Si les données le justifient, il pourrait être pragmatique d'appliquer la transformation sur une base saisonnière ou mensuelle. Pour les besoins de l'évaluation de la valeur d'un actif pour une centrale au fil de l'eau, il n'est peut-être pas nécessaire de représenter adéquatement les pointes de débit, puisque celles-ci dépasseront la puissance de la turbine. Cela serait assurément plus important pour une étude sur la sécurité d'un barrage, à moins que cela entraîne des coûts de construction trop élevés. Voir l'[Annexe H](#) – Analyse de sensibilité pour évaluer la sensibilité des résultats finaux. Ces considérations doivent être soigneusement évaluées à la lumière des besoins de l'entreprise quant à la portée du projet et à la disponibilité des ressources.

Le praticien doit également déterminer à quelle(s) étape(s) de la chaîne de modélisation appliquer la méthode de transformation des données retenue. En règle générale, il est préférable de l'appliquer le plus tôt possible dans la chaîne de modélisation et le plus près possible de la source, et ce, afin de conserver le bilan massique et hydrique. Si la base de référence climatique est utilisée, la méthode de transformation doit être appliquée aux données de précipitation et de température avant d'intégrer celles-ci dans le modèle hydrologique. Pour conserver le bilan hydrique, la précipitation qui entre dans le modèle doit être égale au changement dans le stockage et dans les sorties du modèle. Une manipulation subséquente des débits (p. ex., l'application d'une correction *a posteriori*) pourrait compromettre le bilan hydrique en ajoutant ou retirant artificiellement de l'eau du système. Cela aura un impact inhérent sur les simulations énergétiques. Le bilan hydrique doit être respecté spatialement au sein du bassin versant, ainsi que dans le temps et les saisons (Snover, Hamlet et Lettenmaier, 2003). Par exemple, si la simulation hydrologique semble biaisée par rapport à la base de référence, il serait peut-être préférable d'appliquer la méthode delta ou de correction de biais. Toute lacune connue doit être corrigée, par exemple en incluant un modèle de gestion de l'eau pour prendre en compte un changement dans les régimes de régularisation.

7.5.2. Tendances

La présence d'une tendance dans la base de référence peut causer des problèmes au moment de la transformation des données. Comme mentionné précédemment, il est fortement conseillé de déterminer la cause de la tendance et la corriger (voir l'[Annexe B](#) – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique) avant de passer à l'étape suivante. Sinon, les simulations pourront produire des résultats peu plausibles.

Dans le cas de tendances dans les données historiques qui ont une origine non climatique connue, il est préférable de les conserver ou de les inclure dans un modèle aux fins de la

cohérence, bien qu'il n'y ait aucun consensus à cet égard. S'il y a eu de nombreux changements dans le bassin versant au cours des années, par exemple dans l'utilisation des terres, il est conseillé de choisir un modèle hydrologique capable d'intégrer ces changements et répliquer les tendances associées (voir l'[Annexe F](#) – Sélection et calibration d'un modèle hydrologique).

La présence d'une tendance dans les données influence les méthodes delta, de correction de biais et de prolongement, comme le montre la [Figure 31](#). Dans cet exemple, les deux séries de données sont identiques, mais une forte tendance a été ajoutée à l'une d'elles. On voit clairement que la variabilité (en pointillé) et l'écart-type de la série temporelle avec la tendance sont plus grands. Si cette variabilité n'est pas traitée adéquatement par la méthode de transformation choisie (correction de biais, delta ou prolongement), la variabilité quotidienne sera très exagérée et ne représentera plus des conditions réalistes. L'élimination des tendances (voir la [Section 3.3](#) – Ajustement), des cycles et des changements abrupts dans le jeu de données serait un premier pas très utile pour permettre à la transformation de représenter des patrons météorologiques au jour le jour réalistes dans les données climatiques ou hydrologiques. L'application de la tendance provenant d'un jeu de données climatiques, ou la ré-application d'une tendance observée, mérite une réflexion approfondie de la part du praticien et il est important de bien en comprendre les origines.

Pour des simulations futures de changement climatique, l'incertitude proviendra principalement des scénarios d'émissions et des MCG à mesure que l'on avance dans le temps (voir la [Section 2.3](#) – Sources d'incertitude). Pour cette raison, il n'est pas recommandé de prolonger les tendances ou les cycles actuels dans le futur à long terme, sans de solides raisons et une bonne compréhension de leurs causes physiques. Le praticien devrait être en mesure d'analyser une simulation et déterminer si elle est plausible pour le bassin versant et la centrale.

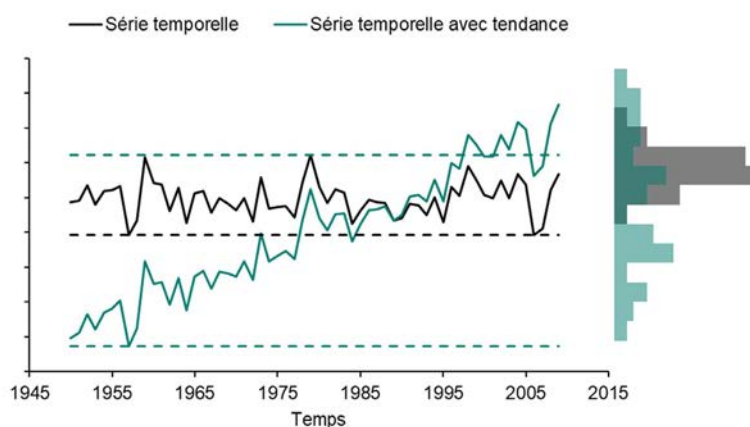


Figure 31 Illustration de l'impact d'une tendance dans un jeu de données synthétiques sur la variabilité statistique (min./max. dans ce cas-ci) des données. La série temporelle en vert est identique à la série en noir, mais une forte tendance y a été ajoutée. Les histogrammes du côté droit montrent que la variabilité augmente lorsqu'une forte tendance (en vert) est ajoutée à une série temporelle.

7.5.3. Surapprentissage

Il faut prendre soin d'éviter le surapprentissage. Ce problème peut survenir dans la méthode de prolongement et dans la correction de biais à l'étape de la conservation de la tendance (voir les considérations particulières à cet égard dans les [Sections 6.2.5](#) et [6.3.5](#)), ainsi que pendant la calibration du modèle, si la période utilisée est trop courte.

La [Figure 32](#) montre un exemple de surapprentissage, qui se produit lorsque la correction ou la fonction est ajustée de trop près à un nombre limité de données et perd ainsi sa capacité de généralisation, ce qui en invalide l'utilisation pour des conditions futures. Dans la [Figure 32](#), un polynôme d'ordre élevé a été utilisé pour correspondre parfaitement au jeu de données (en bleu). Cependant, les nouvelles données ajoutées dans la fourchette existante (en vert) sont nettement moins bien représentées que si une fonction linéaire avait été utilisée. Par ailleurs, il est bien connu que des fonctions telles que les polynômes, les splines et les fonctions exponentielles risquent d'exagérer les extrémités du jeu de données. Par exemple, dans la [Figure 32](#), si l'on prolonge la courbe jusqu'à une valeur de l'axe X inférieure à 1 ou supérieure à 11 (où il y a des données), on obtiendra des valeurs en Y bien au-delà de la fourchette observée. Ce phénomène n'est pas nécessairement le résultat d'un surapprentissage, mais demeure une considération importante dans l'application d'une fonction statistique au-delà des limites des observations.

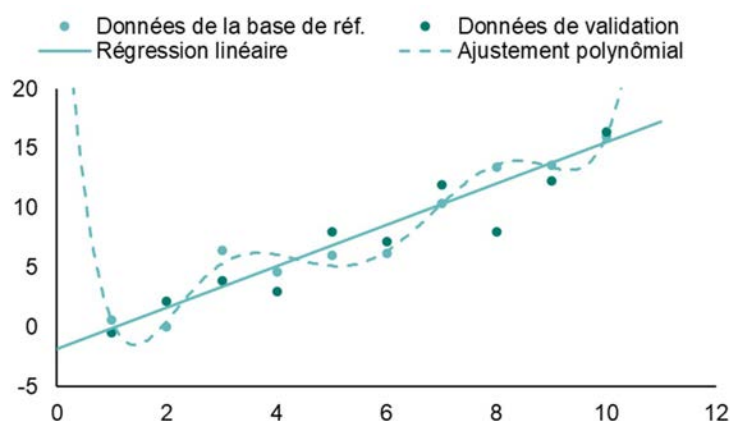


Figure 32 Exemple de surapprentissage. La fonction représentée par le pointillé (polynôme) correspond parfaitement aux données de la base de référence (en bleu), mais n'est pas aussi généralisable que l'ajustement linéaire des données, comme le montrent les données de validation (en vert).

7.6. Cohérence des comparaisons

« Tous les modèles se trompent, mais certains sont utiles », disait le mathématicien George Box. Il est très peu probable qu'un modèle produise une simulation parfaite. Pour savoir faire la distinction entre un écart raisonnable et une erreur qu'il faut corriger, le praticien doit déjà posséder une bonne connaissance du système et avoir établi des cibles et des seuils réalistes pour les écarts par rapport aux cibles. Il peut aussi mener une analyse de sensibilité pour déterminer si les résultats obtenus produisent une différence notable dans le résultat final de la chaîne de modélisation (c.-à-d., la valeur de l'actif). Le cas échéant, il y aurait lieu de réévaluer les décisions ou les modèles en cause.

La cohérence est importante lorsque des comparaisons sont effectuées au travers de l'évaluation. Les bases de référence climatique et hydrologique servent de point de départ à la comparaison. Plusieurs facteurs autres que le changement climatique peuvent modifier l'hydrologie et la production énergétique, par exemple des changements dans les régimes de régularisation, dans les pratiques de gestion de l'eau, dans les conditions du marché et dans l'utilisation des terres. Comme mentionné dans la [Section 4.2](#) – Base de référence hydrologique, cela peut compliquer l'utilisation de la base de référence hydrologique et même la calibration du modèle. Cependant, l'application cohérente au sein du modèle d'un élément tel qu'un nouveau régime de régularisation pourrait produire une comparaison plus précise. Peu importe la base de référence choisie, le praticien devrait être en mesure de déterminer et d'expliquer les écarts par rapport aux conditions historiques. Les questions de cohérence peuvent aussi avoir des conséquences pour la sélection des données de changement climatique ([Section 5](#)) et leur intégration dans la chaîne de modélisation ([Section 6](#)).

Par exemple, si l'évaluation vise à éclairer un processus décisionnel concernant la mise à niveau ou la remise à neuf d'une centrale, l'entreprise se demandera sans doute : quelles seront les différences entre les conditions futures et les conditions de la base de référence ? La plupart des entreprises auront tendance à comparer les scénarios futurs produits par la chaîne de modélisation aux résultats produits par la méthode traditionnelle. Cela est raisonnable, puisque la méthode traditionnelle est probablement bien ancrée dans les processus organisationnels et dans les hypothèses de planification, et qu'elle permet de réaliser des comparaisons avec des études existantes. Cependant, la méthode traditionnelle n'est pas idéale pour une comparaison directe avec un scénario futur (p. ex., des incohérences dans la chaîne donneront lieu à des biais dans les simulations). Le praticien devrait veiller à ce que les scénarios futurs soient proprement intégrés. Dans une application réelle, la chaîne de modélisation peut dégager des résultats peu plausibles en ce qui concerne l'énergie produite ou la valeur d'un actif.

Un diagramme similaire à la **Figure 30**, qui montre les précipitations accumulées d'été produites par différents produits climatiques, peut faire ressortir des écarts qui apparaissent seulement lorsque de longues périodes sont étudiées.

Si les résultats sont peu plausibles, la solution la plus robuste consistera à déterminer la source d'incohérence et à corriger le ou les problèmes dans les modèles. Sinon, le praticien devra choisir entre transformer les données à nouveau ou appliquer la méthode delta pour produire les résultats finaux (p. ex., production énergétique ou valeur de l'actif) de la chaîne de modélisation. Avant d'ajouter de nouvelles transformations de données, il devrait chercher à savoir si les écarts affectent significativement la valeur déterminée de l'actif, comparativement à d'autres coûts externes. Par exemple, les coûts potentiels de travaux géotechniques ou structurels peuvent largement dépasser les écarts dans la production énergétique attribuables à des erreurs mineures dans la chaîne de modélisation.

Puisque la sélection de la période de base est une source d'incohérence majeure, le praticien doit y accorder une attention particulière. Il est généralement reconnu que la période d'observations climatiques doit couvrir au moins 30 ans. Durant cette période, il peut y avoir eu dans le bassin versant des changements physiques (possiblement dus au changement climatique) ou des changements de régularisation qui ont eu un impact sur les débits disponibles pour la production hydroélectrique. Des interruptions majeures ou des changements dans les actifs ont pu affecter la production énergétique historique ou les facteurs d'efficacité utilisés pour les simulations futures. Le praticien doit se demander dans quelle mesure la base de référence est représentative. Idéalement, celle-ci devrait couvrir une longue période, mais dans certains cas, le praticien devra peut-être envisager et justifier une période plus courte ou plusieurs périodes pour l'évaluation.

7.7. Mise à l'échelle d'un modèle

L'impact qu'auront les hypothèses de simplification dans la chaîne de modélisation dépendra en bonne partie de l'échelle spatiale et temporelle des modèles considérés. L'IHA (2019) recommande d'adopter une approche progressive de la modélisation, en raffinant le niveau de détail selon les besoins. Par exemple, les modèles lancés à un pas de temps mensuel pourraient convenir à de grands systèmes stables ayant peu de fluctuations quotidiennes. Cela pourrait simplifier les sources de données climatiques et leur intégration et permettre ainsi d'utiliser des techniques moins complexes. En revanche, une chaîne de modélisation créée pour une rivière dont les pointes sont fortement gérées ou pour des centrales en cascade exigera des modèles ayant une résolution et une échelle spatiale plus fines. Pour que l'intégration du changement climatique dans cette chaîne de modélisation soit convenable, il faudra probablement un modèle de gestion de l'eau et une grande rigueur dans la sélection,

la transformation et l'intégration des données climatiques. Les divers facteurs interagissant entre eux produiront vraisemblablement un résultat plus sensible, au bout de la chaîne de modélisation. Cela peut aussi être le cas si on utilise une approche imbriquée où un modèle ayant une résolution grossière alimente un modèle de résolution plus fine pour des sections précises du bassin versant ou des échelles temporelles à l'étude.

7.8. Avantages de la modélisation de l'hydrologie et de la gestion de l'eau

Comme mentionné dans les sections précédentes, un modèle hydrologique peut être nécessaire à l'intégration du changement climatique dans la chaîne de modélisation. La modélisation hydrologique comporte des avantages certains pour une entreprise. Toutefois, pour que ceux-ci se concrétisent, il faut une bonne calibration et une bonne compréhension du modèle (voir l'**Annexe F** – Sélection et calibration d'un modèle hydrologique). De plus, la plupart de ces avantages se concrétisent si le modèle est mis au point par ou pour une entreprise particulière. L'entreprise peut économiser temps et effort si elle a accès à une simulation externe adéquatement calibrée pour le bassin versant (**Section 5.6** – Jeux de données globaux et approximations), mais celle-ci n'offrira pas le même degré de flexibilité et de transférabilité. En effet, le praticien doit alors déterminer si le besoin et les méthodes qui ont donné lieu au développement de cette simulation hydrologique sont pertinents pour l'évaluation de la valeur de l'actif, étant donné que chaque modèle est bâti pour une raison particulière et découle des choix de la personne qui l'a développé. Voici une liste non exhaustive présentant les avantages de développer un modèle hydrologique et/ou un modèle de gestion de l'eau (c.-à-d., utiliser une base de référence climatique et lancer la chaîne de modélisation à l'étape « Du climat à l'hydrologie » (**Section 6.2** – Du climat à l'hydrologie) plutôt qu'à l'étape « De l'hydrologie à l'énergie » (**Section 6.3** – De l'hydrologie à l'énergie).

La modélisation des apports et des débits au moyen d'un modèle hydrologique développé dans ce but particulier comporte plusieurs avantages pour une organisation. Par exemple, l'entreprise acquiert des connaissances qu'elle peut par la suite appliquer à d'autres activités (opérations, conception de projet, etc.) ou pour des études qui visent à déterminer les causes de tendances dans la base de référence hydrologique (changements dans l'utilisation des terres, changement climatique, variabilité naturelle, etc.). Ce modèle peut tenir simultanément compte de multiples facteurs de changement et analyser l'influence relative de chacun.

Un modèle de gestion de l'eau permet de considérer l'impact de décisions en matière de gestion de l'eau, parfois implicites dans les observations historiques (régimes régularisés) ou moins bien représentées dans les simulations hydrologiques (régimes naturalisés, dans la plupart des cas). Les décisions des opérateurs, l'installation de nouvelles infrastructures

et les changements dans les régimes hydriques peuvent changer les résultats historiques de systèmes fluviaux gérés. Ces impacts devraient être examinés non seulement lors de la sélection de la base de référence, mais aussi dans la préparation des simulations et des scénarios, car les débits ou la production d'énergie historiques ne sont pas nécessairement une base de référence représentative. De même, l'utilisation d'un modèle de gestion de l'eau comprenant une routine d'optimisation pour le routage des apports historiques pourrait entraîner des déviations par rapport aux opérations passées si la base de référence hydrologique est utilisée. L'inclusion d'un modèle de gestion de l'eau permet l'application uniforme d'un ensemble d'opérations et de règles pour la période complète (référence et future). De plus, les règles et limites opérationnelles peuvent être modifiées pour prendre en compte les changements potentiels dans les conditions, les régimes régularisés et la disponibilité des ressources en eau dans un climat changeant. Quant aux questions de sécurité des barrages, la Commission internationale des grands barrages recommande comme première mesure d'adaptation la réopération des réservoirs (ICOLD, 2016).

Conclusion

Ce Guide fournit des lignes directrices sur l'intégration des impacts du changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs hydroélectriques. La **Section 1** présente un moyen rapide d'explorer les liens possibles entre les impacts du changement climatique et l'évaluation de la valeur d'un actif. De plus, elle souligne le besoin de développer des méthodes d'intégration des impacts du changement climatique pour des sous-composantes autres que l'énergie et les revenus sensibles au climat dans l'évaluation de la valeur d'actifs, notamment la fourniture d'énergie et les services ancillaires, la demande d'électricité, le coût de l'adoption de mesures, le coût de l'inaction, les coûts externes et la durée de vie utile des actifs.

Les **Sections 2 à 7** et les annexes présentent diverses méthodes d'intégration des données de changement climatique dans l'évaluation de la valeur des actifs, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Ceux-ci offrent au praticien des solutions de rechange à la pratique traditionnelle, qui consiste à établir des projections au moyen de la base de référence hydrologique. Nous encourageons le praticien à choisir la méthode convenant le mieux aux bassins versants, à la structure et aux pratiques de l'entreprise, à la disponibilité de l'information climatique et hydrologique et à d'autres éléments. Lors du choix de la méthode, le praticien

doit aussi déterminer la meilleure façon de concilier l'incertitude climatique et hydrologique aux autres incertitudes liées aux décisions d'affaires. Les options proposées peuvent aussi être utilisées de manière complémentaire, en débutant avec des analyses moins détaillées pour ensuite les raffiner.

Dans l'élaboration du Guide, des études de cas ont été réalisées avec chaque partenaire hydroélectrique. En conclusion, nous souhaitons partager quelques expériences et conseils relatifs à ces études de cas.

Les options présentées dans le Guide, de même que l'introduction de nouveaux concepts et informations peuvent être intimidantes, particulièrement pour les néophytes en matière de changement climatique. « Ce n'est pas un exercice trivial. Il y a un important risque de tirer des conclusions en utilisant des données qui ne sont pas adaptées », souligne Guillaume Jean Tarel, conseiller réseaux voisins chez Hydro-Québec. Pour cette raison, nous conseillons aux praticiens qui ont peu ou pas d'expérience dans ce domaine de consulter des experts en la matière.

Étant donné la complexité potentielle et les défis propres à la chaîne de modélisation, le praticien peut buter sur des détails techniques et perdre de vue l'ensemble de la situation. Ontario Power Generation a connu une telle situation au cours de l'étude de cas, ce qui a amené Kurt C. Kornelsen, cadre supérieur des ressources en eau, à faire le commentaire suivant : « Commençons par réaliser la chaîne de modélisation au complet avec l'information disponible, et si le changement climatique exerce une influence significative sur la valeur d'un actif, nous pourrons alors en raffiner l'évaluation ».

Finalement, la quantité de résultats et l'incertitude reconnue entourant le changement climatique peuvent empêcher les décideurs d'agir. Sur cette question, voici ce que conseille Marie-Claude Simard, Chef expertise – hydraulique et hydrologie et responsable de l'adaptation aux changements climatiques chez Hydro-Québec Production : « Nous devons montrer ce qui est clairement indéniable au sujet du changement climatique, et non seulement ce qui est incertain ».

Références

- Abbasnezhadi, K. (2017). *Influence of Meteorological Network Density on Hydrological Modeling Using Input from the Canadian Precipitation Analysis (CaPA)* [Doctoral dissertation, University of Manitoba]. <https://mspace.lib.umanitoba.ca/handle/1993/32177>
- Agbazo, M. N., and Grenier, P. (2019). Characterizing and avoiding physical inconsistency generated by the application of univariate quantile mapping on daily minimum and maximum temperatures over Hudson Bay. *International Journal of Climatology*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/joc.6432>
- Arnell, N. W., and Gosling, S. N. (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- Arsenault, R., Brissette, F., Malo, J. S., Minville, M., and Leconte, R. (2013). Structural and Non-Structural Climate Change Adaptation Strategies for the Péribonka Water Resource System. *Water Resources Management*, 27, 2075–2087. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0275-6>
- Arsenault, R., Brissette, F., and Martel, J. L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566, 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.027>
- Arsenault, R., Essou, G. R. C., and Brissette, F. P. (2017). Improving hydrological model simulations with combined multi-input and multimodel averaging frameworks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(4), 04016066–04016061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001489)
- Arsenault, R., Gatién, P., Renaud, B., Brissette, F., and Martel, J. L. (2015). A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 529, 754–767. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.001>
- Bastola, S., Murphy, C., and Sweeney, J. (2011). The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. *Advances in Water Resources*, 34(5), 562–576. <https://doi.org/10.1016/j.adwatres.2011.01.008>
- Benedetti, B., Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., and Hannart, A. (2018, October 18). *Ouranos workshop with Brookfield Renewable Power Workshop* [Workshop]. Series of workshop for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Gatineau, ON, Canada.

- Bennett, T. H., and Peters, J. C. (2004). Continuous soil moisture accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000: Building Partnerships*, 104. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)149](https://doi.org/10.1061/40517(2000)149)
- Bergström, S., Lindström, G., and Pettersson, A. (2002). Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 16(2), 413–421. <https://doi.org/10.1002/hyp.332>
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling : the primer* (2nd ed.). Wiley and Sons.
- Blanchet, R., Le Blanc, M., Letellier, M., Lévesque, F., Geffray, F., Pineault, K., Fournier, E., Lamy, A., and Hannart, A. (2018, October 30). *Ouranos workshop with Innergex Renewable Energy Inc.* [Workshop]. Series of workshop for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Longueuil, QC, Canada.
- Bosshard, T., Carambia, M., Goergen, K., Kotlarski, S., Krahe, P., Zappa, M., and Schär, C. (2013). Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Water Resources Research*, 49(3), 1523–1536. <https://doi.org/10.1029/2011WR011533>
- Boyle, J., Cunningham, M., and Dekens, J. (2013). *Climate Change Adaptation and Canadian Infrastructure*. International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/publications/climate-change-adaptation-and-canadian-infrastructure-review-literature>
- Broderick, C., Matthews, T., Wilby, R. L., Bastola, S., and Murphy, C. (2016). Transferability of hydrological models and ensemble averaging methods between contrasting climatic periods. *Water Resources Research*, 52(10), 8343–8373. <https://doi.org/10.1002/2016WR018850>
- C. Kornelsen, K., Helc, S., MacLeod, G., McDonald, M., Sajid, A., Pineault, K., Fournier, E., and Lamy, A. (2019, March 1). *Ouranos workshop with Ontario Power Generation* [Workshop]. Series of workshop for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Toronto, ON, Canada.
- Canadian Electricity Association. (2016). *Adapting to climate change state of play and recommendations for electricity sector in Canada*. <https://electricity.ca/library/adapting-climate-change-state-play-recommendations-electricity-sector-canada/>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., and Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T., and Fenemor, A. (2006). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes*, 20(5), 1057–1073. <https://doi.org/10.1002/hyp.5933>
- Caron-Périgny, P.-O., Crobeddu, É., Émiel, G., Maldonado, J.-P., Ribichesi, C., Rousseau, S., Rondeau, P.-M., Simard, M.-C., Tarel, G. J., Pineault, K., Fournier, E., and Lamy, A. (2019, February 11 – 12). *Ouranos workshop with Hydro-Québec* [Workshop]. Series of workshop for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Montréal, QC, Canada.
- Carter, T. R., Alfsen, K., Barrow, E., Bass, B., Dai, X., Desanker, P., Gaffin, S. R., Giorgi, F., Hulme, M., Lal, M., Mata, L. J., Mearns, L. O., Mitchell, J. F. B., Morita, T., Moss, R., Murdiyarso, D., Pabon-Caicedo, J. D., Palutikof, J., Parry, M. L., ... Scholes, R. J. (2007). *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. IPCC. http://www.ipcc-data.org/guidelines/TGICA_guidance_sdciaa_v2_final.pdf
- Casajus, N., Périé, C., Logan, T., Lambert, M.-C., De Blois, S., and Berteaux, D. (2016). An Objective Approach to Select Climate Scenarios when Projecting Species Distribution under Climate Change. *PloS One*, 11(3), e0152495. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152495>
- Charron, I. (2016). *A guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions, 2016 edition*. Ouranos. <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Guidebook-2016.pdf>
- Chen, J., Arsenault, R., Brissette, F. P., Côté, P., and Su, T. (2019). Coupling annual, monthly and daily weather generators to simulate multisite and multivariate climate variables with low-frequency variability for hydrological modelling. *Climate Dynamics*, 53(7–8), 3841–3860. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04750-z>
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., and Braun, M. (2013a). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49(7), 4187–4205. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., and Braun, M. (2013b). Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.062>
- Chen, J., Brissette, F. P., and Leconte, R. (2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3–4), 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>

- Chen, J., Brissette, F. P., and Lucas-Picher, P. (2016). Transferability of optimally-selected climate models in the quantification of climate change impacts on hydrology. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3359–3372. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3030-x>
- Chen, J., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., and Caya, D. (2017). Impacts of weighting climate models for hydro-meteorological climate change studies. *Journal of Hydrology*, 549, 534–546. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.025>
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., and Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>
- Cloutier, C., Geertsema, M., Jacob, M., and Schnorbus, M. (2016, October 2–5). *Summary of the report Potential Impacts of Climate Change on Landslides Occurrence in Canada* [Conference paper]. Canadian Geotechnical 69th Conference – GeoVancouver 2016, Vancouver, BC, Canada. https://www.researchgate.net/publication/312612487_Summary_of_the_report_Potential_Impacts_of_Climate_Change_on_Landslides_Occurrence_in_Canada
- Coron, L., Andréassian, V., Bourqui, M., Perrin, C., and Hendrickx, F. (2011, 28 June - 7 July 2011). Pathologies of hydrological models used in changing climatic conditions: a review. In C.C. Ray Cas (Chair), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet* [Symposium]. XXV IUGG General Assembly, Melbourne, Vic, Australia. https://iahs.info/uploads/dms/16759.10-39-44-344-19-CoronACCEPTED_JH02-FINAL-WITH-MODIF.pdf
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., and Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011WR011721>
- Davison, B., Pietroniro, A., Fortin, V., Leconte, R., Mamo, M., and Yau, M. K. (2016). What is missing from the prescription of hydrology for land surface schemes? *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 2013–2039. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0172.1>
- De Niel, J., Van Uytven, E., and Willems, P. (2019). Uncertainty Analysis of Climate Change Impact on River Flow Extremes Based on a Large Multi-Model Ensemble. *Water Resources Management*, 33(12), 4319–4333. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02370-0>
- Deser, C., Knutti, R., Solomon, S., and Phillips, A. S. (2012). Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change*, 2(11), 775–779. <https://doi.org/10.1038/nclimate1562>

- Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A., and Smoliak, B. V. (2014). Projecting North American climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *Journal of Climate*, 27(6), 2271–2296. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00451.1>
- Deser, C., Phillips, A. S., Bourdette Vincent, and Teng, H. (2012). Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38, 527–546. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x>
- Diaconescu, E. P., Mailhot, A., Brown, R., and Chaumont, D. (2018). Evaluation of CORDEX-Arctic daily precipitation and temperature-based climate indices over Canadian Arctic land areas. *Climate Dynamics*, 50(5–6), 2061–2085. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3736-4>
- Evin, G., Hingray, B., Blanchet, J., Eckert, N., Morin, S., and Verfaillie, D. (2019). Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. *Journal of Climate*, 32(8), 2423–2440. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feng, D. (2018). *Characterizing Changes in Hydrologic Fluxes and Uncertainties for Current and Future Climate Conditions* [Doctoral dissertation, Northeastern University]. <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:m044c4807>
- Fischer, E. M., Beyerle, U., and Knutti, R. (2013). Robust spatially aggregated projections of climate extremes. *Nature Climate Change*, 3(12), 1033–1038. <https://doi.org/10.1038/nclimate2051>
- Fleming, M., and Neary, V. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 175–183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:3\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:3(175))
- Forrest, K., Tarroja, B., Chiang, F., AghaKouchak, A., and Samuelson, S. (2018). Assessing climate change impacts on California hydropower generation and ancillary services provision. *Climatic Change*, 151(3–4), 395–412. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-018-2329-5>
- Fournier, É., Braun, B., Merleau, J., Simard, M.C. (2015). *Concordance entre les sorties directes et post-traitées de l'ensemble CMIP5 et les données NRCAN selon certaines caractéristiques statistiques calculées à l'échelle des bassins versants du complexe Manicouagan* [Internal report]. Ouranos project Montréal, QC, Canada.

- Fournier, É. Merleau, J. (2016). *Concordance entre les données sur grille NRCan et MDDELCC et les données du projet CROQ selon les caractéristiques statistiques calculées à l'échelle des bassins versants du complexe Manicouagan* [Internal report]. Ouranos project Montréal, QC, Canada.
- François, B., Schlef, K. E., Wi, S., and Brown, C. M. (2019). Design considerations for riverine floods in a changing climate – A review. *Journal of Hydrology*, 574, 557–573. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.068>
- Gao, J., Sheshukov, A. Y., Yen, H., Douglas-Mankin, K. R., White, M. J., and Arnold, J. G. (2019). Uncertainty of hydrologic processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology*, 568, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.041>
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., and 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). <https://doi.org/10.1002/2015JD023890>
- Giuntoli, I, Vidal, J. P., Prudhomme, C., and Hannah, D. M. (2015). Future hydrological extremes: The uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth System Dynamics*, 6(1), 267–285. <https://doi.org/10.5194/esd-6-267-2015>
- Giuntoli, Ignazio, Villarini, G., Prudhomme, C., and Hannah, D. M. (2018). Uncertainties in projected runoff over the conterminous United States. *Climatic Change*, 150, 149–162. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2280-5>
- Groulx, F., Chavaillaz, Y., Mercier, V., Sparks, D., Fournier, E., and Pineault, K. (2019, May 31). *Ouranos interview with WSP* [Interview]. Series of interview for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Montréal, QC, Canada
- Guay, C., Minville, M., and Braun, M. (2015). A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 40(3), 285–302.
- Gupta, H V, Bastidas, L A, Sorooshian, S, Shuttleworth, W J, Yang, Z. L. (1999). Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research*, 104(D16), 19,419-491,503.
- Haerter, J. O., Hagemann, S., Moseley, C., and Piani, C. (2011). Hydrology and Earth System Sciences Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15, 1065–1079. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1065-2011>

- Haguma, D., Leconte, R., and Krau, S. (2017). Hydropower plant adaptation strategies for climate change impacts on hydrological regime. *Can. J. Civ. Eng.*, 44, 962–970. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0141>
- Hajji, I., Nadeau, D. F., Music, B., Anctil, F., and Wang, J. (2018). Application of the maximum entropy production model of evapotranspiration over partially vegetated water-limited land surfaces. *Journal of Hydrometeorology*, 19(6), 989–1005. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0133.1>
- Hanrahan, J. L., Kravtsov, S. V., and Roebber, P. J. (2010). Connecting past and present climate variability to the water levels of Lakes Michigan and Huron. *Geophysical Research Letters*, 37(1), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2009GL041707>
- Hattermann, F. F., Vetter, T., Breuer, L., Su, B., Daggupati, P., Donnelly, C., Fekete, B., Florke, F., Gosling, S. N., Hoffmann, P., Liersch, S., Masaki, Y., Motovilov, Y., Muller, C., Samaniego, L., Stacke, T., Wada, Y., Yang, T., and Krysnova, V. (2018). Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: A cross-scale study. *Environmental Research Letters*, 13(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938>
- Hausfather, Z. (2018, April 19). *Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change*. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>
- Hawkins, E., Smith, R. S., Gregory, J. M., and Stainforth, D. A. (2016). Irreducible uncertainty in near-term climate projections. *Climate Dynamics*, 46(11–12), 3807–3819. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2806-8>
- Hawkins, E., and Sutton, R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin American Meteorological Society*, 90(8), 1095–1107. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- Hawkins, E., and Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37(1), 407–418. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>
- Hayhoe, H. N. (2000). Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates. *Climate Research*, 14(2), 75–87. <https://doi.org/10.3354/cr014075>
- Hegerl, G. C., Hoegh-Guldberg, O., Casassa, G., Hoerling, M., Kovats, S., Parmesan, C., Pierce, D., and Stott, P. (2010). *Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change*. IPCC Working Group I Technical Support Unit. https://wg1.ipcc.ch/docs/IPCC_D&A_GoodPracticeGuidancePaper-1.pdf

- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini Brazil, J. A., Nicholls, N., Penner, J. E., Stott, P. A., Karoly USA, D. J., Ogallo, L., Planton, S., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N., Luo, Y., Marengo Orsini, J., Nicholls, N., Penner, J., ... Tignor, M. (2007). Understanding and Attributing Climate. In M. T. and H. L. M. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., and Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219–236. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>
- Her, Y., Yoo, S. H., Cho, J., Hwang, S., Jeong, J., and Seong, C. (2019). Uncertainty in hydrological analysis of climate change: multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions. *Nature Scientific Reports*, 9(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41334-7>
- Hingray, B., Musy, A., and Picouet, C. (2015). *Hydrology : a science for engineers*. CRC Press.
- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger F., McMillan, H.K., Pierrefeu, G. (2018). Impact of Stage Measurement Errors on Streamflow Uncertainty. *Water Resources Research*, 54(3), 1952–1976. <https://doi.org/10.1002/2017WR022039>
- Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., and Willems, P. (2017). Uncertainty assessment for climate change impact on intense precipitation: how many model runs do we need? *International Journal of Climatology*, 37, 1105–1117. <https://doi.org/10.1002/joc.5069>
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J. E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D. A., Hut, R. W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., ... Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Hunukumbura, P. B., Tachikawa, Y., and Shiiba, M. (2012). Distributed hydrological model transferability across basins with different hydro-climatic characteristics. *Hydrological Processes*, 26(6), 793–808. <https://doi.org/10.1002/hyp.8294>
- Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., and 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), 725–741. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1979.1>

- ICOLD. (2016). *Bulletin 169: Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources*. International Commission On Large Dams.
- IHA. (2019). *Hydropower Sector Climate Resilience Guide*. International Hydropower Association. <https://www.hydropower.org/publications/hydropower-sector-climate-resilience-guide>
- Immerzeel, W. W., and Droogers, P. (2008). Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 411–424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.017>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R.K. Pachauri, and A. Reisinger, Eds.). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf
- IPCC. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L.A. Meyer (Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.031>
- Isaac, M., and Van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507–521.
- Jaglom, W. S., McFarland, J. R., Colley, M. F., Mack, C. B., Venkatesh, B., Miller, R. L., Haydel, J., Schultz, P. A., Perkins, B., Casola, J. H., Martinich, J. A., Cross, P., Kolian, M. J., and Kayin, S. (2014). Assessment of projected temperature impacts from climate change on the U.S. electric power sector using the Integrated Planning Model®. *Energy Policy*, 73, 524–539. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.032>
- Jie, M. X., Chen, H., Xu, C. Y., Zeng, Q., Chen, J., Kim, J. S., Iian Guo, S., and Guo, F. Q. (2018). Transferability of Conceptual Hydrological Models Across Temporal Resolutions: Approach and Application. *Water Resources Management*, 32(4), 1367–1381. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1874-4>
- Jones, R. N. (2000). Managing uncertainty in climate change projections—issues for impact assessment. *Climatic Change*, 45(3), 403–419. <https://doi.org/10.1016/j.uology.2013.09.061>

- Kao, S. C., Sale, M. J., Ashfaq, M., Uria Martinez, R., Kaiser, D. P., Wei, Y., and Diffenbaugh, N. S. (2015). Projecting changes in annual hydropower generation using regional runoff data: An assessment of the United States federal hydropower plants. *Energy*, 80, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.066>
- Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V. A., and Jones, R. G. (2009). Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: Flood frequency in England. *Climatic Change*, 92(1–2), 41–63. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9471-4>
- Khadam, I. M., and Kaluarachchi, J. J. (2004). Use of soft information to describe the relative uncertainty of calibration data in hydrologic models. *Water Resources Research*, 40(11). <https://doi.org/10.1029/2003WR002939>
- Kim, K., Park, T., Bang, S., and Kim, H. (2017). Real Options-Based Framework for Hydropower Plant Adaptation to Climate Change. *Journal of Management in Engineering*, 33(3), 04016049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000496)
- King, L. M., McLeod, A. I., and Simonovic, S. P. (2014). Simulation of historical temperatures using a multi-site, multivariate block resampling algorithm with perturbation. *Hydrological Processes*, 28(3), 905–912. <https://doi.org/10.1002/hyp.9596>
- Klein, S. A., and Hall, A. (2015). Emergent Constraints for Cloud Feedbacks. *Current Climate Change Reports*, 1, 276–287. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0027-1>
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Knutti, R., Masson, D., and Gettelman, A. (2013). Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1194–1199. <https://doi.org/10.1002/grl.50256>
- Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., Kundzewicz, Z. W., and Di Baldassarre, G. (2018). How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 679–720. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1446214>
- Kumarasamy, K., and Belmont, P. (2018). Calibration parameter selection and watershed hydrology model evaluation in time and frequency domains. *Water*, 10(6), 710. <https://doi.org/10.3390/w10060710>

- Lafrance, G., Da Silva, L., and Desjarlais, C. (2016). *Impact des changements climatiques sur la demande d'énergie*. Ouranos. <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportLafrance2016.pdf>
- Lofgren, B. M., Hunter, T. S., and Wilbarger, J. (2011). Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *Journal of Great Lakes Research*, 37(4), 744–752. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2011.09.006>
- Ludwig, R., Chartier, I., Caya, D., Mauser, W., May, I., Turcotte, R., Vescovi, L., Braun, M., Cyr, J.-F., Fortin, L.-G., Chaumont, D., and Biner, S. (2009). The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment. *Advances in Geosciences*, 21(Journal Article), 63–71. <https://doi.org/10.5194/adgeo-21-63-2009>
- Luke, Adam;Vrugt, Jasper A.;AghaKouchak, Amir; Matthew, Richard; Sanders, B. F. (2017). Predicting nonstationary flood frequencies: Evidence supports an updated stationarity thesis in the United States. *Water Resources Research*, 53, 5469–5494. <https://doi.org/10.1002/2016WR019676>
- Madani, K., and Lund, J. R. (2010). Estimated impacts of climate warming on California's high-elevation hydropower. *Climatic Change*, 102(3–4), 521–538. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9750-8>
- Magand, C. (2014). *Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique* [Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01027409>
- Mahfouf, J. F., Brasnett, B., and Gagnon, S. (2007). A Canadian precipitation analysis (CaPA) project: Description and preliminary results. *Atmosphere - Ocean*, 45(1), 1–17. <https://doi.org/10.3137/ao.v450101>
- Malovic, D., Engelmann-Pilger, H., Arsenijevic, N., Gassner, K. B., Merle-Beral, E., Monti, G., Pooley, J., Inouye, L. K., Levin, J., and Kellenberg, J. (2015). *Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors*. World Bank Group. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/hydroelectric_power_a_guide_for_developers_and_investors
- Mandal, S., and Simonovic, S. P. (2017). Quantification of uncertainty in the assessment of future streamflow under changing climate conditions. *Hydrological Processes*, 31(11), 2076–2094. <https://doi.org/10.1002/hyp.11174>

- Manitoba Hydro. (2013). *Need For and Alternatives To, Chapter 10- Economic uncertainty analysis- Probabilistic Analysis and Sensitivities*. Manitoba Hydro. http://www.pubmanitoba.ca/v1/nfat/pdf/hydro_application/nfat_business_case_chapter_10_economic_uncertainty_analysis_probabilistic_analysis_and_sensitivities.pdf
- Manitoba Hydro. (2015). *Projected Climate Change Impacts on Energy and Peak Demand in Manitoba* Natural Resources Canada, Climate Change Impacts and Adaptation Division. <https://www.prairiesrac.com/wp-content/uploads/2018/06/Projected-Climate-Change-Impacts-on-Energy-and-Peak-Demand-in-Manitoba-MB-Hydro.pdf>
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M. M., Hall, A., and Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764–773. <https://doi.org/10.1038/nclimate3418>
- Maraun, D., and Widmann, M. (Martin L. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press.
- Maréchal, D., and Holman, I. P. (2004, July 1). *Comparison of Hydrologic Simulations using Regionalised and Catchment-Calibrated Parameter Sets for three Catchments in England* [Paper presentation]. 2nd International Congress on Environmental Modelling and Software, Osnabrück, Basse-Saxe, Germany. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2004/all/219>
- Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J. H., Stakhiv, E., Kucharski, J., and Gilroy, K. (2018). *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): collaborative water resources planning for an uncertain future*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265895>
- Merz, R., Parajka, J., and Blöschl, G. (2011). Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 47(2). <https://doi.org/10.1029/2010WR009505>
- Mideksa, T. K., and Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy*, 38(7), 3579–3585.
- Minville, M, Cartier, D., Guay, C., Leclaire, L.-A., Audet, C., Le Digabel, S., and Merleau, J. (2014). Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations. *Water Resources Research*, 50(6), 5044–5073. <https://doi.org/10.1002/2013WR013857>.Received

- Minville, Marie, Brissette, F., Krau, S., and Leconte, R. (2009). Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydro-power. *Water Resources Management*, 23(14), 2965–2986. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9418-1>
- Moss, R. H., Edmonds, J. a, Hibbard, K. a, Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. a, Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., and Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Motavita, D. F., Chow, R., Guthke, A., and Nowak, W. (2019). The comprehensive differential split-sample test: A stress-test for hydrological model robustness under climate variability. *Journal of Hydrology*, 573, 501–515. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.054>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., and van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, J., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *In Geoscientific Model Development Discussions* (Issue 9, pp. 3461–3482). <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-84>
- Olden, J. D., and Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- Onyutha, C. (2019). Hydrological model supported by a step-wise calibration against sub-flows and validation of extreme flow events. *Water*, 11(2), 244. <https://doi.org/10.3390/w11020244>
- Ouranos. (2015). *Ouranos Decision-Making Project*. <http://scenarios-decision.ouranos.ca/en>
- Patil, S. D., and Stieglitz, M. (2015). Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.003>
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, Reasoning and inference* (2nd ed.). Cambridge University Press. <http://bayes.cs.ucla.edu/BOOK-2K/>

- Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., and Wheeler, H. S. (2011). Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global Nest Journal*, 13(3), 193–214. <https://doi.org/10.30955/gnj.000778>
- Poulin, A., Brissette, F., Leconte, R., Arsenault, R., and Malo, J. S. (2011). Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin. *Journal of Hydrology*, 409(3–4), 626–636. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.057>
- Prudhomme, C., and Davies, H. (2009). Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. *Climatic Change*, 93(1–2), 197–222. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9461-6>
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., A. Pitman, J., Shukla, J., Srinivasan, R. J., Stouffer, A. S., and Taylor, K. E. (2007). Climate Models and Their Evaluation. In S. D. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 323, pp. 589–662). Cambridge University Press.
- Razavi, T., and Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958–975. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)
- Refsgaard, J. C., Madsen, H., Andréassian, V., Arnbjerg-Nielsen, K., Davidson, T. A., Drews, M., Hamilton, D. P., Jeppesen, E., Kjellström, E., Olesen, J. E., Sonnenborg, T. O., Trolle, D., Willems, P., and Christensen, J. H. (2014). A framework for testing the ability of models to project climate change and its impacts. *Climatic Change*, 122(1–2), 271–282. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0990-2>
- Reynolds, J. E., Halldin, S., Xu, C. Y., Seibert, J., and Kauffeldt, A. (2017). Sub-daily runoff predictions using parameters calibrated on the basis of data with a daily temporal resolution. *Journal of Hydrology*, 550, 399–411. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.012>
- Sagan, K., Driver, A., Gawne, K., Halayko, A., Teklemariam, E., Pineault, K., Fournier, E., and Lamy, A. (2019, May 22). *Ouranos workshop with Manitoba Hydro* [Workshop]. Series of workshop for Ouranos Project – Integrating climate change impacts in the valuation of hydroelectric assets, Winnipeg, MB, Canada.
- Samaniego, L., Kumar, R., and Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2008WR007327>

- Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Zink, M., Wanders, N., Eisner, S., Müller Schmied, H., Sutanudjaja, E., Warrach-Sagi, K., and Attinger, S. (2017). Toward seamless hydrologic predictions across spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4323–4346. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4323-2017>
- Sanderson, B. M., Knutti, R., and Caldwell, P. (2015). A Representative Democracy to Reduce Interdependency in a Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 28(13), 5171–5194. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00362.1>
- Sanderson, B. M., Oleson, K. W., Strand, W. G., Lehner, F., and O'Neill, B. C. (2018). A new ensemble of GCM simulations to assess avoided impacts in a climate mitigation scenario. *Climatic Change*, 146(3–4), 303–318. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1567-z>
- Savenije, H. H. G. (2004). The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes*, 18(8), 1507–1511. <https://doi.org/10.1002/hyp.5563>
- Schaefli, B. (2015). Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 271–289. <https://doi.org/10.1002/wat2.1083>
- Seiller, G., Anctil, F., and Perrin, C. (2012). Hydrology and Earth System Sciences. *European Geosciences Union*, 16(4), 1171–1189. <https://doi.org/10.5194/hess-1116-1171-2012>
- Sellami, H., Benabdallah, S., La Jeunesse, I., and Vanclooster, M. (2016). Climate models and hydrological parameter uncertainties in climate change impacts on monthly runoff and daily flow duration curve of a Mediterranean catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 61(8), 1415–1429. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1040801>
- Seo, S. B., Kim, Y. O., Kim, Y., and Eum, H. II. (2019). Selecting climate change scenarios for regional hydrologic impact studies based on climate extremes indices. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 1595–1611. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4210-7>
- Shen, M., Chen, J., Zhuan, M., Chen, H., Xu, C. Y., and Xiong, L. (2018). Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. *Journal of Hydrology*, 556, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.004>
- Sillmann, J., Thorarinsdottir, T., Keenlyside, N., Schaller, N., Alexander, L. V., Hegerl, G., Seneviratne, S. I., Vautard, R., Zhang, X., and Zwiers, F. W. (2017). Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes*, 18, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.10.003>

- Singh, R., Wagener, T., van Werkhoven, K., Mann, M. E., and Crane, R. (2011). A trading-space-for-time approach to probabilistic continuous streamflow predictions in a changing climate – accounting for changing watershed behavior. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3591–3603. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3591-2011>
- Snober, A. K., Hamlet, A. F., and Lettenmaier, D. P. (2003). Climate-Change Scenarios for Water Planning Studies: Pilot Applications in the Pacific Northwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1513–1518. <https://doi.org/10.2307/26216902>
- Stoll, B., Andrade, J., Cohen, S., Brinkman, G., and Brancucci Martinez-Anido, C. (2017). *Hydropower Modeling Challenges*. National Renewable Energy Lab. <https://doi.org/10.2172/1353003>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- TCFD. (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*. Task Force on climate-related financial disclosures. <https://www.fsb-tcfd.org/wp-content/uploads/2017/06/FINAL-2017-TCFD-Report-11052018.pdf>
- Thirel, G., Andréassian, V., and Perrin, C. (2015). De la nécessité de tester les modèles hydrologiques sous des conditions changeantes. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7–8), 1165–1173. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1050027>
- Troin, M., Arsenault, R., Martel, J. L., and Brissette, F. (2018). Uncertainty of hydrological model components in climate change studies over two nordic quebec catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 19(1), 27–46. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0002.1>
- Van Uytven, E., and Willems, P. (2018). Greenhouse gas scenario sensitivity and uncertainties in precipitation projections for central Belgium. *Journal of Hydrology*, 558, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.018>
- Vetter, T., Reinhardt, J., Flörke, M., van Griensven, A., Hattermann, F., Huang, S., Koch, H., Pechlivanidis, I. G., Plötner, S., Seidou, O., Su, B., Vervoort, R. W., and Krysanova, V. (2017). Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y>
- Vidal, J. P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., and Ducharne, A. (2016). Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3651–3672. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3651-2016>

- Wada, Y., Wisser, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F. T., Stacke, T., Tessler, Z., and Schewe, J. (2013). Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4626–4632. <https://doi.org/10.1002/grl.50686>
- Wagener, T., and Montanari, A. (2011). Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, 47(6). <https://doi.org/10.1029/2010WR009469>
- Wang, H. M., Chen, J., Cannon, A. J., Xu, C. Y., and Chen, H. (2018). Transferability of climate simulation uncertainty to hydrological impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7), 3739–3759. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3739-2018>
- Wilby, R. L. (2010). Evaluating climate model outputs for hydrological applications. *Hydrological Sciences Journal*, 55(7), 1090–1093. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.513212>
- Wilby, R. L., and Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>
- Wilks, D. ., and Wilby, R. . (1999). The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23(3), 329–357. <https://doi.org/10.1177/030913339902300302>
- Winsemius, H. C., Schaefli, B., Montanari, A., and Savenije, H. H. G. (2009). On the calibration of hydrological models in ungauged basins: A framework for integrating hard and soft hydrological information. *Water Resources Research*, 45(12). <https://doi.org/10.1029/2009WR007706>
- Yadav, M., Wagener, T., and Gupta, H. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1756–1774. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>
- Yang, Y., Pan, M., Beck, H. E., Fisher, C. K., Beighley, R. E., Kao, S. C., Hong, Y., and Wood, E. F. (2019). In Quest of Calibration Density and Consistency in Hydrologic Modeling: Distributed Parameter Calibration against Streamflow Characteristics. *Water Resources Research*, 55(9), 7784–7803. <https://doi.org/10.1029/2018WR024178>
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 83–97. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00107-8](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00107-8)

- Zeng, L., Xiong, L., Liu, D., Chen, J., and Kim, J. S. (2019). Improving parameter transferability of GR4J model under changing environments considering nonstationarity. *Water*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/w11102029>
- Zhang, Z., Wagener, T., Reed, P., and Bhushan, R. (2008). Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimization. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2008WR006833>

Annexe A – Glossaire

Approche par ensemble	Moyen permettant de prendre en compte des incertitudes liées aux événements et processus futurs inconnus en intégrant diverses options et combinaisons à chaque étape de la chaîne de modélisation. Pour les études sur le changement climatique, l'approche par ensemble comprend habituellement des simulations de divers scénarios d'émissions, modèles climatiques, techniques de post-traitement, etc.
Base de référence	Données considérées comme étant la meilleure représentation de l'état passé ou actuel d'un système.
Chaîne de modélisation	Séquence de modèles numériques (p. ex., modèles climatiques, modèles hydrologiques, modèles énergétiques et modèles de valeur).
Comportement au jour le jour	Fait référence aux données quotidiennes, aux séquences et aux moments d'occurrence d'événements dans des observations ou des simulations. Plus précisément, les modèles climatiques ne représentent pas le comportement au jour le jour des observations climatiques en raison de la nature chaotique du système climatique et de leur sensibilité aux conditions initiales. Les modèles climatiques reproduisent les propriétés statistiques (moyenne, variance, variabilité interannuelle, etc.) des observations.
Facteur de changement	Cause de changement.
Générateur de conditions météorologiques	Modèle numérique qui produit des simulations climatiques synthétiques fondées sur les caractéristiques statistiques d'observations météorologiques.
Hydrologie reconstituée	Simulation hydrologique fondée sur la base de référence climatique.
Méthode de transformation des données	Terme générique servant à représenter toute manipulation délibérée d'un ensemble de données observées ou simulées, habituellement dans le but d'en accroître la plausibilité et/ou d'en faciliter les manipulations. Dans le cadre du Guide, les méthodes présentées comprennent le delta, la correction de biais, la réduction, l'ajustement et le prolongement.
Mise à l'échelle	Méthode qui permet de fournir des sorties de modèles climatiques à une résolution plus fine. La mise à l'échelle peut être dynamique (p. ex., MCR) ou statistique.
Modèle climatique	Représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes, leurs interactions et leurs processus de rétroaction, et qui prennent en compte la plupart ou toutes ses propriétés connues. Les modèles climatiques régionaux (MCR) couvrent typiquement une région du globe, tandis que les modèles climatiques globaux (MCG) couvrent le globe en entier (adapté de Charron, 2016).
Modèle climatique global	Voir Modèle climatique.
Modèle climatique régional	Voir Modèle climatique.
Modèle énergétique	Modèle utilisé pour simuler l'énergie produite à un barrage. Il tient compte des apports/niveaux du réservoir, des caractéristiques de l'actif, des règles et des contraintes de gestion opérationnelle.
Modèle hydrologique	Simplification d'un système du monde réel qui facilite la compréhension, la projection et la gestion des ressources en eau. Dans le Guide, un modèle hydrologique est habituellement utilisé pour simuler les apports à un réservoir ou à une centrale. Le modèle peut comprendre une routine pour le routage de l'eau. Dans la plupart des modèles hydrologiques, les opérations au réservoir sont des représentations simplistes.
Modèle de gestion de l'eau	Modèle qui utilise les apports du modèle hydrologique et comprend une routine pour le routage de l'eau entre les sous-bassins versants, les réservoirs, les barrages et les structures hydrauliques. Il représente explicitement les décisions en matière de stockage et d'évacuation de l'eau. Plusieurs options sont possibles, allant de modèles simples suivant des courbes de niveaux optimaux à des routines d'optimisation avancées qui visent explicitement à maximiser certains critères tout en respectant une série de contraintes, tel que des limites de régularisation. Ce type de modèle est parfois intégré dans des modèles hydrologiques ou énergétiques.
Naturalisé (débit)	Terme utilisé pour qualifier les simulations hydrologiques qui ne tiennent pas compte des décisions en matière de gestion de l'eau et/ou des opérations de régularisation aux réservoirs et aux structures hydrauliques en amont.

Observations sur grille	Observations météorologiques transposées sur une grille au moyen de techniques telles que l'interpolation et le krigeage.
Période de référence	Période temporelle du passé récent. Semblable, mais différent, de la période de la base de référence.
Période de la base de référence	Période temporelle pour laquelle des données de la base de référence sont disponibles. Semblable, mais différent, de la période de référence.
Post-traité (post-traitement)	Simulations climatiques mises à l'échelle et/ou débiaisées.
Produits climatiques	Données de stations météorologiques, produits observés sur grille, réanalyses, simulations et scénarios climatiques.
Projection	Projection modélisée de l'état futur fondée sur des hypothèses (p. ex., développements socioéconomiques et technologiques potentiels) qui sont sujettes à une incertitude (adapté de Charron, 2016)
Réanalyse	Estimation des températures, des vents, des courants et d'autres variables météorologiques, atmosphériques et océaniques historiques, produites en traitant des données météorologiques et océaniques passées au moyen de modèles sophistiqués de prévision météorologique et de techniques d'assimilation de données. Les réanalyses facilitent la prise en compte de nombreuses variables climatiques, et sont également utilisées pour valider les MCR et les MCG dans le climat actuel et pour piloter les simulations de MCR (adapté de Charron, 2016).
Régularisé (débit)	Terme désignant une base de référence hydrologique influencée par des opérations aux réservoirs et aux structures hydrauliques en amont. Ce terme peut aussi désigner des simulations hydrologiques qui prennent en compte les réservoirs et les structures hydrauliques en amont à l'aide d'un modèle de gestion de l'eau.
Scénario	Description plausible et cohérente (y compris de manière interne) d'un système. Dans le cadre du Guide, le scénario représente l'évolution du climat, de l'hydrologie et/ou de l'énergie pour une période donnée, qui utilise une méthode spécifique de transformation de données et qui repose sur des hypothèses particulières au sujet de l'évolution des gaz à effet de serre et d'autres facteurs pouvant influencer le climat futur. Les bases de référence et les simulations intégrant le changement climatique servent de matériaux bruts pour la construction d'un scénario (adapté de Charron, 2016).
Scénario d'émissions	Représentation plausible du développement futur d'émissions de substances qui ont un effet radiatif potentiel dans l'atmosphère, dont les gaz à effet de serre et les aérosols. Un scénario d'émissions est basé sur des hypothèses quant aux facteurs de changement tels que le développement socioéconomique et technologique (adapté de Charron, 2016).
Simulation	Résultat de l'exécution d'un modèle pendant une certaine période de temps, qui peut varier de quelques années à des milliers d'années (dans le passé ou dans le futur). Une simulation peut être exécutée à divers pas de temps (minutes, heures, jours, mois, etc.). (Adapté de Charron, 2016).
Simulation climatique	Simulations climatiques brutes, mises à l'échelle et/ou post-traitées, ainsi que simulations climatiques produites au moyen de générateurs de conditions météorologiques.
Simulation fondée sur la base de référence	Simulation produite au moyen d'un modèle ou d'une série de modèles et initialement alimenté par une base de référence.
Simulation intégrant le changement climatique	Simulation produite au moyen d'un modèle ou d'une série de modèles initialement alimenté par un scénario d'émissions et des simulations climatiques.
Variabilité interne	Variabilité obtenue par un seul MCG exécuté avec de légères perturbations dans les conditions initiales ou paramètres initiaux. La variabilité interne est souvent utilisée pour approximer la variabilité naturelle (voir la définition).
Variabilité naturelle	Fluctuations (dans le climat, l'hydrologie) qui se produisent indépendamment des tendances anthropiques. Cela comprend les fluctuations chaotiques, ainsi que les cycles qui ont lieu à de nombreuses échelles temporelles (p. ex., pluriannuelles, décennales et pluridécennales).

Annexe B – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique

L'importance de la détection d'une tendance et de son attribution à une ou plusieurs causes a été abordée dans plusieurs sections du Guide. Cette annexe donne un aperçu général des définitions et concepts clés de la détection et de l'attribution dans le contexte du changement climatique. Cette section repose en grande partie sur des ouvrages de référence et des publications portant sur la science du climat et l'inférence causale (Hegerl *et al.*, 2007, 2010; IPCC, 2014; Pearl, 2009) et en illustre les principes établis.

B.1 Définition de la détection et de l'attribution

Le GIEC définit la détection comme étant le processus consistant à démontrer que le climat, ou qu'un système affecté par le climat, a changé selon certains critères statistiques, sans avoir besoin de donner la raison de ce changement. Par exemple, dans un cadre statistique, un changement identifié est détecté dans les observations s'il est établi que sa probabilité d'occurrence par hasard est faible (inférieure à 10 %).

Le GIEC définit l'attribution comme étant le processus consistant à évaluer les contributions relatives de différents facteurs déterminants d'un changement ou d'un phénomène, en précisant un degré de confiance statistique. Plus précisément, l'attribution vise à déterminer si un ensemble donné de forçages externes et/ou de facteurs de changement a causé un changement détecté dans le système climatique, que ce soit pour une variable climatique (p. ex., température, précipitation) ou une variable affectée par le climat (p. ex., ruissellement, crues, rendements des cultures).

Pour évaluer la contribution causale d'un facteur donné à un changement donné, le GIEC propose un test en deux étapes. Premièrement, le changement détecté doit être cohérent avec les réponses estimées combinées des forçages anthropiques et naturels. Deuxièmement, le changement détecté doit ne pas être cohérent avec d'autres explications physiquement plausibles qui excluent d'importants éléments du forçage anthropique.

B.2 Importance de la détection et de l'attribution des tendances

Les deux exemples ci-dessous soulignent l'importance des études de détection et d'attribution. Comme ils ont trait à la projection de débits élevés, les méthodes employées sont différentes de la méthode proposée dans le Guide, mais les mêmes concepts s'appliquent à l'évaluation de la valeur des actifs. Les exemples démontrent qu'il faut bien comprendre non seulement la cause d'une tendance, mais aussi le rôle de chaque facteur de changement climatique et hydrologique, avant d'intégrer le changement climatique dans l'évaluation.

Dans le premier exemple, Luke *et al.* (2017) ont analysé plusieurs distributions statistiques dans le but de prévoir la fréquence des crues. La ou les causes de la tendance dans la fréquence des crues n'a pas été déterminée avant l'exercice. Comme le montrent les résultats (**Figure B1**), le prolongement d'une tendance peut donner des résultats médiocres et l'utilisation d'un modèle statistique stationnaire, bien qu'approprié dans la plupart des cas, peut aussi donner des résultats médiocres.

Le second exemple (**Figure B2**) est tiré de François *et al.* (2019) et revêt un intérêt particulier en ce qu'il montre qu'il pourrait être tentant d'attribuer la cause de la tendance au changement climatique.

« La Rivière Rouge du Nord à Fargo (Dakota du Nord, É.-U.) est un bon exemple de débit non stationnaire (**Figure B2**) (Mueller et Foley, 2014). Même si le *U.S. Geological Survey* indique que le régime de la rivière est régularisé, le *Corps of Engineers* de l'armée américaine (USACE) a démontré que les changements dans les débits observés depuis le début des années 1940 (Villarini *et al.*, 2009a) ne peuvent pas être expliqués seulement par la régularisation (voir l'analyse de Serinaldi et Kilsby, 2015); plutôt, c'est l'analyse des anneaux de croissance des arbres qui a montré que la rivière connaît des modes de crues élevées et faibles [...], allant de plusieurs décennies à près d'un siècle. » (George et Nielsen, 2003)

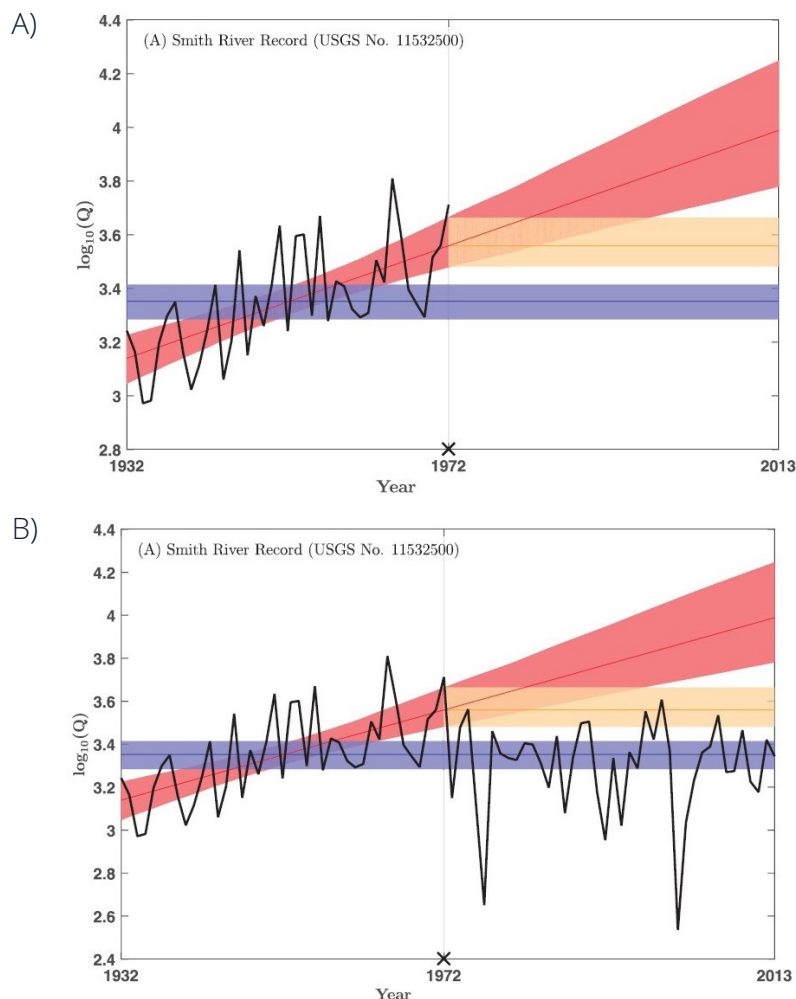


Figure B1 – Exemple des résultats de l'étude de Luke *et al.* (2017). (A) Première moitié des observations de débits (en noir) sur lesquelles les distributions statistiques sont ajustées. La figure montre aussi deux types de distributions statistiques stationnaires et leurs intervalles de confiance (en jaune et en bleu) et une distribution statistique non stationnaire. (B) Deuxième moitié des observations utilisées pour valider les distributions statistiques. Dans ce cas, le modèle statistique stationnaire en bleu représente le meilleur choix pour le futur.

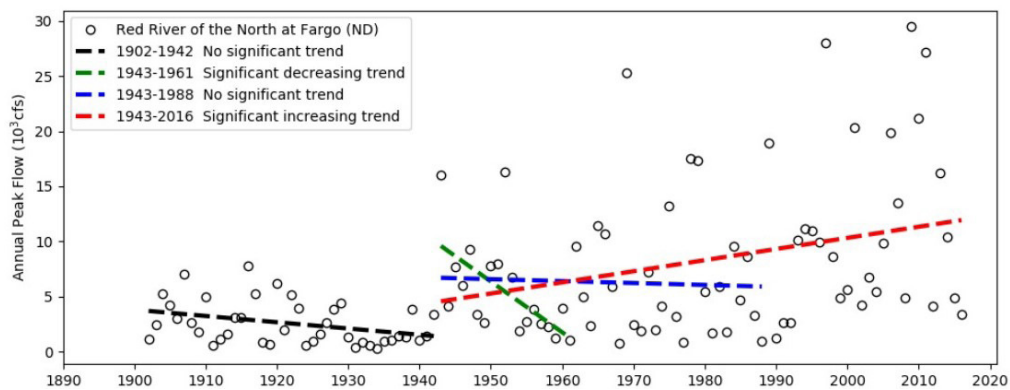


Figure B2 – Débit de pointe annuel de la Rivière Rouge du Nord à Fargo (Dakota du Nord). Les courbes en pointillé montrent les tendances pour diverses périodes (François *et al.*, 2019).

B.3 Articulation de la théorie causale – Causalité nécessaire et suffisante

Il est important de situer la cohérence de ce test en deux étapes dans le contexte plus général de la théorie causale.

David Hume, philosophe écossais du 18^e siècle, définit la causalité comme : « un événement qui est suivi d'un autre événement où, si le premier événement n'était pas survenu, le second ne se serait jamais produit ». Autrement dit, un événement E est causé par un événement C si et seulement si l'événement E n'aurait pas eu lieu si ce n'était de l'événement C. Selon cette définition, la causalité exige une approche contrefactuelle dans laquelle C est retiré et la plausibilité de E est analysée. Le concept fondamental de la causalité suggéré par la définition qualitative de Hume demeure encore pertinent dans la théorie standard de causalité (p. ex., théorie causale de Pearl) utilisée de nos jours. Selon cette théorie, il faut distinguer deux facettes de la causalité : la causalité nécessaire, où l'occurrence de E exige C, mais peut aussi exiger d'autres facteurs; et la causalité suffisante, où l'occurrence de C entraîne celle de E, mais peut ne pas être requise pour que E se produise.

Ces concepts de la théorie causale permettent de mieux comprendre la définition de l'attribution en deux étapes du GIEC : la cohérence avec les réponses estimées combinées des forçages anthropiques et naturels correspond à la causalité suffisante; et l'incohérence avec d'autres explications physiques plausibles qui excluent le forçage anthropique correspond à la causalité nécessaire.

B.4 Importance de bien comprendre les mécanismes

La causalité nécessaire et suffisante s'appuie sur une approche souvent référée en tant que causalité différentielle, qui consiste à tester et à évaluer l'influence d'un facteur sur un résultat donné. Or, cette approche est souvent considérée comme étant insuffisante. Bien qu'elle puisse confirmer l'existence d'un lien causal, elle ne permet pas de le comprendre. La compréhension elle-même consiste habituellement en la connaissance et la description des mécanismes sous-jacents du lien causal.

On peut dès lors considérer la compréhension des mécanismes comme une troisième condition, qualitativement distincte, nécessaire pour démontrer la causalité, les deux autres étant les causalités nécessaire et suffisante décrites précédemment.

Malgré les différences entre la compréhension des mécanismes et la causalité différentielle, il y a également des rapports étroits entre les deux : d'une part, notre connaissance des mécanismes sous-jacents guide nos hypothèses causales et, d'autre part, l'existence de relations causales nous aide à découvrir les mécanismes.

B.5 Attribution en une étape par rapport à deux étapes

L'attribution dans le contexte du changement climatique établit une distinction méthodologique entre l'attribution en une étape et en deux étapes. Cette distinction, cependant, n'est que de nature méthodologique, car la définition de la causalité sous-jacente demeure la même.

Par exemple, l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre peut être un facteur d'un changement observé dans le système climatique. À son tour, le changement climatique peut être un facteur externe pouvant avoir des impacts sur divers aspects tels que le rendement des cultures et la masse des glaciers.

L'attribution à des forçages externes en une seule étape se fait au moyen d'évaluations qui attribuent un changement observé au sein d'un système à un forçage externe, basé sur la modélisation explicite de la réponse de la variable étudiée aux forçages externes et aux facteurs de changement. La modélisation peut comporter un seul modèle complet ou une séquence de modèles. L'étape d'attribution comprend la détection d'un changement significatif dans la variable étudiée, et la comparaison des changements observés dans cette variable aux changements attendus causés par les forçages externes et les facteurs de changement (provenant habituellement de modèles).

L'attribution à des forçages externes en deux étapes se fait au moyen d'évaluations qui attribuent un changement observé dans la variable étudiée à un changement dans les conditions climatiques et/ou environnementales, en plus d'évaluations distinctes qui attribuent le changement dans les conditions climatiques et/ou environnementales à des facteurs de changement et des forçages externes. Un exemple de ceci serait le cas de l'attribution multi-étape de la baisse de la calcification marine à l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone atmosphérique (c.-à-d., les changements dans la calcification marine sont attribués à des changements dans la chimie de l'océan qui, dans une étape distincte, est attribuée aux changements dans le dioxyde de carbone atmosphérique). Par exemple, pour les extrêmes climatiques et les événements rares, il n'est pas toujours possible d'estimer de façon fiable, sur la base des observations, s'il s'est produit un changement dans la fréquence ou l'intensité d'un type particulier d'événement. Néanmoins, il peut être possible de faire une évaluation multi-étape de l'attribution d'un changement indirectement estimé dans la probabilité d'occurrence d'un tel événement, s'il y a un changement détectable dans un ensemble de conditions climatiques fortement liées à la probabilité de cet événement (par exemple, il se peut qu'un changement dans la fréquence de canicules rares soit indétectable, mais un changement dans les températures moyennes pourrait suggérer un changement attendu dans la fréquence des canicules). Cette méthode comprend une séquence d'analyses, dont une synthèse des observations et des applications de modèles. L'évaluation du lien entre le climat et la variable étudiée peut s'appuyer sur un processus modélisé, un lien statistique ou un outil de mise à l'échelle. Les évaluations des composantes (ou étapes) devraient être réalisées explicitement (chacune avec son propre degré de confiance), parallèlement à une évaluation générale du résultat combiné. La confiance dans le résultat final sera habituellement semblable ou inférieure à l'étape la plus faible.

B.6 Exemples

En résumé, voici les trois composantes de l'attribution causale :

- Incohérence contrefactuelle
- Cohérence factuelle
- Compréhension des mécanismes

Revenons aux arguments appuyant l'attribution du changement climatique aux activités humaines. Dans cet exemple, l'incohérence contrefactuelle peut se vérifier au moyen de simulations contrefactuelles (forçages naturels uniquement), disponibles dans CMIP.

- Incohérence contrefactuelle – Les estimations historiques du changement climatique passé donnent à penser que les récents changements dans la température de surface mondiale sont inhabituels. Les modèles climatiques numériques sont incapables de reproduire le réchauffement observé au moyen des seuls forçages naturels. Autrement dit, ces forçages (p., ex., l'activité solaire et volcanique, la variabilité interne du climat) ne peuvent pas à eux seuls expliquer le réchauffement observé.
- Cohérence factuelle – Les estimations historiques du changement climatique passé sont cohérentes avec les émissions anthropiques. Les modèles climatiques numériques reproduisent toujours le réchauffement observé lorsque les forçages comprennent les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines.
- Compréhension des mécanismes – La physique du système climatique est connue (c.-à-d. que les propriétés de réchauffement des gaz à effet de serre sont bien comprises et établies).

Voici un exemple à l'appui de l'attribution d'un changement dans le débit aux changements dans l'utilisation des terres.

- Incohérence contrefactuelle – Un modèle hydrologique récemment calé ne peut pas reproduire un changement inhabituel du débit observé dans les données historiques en supposant des paramètres stationnaires. En d'autres mots, le forçage d'un modèle hydrologique avec la précipitation et la température passé ne reproduit pas le changement observé dans le débit.
- Cohérence factuelle – Les observations historiques de changements dans le débit sont cohérentes avec l'imagerie aérienne des pertes forestières (p. ex., en raison de feux ou de l'exploitation forestière). Le modèle hydrologique qui prend en compte le changement dans l'utilisation des terres concordant avec l'imagerie ou l'exploitation forestière historique, etc., reproduit le changement observé dans le débit.
- Compréhension des mécanismes – Une compréhension physique du bassin versant indique que l'élimination de la végétation de surface en accroît le débit annuel moyen (ruissellement accru lors d'une précipitation).

Cette tendance peut être raisonnablement incluse dans un modèle de conditions futures, particulièrement si elle concorde avec un plan de gestion forestière dont on connaît les conditions ou les règles de planification future.

Annexe C – Méthodes de sélection de MCG

Comme il l'est mentionné dans la [Section 2.3](#) – Sources d'incertitude, l'approche par ensemble permet de caractériser l'incertitude des scénarios d'émissions futures et des modèles climatiques. Sachant que le nombre de modèles augmente rapidement et peut poser des problèmes techniques liés au stockage des données et au temps de calcul, de nouvelles méthodes de sélection des MCG ont été mises au point et sont présentées dans cette annexe. Celles-ci visent à sélectionner un sous-ensemble de MCG qui représente adéquatement la quasi-totalité de l'ensemble complet et de son incertitude.

Il existe plusieurs méthodes de sélection d'ensembles de MCG, allant de l'élimination de quelques modèles ayant d'importants biais (valeurs aberrantes) à la combinaison optimale de modèles, et chacune demande un investissement de temps et de ressources. Cette annexe est donc plus pertinente pour les praticiens qui ont le temps et les ressources nécessaires pour réaliser des analyses plus poussées.

Bien que la présente discussion s'intéresse surtout aux MCG, certains concepts de sélection s'appliquent aussi aux trajectoires de concentration représentatives (RCP) et à d'autres modèles (MCR et modèles hydrologiques).

C.1 Besoins en matière de sélection

La sélection optimale de MCG dépend des besoins de l'évaluation. Certaines évaluations requièrent de ne garder que le meilleur et le pire cas. D'autres peuvent plutôt demander un petit nombre de projections, afin d'analyser une tendance centrale. L'évaluation doit également tenir compte d'éventuelles contraintes pratiques, dont le temps de traitement.

C.2 Ensembles de MCG – Principaux concepts

Les concepts suivants soulignent les principes de sélection d'un ensemble.

- Il existe de nombreux MCG. Le nombre de modèles de changement climatique augmente sans cesse. Par exemple, la prochaine génération CMIP est estimée être environ 10 fois plus importante que la génération actuelle (Eyring *et al.*, 2016).
- Certains modèles sont aberrants. Dans la projection de changements hydrologiques, certains modèles climatiques se démarquent de l'ensemble (en raison de biais importants, en surestimation ou sous-estimation) et sont la source d'une importante fraction de l'incertitude (Gao *et al.*, 2019; Her *et al.*, 2019; Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017).

- Certains modèles sont similaires. Il arrive souvent que les MCG d'un ensemble aillent des composantes en commun (Knutti *et al.*, 2013; Sanderson *et al.*, 2015). Cette similarité peut produire des projections similaires et le praticien doit en tenir compte lorsqu'il sélectionne un ensemble qui représente suffisamment l'incertitude et en interprète les statistiques.
- Certains MCG représentent mieux le climat observé. Les modèles n'ont pas tous la même capacité de représenter le climat observé (IPCC, 2013) et les processus hydrologiques lorsqu'ils sont couplés à des modèles hydrologiques (Giuntoli *et al.*, 2018).
- Les MCG qui représentent le mieux le climat observé ne seront pas forcément meilleurs pour le climat futur. Le fait que le modèle représente mieux le climat observé ne garantit pas la validité des projections (Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017; Klein et Hall, 2015).
- La performance dépend des variables, de la géographie et de l'échelle temporelle. Aucun modèle n'a démontré sa supériorité par rapport aux autres pour tous les nombreux diagnostics, indices ou échelles temporelles (Charron, 2016; Wang *et al.*, 2018; Wilby, 2010). Par exemple, les modèles qui performant bien pour la température historique (une composante importante pour les processus de la neige) peuvent être moins fiables pour la précipitation.
- La couverture des variables d'un modèle d'impact est différente de celle des variables climatiques. Bien qu'un sous-ensemble de MCG puisse couvrir la quasi-totalité de l'incertitude liée aux variables climatiques (p. ex., la précipitation), rien ne garantit que cet ensemble couvrira adéquatement les variables d'impact hydrologique, puisque le processus de transfert du climat à l'hydrologie est complexe et non linéaire (Chen *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018).

C.3 Besoin #1 – Maximiser l'incertitude

Dans certains cas, le praticien peut vouloir connaître les meilleur et pire cas, pour tester la sensibilité ou pour se préparer aux conséquences les plus extrêmes. Cela peut être accompli en maximisant la diversité de modèles (c.-à-d., en choisissant des modèles ayant différentes caractéristiques) à chaque étape de la chaîne de modélisation (Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017; Schaefli, 2015). La sélection du sous-ensemble de MCG représentant les meilleur et pire cas devrait donc se faire le plus tard possible dans la chaîne.

Option de sélection

- Méthode de l'enveloppe – Pour sélectionner un sous-ensemble de modèles, le praticien peut choisir les meilleur et pire cas, si son objectif est de représenter adéquatement toute la gamme des conditions futures possibles pour les indices étudiés (Charron, 2016; Wang *et al.*, 2018).

Cette approche permet de s'assurer avec un plus grand degré de confiance que les modèles choisis engloberont la trajectoire future. Cependant, l'évaluation ne devrait pas avoir un degré de confiance irréaliste, car l'inclusion de tous les modèles disponibles ne garantit pas que toutes les projections hydrologiques possibles sont couvertes (Wang *et al.*, 2018).

C.4 Besoin #2 – Optimiser l'incertitude

Maximiser l'incertitude n'est pas toujours l'approche appropriée pour la prise de décision. Par exemple, il se peut que la maximisation donne lieu à des projections climatiques qui représentent des impacts hydrologiques radicalement différents (p. ex., différentes directions du changement). Le décideur peut plutôt avoir besoin d'un plus petit nombre de résultats qui reflètera tout de même la plus grande partie de l'incertitude de la projection. Par conséquent, le praticien a besoin d'une méthode capable d'optimiser sa compréhension de l'incertitude.

Options de sélection

- Méthodes fondées sur la performance passée – Ces méthodes sélectionnent un sous-ensemble de MCG (ou pondèrent différemment les modèles) en fonction de leur capacité à représenter le climat observé (Wang *et al.*, 2018). Par exemple, le praticien a le choix d'inclure ou d'exclure des modèles sur la base de la crédibilité de leur représentation du débit moyen ou faible (Giuntoli *et al.*, 2018). Le défi lié à cette méthode est qu'un modèle climatique qui produit des simulations passées relativement précises ne produira pas nécessairement des projections à long terme tout aussi précises (Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017), quoiqu'il soit possible de cibler les processus qui dictent l'évolution à long terme du climat (Klein et Hall, 2015). Des études ont proposé des méthodes de sélection qui combinent à la fois la performance dans le passé récent et un critère de couverture de l'enveloppe de changement climatique (Wang *et al.*, 2018).
- Élimination des projections aberrantes – Quelques études se sont penchées sur la façon dont l'incertitude varie selon les modèles climatiques individuels (Gao *et al.*, 2019; Her *et al.*, 2019; Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2017). Ce type d'analyse permet de mieux déterminer les modèles qui contribuent le plus à l'incertitude d'un ensemble. Ces modèles irréalistes (les plus différents) peuvent être éliminés pour réduire l'incertitude dans le sous-ensemble de MCG (Maraun et Widmann, 2018).

C.5 Besoin #3 – Composer avec les contraintes pratiques

Le besoin d'accroître l'efficacité de la chaîne de modélisation en regard de contraintes pratiques, dont le temps et le budget alloué, est une autre raison de sélectionner un sous-ensemble de MCG. Bien qu'il soit recommandé d'utiliser autant de modèles climatiques (crédibles) que possible, les coûts d'extraction, de stockage et de traitement de grands ensembles sont parfois prohibitifs (Chen *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). Dans la pratique, il n'est pas rare pour les études d'impact de compter sur un sous-ensemble de modèles climatiques, pour des raisons de faisabilité (Charron, 2016; Wang *et al.*, 2018). Le but de la sélection dans ce cas-ci est d'avoir un plus petit nombre de modèles.

Si possible, la sélection devrait être faite en fonction d'indices climatiques qui représentent les principaux facteurs de changement du modèle d'impact (hydrologie, production d'énergie et/ou valeur de l'actif), plutôt que des indices tels que la précipitation ou la température annuelle moyenne (Chen *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2019). Dans le cas de débits élevés, par exemple, un tel indice pourrait être la précipitation maximale sur 72 heures. Si la détermination de ces indices représentatifs peut exiger des analyses approfondies des données passées, elle augmente toutefois la probabilité d'obtenir un ensemble adéquat de modèles climatiques.

Options de sélection

- Toute méthode décrite précédemment (enveloppe, performance passée, élimination des résultats aberrants)
- Méthodes de regroupements/sélection par grappes – Une autre approche de la sélection de MCG consiste à minimiser la répétition entre les modèles similaires en les regroupant et en choisissant un modèle représentatif dans chaque groupe. Cela est réalisé en calculant les différences entre tous les modèles quant aux variables étudiées (Casajus *et al.*, 2016; Sanderson *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018).

Annexe D – Transférabilité des données et des résultats

Le praticien peut avoir besoin de transférer l'information d'une situation ou d'un projet à un autre. Comme les évaluations de l'impact du changement climatique se font au moyen d'une chaîne de modélisation, il peut y avoir transfert d'information à différentes étapes de la chaîne, c.-à-d., l'information climatique (p. ex., données et projections climatiques) et l'information hydrologique (p. ex., débits en climat présent, projections hydrologiques futures). Le praticien peut vouloir savoir si les résultats d'études réalisées dans une autre région peuvent être appliqués à son bassin versant (transférabilité entre bassins versants). Aussi, s'il compte utiliser les sorties de modèles d'impact globaux, le praticien voudra savoir si les résultats peuvent être transférés à partir de l'échelle spatiale du modèle d'impact (transférabilité entre résolutions spatiales). Enfin, s'il réalise ses propres analyses, il voudra peut-être savoir si un modèle calé durant des années humides donne de bons résultats pour des années sèches (transférabilité entre périodes temporelles).

Tout compte fait, le praticien doit utiliser la meilleure information disponible et comparer de façon critique différents résultats et données pour savoir s'ils sont transférables à un bassin versant particulier. Il doit être conscient des limites potentielles du transfert d'information. Cette annexe examine les facteurs à prendre en considération.

D.1 Transférabilité entre bassins versants

D.1.1 Quel est l'enjeu ?

Le praticien peut devoir ou vouloir transférer l'information d'un bassin versant à un autre. Bien que plusieurs études d'impact du changement climatique reposent sur des projections à l'échelle du bassin versant (Schaepli, 2015), elles ne sont pas forcément utiles pour une étude située dans une autre région. Le manque d'observations hydrologiques fiables est un problème mondial en raison des coûts et de la logistique associés aux réseaux de stations d'observation. Ainsi, la plupart des bassins versants, dans toutes les régions climatiques, demeurent non jaugés (Maréchal et Holman, 2004). Même pour les bassins versants jaugés, il est nécessaire de faire des prévisions non seulement à l'exutoire du bassin, mais aussi à certains emplacements au sein du bassin (Hunukumbura *et al.*, 2012).

Cependant, le transfert de projections ou de résultats climatiques ou hydrologiques d'une région à une autre pose un défi, puisque les paramètres des modèles sont calés au moyen de facteurs climatiques et physiographiques uniques (Schaepli, 2015). Même dans de petites

régions, l'interdépendance du climat, de l'hydrologie et de la production d'énergie peut varier fortement (Schaepli, 2015; Wilby, 2010). Par exemple, la relation entre la hausse des températures et le cycle hydrologique peut différer considérablement d'une région à une autre (Hattermann *et al.*, 2018; Schaepli, 2015). Dans certaines régions, les hausses de température et de radiation peuvent intensifier l'évapotranspiration et réduire la disponibilité en eau, tandis que dans d'autres, elles peuvent intensifier la précipitation plutôt que l'évapotranspiration et accroître la disponibilité en eau (Hattermann *et al.*, 2018). Des tendances contraires peuvent même se développer au sein d'un même bassin (Hattermann *et al.*, 2018). Même si le modèle hydrologique a été calé à l'exutoire du bassin versant, il se peut que les paramètres du modèle hydrologique ne soient pas transférables aux sous-bassins internes non jaugés (Hunukumbura *et al.*, 2012).

D.1.2 Facteurs à prendre en considération

Avant de transférer l'information d'un bassin versant à un autre, il est important de considérer non seulement la similarité des processus climatiques et hydrologiques du bassin, mais aussi le degré de flexibilité de la méthode ou du modèle. Les facteurs ci-dessous peuvent servir de guide (Kour *et al.*, 2016, Schaepli, 2015, Hattermann *et al.*, 2018, Hunukumbura *et al.*, 2012),

Dans quelle mesure la physiographie et le climat sont-ils similaires ?

- Latitude et proximité spatiale
- Altitude et topographie
- Proximité à des plans d'eau
- Saisonnalité climatique
- Type de précipitation (p. ex., neige)

Dans quelle mesure les caractéristiques et les processus du bassin versant sont-ils similaires ?

- Taille du bassin versant
- Topographie (p. ex., pente)
- Géologie
- Utilisation des terres/urbanisation
- Écozone/végétation
- Stockage de l'eau naturel et artificiel
- Rôle des eaux souterraines
- Comportement saisonnier du bilan hydrique
- Présence de glaciers ou d'accumulation de neige
- Hétérogénéité du bassin versant

TROQUER LES PARAMÈTRES SPATIAUX POUR LES PARAMÈTRES TEMPORELS DANS LES ÉTUDES D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

On peut dresser un parallèle entre le transfert de paramètres temporels et de paramètres spatiaux (Coron *et al.*, 2012). Il s'agit d'une approche qui se pratique de plus en plus pour l'évaluation des implications hydrologiques du changement climatique anthropique (Patil et Stieglitz, 2015). Par exemple, Singh *et al.* (2011) ont évalué la capacité d'extrapoler les paramètres (pour le changement climatique) en les transférant à d'autres bassins versants dans des zones climatiques plus chaudes (Coron *et al.*, 2012). Selon Merz *et al.* (2011), les variations des paramètres, dans le temps et dans l'espace, sont comparables. Enfin, Patil et Stieglitz (2015) suggèrent qu'il faut poursuivre la recherche pour adéquatement comparer des approches de transfert de paramètres spatiaux et temporels.

D.2 Transférabilité de résolutions spatiales

D.2.1 Quel est l'enjeu ?

Le praticien doit transformer l'information d'une résolution spatiale à une autre, car les évaluations de l'impact du changement climatique sont souvent réalisées dans des contextes régionaux, tandis que la plupart des analyses hydrologiques portent sur des domaines spatiaux plus grands (Her *et al.*, 2019).

Toutefois, le transfert des projections/résultats climatiques ou hydrologiques d'une résolution spatiale à une autre présente un défi, car les analyses à grande échelle ne prennent pas en compte les processus détaillés, et les impacts localisés ne seront peut-être pas bien représentés (Her *et al.*, 2019). Au départ, le but premier des MCG était d'évaluer le changement global, et ce n'est que récemment qu'ils ont commencé à servir à éclairer les décisions en matière de mesures d'adaptation à l'échelle régionale et locale (Wilby, 2010).

Par exemple, les processus liés aux pentes (p. ex., infiltration, écoulement de surface) sont plus importants dans les petits bassins versants, tandis que les canaux d'écoulement et l'écoulement souterrain peuvent contrôler l'hydrologie globale de grands bassins versants (Her *et al.*, 2019). De plus, l'homogénéité peut être raisonnablement présumée pour le flanc d'une colline, alors qu'un grand bassin versant présente habituellement une hétérogénéité considérable (Her *et al.*, 2019). Les réponses hydrologiques des différentes régions d'un grand bassin versant risquent d'être mélangées et réduites en raison de processus plus lents dans les terres et les canaux d'écoulement (Her *et al.*, 2019).

D.2.2 Facteurs à prendre en considération

Avant de transférer l'information d'une échelle spatiale à une autre, il est important de considérer les différences entre les processus climatiques et hydrologiques. Les facteurs ci-dessous peuvent servir d'exemples (Her *et al.*, 2019; Wilby, 2010).

- Quels sont les processus dominants ?
- Processus hydrologiques dominants (p. ex., pentes versus canaux d'écoulement)
- Rapport avec l'échelle des processus atmosphériques (p. ex., orages)
- Homogénéité du bassin versant
- Temps de réponse (p. ex., influence des eaux souterraines)

Il existe des fonctions de transfert empiriques (en supposant des fonctions de distribution indépendantes de l'échelle et des paramètres de distribution régionalisés) utilisées pour transférer des paramètres globaux aux échelles régionales; cependant, ces fonctions ont dégagé des résultats mitigés (Samaniego *et al.*, 2010, 2017).

D.3 Transférabilité des périodes temporelles

D.3.1 Quel est l'enjeu ?

Le praticien peut vouloir transformer l'information d'une période temporelle à une autre. Il s'agit d'un enjeu important dans le contexte des études d'impact du changement climatique, car les modèles climatiques et hydrologiques sont développés pour des conditions observées, puis appliqués aux conditions futures (Coron *et al.*, 2012; Schaefli, 2015). Les fluctuations du climat historique peuvent aussi poser problème si le débit est simulé pour une période différente de celle qui a été utilisée pour le calage (Coron *et al.*, 2012). Cette situation, où le calage du modèle est effectué sur certaine une période, puis extrapolé vers une autre, survient également pour la prévision, ainsi que lors de la conception et de la gestion d'un réservoir (Coron *et al.*, 2012; Maréchal et Holman, 2004).

Cependant, le transfert des résultats/projections climatiques ou hydrologiques d'une période à une autre comporte des défis, car les paramètres optimaux du modèle varient dans le temps. Comme le soulignent Coron *et al.* (2012), de nombreux auteurs ont observé une dégradation de la performance du modèle (c.-à-d. erreurs plus grandes) après le transfert d'ensembles de paramètres entre des périodes climatiques contrastées. Par exemple, les valeurs des paramètres peuvent varier selon les saisons en raison de différences dans les processus hydrologiques dominants qui contrôlent la formation du ruissellement (Coron *et al.*, 2012). Ainsi, le calage sur un climat plus humide (plus sec)

que le climat utilisé pour la validation entraîne une surestimation (sous-estimation) du ruissellement simulé moyen (Coron *et al.*, 2012; Motavita *et al.*, 2019). Le risque d'un transfert insatisfaisant de l'information d'une période temporelle à une autre peut donner lieu à un excès de confiance (Motavita *et al.*, 2019).

La dépendance des paramètres au climat a été étudiée au moyen du test différentiel par échantillons séparés (*differential split-sample test, DSST*), qui consiste à choisir des périodes de calage et de validation en fonction de leurs différences climatiques (Coron *et al.*, 2012). En ce qui a trait au succès du transfert de paramètres entre différentes périodes temporelles, Coron *et al.* (2012) soulignent une absence de consensus dans la littérature et postulent que les résultats varient d'un bassin versant à un autre.

D.3.2 Facteurs à prendre en considération

Avant de transférer l'information d'une période temporelle à une autre, il est important de considérer la similarité entre les deux périodes. Les facteurs ci-dessous peuvent servir de guide (Coron *et al.*, 2012; Motavita *et al.*, 2019).

Comment le modèle a-t-il été calé ?

- Longueur de la période observée
- Disponibilité et qualité des données (p. ex., données manquantes)
- Diversité de conditions climatiques et hydrologique

Dans quelle mesure les deux périodes sont-elles similaires ?

- Conditions climatiques
- Processus hydrologiques dominants (p. ex., modification saisonnière du bilan hydrique souterrain)
- Caractéristiques du bassin versant (p. ex., modification saisonnière de la végétation)

D.4 Transférabilité de résolutions temporelles

Les hydrologues ont largement étudié la dépendance temporelle des modèles hydrologiques (Jie *et al.*, 2018; Reynolds *et al.*, 2017). Il a été établi que la résolution temporelle des données observées joue un rôle crucial dans la détermination des paramètres, la performance de la prévision et l'applicabilité des modèles hydrologiques (Jie *et al.*, 2018). Dans plusieurs régions, les observations hydrologiques ne sont disponibles que pour des pas de temps plus longs (p. ex., quotidiens), tandis que les applications du modèle requièrent parfois des résolutions temporelles plus fines (p. ex., aux 6 h; Jie *et al.*, 2018). Il est recommandé au praticien de rechercher de l'information climatique et hydrologique ayant une résolution temporelle semblable à celle de son application.

Annexe E – Validation de produits climatiques

Cette annexe fournit au praticien une approche globale pour évaluer l'adéquation de produits climatiques (données de stations météorologiques, observations sur grille, réanalyses, simulations climatiques et scénarios climatiques) et déterminer si un produit climatique convient à la chaîne de modélisation de la valeur.

La [Section E.1](#) expose les concepts généraux et fournit des exemples spécifiques de l'approche, la [Section E.2](#) porte sur ses limites, la [Section E.3](#) en propose un examen détaillé et la [Section E.4](#) fournit plusieurs exemples.

E.1 Concepts généraux

L'approche s'appuie sur l'idée voulant qu'un produit climatique, pour être adéquat à la modélisation hydrologique, doive respecter certains critères lorsque comparé à une base ou un produit de référence. Ce concept devrait être appliqué à tout produit climatique avant l'intégration dans un modèle hydrologique. En effet, les modèles hydrologiques utilisés dans la chaîne de modélisation doivent être calés sur des débits observés, d'où l'importance d'avoir des intrants de qualité pour produire une sortie acceptable. De plus, si les forces et les limites du produit climatique sont bien comprises, l'interprétation des résultats de la simulation hydrologique en sera facilitée (Krysanova *et al.*, 2018). Ce processus est habituellement considéré comme une évaluation diagnostique (Maraun et Widmann, 2018).

Maraun et Widmann (2018) décrivent le climat régional en analysant les aspects marginaux, temporels, spatiaux et multivariés, ainsi que les variations saisonnières et spatiales. À cet égard, l'approche repose sur une multitude d'indices visant à caractériser la complexité du climat. Pour en évaluer la performance, le produit climatique est comparé à une base de référence fixe en regard des indices climatiques. Les variables servant d'intrants au modèle hydrologique – habituellement la température minimale et maximale, ainsi que la précipitation – doivent donc être validées avec l'approche.

Cette approche globale est bien adaptée aux décisions d'affaires qui exigent une grande attention aux détails. Selon l'expertise du praticien, des parties de l'approche peuvent aussi servir à éclairer d'autres décisions d'affaires.

Les utilisations spécifiques de l'approche comprennent l'évaluation et la comparaison de la performance des éléments suivants :

- 1) Données observées sur grille et réanalyses versus observations
- 2) Multiples simulations post-traitées de modèles climatiques
- 3) Multiples générateurs de conditions météorologiques

L'approche ne devrait pas être utilisée pour évaluer et comparer la performance de simulations climatiques brutes. Voir Maraun et Widmann (2018) à cet égard.

E.2 Limites

Les limites de la validation suggérée sont les suivantes.

- La validation des produits climatiques peut ne pas être suffisante pour évaluer la convenance de la chaîne de modélisation de la valeur. Il se peut que la validation hydrologique présentée dans l'**Annexe G** – Validation de simulations hydrologiques soit aussi nécessaire (voir l'exemple dans Chen *et al.*, 2019).
- Le choix du seuil d'adoption/élimination d'un produit climatique est laissé au jugement du praticien. Voir Maraun et Widmann (2018) pour en savoir plus sur la pertinence des tests de signification.
- L'approche se limite à une validation climatique, ou plus précisément aux produits climatiques qui sont censés représenter au plan climatique la base de référence climatique, et non le comportement au jour le jour (voir Comportement au jour le jour dans le glossaire).
- Elle est limitée par la disponibilité de la base de référence climatique pour la région étudiée.
- Elle est aussi limitée par la qualité et la fiabilité de la base de référence climatique. Comme mentionné dans la **Section 4.1** – Base de référence climatique, la base de référence est certainement sujette à des erreurs et à des sources d'incertitude.
- Pour la première utilisation spécifique – données observées sur grille et réanalyses versus observations –, l'approche est limitée par la présence de stations météorologiques indépendantes (c.-à-d., certaines stations n'ayant pas été utilisées pour produire les observations sur grille ou la réanalyse).

E.3 Méthodes

E.3.1 Définir la base de référence, l'échelle spatiale et la période

La première étape consiste à déterminer une base de référence appropriée pour la validation. La base de référence appropriée pour les deuxième et troisième utilisations spécifiques – multiples simulations post-traitées de modèles climatiques et multiples générateurs de conditions météorologiques – est la base de référence mentionnée dans la [Section 4.1](#) – Base de référence climatique. Pour la première utilisation spécifique, la base de référence correspond aux stations météorologiques indépendantes (c.-à-d., les stations non utilisées pour produire les observations sur grille ou la réanalyse). Cependant, ces stations sont parfois inexistantes ou indisponibles et, le cas échéant, la validation du produit climatique ne peut être effectuée.

Le praticien doit aussi choisir une échelle spatiale : aux stations météorologiques, aux points de grille ou au bassin versant. La décision dépendra du modèle hydrologique – global ou distribué – et de la disponibilité des données.

La base de référence et le produit climatique devraient utiliser la même période temporelle (années concomitantes) pour réaliser la validation, afin d'éviter des incohérences dues à des faibles cycles de variabilité naturelle et à un signal de changement climatique.

E.3.2 Valider les produits climatiques

Comme mentionné dans la [Section E.1](#), la validation compare les caractéristiques (indices, indicateurs) de certaines variables obtenues d'un produit climatique et celles obtenues d'un jeu de données de référence (p.ex. la base de référence). Ces caractéristiques reposent sur des propriétés statistiques clés des variables à l'étude, dans le but de vérifier si le produit climatique reproduit adéquatement les statistiques de la base de référence pour ces indices jugés importants par le praticien. Il faut aussi vérifier des statistiques générales, comme les moyennes annuelles et la variabilité interannuelle de ces moyennes, pour s'assurer que le comportement général des variables d'un produit climatique est similaire à celui de la base de référence. Les profils (ou cycles) annuels moyens des variables à une échelle temporelle donnée (quotidienne, hebdomadaire, mensuelle, etc.) sont d'autres indices généraux dont il faut tenir compte; par exemple, l'échelle temporelle du modèle hydrologique utilisé revêt un intérêt particulier. De plus, il est également important d'analyser la variabilité des cycles au cours des années de la période étudiée. La [Section E.3.3](#) énumère d'autres indices particuliers pour la modélisation hydrologique.

La validation du produit climatique comporte les trois étapes ci-dessous : validation générale, validation de tous les indices considérés pertinents et analyse approfondie. Un jeu de données simulées qui ne dégage pas une performance adéquate pour un indice climatique donné possède une limitation et ne devrait pas être utilisé pour prédire le futur de cette propriété climatique.

1. Validation générale

La validation générale s'applique à toutes les variables climatiques étudiées, soient habituellement la température minimale et maximale et la précipitation, pour la modélisation hydrologique. Pour une variable X donnée, Xobs représente les valeurs de la base de référence et Xsim représente les valeurs du produit climatique. Le tableau ci-dessous indique les principaux indicateurs d'intérêt pour la validation générale.

Tableau E1 – Indicateurs présentant un intérêt, dénomination et exemples pour la validation générale

Indicateurs d'intérêt	Dénomination	Exemple pour une base de référence de 30 ans
Moyennes annuelles (MA)	MA-Xobs, MA-Xsim	Moyenne annuelle des 30 ans (30 valeurs) de Xobs et Xsim
Moyennes au fil des ans pour une échelle temporelle donnée (T) – habituellement une journée, une semaine ou un mois (MT)	MT-Xobs, MT-Xsim	T = Mois; moyennes mensuelles des 360 mois (30 ans x 12 mois = 360 valeurs) de Xobs et Xsim
Min. et max. de Xobs et Xsim (Tmin et Tmax) avec un pas de temps T	TMin-Xobs, TMin-Xsim, TMax-Xobs, TMax-Xsim	T = Mois; minimum et maximum de Xobs et Xsim au cours d'un mois pour chacun des 360 mois (30 ans x 12 mois = 360 valeurs)

- 1.1. Comparer la moyenne des moyennes annuelles MA-Xobs et MA-Xsim pour détecter la présence d'un biais.
- 1.2. Comparer l'écart-type de MA-Xobs et de MA-Xsim pour détecter la présence d'un biais dans la variabilité interannuelle.
- 1.3. Tracer la série temporelle.
 - Tracer Xobs & Xsim en fonction du temps.
 - ◆ Y a-t-il des problèmes dans les données ?
- 1.4. Tracer la série temporelle annuelle.
 - Tracer MA-Xobs et MA-Xsim en fonction du temps. Voir l'exemple dans la **Figure E1**.
 - Pour la première utilisation spécifique :
 - ◆ Y a-t-il des tendances dans MA-Xobs et MA-Xsim ? Si oui, concordent-elles ?
 - ◆ S'il y a une tendance dans MA-Xobs ou MA-Xsim, il faut en examiner les causes possibles. Voir l'**Annexe B** – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique.
 - ◆ S'il y a des tendances dans MA-Xobs et MA-Xsim qui ne correspondent pas et que la différence ne peut être expliquée par leurs causes, un examen plus approfondi est nécessaire.

- Pour la deuxième utilisation spécifique :
 - ◆ Y a-t-il des tendances dans MA-Xobs ? Quelles en sont les causes ?
 - ◆ En raison de la variabilité naturelle, les tendances dans MA-Xsim doivent être évaluées au moyen de l'approche par ensemble (Maraun et Widmann, 2018).
 - Pour la troisième utilisation spécifique :
 - ◆ Y a-t-il des tendances dans MA-Xobs ? Quelles en sont les causes ?
 - ◆ Si un seul jeu de données généré est disponible, l'examen des tendances dans MA-Xsim peut se faire en suivant l'approche de la première utilisation spécifique. Si plusieurs jeux de données générés sont disponibles, l'approche par ensemble peut être utilisée (deuxième utilisation spécifique). L'approche par ensemble minimisera les effets de la variabilité stochastique pour les fins de l'analyse des tendances.
- 1.5 Tracer les cycles annuels (moyenne climatique).
- Tracer la moyenne, le minimum et le maximum de MT-Xobs et MT-Xsim en fonction de T (voir l'exemple pour T = un mois dans la [Figure E2](#)).
 - Le cycle est-il bien représenté par la simulation ?
 - La variabilité du cycle est-elle bien représentée ?
- 1.6 Tracer les cycles annuels (min et max).
- Tracer TMin-Xobs et TMin-Xsim en fonction de T (semblable au graphique du point 1.5).
 - Tracer TMax-Xobs et TMax-Xsim en fonction de T (semblable au graphique du point 1.5).
 - ◆ La variabilité du cycle est-elle bien représentée ?
- 1.7 Tracer les schémas spatiaux des valeurs quotidiennes.
- Tracer des cartes de valeurs quotidiennes pour la région étudiée. Si des jeux de données sur grille sont utilisés, il vaut la peine de tracer ces graphiques avant l'agrégation à la station météorologique ou à l'échelle du bassin versant.
 - Tracer des cartes de min-Xobs et max-Xobs, et de min-Xsim et max-Xsim. Tracer des cartes de Xobs et Xsim pour tout autre jour.
 - Y a-t-il des schémas spatiaux qui ne ressemblent pas à des schémas météorologiques ? Voir la [Figure E3](#).
- 1.8 Tracer la moyenne annuelle en fonction du temps.

2. Validation des simulations pour tous les indices climatiques à l'étude

À cette étape-ci, tous les indices jugés pertinents par le praticien sont examinés. La [Section E.3.3](#) énumère des indices climatiques utiles pour les fins de la modélisation hydrologique.

Les analyses de cette deuxième étape, bien qu'elles soient réalisées de manière semblable à celles de la première étape, sont plus poussées en ce qu'elles examinent plus en détail les propriétés climatiques mesurées par un éventail plus large d'indices climatiques.

Voici un exemple de la proportion de jours humides au pas de temps mensuel ($T=M$) qui devrait être reproduit pour tous les indicateurs pertinents.

Tableau E2 – Indicateurs d'intérêt, dénomination et exemple de la validation de simulations pour tous les indices climatiques à l'étude

Indicateurs d'intérêt	Dénomination	Exemple pour une base de référence de 30 ans
Proportion de jours humides par mois	JhumM-Xobs, JhumM-Xsim	T = Mois; proportion de jours humides pour les 360 mois (30 ans x 12 mois = 360 valeurs) de Xobs et Xsim

- 2.1. Comparer la moyenne des moyennes annuelles JhumM-Xobs et JhumM-Xsim pour détecter la présence d'un biais.
- 2.2. Comparer l'écart-type de JhumM-Xobs et de JhumM-Xsim pour détecter la présence d'un biais dans la variabilité interannuelle.
- 2.3. Tracer la série temporelle annuelle.
 - Tracer JhumM-Xobs et JhumM-Xsim en fonction des années de la période (12 mois = 12 graphiques).
- 2.4. Tracer le cycle annuel.
 - Tracer la moyenne, le minimum et le maximum de JhumM-Xobs et de JhumM-Xsim en fonction de T.
- 2.5. Tracer tout autre type de graphique pertinent pour les indicateurs.

Les résultats peuvent être tracés dans un graphique et/ou compilés au moyen de cartes thermiques (voir la [Figure E4](#)) et de mesures de performance telles que l'erreur quadratique moyenne, l'indice de réduction de la variance ou la métrique de validité de l'ajustement de Kuiper (Diaconescu *et al.*, 2018).

Si la performance d'un jeu de données simulé n'est pas adéquate pour l'indice climatique, cela indique une limite avec ce jeu de données. Il faudra l'utiliser avec prudence s'il s'agit d'un indice qui revêt un intérêt particulier dans la chaîne de modélisation.

3. Réaliser une analyse approfondie pour les première et deuxième utilisations spécifiques.

Cette étape prend en compte les éléments structuraux des modèles climatiques utilisés pour obtenir les produits climatiques. Maraun et Widmann (2018) proposent et démontrent plusieurs analyses approfondies portant par exemple sur des thèmes liés à la valeur ajoutée des MCR.

E.3.3 Définir les indices climatiques

Maraun et Widmann (2018) soulignent que « les indices doivent être propres à l'utilisateur et bien choisis pour en dériver de l'information pertinente dans un contexte donné » et fournissent quelques points de départ pour dresser une liste. Dans le contexte de l'évaluation de la valeur des actifs, cette liste peut varier selon le type d'actif (réservoir, au fil de l'eau), la taille du bassin versant, le type de modèle hydrologique, le type de revenus (énergie, puissance, services ancillaires), etc.

La liste ci-dessous fournit des indices climatiques généralement d'intérêt pour la modélisation hydrologique (Fournier *et al.*, 2015; Fournier et Merleau, 2016), comme autre point de départ. Le praticien peut aussi utiliser la base de référence climatique et l'analyse de sensibilité présentée dans l'**Annexe H** – Analyse de sensibilité pour déterminer ses propres indices ou en privilégier certains de la liste suivante.

Précipitation

- Intensité de la précipitation : quotidienne, mensuelle, saisonnière et annuelle. Pour le traitement mensuel, saisonnier et annuel, les moyennes et les accumulations sont pertinentes. Pour les quantités saisonnières et annuelles, moyenne en fonction des années.
- Proportion de jours secs et humides : quotidienne, mensuelle, saisonnière et annuelle. Pour les quantités saisonnières et annuelles, proportion en fonction des années.
- Séquence de jours secs et humides par mois, saison et année. Pour les quantités saisonnières et annuelles, proportion en fonction des années.
- Profils annuels au pas de temps quotidien des probabilités de transition entre les jours secs (s) et les jours humides (h), avec différents décalages.
 - ◆ Décalage d'un jour : s | s; s | h; h | s; h | h (p. ex., s | h : jour sec si le jour précédent est humide)
 - ◆ Décalage de deux jours : s | s, s; s | s, h; etc.
 - ◆ Décalage de trois jours : s | s, s, s; s | s, s, h; etc.

Températures

- Température minimale (T_{min}) et température maximale (T_{max}), ainsi que la moyenne de T_{min} et T_{max} (T_{moy}) et amplitude thermique quotidienne ($ATQ = T_{max} - T_{min}$).
 - ◆ Sans condition quant à la présence de précipitation
 - ◆ Distributions (p. ex., boîte à moustaches) : mensuelles, saisonnières et annuelles
 - ◆ Profils quotidiens pour la moyenne et l'écart-type
 - ◆ Moyenne et écart-type en fonction du temps : saisonniers et annuels
 - Avec des conditions quant à la présence ou non de précipitation (s ou h)
 - ◆ Distributions (p. ex., boîte à moustaches) : mensuelles, saisonnières et annuelles
 - ◆ Profils quotidiens pour la moyenne et l'écart-type
 - ◆ Moyenne et écart-type en fonction du temps : saisonniers et annuels
 - Selon T_{min}
 - ◆ Nombre de jours de gel : mensuel, saisonnier et annuel en fonction des années
 - ◆ Nombre de vagues de froid en fonction des années
 - Selon T_{max}
 - ◆ Nombre de canicules en fonction des années

Dépendances temporelles des variables et dépendances entre variables au pas de temps quotidien

Des corrélations sont utilisées pour étudier les diverses dépendances, une fois que les données à un pas de temps déterminé ont été normalisées (centrées et mises à l'échelle) selon les deux approches suivantes.

- Sans condition quant à la présence de précipitation
 - ◆ Temporel :
 - ◆ $\text{Corr} [X(t-h), X(t)]$ pour $X = T_{min}, T_{max}, T_{moy}$ et ATQ ; $h = 1, 2, \dots$
 - ◆ Entre variables :
 - ◆ $\text{Corr} [X(t), Y(t)]$ pour $X = T_{min}, Y = T_{max}$ et $X = T_{moy}, Y = ATQ$
- Avec des conditions quant à la présence ou non de précipitation (s ou h), avec des variables quotidiennes normalisées
 - ◆ Temporel
 - ◆ $\text{Corr} [X(t-h), X(t)]$ pour $X = T_{min}, T_{max}, T_{moy}$ et ATQ ; $h = 1, 2, \dots$

- ♦ Entre variables :
 - ♦ $\text{Corr} [X(t), Y(t)]$ pour $X = T_{\min}$, $Y = T_{\max}$ et $X = T_{\text{moy}}$, $Y = \text{ATQ}$
 - ♦ Pour les jours humides seulement, $\text{corr} [X(t), Y(t)]$ pour $X = T_{\min}$, $T_{\max}$, T_{moy} et ATQ ; et $Y = \text{intensité de la précipitation (P) et } \log(P)$.

Dépendance des variables sur différents bassins versants

Corrélation des variables, comme dans la section ci-dessus, entre différents bassins versants/ points de grille

E.4 Exemples

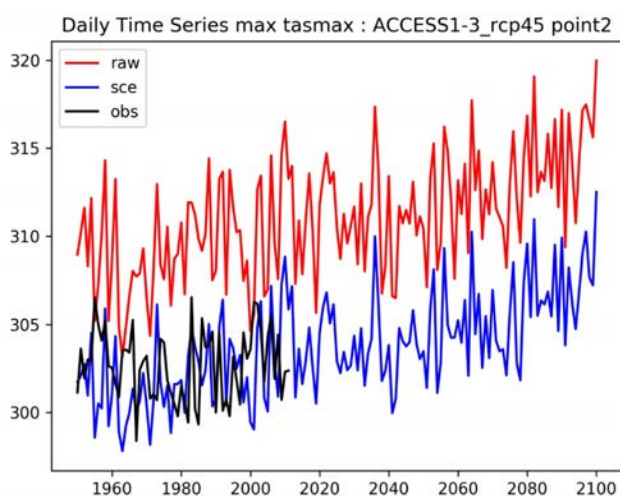


Figure E1 – Exemple de profil annuel pour MA-Xobs et MA-Xsim en fonction du temps. MA-Xsim a été calculée sur une simulation climatique post-traitée. La ligne rouge (brute) représente MA-Xsim calculée sur la simulation brute.

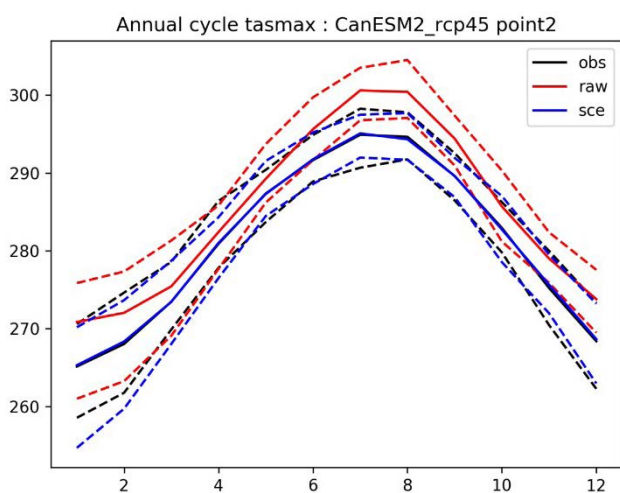


Figure E2 – Exemple de cycle annuel pour la moyenne (climatologie) de MT-Xobs et la moyenne de MT-Xsim. MT-Xsim a été calculée sur une simulation climatique post-traitée. La ligne rouge (simulation brute) représente la MA-Xsim calculée sur la simulation brute. Les pointillés représentent les minimums et maximums.

Annexe F – Sélection et calage d'un modèle hydrologique

Cette annexe passe en revue les considérations nécessaires pour bien choisir et caler un modèle hydrologique pour une étude sur le changement climatique. Les aspects à considérer sont les suivants : le modèle hydrologique en soi (global ou distribué, conceptuel ou physique); le nombre de paramètres et leurs interactions; la période de calage choisie; et la quantité et la qualité des intrants. La méthodologie utilisée pour le choix des paramètres optimaux varie largement en fonction des données disponibles, de la complexité du modèle hydrologique et des outils disponibles pour optimiser les paramètres. Cette annexe explore les facteurs à considérer et propose des lignes directrices générales pour l'adoption de bonnes pratiques permettant d'accroître la robustesse des projections hydrologiques.

F.1 Sélection du modèle hydrologique

F.1.1 Considérations préalables

Les facteurs à considérer pour le choix d'un modèle hydrologique approprié comprennent la portée de l'étude, le type de résultats recherchés (comparaison relative ou valeurs absolues, débits extrêmes – élevés versus faibles –, volumes saisonniers ou annuels moyens, etc.) et l'utilisation prévue des résultats.

F.1.2 Types de modèles hydrologiques et leurs limites

Un simple modèle global bien calé peut réussir à bien représenter certains indices hydrologiques, dont les volumes annuels ou saisonniers. Dans certains cas cependant, un modèle distribué plus complexe sera préférable. Par exemple, si le débit simulé d'une rivière est nécessaire ou si l'étude comporte un changement dans l'utilisation des terres entre la période de référence et la période future, un modèle distribué et physique plus complexe conviendra mieux. Il faut toutefois accepter un compromis entre une approche fondée sur le processus et une approche fondée sur le calage. Les intrants requis pour ces modèles plus complexes, généralement plus nombreux, ne sont pas nécessairement disponibles ou doivent être estimés; ces modèles sont également plus difficiles à mettre en œuvre et sont habituellement fortement paramétrés et difficiles à caler.

Le choix du modèle doit aussi tenir compte des processus hydrologiques dominants du bassin versant étudié. Par exemple, pour un bassin versant dominé par la fonte de la neige, il faudra un module d'accumulation de neige et de fonte capable de simuler adéquatement la complexité du processus hydrologique dominant (Magand, 2014).

La hausse ou la baisse de la fréquence de certains événements hydrologiques peu observés dans le passé doit également être prise en compte. Par exemple, un modèle (ou ses paramètres) n'aura peut-être pas la capacité de reproduire des épisodes de chaleur ou de pluie-sur-neige si ceux-ci sont trop peu fréquents dans les observations historiques.

Il a également été démontré que les équations empiriques utilisées en dehors des conditions pour lesquelles elles ont été établies (p. ex., le climat futur) peuvent parfois surestimer la valeur des différentes composantes du cycle hydrologique, dont l'évapotranspiration (Hajji *et al.*, 2018; Ludwig *et al.*, 2009). Il est donc important d'utiliser diverses périodes de calage et de validation, chacune ayant un éventail de données sur les années humides par rapport aux années sèches, pour produire un ensemble de paramètres plus robuste. Également, il peut être important de considérer l'approche utilisée par le modèle pour simuler divers processus, tel que l'utilisation de l'évapotranspiration dans la modélisation de l'évaporation (Savenije, 2004). Idéalement, le modèle choisi devrait avoir déjà démontré sa capacité à reproduire un juste débit dans un climat changeant (Broderick *et al.*, 2016).

F.2 Calage des paramètres d'un modèle hydrologique

Le processus de calage consiste à estimer les valeurs des paramètres de manière à ce que le modèle hydrologique puisse correspondre à des observations, tel que le ruissellement ou le débit (Kumarasamy et Belmont, 2018).

En règle générale, le calage s'effectue automatiquement au moyen d'un algorithme d'optimisation, où la valeur d'une ou de plusieurs fonctions objectif sera minimisée entre les débits simulés et observés. Traditionnellement, les paramètres optimaux choisis sont ceux qui minimisent la valeur de la fonction objectif. Dans les études d'impacts hydrologiques du changement climatique, les paramètres sont utilisés pour effectuer une extrapolation et sont censés modéliser adéquatement des débits résultant de scénarios climatiques. Donc, pour assurer la robustesse des projections hydrologiques, des facteurs autres que la valeur de la fonction objectif doivent être pris en compte dans le choix des paramètres.

D'autres méthodologies, notamment celles qui cherchent à reproduire les processus hydrologiques, peuvent éclairer le processus d'optimisation. La section suivante examine divers moyens de tirer parti d'informations utiles pendant le processus de calage, ainsi que quelques pistes qui éviteront au praticien de choisir des paramètres optimaux sur la seule base de l'optimisation de la performance. Les nombreux défis posés par la sélection des paramètres sont abordés dans cette section.

F.2.1 Méthodes d'optimisation

Au cours des dernières décennies, de nombreuses solutions ont été proposées pour relever les défis propres au calage dans le cadre d'études d'impact du changement climatique. Les

améliorations aux procédures de calage des modèles hydrologiques peuvent être séparées en deux catégories interconnectées : modification des techniques d'optimisation et recours à des données complémentaires pour le calage. Le premier type ([Section F.2.1.1](#)) comprend des techniques tel que le calage multi-objectifs et l'utilisation de contraintes. Le second type ([Section F.2.1.2](#)) consiste à utiliser des données mesurées complémentaires (évapotranspiration, équivalent en eau de la neige et quantité d'eau dans le sol) dans le processus de calage.

Considération sur les interactions entre paramètres

Indépendamment de leur nature, tous les modèles utilisent plusieurs équations et sont, à un moment ou à un autre, conceptuel (Coron *et al.*, 2011). Par ailleurs, comme tous les paramètres ne peuvent être mesurés, le calage est une étape inévitable dans toute étude hydrologique. L'équifinalité et les interdépendances entre paramètres sont des faits bien connus en hydrologie (p. ex., Kumarasamy et Belmont, 2018). Les défis tels que la dépendance des paramètres du modèle au climat de la période de calage et la faible identifiabilité de la valeur des paramètres (Coron *et al.*, 2011) doivent également être pris en compte. L'examen de la corrélation entre les paramètres et les indices climatiques a démontré que certains paramètres sont beaucoup plus étroitement corrélés avec les indices climatiques que d'autres. Par exemple, Merz *et al.* (2011) ont montré qu'il existe une forte corrélation entre les paramètres de neige et de sol et les conditions climatiques changeantes. Lorsqu'on utilise un modèle hydrologique pour produire des projections hydrologiques du changement climatique, il faut porter une attention particulière aux étapes de calage et de sélection des paramètres.

- Une sélection hiérarchique des paramètres au cours du calage offre un moyen de mieux comprendre l'identifiabilité des paramètres (Kumarasamy et Belmont, 2018) et/ou de mieux reproduire les débits extrêmes (élevés et faibles) (Onyutha, 2019).
- Des paramètres pouvant varier dans le temps offrent quant à eux un moyen d'améliorer la transposabilité du jeu de paramètres, surtout pour les modèles simples ayant peu de paramètres (Zeng *et al.*, 2019).

Intrants et autre information précieuse dans le processus de calage

Typiquement, le calage d'un modèle hydrologique demande minimalement des observations de débit, de température et de précipitation. S'il semble évident de n'utiliser que les meilleures données disponibles avant d'ajuster les paramètres pour obtenir les mesures de performance souhaitées (Kumarasamy et Belmont, 2018), le praticien devrait aussi considérer toute information pertinente au processus de calage. Si des observations (autres que le ruissellement ou le débit) sont disponibles pour tout processus hydrologique simulé par le modèle (p. ex., mesures de neige validant le module d'accumulation de neige et de fonte, équivalent en eau de la neige,

mesures d'évapotranspiration provenant d'instruments sur le terrain ou de données satellitaires, données sur l'humidité du sol, etc.), elles peuvent servir à valider l'identifiabilité des paramètres de ces processus du modèle hydrologique, pourvu qu'elles aient fait l'objet d'un contrôle de qualité. Ce type de données peut aussi servir à limiter le modèle en imposant des contraintes au cours de la procédure d'optimisation (Minville *et al.*, 2014) et ainsi améliorer la robustesse du modèle.

Plusieurs moyens permettant d'incorporer des données supplémentaires au cours de l'optimisation ont fait leurs preuves.

- Gupta *et al.* (1999) ont montré que l'approche de calage multicritères peut permettre de restreindre efficacement l'estimation des paramètres à des plages de valeurs physiquement plausibles, si des observations sur au moins un flux de chaleur approprié et une variable d'état correctement sélectionnée sont disponibles.
- Yapo *et al.* (1998) ont affirmé qu'il est possible d'extraire d'une série temporelle de données mesurées des informations utiles sur le système physique, qui peuvent être employées pour générer des procédures de calage multi-objectif efficaces.
- Yadav *et al.* (2007) ont proposé une méthode qui procure des jeux de paramètres comportementaux pour la prévision du débit dans les bassins non jaugés. La méthode restreint l'espace de paramètres en utilisant des indices hydrologiques, les contraintes étant obtenues au moyen d'une régionalisation des caractéristiques des débits.
- Zhang *et al.* (2008) ont aussi identifié des jeux de paramètres comportementaux au moyen d'indices hydrologiques dans un cadre d'optimisation multi-objectif.
- Bergström *et al.* (2002) et Cao *et al.* (2006) ont démontré que les résultats des modèles, générés avec des mesures autres que le débit, peuvent accroître le degré de confiance quant à la cohérence physique du modèle hydrologique.
- Immerzeel et Droogers (2008) ont proposé une méthode de calage pour un modèle hydrologique conceptuel et distribué dans lequel la modélisation de l'évapotranspiration réelle (ETR) mensuelle est restreinte au moyen de données satellitaires. Ils ont montré qu'avec l'optimisation la plus performante, les valeurs de R² entre l'ETR mensuelle simulée et mesurée dans les sous-bassins augmentent considérablement.
- Khadam et Kaluarachchi (2004) ont indiqué que la prise en compte d'une information qualitative, notamment le coefficient d'efficacité pour les mesures de la nappe phréatique, peut améliorer le calage d'un modèle hydrologique.
- Fleming et Neary (2004) et Bennett et Peters (2004) ont suggéré de restreindre l'espace de recherche des paramètres en fonction de données à base physique. Leur méthode s'appuie sur les types de sol, l'utilisation des terres et d'autres données du système d'information géographique (SIG) pour estimer les valeurs/étendues des paramètres de HEC-HMS. Cela contribue à limiter l'espace de recherche et améliore l'efficacité.

F.2.2 Défis de la sélection de paramètres

Sélection du jeu de paramètres optimaux

Lorsque plusieurs jeux de paramètres sont disponibles, il se peut que le praticien doive en choisir un seul (ou quelques-uns) pour mener l'étude d'impact hydrologique. Cette section examine diverses approches utiles à cette sélection.

- Bien que les métriques hydrologiques standards soient utiles – coefficient d'efficacité du modèle Nash-Sutcliffe (NSE), erreur quadratique moyenne (EQM) –, des indices hydrologiques devraient être utilisés pour faciliter la caractérisation de l'hydrogramme et raffiner l'objectif du projet (Olden et Poff, 2003). Il est également important de garder à l'esprit que les indices hydrologiques les plus importants pour les fins de l'étude pourraient être mieux reproduits par un jeu de paramètres qui n'est pas considéré comme étant optimal en ce qui a trait aux métriques standards. Une inspection visuelle réalisée par un hydrologue d'expérience peut contribuer à identifier le jeu de paramètres convenant le mieux au type d'étude.
- L'utilisation de paramètres régionalisés, ou la régionalisation de variables physiques du bassin versant (Yang *et al.*, 2019), réduit les discontinuités spatiales dans le champ de paramètres (contrairement à une approche stricte par bassin) et pourrait permettre de reproduire des patrons qui correspondront mieux aux caractéristiques climatiques, dont l'aridité (ETP/P) et le ratio de ruissellement (Q/P). Cette approche plus physique peut procurer un degré de confiance plus élevé quant à la robustesse et à la transposabilité du modèle.
- Dans bien des cas, on améliore la performance du modèle hydrologique en moyennant plusieurs simulations (p. ex., Arsenault, Essou et Brissette, 2017; Arsenault, Gatien, Renaud, Brissette et Martel, 2015; Seiller, Anctil et Perrin, 2012), et ce, tant pour un ensemble de plusieurs modèles hydrologiques que pour un ensemble de simulations d'un même modèle produites au moyen de plusieurs jeux de paramètres optimaux. On trouve dans la littérature une variété d'approches pour moyennner des ensembles ou des sous-ensembles de simulations de modèles.
- Bien qu'un calage sur la période entière des données soit possible (Arsenault *et al.*, 2018), une approche par échantillons séparés est souvent utilisée, où le modèle est calé sur une période et validé pour une autre. Le test différentiel par échantillon séparé (*differential split-sample test*, DSST, voir ci-dessous), où l'on choisit délibérément des cycles contrastés au sein de l'ensemble d'observations, permet d'évaluer la robustesse d'un modèle et son potentiel de transposabilité à une période ayant des conditions climatiques différentes.

Klemeš (1986) et Refsgaard *et al.* (2014) donnent plus de détails sur le DSST. Ces études recommandent le DSST pour s'assurer que le modèle hydrologique puisse adéquatement simuler les processus hydrologiques étudiés dans différents climats. Voici la description qu'en donne Klemeš (1986).

« Deux périodes où les valeurs des paramètres climatiques étudiés diffèrent devraient être identifiées dans les observations historiques, par exemple, l'une ayant une précipitation moyenne élevée et l'autre, faible. Si le modèle vise à simuler le débit pour un scénario climatique humide, il devrait être calé sur un segment sec des observations historiques et validé sur un segment humide. S'il vise à simuler le débit pour un scénario climatique sec, ce sera le contraire. En règle générale, le modèle devrait démontrer sa capacité de performer dans la transition requise : de conditions plus sèches à plus humides, ou vice-versa. »

Retour sur la transposabilité des paramètres hydrologiques

On reproche souvent aux modèles hydrologiques leur inadéquation quand ils sont utilisés pour extrapoler (Thirel *et al.*, 2015). La question de la transposabilité est encore plus délicate dans le cas des études d'impact du changement climatique. Dans ce contexte, le calage et la sélection des paramètres du modèle hydrologique ont une importance capitale pour l'intégration des données de changement climatique dans la chaîne de modélisation. Par exemple, comme le suggèrent les résultats de Her *et al.* (2019), les scénarios climatiques et les paramètres du modèle hydrologique devraient être soigneusement sélectionnés pour améliorer la robustesse de l'évaluation hydrologique du changement climatique.

Différents jeux de paramètres d'un modèle calé peuvent dégager des simulations hydrologiques divergentes et entraîner ainsi différentes décisions opérationnelles et conclusions scientifiques. Pour obtenir des résultats hydrologiques fiables, un calage adéquat est donc fondamental (Minville *et al.*, 2014). En effet, même si le calage des observations procure une estimation fiable des paramètres du modèle pour les conditions actuelles, les paramètres estimés peuvent ne pas être représentatifs du comportement du bassin versant dans un climat différent (Singh *et al.*, 2011).

F.3 Calage d'un bassin versant non jaugé

Le calage d'un modèle hydrologique pour un bassin versant non jaugé pose un défi supplémentaire. Nous recommandons au praticien de consulter les travaux de Winsemius *et al.* (2009), Wagener et Montanari (2011) Hrachowitz *et al.* (2013), car ce sujet déborde du champ d'application du Guide.

Annexe G – Validation des simulations hydrologiques

Cette annexe fournit au praticien une approche globale pour l'évaluation de l'adéquation des simulations hydrologiques et de leur robustesse aux fins de la projection du changement climatique. Cette approche l'aidera à déterminer la convenance de la simulation hydrologique pour la chaîne de modélisation d'évaluation de la valeur des actifs. La [Section G.1](#) présente les concepts généraux, la [Section G.2](#) décrit les limites et la [Section G.3](#) fournit une analyse plus détaillée.

G.1 Concepts généraux

L'approche se fonde sur l'idée selon laquelle une simulation qui évalue adéquatement la valeur d'un actif doit respecter certains critères en comparaison à la base de référence. Cette approche est considérée comme étant plus fiable lorsqu'elle est appliquée à l'échelle du bassin versant et supérieure à l'approche par ensemble de simulations où la performance n'est pas prise en compte (Krysanova *et al.*, 2018).

L'approche appuie la vision voulant que : « [...] ce qui importe est la performance du modèle à l'emplacement étudié et au cours de la période correspondant aux observations, et pas que le modèle ait été ou non calé et validé à cet emplacement. Un modèle non calé peut parfois être suffisamment performant, alors que le calage peut causer des problèmes liés au surapprentissage. » (Voir Krysanova *et al.*, 2018.) Cette vision peut être étendue pour considérer que l'approche convient à l'évaluation de simulations hydrologiques effectuées avec tous types de modèles hydrologiques, ainsi qu'aux variables de débit et de ruissellement d'un modèle hydrologique sur grille. Voir la [Section 5.5](#) – Simulations hydrologiques pour en savoir plus sur l'utilisation adéquate de la variable de ruissellement.

Au cours du processus, les simulations hydrologiques sont comparées à la base de référence hydrologique sur la période temporelle de la base de référence hydrologique ([Section 4.2](#)) et doivent respecter des normes minimales de performance et de robustesse. La comparaison doit porter sur plusieurs indices hydrologiques, afin d'illustrer les nombreuses propriétés de la série temporelle hydrologique auxquelles la production hydroélectrique est sensible. L'approche suggérée est fortement fondée sur les travaux de Krysanova *et al.* (2018).

Pour mieux comprendre les forces et les limites de la série temporelle, l'approche devrait être appliquée à toute simulation hydrologique. Cela vaut aussi pour les simulations hydrologiques produites par le praticien, car dans la plupart des cas, la fonction objectif utilisée pour le calage du modèle n'évaluera que la série temporelle hydrologique avec une portée limitée.

L'approche proposée convient bien aux décisions d'affaires qui exigent une grande attention aux détails. Pour d'autres décisions et selon l'expertise du praticien, l'évaluation peut porter sur certaines étapes seulement.

L'approche peut être utilisée spécifiquement pour les tâches suivantes :

- 1) Évaluer la performance d'un modèle hydrologique pour représenter l'hydrologie passée.
- 2) Évaluer la performance d'un modèle hydrologique pour représenter l'hydrologie à des échelles climatiques (p. ex., 30 ans).
- 3) Évaluer la performance de divers jeux de données météorologiques (stations météorologiques, observations sur grille, réanalyses) dans le modèle hydrologique.
- 4) Évaluer la performance de simulations climatiques dans le modèle hydrologique, pour la période de référence.

Remarque : L'évaluation des intrants du modèle hydrologique des points 3 et 4 devrait se faire après la validation des produits climatiques, comme mentionné dans l'[Annexe E](#) – Validation de produits climatiques (Krysanova *et al.*, 2018).

G.2 Limites

Les limites de l'approche sont les suivantes.

- L'approche est limitée par la disponibilité d'une base de référence hydrologique. Les simulations hydrologiques d'un bassin versant non jaugé peuvent quand même être réalisées, mais l'évaluation de leur performance doit s'appuyer sur d'autres méthodes.
- Elle est limitée par la qualité de la base de référence hydrologique et son incertitude. Comme mentionné dans la [Section 4.2](#) – Base de référence hydrologique, la base de référence peut comporter des erreurs et des incertitudes.
- Krysanova *et al.* (2018) ont proposé des seuils minimaux pour représenter la performance, mais ceux-ci ne sont pas spécifiquement conçus pour l'évaluation de la valeur d'actifs. Aussi, « [...] ils devraient être appliqués de façon flexible et pragmatique, car la capacité d'obtenir un certain niveau de performance dépend de la quantité et de la qualité des données disponibles, de la taille du bassin, des impacts anthropiques, des conditions climatiques et du régime hydrologique. » (Voir Krysanova *et al.*, 2018.)
- L'approche recommande de mener un test différentiel par échantillon séparé (DSST) (Klemeš, 1986; Refsgaard *et al.*, 2014) comme moyen d'évaluer à la fois la robustesse du modèle et la performance générale du modèle durant la période de la base de référence hydrologique. Cependant, le praticien doit équilibrer les résultats de ces deux tests. Comme le soulignent Krysanova *et al.*, (2018) « [...] la capacité d'un modèle à conserver une performance stable pour toutes les périodes climatiques (p. ex., au moyen d'un DSST) est plus importante que d'obtenir une performance très élevée pour une seule période, car le niveau de performance pour de multiples périodes est plus représentatif du potentiel de cohérence dans un climat futur. »

G.3 Méthodologie

G.3.1 Définir le type de validation

La première étape consiste à définir le type de validation, soit systématique ou climatique. Quel que soit le type, la validation devrait se faire sur une même période temporelle (années concomitantes) afin d'éviter des incohérences dues à des faibles cycles de variabilité naturelle et à un signal de changement climatique.

- La validation systématique peut se faire si les données climatiques incorporées dans le modèle hydrologique correspondent aux données du climat passé. Dans cette situation, les données climatiques proviennent soit de stations météorologiques, d'observations sur grille ou de produits de réanalyse. La validation sera effectuée pour répondre aux usages spécifiques 1 et 3 décrits ci-dessus.
- La validation climatique peut se faire si les données climatiques incorporées dans le modèle hydrologique correspondent climatologiquement au climat passé (projections climatiques, voir Taylor *et al.*, 2012). Dans cette situation, les données climatiques proviennent de modèles climatiques ou de générateurs de conditions météorologiques. La validation sera effectuée pour répondre aux usages spécifiques 2 et 4 décrits ci-dessus.

Les deux types de validation sont complémentaires. Pour s'assurer de prendre une décision d'affaires judicieuse, le praticien pourrait devoir effectuer les deux validations. Par exemple, il pourrait être nécessaire de d'abord évaluer la capacité d'un modèle hydrologique à représenter l'hydrologie passée, puis évaluer la performance des simulations climatiques.

La période temporelle utilisée pour la base de référence et pour les simulations devrait être la même, et ce, pour les deux types de validation. Cela évitera des incohérences dues à des faibles cycles de variabilité naturelle et à un signal de changement climatique.

G.3.2 Valider les simulations hydrologiques

La validation d'une simulation hydrologique comporte les quatre étapes ci-dessous. Les critères proposés d'élimination d'une simulation proviennent de Krysanova *et al.* (2018). Le tableau G1 indique des spécificités quant aux critères d'élimination pour l'évaluation de la valeur des actifs. Les critères proposés par Krysanova *et al.* (2018) sont acceptables si le praticien compte utiliser comme méthode de transformation des données le delta, la correction de biais ou le prolongement. Dans le cas de la méthode directe, les critères d'élimination devraient être beaucoup plus restrictif. Les critères proposés dans ce cas sont des suggestions provenant de la littérature et de l'équipe de projet. Cependant, le praticien devra prendre en considération les besoins et les objectifs de son évaluation et adapter les critères selon ses limites de tolérance.

Tableau G1 – Critères d'élimination suggérés pour divers indices hydrologiques pour les méthodes delta, de correction de biais et de prolongement.

Indices hydrologiques étudiés	Critère d'élimination pour les méthodes delta, de correction de biais et de prolongement. Selon Krysanova <i>et al.</i> , (2018).	Critère d'élimination pour la méthode directe. Selon l'équipe de projet.
Moyenne annuelle à long terme	25 %	5 %
Variabilité interannuelle	25 %	25 %
Coefficient d'efficacité du modèle Nash-Sutcliffe	0,5	0,7
Moyenne mensuelle	25 %	5 %-10 %
Variabilité mensuelle	25 %	25 %
Coefficient de corrélation mensuelle	0,8	0,8

1. Validation générale

1.1. Calculer la performance :

- Moyenne annuelle à long terme
 - ◆ Calculer la moyenne annuelle à long terme de Qobs et Qsim.
 - ◆ Élimination si sur/sous-estimation > 25 %
- Variabilité interannuelle
 - ◆ Calculer la moyenne annuelle (MA) de Qobs et Qsim,
 - ◆ Calculer le biais de l'écart-type de MA-Qobs et MA-Qsim.
 - ◆ Élimination si le biais > 25 %
- Coefficient d'efficacité du modèle Nash-Sutcliffe
 - ◆ Pour la validation systématique :
 - ◆ Élimination si le NSE < 0,5

1.2. Tracer les graphiques :

- Hydrogrammes quotidiens (mensuels si le pas de temps du modèle hydrologique est mensuel)
 - ◆ Calculer la moyenne, le minimum et le maximum quotidiens de Qobs et Qsim.
 - ◆ Tracer la moyenne de Qobs et de Qsim en fonction du temps. Faire de même pour le minimum et le maximum.
 - ◆ L'hydrogramme moyen est-il bien représenté par la simulation ?
 - ◆ Y a-t-il des problèmes avec les débits minimums ou maximums de la simulation ?

- Moyenne annuelle à long terme
 - ◆ Calculer la moyenne annuelle (MA) de Qobs et Qsim.
 - ◆ Tracer MA-Qobs et MA-Qsim en fonction du temps.
 - ◆ Pour les utilisations spécifiques 1 et 3 :
 - ◆ Y a-t-il des tendances dans MA-Qobs et MA-Qsim ? Concordent-elles ?
 - ◆ S'il y a une tendance dans MA-Qobs ou dans MA-Qsim, les causes possibles doivent être examinées. Voir l'**Annexe B** – Détection et attribution dans le contexte du changement climatique.
 - ◆ Si les tendances dans MA-Qobs et MA-Qsim ne concordent pas et que la cause ne peut être expliquée, un examen plus approfondi est nécessaire.
 - ◆ o Pour les utilisations spécifiques 2 et 4 :
 - ◆ Y a-t-il des tendances dans MA-Qobs ? Quelles en sont les causes ?
 - ◆ Les tendances dans MA-Qsim, si la simulation est pilotée par un MCG, doivent être évaluées au moyen de l'approche par ensemble en raison de la variabilité naturelle (Maraun et Widmann, 2018).

2. Validation des simulations pour chaque indice hydrologique étudié (**Annexe G.3.3** – Définir les indices hydrologiques)

2.1. Calculer la performance pour chaque indice hydrologique

- Exemple pour la moyenne mensuelle
 - ◆ Calculer la moyenne mensuelle (MM) de Qobs et Qsim.
 - ◆ Élimination si sur/sous – estimation > 25 %
 - ◆ Calculer l'écart-type de MM-Qobs et MM-Qsim.
 - ◆ Élimination si le biais > 25 %
 - ◆ Pour la validation systématique :
 - ◆ Calculer le coefficient de corrélation entre MM-Qobs et MM-Qsim,
 - ◆ Élimination si $r < 0,8$
- Si la performance du jeu de données simulé n'est pas adéquate pour un processus hydrologique, cela indique une limitation du jeu de données. Celui-ci ne devrait pas être utilisé pour la projection du processus hydrologique.
- Les résultats peuvent aussi être compilés visuellement au moyen de cartes thermiques (voir l'exemple de cartes thermiques dans l'**Annexe E** – Validation de produits climatiques).

3. Test différentiel par échantillon séparé (DSST)

- 3.1. Calculer la performance comme aux étapes 1.1 et 2.1 selon le DSST. Voir l'[Annexe G.3.1](#) – Définir le type de validation pour en savoir plus sur le DSST.
- Si le praticien effectue lui-même le calage du modèle, il serait préférable d'employer le DSST durant le processus de calage.
 - Si le praticien n'effectue pas lui-même le calage du modèle, le DSST pourrait tout de même être employé en validant la sortie du modèle pour deux périodes dont les paramètres climatiques diffèrent.

4. Validation à plusieurs emplacements et sur plusieurs variables

- Faire une validation semblable aux étapes 1, 2 et 3 à de multiples emplacements et sur diverses variables (p. ex., fonte de neige, évapotranspiration, etc.).

G.3.3 Définir des indices hydrologiques

La liste d'indices hydrologiques peut varier selon le type d'actif (réservoir/au fil de l'eau), la taille du bassin versant, le type de revenus (énergie, puissance et services ancillaires), etc. La liste suivante énumère les indices qui sont généralement d'intérêt pour les producteurs d'énergie hydroélectrique. Le praticien peut aussi utiliser la base de référence et l'analyse de sensibilité présentée dans l'[Annexe H](#) – Analyse de sensibilité pour déterminer ses propres indices ou en privilégier un parmi ceux de la liste.

- Volumes d'eau annuels, saisonniers et mensuels (moyenne, distribution et moment d'occurrence)
- Variabilité interannuelle des débits
- Variabilité intra-annuelle des débits (mensuelle et/ou saisonnière)
- Persistance des débits interannuels
- Nombre de jours avec des débits supérieurs à un seuil donné (p. ex., dépassement de la capacité de la centrale)
- Sécheresse hydrologique pluriannuelle (en fonction du débit)
- Nombre et moment d'occurrence des jours/semaines de faibles débits

Annexe H – Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité donne au praticien une idée de la sensibilité de la valeur d'un actif en regard de l'hydrologie et/ou du climat (p. ex., $\pm 10\%$ des apports annuels). Elle permet également d'identifier les processus hydrologiques/climatiques importants qui sont en cours dans le bassin versant.

Ce type d'analyse permet aussi d'évaluer la sensibilité de la valeur à l'hydrologie et/ou au climat, en relation à d'autres facteurs (p. ex., prix à l'exportation, taux d'actualisation, etc.). Cet exercice peut éclairer le processus décisionnel quant au niveau d'efforts à donner aux études sur le changement climatique suggérées dans le Guide.

L'analyse de sensibilité consiste à faire varier certaines propriétés de la série temporelle de la base de référence, comme la moyenne ou les extrêmes, et à identifier les impacts résultants sur les étapes subséquentes de la chaîne de modélisation. Un exercice similaire peut être mené avec les modèles disponibles : les conditions du bassin versant, les scénarios de gestion de l'eau, les prix de l'énergie, etc. peuvent tous être modifiés au sein de leurs modèles respectifs pour en déterminer les impacts sur les étapes subséquentes de la chaîne de modélisation.

L'**Annexe G** – Validation de simulations hydrologiques présente une liste d'indices hydrologiques qui représentent les processus hydrologiques typiquement utiles à l'évaluation de la valeur des actifs. L'**Annexe E** – Validation de produits climatiques présente une liste similaire pour les indices climatiques.

La **Figure H1** fournit un exemple de l'analyse de sensibilité. Elle montre que la valeur actualisée nette (VAN) est plus sensible aux variations des apports annuels qu'à celles des revenus annuels moyens. Les revenus annuels moyens, quant à eux, sont plus sensibles aux variations des apports annuels qu'aux variations de faibles débits.

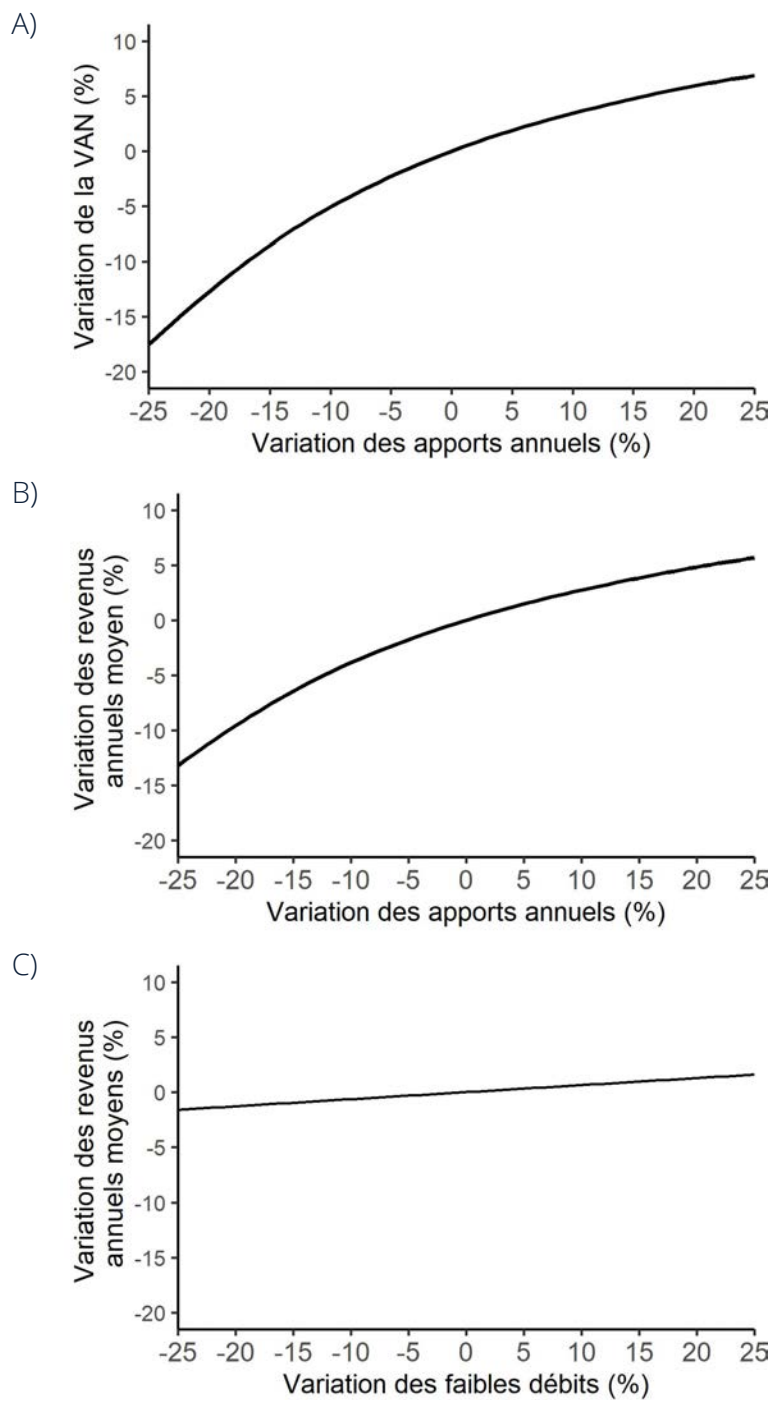


Figure H1 – Exemple d’une analyse de sensibilité relative à la base de référence hydrologique pour : la VAN par rapport aux apports annuels (A); les revenus annuels moyens par rapport aux apports annuels (B); et les revenus annuels moyens par rapport aux faibles débits (C).

Annexe I – Meilleures et bonnes pratiques pour l’approche par ensemble

Cette annexe fournit des recommandations concernant le nombre de scénarios, de modèles et de méthodes à inclure dans l’approche par ensemble. La sélection peut être motivée par les objectifs et les contraintes du praticien tel que, par exemple, le temps et les ressources disponibles. Si des données ou résultats existants sont réutilisés, il demeure nécessaire d’évaluer si la taille d’un ensemble donné est suffisante à l’aide d’une meilleure compréhension du nombre de scénarios/modèles nécessaires pour obtenir un ensemble valable. Il s’agit donc d’un critère à prendre en considération lors de la sélection de données de changement climatique ([Section 5](#)). Le tableau I1 présente les meilleures et bonnes pratiques à cet égard. La [Section 2.3](#) – Sources d’incertitude et l’[Annexe C](#) – Méthodes de sélection de MCG fournissent de l’information contextuelle complémentaire sur les ensembles, les sources d’incertitude et les méthodes de sélection d’un ensemble de MCG.

Tableau I1 – Meilleures et bonnes pratiques pour l'approche par ensemble. Plusieurs concepts mentionnés ici s'appuient sur l'information contextuelle de la [Section 2.3](#) – Sources d'incertitude.

	Meilleures pratiques	Bonnes pratiques
Scénarios d'émissions	La meilleure pratique consiste à utiliser tous les scénarios d'émissions disponibles parmi le groupe de scénarios d'émissions le plus récemment publié. Ceci est particulièrement important pour les horizons temporels plus lointains (p. ex., > 50 ans), car le choix du scénario aura probablement un impact plus marqué sur les projections hydrologiques (Giuntoli <i>et al.</i>, 2018).	Une bonne pratique consiste à utiliser au moins deux scénarios d'émissions : un scénario d'émissions modérées et un scénario représentant le statu quo (<i>business-as-usual scenario</i>). Pour CMIP5, ce sont les RCP4.5 et RCP8.5, respectivement (Van Uytven et Willems, 2018). Pour les horizons temporels plus rapprochés (< 15 ans), il est acceptable d'utiliser un seul scénario, car le signal de changement climatique peut ne pas encore avoir émergé (Section 2.3 – Sources d'incertitude). S'il n'est pas possible d'utiliser des scénarios d'émissions récemment publiés, des scénarios plus anciens sont acceptables.
Modèles de circulation globale	Traditionnellement, la meilleure pratique a consisté à utiliser tous les MCG disponibles (nouvelles versions des modèles, si possible), car aucun MCG ne dégage une performance toujours supérieure à tous les autres (IPCC, 2013). Cependant, quelques études récentes suggèrent qu'il peut être préférable de ne sélectionner que certains modèles (Chen <i>et al.</i>, 2016; Maraun <i>et al.</i>, 2017; Maraun et Widmann, 2018). Pour en savoir plus, voir l'Annexe C – Méthodes de sélection de GCM. Le problème tient à ce qu'il est difficile de définir et de sélectionner les meilleurs modèles, et que l'interprétation des résultats d'un sous-ensemble est complexe (Maraun <i>et al.</i>, 2017). Par le passé, la sélection a parfois été faite avec peu de regard quant à la qualité et la fiabilité (Her <i>et al.</i>, 2019); la prudence est donc de mise.	Une bonne pratique consiste à utiliser moins de modèles (y compris des versions plus anciennes du modèle, si ce sont les seules disponibles); cependant, il faut éviter à tout prix de mener une étude avec un nombre insuffisant de modèles (voir l'Annexe C – Méthodes de sélection de MCG). Malheureusement, il y a trop peu de publications qui précisent le nombre approprié de MCG. L'IHA recommande d'utiliser des projections climatiques de trois MCG ou MCR crédibles à l'échelle locale (optimistes, modérées, pessimistes) (IHA, 2019). Selon Wang <i>et al.</i> (2018), les projections de 10 modèles climatiques sont suffisantes, et les résultats ne sont guère meilleurs avec plus de 10 modèles. Toutefois, ce constat a été établi dans une analyse visant à couvrir la majorité de l'incertitude. Des évaluations fondées sur d'autres critères pourraient demander un nombre minimal différent de MCG (Annexe C – Méthodes de sélection de MCG). Lorsqu'il y a plusieurs simulations du même MCG avec le même scénario d'émissions, une bonne pratique consiste à ne sélectionner que la première réalisation.
Modèles hydrologiques et post-traitement	Le modèle hydrologique et les étapes de post-traitement de la chaîne de modélisation peuvent contribuer à un large pourcentage de l'incertitude totale (Section 2.3 – Sources d'incertitude). L'idéal est donc d'utiliser plusieurs modèles hydrologiques (p. ex., Giuntoli <i>et al.</i>, 2015; Hattermann <i>et al.</i>, 2018) et plusieurs méthodes de post-traitement (p. ex., Chen, Brissette et Leconte, 2011; De Niel, Van Uytven et Willems, 2019). Quel que soit le nombre de modèles utilisés, il est important que les processus clés soient bien représentés et que le modèle ait été bien calé (Krysanova <i>et al.</i>, 2018).	Bien souvent, il n'est pas faisable d'utiliser un ensemble de modèles hydrologiques et de méthodes de post-traitement. Il est parfois plus avantageux (et plus gérable) d'utiliser le bon type de modèle/méthode (Annexe F – Sélection et calage d'un modèle hydrologique), pourvu que le calage soit fondé sur des données de qualité (Chen <i>et al.</i>, 2013b; Gao <i>et al.</i>, 2019; Pechlivanidis <i>et al.</i>, 2011). L'expérience du praticien en matière de modèles hydrologiques joue un rôle important (voir aussi les Annexe E et Annexe G).

Annexe J – Études de cas

Étude de cas de Brookfield Renewable

Application de la méthode delta aux bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna pour l'obtention de scénarios hydrologiques futurs dans un climat changeant

Par: Nelson Jia, Bruno Benedetti and Andy Davis



Contexte

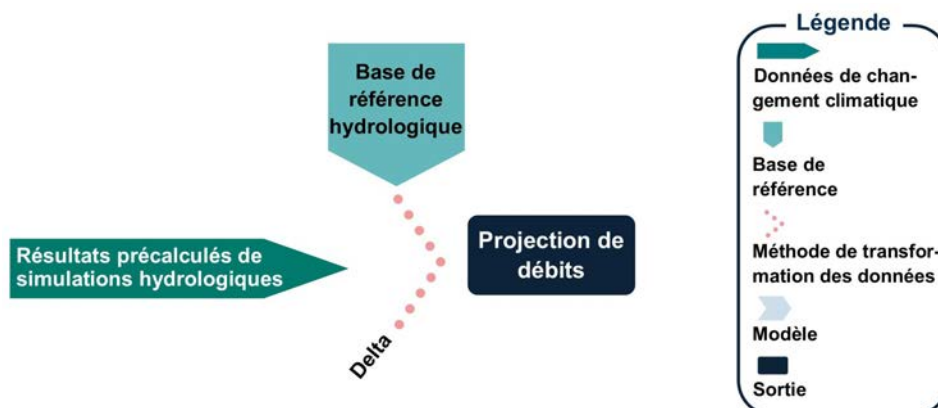
Conformément à son programme environnement, social et gouvernance (ESG) et à son engagement envers les investissements en énergie renouvelable, Brookfield Renewable s'intéresse à l'impact du changement climatique sur le potentiel de production énergétique de ses actifs hydroélectriques. Cette étude de cas vise à démontrer comment la méthode delta décrite dans le *Guide Valeur des actifs hydroélectriques et des impacts physiques du changement climatique* peut contribuer au développement de projections de débits dans un contexte de changement climatique. Elle a été réalisée pour les bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna, où Brookfield Renewable possède et exploite de nombreux actifs hydroélectriques.

Objectifs

- Développer des projections de débits pour montrer l'impact du changement climatique sur les débits des bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna.
- Démontrer l'applicabilité de la méthode delta et sa capacité à appliquer un scénario hydrologique précalculé intégrant le changement climatique à une base de référence hydrologique, pour obtenir des projections de débits dans un climat changeant.

Démarche

La méthode delta consiste en une perturbation de la base de référence au moyen d'un changement relatif ou absolu entre la période de référence et les périodes futures d'une simulation intégrant le changement climatique. La perturbation est fondée sur un scénario hydrologique précalculé intégrant le changement climatique. Ce scénario est le produit d'une étude de cas précédemment réalisée et a été validé selon diverses techniques pour en assurer l'applicabilité sur la base de référence hydrologique.



Résultats

L'étude a été appliquée à deux bassins versants américains : Penobscot (Nouvelle-Angleterre) et Susquehanna (littoral atlantique). Une revue de littérature a permis d'identifier deux études présentant des scénarios hydrologiques précalculés, soit Hayhoe (2007) et Johnson (2015). L'article scientifique de Hayhoe présente un scénario hydrologique intégrant le changement climatique calculé en fonction d'une augmentation estimée du ruissellement, tandis que l'article de Johnson présente plutôt un scénario calculé en fonction d'une augmentation estimée des débits.

Les simulations précalculées ont été évaluées en les comparant aux débits de la base de référence historique de Brookfield Renewable, pour les débits moyens et les écarts-types. Pour confirmer l'adéquation des simulations hydrologiques précalculées intégrant le changement climatique, la différence entre les débits moyens et entre les écarts-types devait être inférieure à 25 % dans les deux cas.

Les scénarios hydrologiques précalculés intégrant le changement climatique dans l'article de Johnson proviennent des bassins versants de la Merrimack et de la Susquehanna, et ont été appliqués aux bases de référence des bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna, respectivement. Le scénario du bassin versant de la Merrimack a passé le test de validation :

la différence pour les débits moyens était inférieure à 15 % et celle des écarts-types était d'environ 20 %, comparativement à la base de référence historique des débits. Le scénario du bassin versant de la Susquehanna a également été jugé adéquat, la différence étant d'environ 25 % par rapport aux débits de la base de référence historique. Cependant, le scénario provenant de Hayhoe (2007) a été jugé inadéquat, les différences étant supérieures à 25 %.

Une fois les résultats de l'article de Johnson (2015) validés avec succès, la méthode delta a été appliquée aux bases de référence historiques des bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna pour produire des projections hydrologiques intégrant le changement climatique. Les perturbations moyennes des débits appliquées aux bassins versants de la Penobscot et de la Susquehanna ont été de +0,4 % et +0,2 %, respectivement.

Ces augmentations estimées des débits fournissent une précieuse information qui aidera Brookfield Renewable à prendre des décisions d'affaires à long terme en matière d'investissement, de renouvellement de contrats, de remise à neuf des actifs et d'intervention environnementale. Toutefois, une analyse plus pointue devrait être réalisée afin d'obtenir des résultats plus précis.

Leçons apprises

- L'application de l'étude de cas a donné de meilleurs résultats avec l'utilisation de débits plutôt que de données de ruissellement. De plus, les bassins versants utilisés pour les scénarios précalculés et pour les scénarios de la base de référence devraient être comparables, pour obtenir des résultats valides.
- La granularité et le niveau de détails de la perturbation appliquée dépendent des valeurs provenant des études sélectionnées.
- La méthode delta est rapide, simple et commode. Cependant, pour le praticien néophyte, il pourrait être difficile de s'y retrouver dans la littérature (c.-à-d., trouver des études pour établir un facteur de perturbation). La méthode bénéficierait de l'établissement d'un corpus d'études pertinentes.
- L'établissement de la similarité hydrologique entre des bassins versants repose sur des critères très simples, mais le nombre de bassins versants de référence est limité. Cela restreint la mesure dans laquelle la méthode peut être appliquée, et celle-ci gagnerait à ce qu'il y ait d'autres études sur un plus grand nombre de bassins versants.

Références

Cette étude de cas a été développée dans le cadre du Guide : Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, H., Chartier, I., Tarel, G. J., Minville, M. et Merleau, J. (2020). Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation, Ouranos, Montréal, 208 pages.

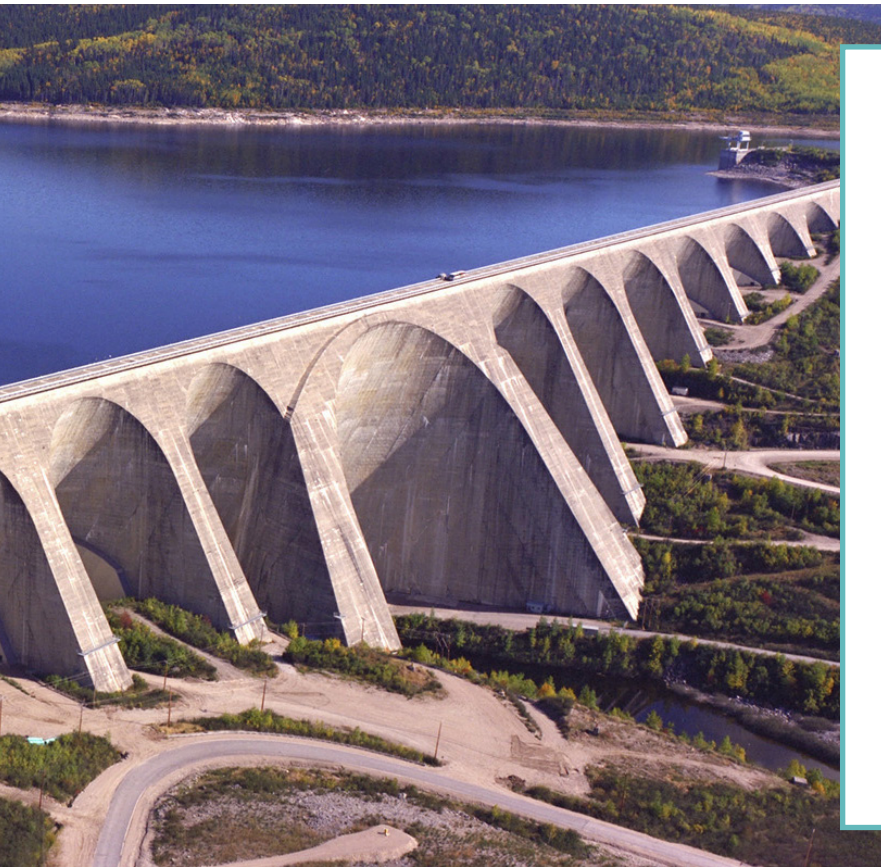
Hayhoe, K., Wake, C. P., Huntington, T. G., Luo, L., Schwartz, M. D., Sheffield, J., ... & Troy, T. J. (2007). Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Climate Dynamics*, 28(4), 381-407. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0187-8>

Johnson, T., Butcher, J., Deb, D., Faizullahoy, M., Hummel, P., Kittle, J., ... & Sarkar, S. (2015). Modeling streamflow and water quality sensitivity to climate change and urban development in 20 US watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(5), 1321-1341. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12308>

Étude de cas d'Hydro Québec

Impact des changements climatiques sur les apports en eau annuels d'Hydro-Québec; évolution de la moyenne et de la variabilité

Par : Guillaume Jean Tarel¹, Catherine Guay², Marie Mainville²



Contexte

Dans un article de 2015, Guay *et al.* ont utilisé l'ensemble CMIP3 pour montrer, entre autres, une augmentation future probable des apports moyens au Québec. Pour compléter ces résultats et évaluer l'impact des changements climatiques sur le parc de production, il est important de caractériser aussi l'évolution probable de la variabilité des apports (HQD 2019). Cette analyse est faite grâce aux simulations du projet cQ2 basées sur l'ensemble climatique CMIP5.

Objectifs

- Comparer les résultats obtenus avec CMIP5 et les précédentes simulations provenant de CMIP3.
- Analyser l'évolution de la variabilité à l'horizon 2050.
- Évaluer si les simulations hydrologiques disponibles représentent bien les séquences d'années de faible hydraulité.

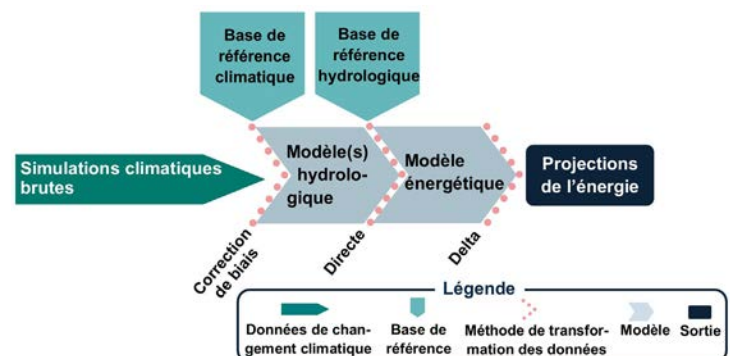
Démarche

Dans le cadre du projet cQ2, les simulations climatiques CMIP5 ont été utilisées comme intrants d'un modèle hydrologique (HSAMI) pour produire des simulations de débits futurs pour plusieurs dizaines de sites du système HQP. Deux scénarios de trajectoires du forçage radiatif ont été pris en compte (RCP4.5 et 8.5).

L'étape initiale est l'analyse d'adéquation; celle-ci consiste à valider que les données disponibles reproduisent adéquatement l'historique observé (période de contrôle 1971-2000). L'analyse a montré :

- que les moyennes annuelles et la variabilité interannuelle, représentée par l'écart-type, sont des variables adéquates;
- que les variables cumulatives sur plusieurs années (par exemple les séquences d'années de faible hydraulité) ne sont pas représentées adéquatement par les données disponibles.

À la lumière de ces constats, les changements dans les moyennes annuelles et la variabilité interannuelle ont donc été calculés avec une approche par deltas, en comparant les variables entre la période future et la période de référence. Les changements dans les séquences d'années de faible hydraulité n'ont pas été étudiés.



Résultats

Note : Les résultats ci-dessous sont présentés en termes de changement futur probable des débits moyens annuels. Les efficacités de conversion des débits en énergie étant très variables entre les différentes centrales, il n'est pas possible de transposer directement l'évolution des débits en évolution énergétique. Par ailleurs (voir plus haut), l'évolution des séquences d'années de faible hydraulicité n'a pas été étudiée.

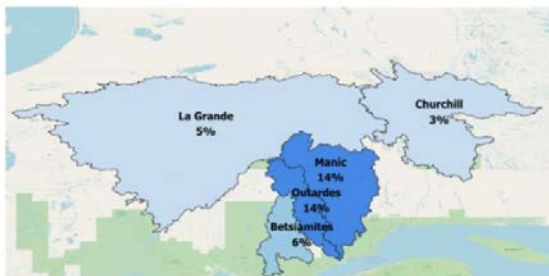
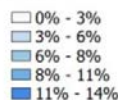
En termes de débits, les moyennes annuelles montrent une augmentation entre la période de contrôle (1971-2000) et la période future (2036-2065). La figure ci-dessous montre le détail dans le cas des bassins les plus importants (pour le scénario RCP 4.5). Les changements sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus dans

Guay, C. *et al.* (2015). Alors que la moyenne augmente, les écarts-types augmentent également, ci-dessous dans le cas du RCP 4.5. Et même dans le cas du RCP 8.5, les écarts-types augmentent largement plus que les moyennes. Ceci résulte en une augmentation de la variabilité des débits d'une année à l'autre.

Évolution des débits
annuels moyens
RCP 4.5



Évolution de l'écart-type
des débits annuels
RCP 4.5



Leçons apprises

- « L'utilisation de résultats de simulations climatiques n'est pas un exercice banal; il y a un important risque de tirer des conclusions en utilisant des données qui ne sont pas adaptées. » [Fournier, E. *et al.*, 2020]
- L'analyse d'adéquation des simulations, basée sur la comparaison des simulations avec l'historique disponible, est

une étape indispensable. Cette étape doit être recommandée à tous les utilisateurs; l'utilisation d'expertise externe ou d'un guide comme celui du projet est recommandée.

- Pour HQP, l'analyse des simulations disponibles a montré qu'il convient d'approfondir l'étude des séquences d'années de faible hydraulicité en changement climatique.

Références

Cette étude de cas a été développée dans le cadre du Guide : Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, H., Chartier, I., Tarel, G. J., Minville, M. et Merleau, J. (2020). Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation, Ouranos, Montréal, 208 pages.

Guay, C., Minville, M., and Braun, M. (2015). A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. Canadian Water Resources Journal, 40(3), 285–302. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1043583>

Hydro Québec Distribution. (2019, Novembre 1). Complément d'information du plan d'approvisionnement 2020-2029. http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/529/DocPrj/R-4110-2019-B-0009-Demande-Piece-2019_11_01.pdf

Étude de cas de Manitoba Hydro

Explorer le changement climatique pour l'évaluation de la mise à niveau de centrales

Contact : Kristina Koenig, kkoenig@hydro.mb.ca

Contexte

Manitoba Hydro fournit de l'électricité à plus de 580 000 clients au Manitoba et en exporte sur les marchés au Canada et aux États-Unis. En moyenne, 96 % de l'électricité produite annuellement provient de 15 centrales principalement établies sur les rivières Winnipeg et Saskatchewan, ainsi que sur le fleuve Nelson.

Avec l'appui d'Ouranos, les professionnels responsables du génie des ressources hydriques et de la planification des ressources à Manitoba Hydro ont exploré l'intégration de scénarios de changement climatique dans leurs modèles hydrologiques et dans leurs modèles de planification des ressources. Cet exercice a permis de conjuguer de façon pragmatique la science du climat et les pratiques sectorielles.

Objectif

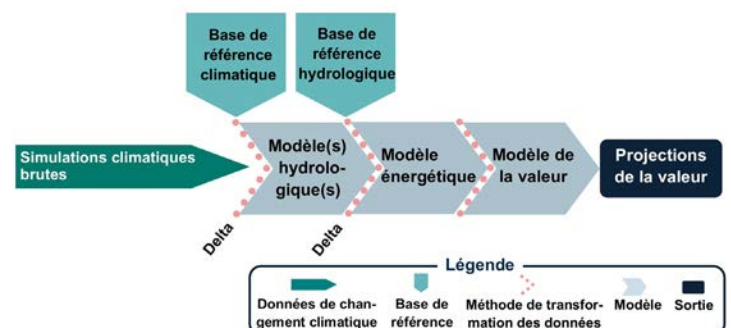
- Améliorer les techniques actuelles pour produire des scénarios de débits futurs.
- Produire des scénarios de débits futurs et en tester l'application pour la planification des ressources.
- Explorer l'impact des scénarios de débits futurs sur la mise à niveau potentielle d'une centrale.
- Étudier le processus menant à l'intégration de scénarios de débits futurs dans les modèles de planification des ressources.

Démarche

À partir d'un ensemble de 40 simulations de modèles climatiques (Manitoba Hydro, 2020), les changements projetés dans la précipitation et la température minimale et maximale ont été combinés à une base de référence climatique pour produire des scénarios de climat futur à l'horizon 2050 pour le bassin versant Nelson-Churchill (1,4 million km²). Ces scénarios ont ensuite servi à piloter des modèles hydrologiques distribués WATFLOOD afin de produire des scénarios de débits futurs.

La démarche utilisée a été adaptée afin de tirer parti de l'accès privilégié à un historique long-terme de données de débits (HLTDD; une base de référence hydrologique qui couvre 106 ans), essentiel pour les études de planification des ressources. Les scénarios hydrologiques réalisés avec WATFLOOD ont servi à développer un ensemble de deltas futurs basés sur les quantiles de débits, dans le but d'évaluer les changements dans les moyennes, les extrêmes et la variabilité. Les deltas ont été appliqués mensuellement, sur les saisons et semi-annuellement pour générer des scénarios HLTDD futurs.

Pour utiliser au mieux les ressources de calcul et les ressources humaines, un sous-ensemble de six scénarios HLTDD futurs représentant un vaste éventail d'impacts liés à la production d'énergie a été sélectionné au moyen d'une analyse par grappes. Le sous-ensemble a servi à piloter une série de modèles de planification des ressources afin d'évaluer les impacts énergétiques et économiques de diverses options de mise à niveau dans des scénarios de débits futurs.



Résultats

Des modèles hydrologiques WATFLOOD ont été développés et calés sur un éventail de conditions historiques. En raison des incertitudes liées à la simulation de la régularisation future, les modèles ont été configurés pour simuler les conditions naturelles à des emplacements clés.

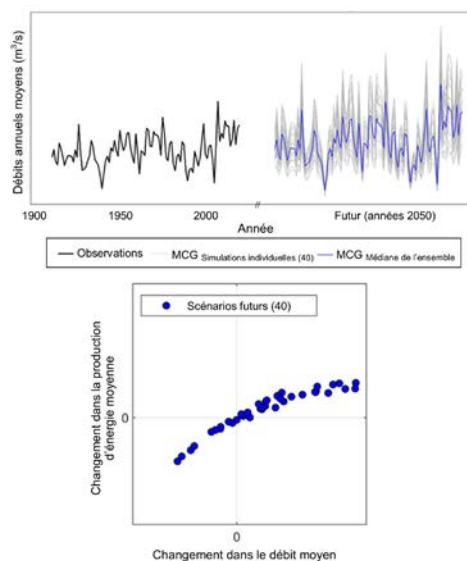
Des fonctions de transfert basées sur la comparaison entre les quantiles de débit de la base de référence et du futur (horizon 2050; 2040-2069) ont été bâties afin de créer des scénarios HLTDD futurs. Compte-tenu de la longueur des observations HLTDD, une approche de retrait et de réintroduction des tendances a été suivie, mais cette étape doit être étudiée davantage par la recherche scientifique.

L'ensemble de 40 scénarios futurs HLTDD tend vers des conditions plus humides, mais certains scénarios indiquent une baisse des débits. Un modèle de production d'énergie simple a permis de donner un aperçu des changements dans la production annuelle moyenne d'énergie à l'échelle du réseau. Les résultats montrent que l'augmentation des débits entraîne généralement une augmentation de la production d'énergie, mais commence à plafonner lorsque les débits s'approchent de la capacité de production de l'actif hydroélectrique. Un algorithme d'analyse par grappes a servi à sélectionner ce sous-ensemble, qui capture tout de même 97,3 % de l'étendue du changement de production d'énergie futur. Ce sous-ensemble est important, car il faudrait beaucoup de temps et d'énormes ressources informatiques pour évaluer les 40 scénarios au moyen d'un modèle de planification des ressources plus détaillé.

Le sous-ensemble de scénarios futurs HLTDD a servi d'intrant à une série d'outils de planification des ressources. Les scénarios HLTDD ont d'abord été exécutés dans un modèle de production à l'échelle du réseau à résolution grossière, qui

simule les opérations au réservoir, la production d'électricité et les revenus d'exportation au moyen d'intrants tels que les prévisions de demande et de prix d'exportation, ainsi que les limites opérationnelles. Les sorties de ce modèle alimentent un modèle de production qui représente les opérations de centrales individuelles. Pour les fins d'exploration, les impacts du changement climatique sont considérés séparément des autres effets, et seuls les scénarios HLTDD et diverses options de mise à niveau de centrale ont été modifiées par rapport aux conditions de la base de référence.

Ce processus permet de tester et de comparer diverses options de mise à niveau de centrale selon les conditions de la base de référence avec et sans changement climatique. Dans ce travail préliminaire, les options de mise à niveau se sont avérées économiquement robustes, autant avec les conditions de la base de référence HLTDD qu'avec l'intégration des scénarios futurs de changement climatique.



Leçons apprises

- L'engagement précoce et la collaboration entre des experts de plusieurs domaines (science du climat, hydrologie, modélisation de la production d'énergie) ont joué un rôle déterminant dans l'exécution du projet et le peaufinage de la méthodologie.
- Bien que les sources d'incertitude soient nombreuses dans la modélisation hydrologique et énergétique, l'exploration de l'étendue des impacts résultant de scénarios de climats futurs constitue une précieuse analyse de sensibilité.
- Les impacts du changement climatique sur les débits peuvent affecter l'aspect économique d'un projet, mais d'autres facteurs, notamment les coûts d'immobilisation, les prix de l'énergie et le taux d'actualisation, se sont avérés plus importants.
- Les sécheresses hydrologiques pluriannuelles jouent un rôle important dans la planification des ressources à long terme. Il sera intéressant d'étudier plus à fond les impacts du changement climatique sur ces événements extrêmes.

Références

Cette étude de cas a été développée dans le cadre du Guide : Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, H., Chartier, I., Tarel, G. J., Minville, M. et Merleau, J. (2020). Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation, Ouranos, Montréal, 208 pages.

Manitoba Hydro (2020, March). Manitoba Hydro's Climate Change Report. https://www.hydro.mb.ca/environment/pdf/climate_change_report_2020.pdf

Étude de cas d'Ontario Power Generation

L'impact du changement climatique sur un scénario de redéveloppement

Par: Kurt C. Kornelsen



Contexte

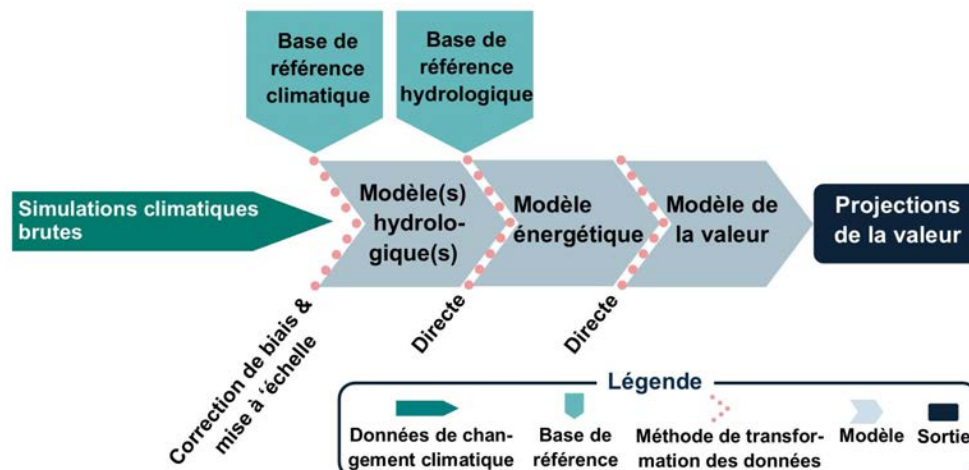
L'analyse de rentabilité pour la construction ou le redéveloppement d'une centrale hydroélectrique doit prendre en compte les revenus et les coûts sur la longue durée de vie des actifs hydroélectriques. Cette étude de cas a consisté en une évaluation quasi complète des changements potentiels dans les débits et la production d'énergie dus au changement climatique et leur impact possible sur les coûts d'un projet hypothétique.

Objectif

Mieux comprendre les impacts du changement climatique sur la production d'énergie d'une centrale individuelle et leur influence relative sur l'évaluation de la valeur du redéveloppement de la centrale.

Démarche

Pour mieux distinguer les impacts du changement climatique d'autres effets, tel que des changements dans la gestion du réservoir, Ontario Power Generation a décidé d'exécuter toutes les étapes de la chaîne de modélisation et de la base de référence climatique. Des scénarios de MCG mis à l'échelle et débiaisés pour la température et la précipitation ont été fournis par Ouranos pour simuler le débit quotidien et la production d'énergie de la centrale. Un modèle financier a été utilisé pour déterminer l'impact relatif que des changements dans les débits attribuables au climat pourraient avoir sur la valeur de la centrale. Aucune adaptation opérationnelle ou physique n'a été envisagée.

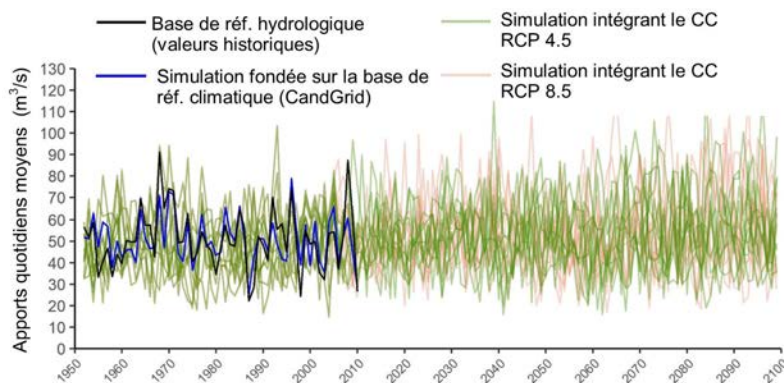


Résultats

- Plusieurs itérations du modèle hydrologique ont été utilisées afin d'améliorer la cohérence avec les données historiques et la simulation fondée sur la base de référence climatique. Cela a permis de produire une chaîne de modélisation performante dont le biais dans les apports est inférieur à 1 % par rapport aux valeurs historiques. Ce résultat a été obtenu en calant le modèle hydrologique sur une longue période de 62 ans et en utilisant le même produit de précipitation sur grille que celui qui a été utilisé pour la correction de biais des données climatiques.
- Le débit annuel moyen semble être peu affecté par le changement climatique (c.-à-d., peu de tendances significatives) à l'emplacement étudié, mais la variabilité interannuelle des débits est plus élevée. De plus, les années de débits élevés ou faibles sont plus fréquentes, mais sont du même ordre de grandeur que celles des observations historiques. Les changements

dans les débits ont un impact correspondant sur la production d'énergie.

- L'évaluation de la valeur de l'actif était sensible à de nombreux facteurs non reliés au climat, dont le coût d'immobilisation et le taux d'actualisation. L'impact de certains de ces facteurs financiers sur la valeur projetée de l'actif était plus important que celui des variations attendues dans la production d'énergie en raison du changement climatique. Remarque : aucune mesure d'adaptation physique ou opérationnelle n'a été envisagée dans le cadre cette étude, et celles-ci pourraient avoir un impact sur les coûts du projet et la production d'énergie.
- Une analyse de sensibilité sur les valeurs de la production d'énergie a montré que l'évaluation était plus sensible à une faible production d'énergie qu'à une production d'énergie élevée.



Leçons apprises

- La chaîne de modélisation qui a produit le résultat final s'appuyait sur plusieurs modèles. Il a été utile de d'abord assembler toutes les pièces de cette chaîne, tant que les modèles étaient de qualité acceptable, puis de réaliser une analyse de sensibilité sur toute la chaîne de modélisation afin de déterminer les modèles qui exerçaient la plus forte influence sur le résultat final. Cela a permis de mieux centrer les efforts et de peaufiner les quelques modèles dont l'impact sur le résultat final était le plus grand.
- La cohérence s'est avérée très importante. Il a été absolument nécessaire de caler le modèle hydrologique en utilisant le produit de précipitation sur grille qui avait été utilisé comme référence pour la correction de biais du MCG, car le calage du modèle hydrologique initial avait été fait avec différents jeux de données. La base de référence commune a éliminé des biais initiaux significatifs.

Références

Cette étude de cas a été développée dans le cadre du Guide : Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, H., Chartier, I., Tarel, G. J., Minville, M. et Merleau, J. (2020). Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation, Ouranos, Montréal, 208 pages.

