UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

# ÉVALUATION DU RISQUE D'INONDATION À RIGAUD (QUÉBEC, CANADA) : LE CAS DE L'INONDATION PRINTANIÈRE DE 2017

## MÉMOIRE PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE DE RECHERCHE EN GÉOGRAPHIE

PAR CLÉMENCE BENOIT

JANVIER 2021

#### UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL Service des bibliothèques

#### Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

#### REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier mon directeur de maîtrise, Philippe Gachon, qui fut une réelle inspiration pour moi tout au long de mon parcours, étant donné le regard profondément humain qu'il pose sur la science, sa rigueur scientifique et son approche multidisciplinaire dans son travail et ses recherches. Ce fut un réel plaisir de travailler aux côtés de ce chercheur terre à terre, qui n'a jamais hésité à me démontrer sa reconnaissance devant le travail accompli. Un merci tout spécial à la confiance qu'il m'a accordée en m'impliquant dans de nombreux projets, activités et événements, mais également en me laissant une grande liberté dans mon processus de recherche. C'est un vrai privilège d'avoir pu profiter de son expertise tout au long de mon parcours.

Je tiens également à remercier Guillaume Dueymes de m'avoir accompagnée dans le merveilleux monde de la programmation, lequel me passionne aujourd'hui un peu plus chaque jour et Marie Raphoz; les deux m'ont fait découvrir que derrière les murs blancs et sans âme du 7e étage se cachait des professionnels de recherche beaucoup plus vivants et colorés, sachant jongler science, politique et philosophie. Je ne peux passer sous silence toute l'expertise de terrain que m'a transmise Éric Martel, coordonnateur de la sécurité civile à Rigaud, sans quoi et sans qui ce projet de recherche n'aurait jamais pris forme.

Je souhaite finalement témoigner toute ma reconnaissance à mes amis.es et collègues Alexis Robitaille, David Dufour-Laflamme, Annie Métivier-Hudon et Élie Ferland, qui ont été les soleils de mes journées passées au 4e étage du Aquin, du début à la fin. Nos conversations auront permis d'alimenter mes réflexions à nature géographique, de la mer de Champlain jusqu'aux grands thèmes fictifs d'une géographie onirique.

# TABLE DES MATIERES

LIS	TE DES	FIGURESv
LIS	TE DES	TABLEAUXxi
LIS	TE DES	ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMESxviii
LIS	TE DES	SYMBOLES ET UNITÉSxx
LIS	TE DES	VARIABLES ET INDICESxxi
RÉS	SUMÉ .	xxiii
AB	STRAC	Тххіv
INT	RODU	CTION 1
CH	APITRE	EI État des connaissances et problématique4
1.1	Mise	en contexte4
	1.1.1 1.1.2 1.1.3	Les changements climatiques : Le rôle des activités humaines
1.2	Natur	e du problème et conséquences des inondations16
	1.2.1 1.2.2 1.2.3	Les facteurs d'exposition au Canada et au Québec
1.3	Objec	tifs et hypothèses de l'étude22
	1.3.1 1.3.2	Objectifs principal et spécifiques
1.4	Cadre	théorique et concepts
	1.4.1	Cadre théorique

	1.4.2	Principaux concepts	25
CH	APITRE	E II Caractérisation de l'aléa : Le cas de L'inondation de 2017	28
2.1	Introd	luction	28
2.2	Métho	odologie	31
	2.2.1 2.2.2 2.2.3 2.2.4 2.2.5	Région d'étude Données utilisées Méthodes de traitement des données de grille ou géoréférencées Traitement et analyse par indices hydrométéorologiques Analyse des variables et indices	31 38 43 44 50
2.3	Résul	tats	60
	2.3.1 2.3.2 hydrom 2.3.3 événem	Conditions hydroclimatiques du BVRO et à l'exutoire Analyses des tendances : variables de base et i nétéorologiques L'inondation de 2017 et ses caractéristiques par rapport aux nents	62 ndices 67 autres 72
2.4 Discussion et conclusion		ssion et conclusion	107
	2.4.1 2.4.2	Discussion Conclusion	107 115
CH	APITRE	E III Caractérisation des facteurs de risque	118
3.1	Introd	luction	118
3.2	Métho	odologie	122
	3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4	Données utilisées Analyse par indices de risque Analyse temporelle des facteurs de risque Analyse multicritère des indices de risque	123 126 131 134
3.3	Résultats		136
	3.3.1 3.3.2 3.3.3	Conditions environnementales dans le BVRO Exposition au risque d'inondation à Rigaud Niveau de risque au printemps 2017	137 146 148
3.4	Discu	ssion et conclusion	152
	3.4.1 3.4.2	Discussion Conclusion	152 154
			ii

CONCLUSION GÉNÉRALE157
ANNEXES
ANNEXE A Stations météorologiques d'ECCC situées dans le BVRO ou à moins de 75 km de distance utilisées pour l'analyse météorologique régionalexxv
ANNEXE B Cartographie de la Climatologie (1981 - 2010) des principaux indices et variables des mois de mars, avril et mai au sein du BVROxxvii
ANNEXE C Cartographie des tendances décennales des indices et variables météorologiques dans le BVROxxxi
ANNEXE D Tendances décennales des débits et des niveaux d'eau à Carillon sur les périodes de 1963 à 2019 et de 1998 à 2017xxxiii
ANNEXE E Météogramme quotidien du printemps 2017 établi avec les données de la station d'observation d'ECCC à Rigaudxxxv
ANNEXE F Comparaison des anomalies standardisées moyennes à l'échelle du BVRO des indices et variables météorologiques des mois de mars, avril et mai pour les huit années à plus fort débit enregistré à Carillon depuis 1963 et calculées à partir des données de station d'ECCCxxxvi
ANNEXE G Comparaison des anomalies standardisées moyennes à l'échelle du BVRO des indices et variables météorologiques calculées à partir des données DAYMET pour les mois de mars, avril et mai, de 1981 à 2017xxxvii
ANNEXE H Comparaison des données d'observation et modélisées de l'extension géographique de l'inondation de 2017 à Rigaud, en date du 6 maixli
ANNEXE I Cartographie des versions de données de drainage relatives aux polygones de sol utilisées dans le BVRO (v.2.2 et v.3.2)xlii
ANNEXE J Cartographie des indices spatiaux standardisés moyens d'utilisation du sol, de pente et de drainage pour l'ensemble des SBV du BVROxliii

ANNEXE K Cartographie des indices spatiaux standardisés moyens de l'intensité de
l'aléa météorologique et du niveau de risque au mois de mars, pour l'ensemble des
SBV du BVROxlv
BIBLIOGRAPHIE

#### LISTE DES FIGURES

- Figure 2.5 Tendances par décennie des indices et variables météorologiques, calculées pour chaque mois de novembre à mai pour les périodes de 1981 à 2017 (panneau du haut) et de 1998 à 2017 (panneau du bas) à partir des données DAYMET. Les tendances sont calculées à partir des valeurs moyennées spatialement sur tout le

- Figure 2.7 Météogramme des indices journaliers Tmoy, PrcpTot, SWE, AccuSWEtot, DimSWEtot au printemps 2017 (1<sup>er</sup> mars au 31 mai), calculés à partir des données DAYMET en tant que moyennes spatiales à l'échelle du BVRO. Le panneau du haut correspond aux Tmax (en rouge) et Tmin (en bleu) quotidiennes. La précipitation totale (en bleu) et le SWE moyen (en vert), quotidiens, sont représentés dans le panneau du milieu. Le panneau du bas correspond à la variation positive (en bleu) et négative (en rouge) du SWE quotidien......74

- Figure 2.13 Hydrogramme de crue des Qmoy journaliers (panneau du haut) et des Nmoy journaliers (panneau du bas) à la centrale Carillon (données fournies par HQ), du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai, ce pour les six années ayant enregistré les Qmax printaniers les plus élevés. Les lignes noires hachurées représentent les seuils d'inondation mineure estimés à 5 175,91 m<sup>3</sup>/s pour les valeurs de débit (SI<sub>Q</sub>) et à 23,8 m pour les valeurs de niveau d'eau (SI<sub>N</sub>) (cf. section 2.2.4a). .................................90
- Figure 2.15 Anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 2010) des Qmax et Nmax printaniers à la centrale de Carillon, de 1963 à 2019......94

Figure 3.1 Histogramme des superficies relatives à la superfic	cie totale du BVRO
occupées par chaque catégorie d'utilisation du sol, ce en 1	990 (bandes rouges),
2000 (bandes jaunes) et 2010 (bandes orange). Les catégor	ies représentées sont
les eaux, les forêts, les milieux humides (MH) et prairies,	les autres terres, les
terres cultivées et le milieu urbain.	

- Figure 3.6. Indices spatiaux standardisés moyens IAM (panneaux du haut) et NR (panneaux du bas), du mois d'avril (panneaux de gauche) et du mois de mai (panneaux de droite), représentés à l'échelle des SBV. L'indice IAM révèle l'intensité de l'aléa hydrométéorologique qui tient compte des anomalies standardisées des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot. L'indice NR est l'indice final de niveau de risque qui tient compte des indices VE et IAM....150
- Figure A.1 Cartographie des stations d'ECCC dont les données ont été utilisées pour le calcul des anomalies standardisées moyennes pour l'ensemble du BVRO. Les stations sont situées à l'intérieur du BVRO ou à moins de 75 km de distance.

- Figure B.1 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois de mars pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.xxviii
- Figure B.2 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois d'avril pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.
- Figure B.3 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois de mai pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.....xxx
- Figure C.1 Tendances par décennie calculées pour la période 1981 2017 des indices Tmoy, PrcpTot et SWE. Les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value ≤ 0,1) sont représentées spatialement à 1 km de résolution sur l'ensemble du BVRO et ont été calculées à partir des données DAYMET.....xxxii
- Figure D.1 Tendances par décennies des débits et des niveaux d'eau (Qmoy, Qmin et Qmax, cf. Tableaux 2.3 et 2.6) des mois de novembre à mai pour la période de 1963 à 2019 (panneaux du haut) et de 1998 à 2017 (panneaux du bas). Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value ≤ 0,1) sont représentées. xxxiv
- Figure E.1 Météogramme quotidien du 1<sup>er</sup> novembre au 1<sup>er</sup> juin 2017 réalisé à partir des variables météorologiques journalières observées à la station de Rigaud d'ECCC. Le panneau du haut correspond aux températures maximales (en rouge), minimales (en bleu) et moyennes (en vert) quotidiennes. Le panneau du milieu représente les accumulations journalières totales de la précipitation liquide (en bleu) et solide (en vert). Le panneau du bas correspond à la quantité de neige au sol (en vert) telle que mesurée à la station (Source : Gachon *et al.*, 2018, p. 26).....xxxv
- Figure F.1 Histogrammes des anomalies standardisées moyennes à l'échelle du BVRO des indices et variables météorologiques des mois de mars (panneau du haut à gauche), d'avril (panneau du haut à droite) et de mai (panneau du bas), calculées à partir des données d'observation aux stations d'ECCC, pour les huit années à plus fort débit enregistré à Carillon depuis 1963......xxxvi

- Figure G.1 Histogrammes des anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 à 2010) des indices météorologiques moyennés spatialement sur l'ensemble du BVRO du mois de mars, de 1981 à 2017, calculées à partir des données sous forme de grille DAYMET.....xxxviii
- Figure G.2 Histogrammes des anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 à 2010) des indices météorologiques moyennés spatialement sur l'ensemble du BVRO du mois d'avril, de 1981 à 2017, calculées à partir des données sous forme de grille DAYMET......xxxix
- Figure G.3 Histogrammes des anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 à 2010) des indices météorologiques moyennés spatialement sur l'ensemble du BVRO du mois de mai, de 1981 à 2017, calculées à partir des données sous forme de grille DAYMET......xl
- Figure H.1 Extension géographique de l'inondation du lac des Deux-Montagnes à Rigaud le 6 mai 2017. La couche en bleu représente l'extension spatiale issue des données d'observation par satellite, corrigée à partir des données de topographie, et la couche jaune, superposée à la couche bleue, représente l'extension géographique obtenue par modélisation à partir des outils d'Arc Hydro......xli
- Figure I.1 Cartographie des versions de données géospatiales de la pédologie utilisées pour caractériser le BVRO. La portion en jaune représente la part du BVRO pour laquelle les polygones de sol de la version 2.2 ont été utilisés dans les analyses. Les données concernant le drainage étaient manquantes pour ce secteur dans la version plus récente. La portion en bleu représente la part du BVRO pour laquelle les polygones de sol de la version 3.2 ont été utilisés dans les analyses.......xlii
- Figure J.1 Indices spatiaux standardisés moyens d'utilisation du sol (US) (panneau du haut à gauche), de pente (P) (panneau du haut à droite) et de drainage (Dr) (panneau du bas) pour chacun des SBV du BVRO. Plus l'indice est près de 1 (ou tend vers le rouge), plus celui-ci témoigne d'une contribution importante du secteur au ruissellement de surface en présence d'aléas météorologiques.....xliv
- Figure K.1 Indices spatiaux standardisés moyens IAM (panneau de gauche) et NR (panneau de droite) au mois de mars pour chacun des SBV du BVRO......xlv

#### LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.1. Principaux dommages causés par l'inondation printanière de 2017, recensés à Rigaud (Québec, Canada) (Source : Gachon *et al.*, 2018).....20

- Tableau 2.5. Définition des données géospatiales utilisées. Les limites du BVRO et des SBV proviennent du RHN. Le MNT à 1 m de résolution est dérivé à partir de relevés LiDAR produits en 2011 et 2018 par le gouvernement du Québec. Les photographies aériennes sous format papier sont fournies par le gouvernement du Québec entre 1964 et 1997. Les photographies de 2009, 2014 et 2017 sont fournies dans un format numérique, et sont géoréférencées et orthorectifiées. Les photos de 2014 et 2017 proviennent de Géomont. Finalement, les polygones

- Tableau 2.6. Définition des indices hydrologiques univariés et multivariés. Les indices mensuels sont calculés pour tous les mois de novembre à mai alors que les indices printaniers sont calculés pour la période allant du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai......45

- Tableau 2.13. Tendances décennales des indices printaniers Qmax et Nmax, calculées pour les périodes de 1963 à 2019, de 1981 à 2017 et de 1998 à 2017. Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value ≤ 0,1) sont données......72

- Tableau 2.17. Valeurs médianes pour les distributions des débits et niveaux d'eau<br/>printaniers maximaux, moyens et minimaux à Carillon, sur la période de 1963 à<br/>2019.92
- Tableau 2.18 Périodes de retour des 10 inondations majeures à Rigaud depuis 1963, estimées à partir des séries temporelles complètes des Qmax et Nmax printaniers, et également sans considérer les valeurs extrêmes. Les périodes de retour ont été estimées à partir de la distribution de GEV et les distributions ont été ajustées par la méthode du maximum de vraisemblance. Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité sont validées dans les trois cas en considérant les Qmax printaniers. Elles sont toutefois rejetées dans tous les cas en considérant les Nmax printaniers.

Tableau 2.19. Quantiles de crue associés aux périodes de retour de 2, 10, 20, 50, 100,
350 et 500 ans, estimés à partir des séries temporelles complètes des Qmax et
Nmax printaniers et sans considérer les valeurs extrêmes. Les quantiles ont été
estimés à partir de la distribution de GEV et les distributions ont été ajustées par
la méthode du maximum de vraisemblance. Les hypothèses d'indépendance,
d'homogénéité et de stationnarité sont validées dans les 3 cas en considérant les
Qmax printaniers. Elles sont toutefois rejetées dans tous les cas en considérant
les Nmax printaniers97
Tableau 2.20. Seuils d'inondation mineure estimés à partir de la distribution GEV des

- Tableau 2.24. Valeurs de la borne supérieure de chaque classe pour les indices desévérité de l'aléa d'inondation (IF, ID, IS et IB).105
- Tableau 3.1 Données géospatiales utilisées pour la caractérisation de l'exposition au risque d'inondation à Rigaud. Les données relatives à la délimitation des zones inondables à Rigaud ont été produites par Géomont (en 2014) et les bâtiments principaux ont été numérisés à partir des mosaïques d'orthophotographies (voir Tableau 2.5).

- Tableau 3.3. Définition des données géospatiales utilisées pour l'évaluation de lasensibilité du BVRO au risque d'inondation.126

- Tableau 3.10. Définition des grandes catégories d'utilisation du sol (cf. base de données « Utilisation des terres du Canada », Tableau 3.3) pour lesquelles les changements de superficies sont quantifiés dans le temps. La contribution au ruissellement est « Favorable » si la catégorie est connue pour contribuer à

- Tableau 3.15 Principales caractéristiques physiographiques du BVRO et des SBV. La superficie, les altitudes moyennes, maximum et minimum, et la pente moyenne ont été calculées dans un SIG à partir du MNE du BVRO (Tableau 3.3) et des couches vectorielles provenant du RHN représentant les limites des bassins. 143
- Tableau 3.17. Moyenne pondérée du taux de changement annuel du nombre de bâtiments dans la ZE à Rigaud (ΔExpo) pour chaque période étudiée, y compris la période complète de 1970 à 2017. Les taux de changements du nombre de bâtiments pour chacune des zones ayant servi au calcul de la moyenne pondérée sont également présentés, en plus des valeurs observées pour la ZE complète.
- Tableau 3.18. Récapitulatif des indices de risque moyens (VE, IAM et NR) calculés à

   l'échelle des SBV.

Tableau A.1 Stations d'ECCC dont les données ont été utilisées pour le calcul des anomalies standardisées moyennes des différents indices à l'échelle du BVRO, pour les huit années à plus fort débit enregistré à Carillon depuis 1973. Pour la période 1963-1980, 21 stations ont été utilisées, alors que pour la période 1981-2017, un total de 95 stations a été utilisé, compte tenu de la période d'enregistrement des données de chacune des stations. Les stations sont situées dans le BVRO ou à moins de 75 km de distance. Pour plus de détails, consulter Gachon *et al.* (2018).

# LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AGRCQ	Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec
BAC	Bureau d'assurance du Canada
BAnQ	Bibliothèque et Archives nationales du Québec
BVRO	Bassin versant de la rivière des Outaouais
C3S	Copernicus Climate Change Service
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
FCM	Fédération canadienne des municipalités
GC	gridcode
GEV	Generalized extreme values
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HQ	Hydro-Québec
INSPQ	Institut National de Santé publique du Québec
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IQR	Écart interquartile
IRI	International Research Institute for Climate and Society
LiDAR	Light detection and ranging
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MAMOT	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la
	Lutte contre les changements climatiques
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements
МН	Climatiques Milieux humides
MNF	Modèle numérique d'élévation
	Modèle numérique de torrain
IVIIN I	mouere numerique de terrain

Municipalité régionale de comté de Vaudreuil-Soulanges
Ministère de la Sécurité publique
North American Datum
National Aeronautics and Space Administration
Network Common Data Form
National Geospatial-Intelligence Agency
Landsat Operational Land Imager
Ontario
Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques
Québec
Réseau hydrographique national du Canada
Ressources naturelles Canada
Sous-bassins versants
Système d'information géographique
Sécurité publique Canada
Shuttle Radar Topographie Mission
Standardisé
Snow Water Equivalent
United Nations Office for Disaster Risk Reduction
United Nations International Strategy for Disaster Reduction
World Meteorological Organization
Zone d'étude locale

# LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS

$\Delta$	taux de changement
%	pour cent
kg/m <sup>2</sup>	kilogramme par mètre carré
kg/m3	kilogramme par mètre cube
km	kilomètre
km <sup>2</sup>	kilomètre carré
m	mètre
$m^3/s$	mètre cube par seconde
mm	millimètre
Nb	nombre

# LISTE DES VARIABLES ET INDICES

## Variables hydrométéorologiques

Moyenne journalière du débit à Carillon
Moyenne journalière du niveau d'eau en aval de Carillon
Précipitation journalière totale
Température journalière maximale
Température journalière minimale
Équivalence en eau de la neige
Densité de la neige
Équivalence en eau de l'épaisseur de la neige

# Indices hydrométéorologiques univariés

Qmax	Débit maximal
Qmin	Débit minimal
Nmax	Niveau d'eau maximal
Nmin	Niveau d'eau minimal
SIQ	Seuil d'inondation mineure estimé en fonction des Qmax printaniers
SI <sub>N</sub>	Seuil d'inondation mineure estimé en fonction des Nmax printaniers
Prcp1	Nombre total de jours de pluie (PrcpTot $\geq 1 \text{ mm}$ )
Prcp90	90e percentile de la précipitation
SDII	Simple Daily Intensity Index
CWD	Consecutive Wet Days
AccuSaison	Précipitation saisonnière totale
Tmoy	Température moyenne
AccuSWEmoy	Taux moyen journalier d'accumulation de la neige par jours de neige
AccuSWEtot	Quantité totale de neige accumulée
DimSWEmoy	Taux moyen journalier de fonte de la neige par jours de fonte
DimSWEtot	Quantité totale de neige fondue

# Indices hydrologiques multivariés

D <sub>Q</sub>	Durée de l'inondation en considérant les Qmoy
$D_N$	Durée de l'inondation en considérant les Nmoy

#### Indices multicritères

IF	Indice de fréquence de l'a	aléa hydrologique
----	----------------------------	-------------------

- $ID Indice de durée en fonction de D_Q$
- IS Indice de submersion en fonction de  $D_N$
- IB Indice d'exposition relatif au nombre estimé de bâtiments touchés
- SAI Indice de sévérité de l'aléa d'inondation

#### Indices de validation du modèle hydrologique

TP	True positive
FN	False Negative
FP	False Positive
TN	True Negative
I <sub>Sens</sub>	Indicateur de sensibilité
I <sub>PPP</sub>	Indicateur du pouvoir positif de prédiction

### Indices temporels

ΔExpo	Moyenne pondérée des taux de changements du nombre de
	bâtiments dans la ZE à Rigaud
∆Superficies	Taux de changement des superficies des grandes catégories
	d'utilisation du sol dans le BVRO pour différentes périodes

#### Indices de risque

US	Indice d'utilisation du sol
Р	Indice de pente
Dr	Indice de drainage
VE	Indice de vulnérabilité environnementale
Ano. Std DimSWEtot	Anomalie standardisée de l'indice mensuel DimSWEtot
Ano. Std PrcpTot	Anomalie standardisée de l'indice mensuel PrcpTot
Ano. Std Prcp90	Anomalie standardisée de l'indice mensuel Prcp90
IAM	Indice de l'intensité de l'aléa météorologique
NR	Indice du niveau de risque

# RÉSUMÉ

Ce travail de recherche a pour objectif d'évaluer le risque d'inondation printanier à Rigaud (Québec, Canada), en faisant une analyse de cas de l'inondation historique du printemps 2017. Dans la première partie de ce mémoire, une analyse des conditions météorologiques printanières dans le bassin versant de la rivière des Outaouais (BVRO) est d'abord réalisée à partir des données météorologiques sous forme de grille (DAYMET) à 1 km de résolution (1980 à 2017), mais également à partir des données météorologiques de stations d'Environnement et Changement climatique Canada (1963 à 2017). La sévérité des aléas d'inondation à Rigaud (1963 à 2019) est ensuite évaluée en termes d'ampleur de l'aléa hydrologique et des dommages potentiels associés. Dans la seconde partie de ce mémoire, l'exposition au risque d'inondation à Rigaud ainsi que les conditions socio-environnementales contribuant à exacerber le risque d'inondation à l'exutoire du bassin sont caractérisées. Une analyse multicritère qui tient compte de la pente, de la capacité de drainage des sols et de l'utilisation du sol en plus des caractéristiques de l'aléa météorologique dans le BVRO permet d'estimer la contribution des sous-bassins versants (SBV) à l'inondation printanière de 2017 à Rigaud.

Au printemps 2017, le dégel brusque du début avril ainsi que le caractère exceptionnellement intense et régulier des événements de précipitation liquide aux mois d'avril et mai, généralisés sur l'ensemble du BVRO, ont contribué en partie à la sévérité de l'inondation. Ces facteurs météorologiques ont eu des conséquences importantes sur l'occurrence et l'intensité de l'inondation durant ces mois, d'autant plus que les conditions les plus extrêmes se sont produites dans les SBV les plus près de l'exutoire et les plus vulnérables, compte tenu de leurs fortes pentes et des modifications importantes au territoire engendrées par les activités humaines entre 1990 et 2010. L'indice de sévérité révèle que les inondations de 2017 et de 2019 se distinguent des autres inondations majeures en raison de l'intensité des débits journaliers enregistrés à l'exutoire du BVRO sur une durée de plus de 40 jours, alors que les dernières inondations historiques de 1974 et 1976 ont plutôt enregistré des niveaux d'eau records à l'exutoire du bassin. À Rigaud, l'exposition au risque d'inondation s'est également accrue entre 1970 et 2017, en raison du développement de l'aménagement périurbain (infrastructure et construction résidentielle) au cours de ces années, résultant en un potentiel de dommages beaucoup plus important lors des événements récents de 2017 et 2019.

Mots-clés : Inondation, risque d'inondation, aléa, facteurs de risque, conditions socioenvironnementales, conditions hydrométéorologiques, exposition, bassin versant de la rivière des Outaouais, Rigaud.

#### ABSTRACT

The objective of this research is to assess the risk of spring flooding in Rigaud, Quebec, Canada, with a case analysis of the historic flooding in spring 2017. In the first part of this brief, an analysis of spring weather conditions in the Ottawa River watershed (BVRO) is first conducted from grid-based weather data (DAYMET) at 1 km resolution (1980-2017), as well as weather data from Environment and Climate Change Canada stations (1963-2017). The severity of the flood hazards in Rigaud (1963 - 2019) is then assessed in terms of the extent of hydrological hazard and associated potential damage. In the second part of this brief, exposure to flood risk in Rigaud and socio-environmental conditions contributing to exacerbating the risk of flooding at the outlet of the basin are characterized. A multi-criterion analysis that takes into account slope, soil drainage capacity and land use in addition to the characteristics of weather hazard in the BVRO estimates the contribution of sub-watersheds (SBV) to the 2017 spring flood in Rigaud.

In the spring of 2017, the sudden thaw in early April and the unusually intense and regular nature of liquid precipitation events in April and May, widespread throughout the BVRO, contributed in part to the severity of the flood. These weather factors had a significant impact on the occurrence and intensity of the flood during these months, especially since the most extreme conditions occurred in the SBV closest to the outlet and the most vulnerable given their steep slopes and significant changes to the territory caused by human activities between 1990 and 2010. The severity index shows that the floods of 2017 and 2019 differ from other major floods because of the intensity of daily flows recorded at the BVRO outlet over a period of more than 40 days, while the last historic floods of 1974 and 1976 recorded record water levels at the outlet of the basin. In Rigaud, exposure to flood risk also increased between 1970 and 2017, due to the development of peri-urban development (infrastructure and residential construction) during these years, resulting in a much greater potential for damage during the recent events of 2017 and 2019.

Keywords : Flooding, flood risk, hazard, risk factors, socio-environmental conditions, hydrometeorological conditions, exposure, Ottawa River watershed, Rigaud.

#### INTRODUCTION

À l'échelle mondiale, le nombre de catastrophes d'origine hydrométéorologique a connu une augmentation dans les cinquante dernières années, notamment les nombreux désastres reliés à des inondations de plus en plus intenses et fréquentes (Etkin *et al.*, 2004; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018; United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2015; World Economic Forum, 2018; World Meteorological Organization (WMO), 2018). Le nombre d'inondations recensées dans le monde au cours des 20 dernières années a d'ailleurs plus que doublé, avec une augmentation de 234 % par rapport à la période 1980 – 1999 (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) & United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2020). En moyenne au Canada, incluant le Québec, les inondations sont les aléas naturels à l'origine des catastrophes les plus fréquentes (40 %) et les plus coûteuses (Bureau d'assurance du Canada (BAC), 2015; Ressources naturelles Canada (RNCan) et Sécurité publique Canada (SP Canada), 2017).

Par ailleurs, le risque d'inondation est complexe, car il résulte de l'interaction entre de nombreux processus sociaux et environnementaux, reliés par exemple aux changements socio-économiques et climatiques, qui sont spatialement hétérogènes en plus d'être en constante évolution (Cardona *et al.*, 2012; Etkin *et al.*, 2004). L'intensité de l'inondation dépend avant tout de l'aléa météorologique et de ses caractéristiques qui affectent l'écoulement au sein du bassin versant, à la fois le niveau d'eau et le débit des rivières, ainsi que le taux (vitesse) d'augmentation ou de diminution de ceux-ci (Buttle *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 1995; Saint-Laurent et Hähni, 2008). Toutefois, d'autres facteurs de vulnérabilité et d'exposition des sociétés humaines et des

écosystèmes naturels, reliés par exemple à la croissance démographique, l'urbanisation, l'aménagement du territoire et les caractéristiques du bassin versant peuvent également exacerber la sévérité des inondations, leur extension sur le territoire ainsi que les dommages potentiels associés (Cardona *et al.*, 2012; Etkin *et al.*, 2004; Gachon, 2019; Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2012, 2014; IPCC, 2019; Knox, 2000; O'Neill *et al.*, 2017). Seule l'amélioration de la compréhension de tous les facteurs de risque peut permettre de mieux le gérer et d'augmenter la résilience des communautés vis-à-vis du risque d'inondation (Cardona *et al.*, 2012; UNISDR, 2015; Working Group on Adaptation and Climate Resilience, 2016).

Les inondations printanières de 2017, qui ont fortement touché l'aval du bassin versant de la rivière des Outaouais (BVRO), figurent parmi les pires inondations jamais connues au Québec, notamment en ce qui concerne le débit enregistré, la durée et l'extension géographique de cet événement qui a dépassé les records historiques dans plusieurs régions (Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), 2017; Gachon, 2019; Gachon *et al.*, 2018). Les dommages engendrés furent sans précédent, en considérant autant les dommages économiques (Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), 2020; Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP), 2017) que les répercussions sur la santé physique et psychosociale des communautés affectées (Gachon, 2019, Généreux *et al.*, 2020).

Notre recherche a pour objectif d'améliorer la connaissance du risque d'inondation à Rigaud (Québec, Canada), ville située à l'exutoire du BVRO, en faisant une analyse de cas de l'inondation historique du printemps 2017, l'événement le plus marquant jusqu'alors enregistré pour la ville (Gachon *et al.*, 2018). Pour ce faire, nous caractérisons de manière détaillée et complète l'aléa d'inondation dans le BVRO, mais

nous intégrons également certains facteurs d'exposition et de vulnérabilité au sein de nos analyses, lesquels permettent de réaliser un portrait plus complet du risque d'inondation à Rigaud.

Dans le Chapitre I, nous dressons d'abord un état des connaissances sur le risque d'inondation printanier, en régime hydrologique nivo-pluvial, dans le contexte des changements climatiques. Nous abordons ensuite plus spécifiquement le problème du risque d'inondation à Rigaud. Ce chapitre se termine par la présentation des objectifs principal et spécifiques de cette étude, et des hypothèses utilisées dans notre travail. Dans le Chapitre II, nous traitons de notre premier objectif spécifique de recherche étant d'évaluer l'aléa d'inondation depuis 1963 à Rigaud en tenant compte des caractéristiques des conditions météorologiques dans le BVRO (avant et pendant l'événement d'inondation) et de la sévérité des inondations recensées. Dans le Chapitre III, nous traitons de notre second objectif spécifique de recherche étant d'évaluer les facteurs environnementaux contribuant à exacerber le risque d'inondation, ce en tenant compte des conditions de vulnérabilité socio-environnementale à Rigaud et dans le BVRO, et du contexte relié aux conditions météorologiques particulières du printemps 2017 au sein de l'ensemble du bassin. Une conclusion générale est finalement présentée avec les faits saillants de notre étude et une mise en perspective des principaux résultats face aux changements climatiques, environnementaux et socioéconomiques à venir.

#### CHAPITRE I

#### ÉTAT DES CONNAISSANCES ET PROBLÉMATIQUE

#### 1.1 Mise en contexte

#### 1.1.1 Les changements climatiques : Le rôle des activités humaines

#### *a) Les changements climatiques à l'échelle globale*

L'augmentation récente de la concentration de CO<sub>2</sub> et des autres gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et de la température se fait à un rythme jamais vu, et ce, à l'échelle planétaire, surtout depuis les cinquante dernières années (IPCC, 2018). La communauté scientifique s'entend pour dire que le réchauffement planétaire récent est attribuable en majeure partie à cette augmentation de GES dans l'atmosphère, reliée aux activités humaines (Barrow et al., 2004; Bush et al., 2019; GIEC, 2012; IPCC, 2018; Wan et al., 2018; Zhang et al., 2006; Zhang et al., 2019). En effet, la contribution (significative) des activités humaines au réchauffement climatique n'est perceptible que depuis le début des années 1970, bien que celles-ci aient commencé à transformer notre environnement depuis des siècles (IPCC, 2018). Depuis l'ère industrielle, le changement climatique d'origine anthropique a d'ailleurs connu des périodes de réchauffement accru, alternées avec des périodes de réchauffement plus limité ou mineur, et ce en raison de la variabilité climatique naturelle qui se réalise à des échelles de temps saisonnières, multi-annuelles et multi-décennales, notamment via les modifications dans les circulations atmosphériques et océaniques (Barrow et al., 2004; Bush et al., 2019). En plus de contribuer aux émissions de GES dans l'atmosphère, les activités humaines transforment le territoire ce qui contribue d'autant plus à modifier le climat, que ce soit à l'échelle globale, mais aussi à des échelles continentales et régionales (Blöschl *et al.*, 2007; Pielke *et al.*, 2016).

#### *b) Les changements climatiques au Canada et au Québec*

Le Canada a connu un des réchauffements les plus rapides du globe avec une augmentation des températures moyennes annuelles de 1,7 °C au cours de la période historique de 1948 à 2016, et jusqu'à 2,3 °C pour le Nord du Canada, soit de deux à trois fois la tendance à l'échelle globale, avec un réchauffement encore plus prononcé en hiver et au niveau des extrêmes de température (Vincent et al., 2015; Wan et al., 2018; Zhang et al., 2019). Les forçages anthropiques sont d'ailleurs responsables de plus de la moitié de ce réchauffement (Zhang et al., 2019), excepté pour les températures moyennes hivernales où la variabilité naturelle du climat a joué un rôle plus important (Wan et al., 2018). Au Canada, le réchauffement anticipé d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle sera également d'environ le double de celui prévu à l'échelle mondiale (Bush et al., 2019; Vincent et al., 2015; Wan et al., 2018), et plus de trois fois celle-ci au-delà de 60° N (Ogden et Gachon, 2019). Au Québec, la température moyenne annuelle a augmenté de 1,1 °C au cours de la période de 1948 à 2016, soit un taux plus bas que pour l'ensemble du Canada (Cohen et al., 2019), mais qui varie régionalement et saisonnièrement. La tendance est plus importante en été et en automne, avec une augmentation de 1,5 °C, et de seulement 0,7 °C au printemps (Cohen et al., 2019), avec des taux de réchauffement plus élevés dans le Nord surtout au cours des récentes décennies. Par exemple au nord-est du Canada (au nord de 60° N et à l'est de 110° O), la température moyenne annuelle a augmenté de 0,75 à 1,2 °C par décennie au cours des trois dernières décennies, comparativement à environ 0,18 °C par décennie à l'échelle mondiale (Ogden et Gachon, 2019).

#### 1.1.2 Un cycle hydrologique profondément modifié

#### *a)* Les changements climatiques et le cycle hydrologique au niveau global

Le cycle hydrologique est affecté par la variabilité et les changements du climat, que ce soit à des échelles globales ou régionales, et ceci peut avoir des conséquences importantes sur les systèmes naturels et humains (Held et Soden, 2006; Knox, 2000; Milly et al., 2008). En effet, le cycle hydrologique est directement affecté par la température, en particulier parce que celle-ci détermine les trois phases de l'eau (solide, liquide et vapeur) et leur fluctuation dans le temps et dans l'espace, selon notamment la durée et l'occurrence des degrés jours de gel et de dégel. La température de l'air a également un effet direct sur le contenu de l'humidité atmosphérique. Plus la température de l'air est élevée, plus l'atmosphère peut contenir de vapeur d'eau (lien exponentiel via la loi de Clausius Clapeyron), et plus la température de l'eau est élevée, moins il faut d'énergie pour qu'elle s'évapore (Anctil et al., 2012; Held et Soden, 2006). Ces changements dans les caractéristiques de l'atmosphère entrainent une amplification du cycle hydrologique en affectant simultanément plusieurs de ses composantes, notamment les types de précipitations et leur intensité (Gachon, 2019; Milly et al., 2008). Cette intensification du cycle hydrologique causée par le réchauffement climatique mondial est toutefois remise en cause dans certaines études récentes (Koutsoyiannis, 2020; Wang et al., 2008) qui suggèrent plutôt des phases d'intensification, alternées avec des phases de ralentissement du cycle hydrologique. Ces alternances de phases plus humides/sèches sont en effet corroborées via l'analyse des séries observées et via les conditions anticipées par les modèles climatiques, tout cela étant associé aux fluctuations climatiques multi-annuelles causées par la variabilité naturelle du climat (Koutsoyiannis, 2020). Somme toute, l'influence des facteurs anthropiques à eux seuls sur la réponse du cycle hydrologique est complexe et varie selon l'échelle temporelle utilisée (Kramer et Soden, 2016). Les phénomènes d'intermittence phases humides/phases sèches sont certes beaucoup plus complexes à étudier que les fluctuations des températures, d'autant plus que la réponse de la précipitation moyenne au réchauffement climatique planétaire se fait à un rythme beaucoup plus lent que celle de la vapeur d'eau (Held et Soden, 2006), surtout à haute fréquence (échelle horaire). Il est notamment suggéré que le réchauffement des températures a des impacts plus prononcés sur l'intensification des précipitations extrêmes horaires, que sur les précipitations extrêmes journalières, occasionnant une intensification du cycle hydrologique plus marquée à des échelles temporelles très courtes (Ali *et al.*, 2020).

Des répercussions des changements climatiques récents sur le cycle hydrologique, notamment l'augmentation de la quantité totale des précipitations, de leur intensité et de leur fréquence (Blöschl *et al.*, 2013; Gachon, 2019; GIEC, 2012; Wuebbles *et al.*, 2017), sont néanmoins déjà constatées à l'échelle globale. Le type de précipitation a également été affecté, notamment par une diminution des précipitations sous forme solide et du couvert neigeux, depuis les 60 dernières années (Derksen *et al.*, 2019; Wuebbles *et al.*, 2017). Le réchauffement climatique peut également accélérer la vitesse de fonte du couvert neigeux, faire fluctuer plus rapidement la teneur en eau du sol ainsi que de la végétation et augmenter l'évapotranspiration (Barrow *et al.*, 2004; Bonsal *et al.*, 2019; Derksen *et al.*, 2019; GIEC, 2012; IPCC, 2019).

#### *b) Le cas des régions nordiques : Le rôle de la cryosphère terrestre*

Au Canada, le réchauffement rapide et de plus grande ampleur du climat au cours de la période historique de 1948 à 2016, par rapport à la tendance globale, est en partie le résultat des facteurs d'amplification propres aux régions polaires et subpolaires, en particulier reliés à la diminution de la cryosphère (glace marine et neige surtout; Derksen *et al.*, 2019; IPCC, 2019).

En effet, dans les régions polaires et subpolaires, le cycle hydrologique est particulièrement affecté par la température et sa saisonnalité, alors que la neige et la glace en surface modifient l'albédo de surface et isolent le sol. L'eau gelée dans le sol, le pergélisol, contrôle en grande partie les processus hydrologiques qui s'y produisent, notamment la circulation et le stockage de l'eau. La forte saisonnalité des températures dans les régions polaires entraîne également des changements importants dans la rétention de l'eau en surface (Barrow *et al.*, 2004; Derksen *et al.*, 2019). Notamment, la forte saisonnalité des températures affecte la rétention ou libération de l'eau en surface (selon l'occurrence des températures < 0 °C) (Barrow *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2019).

Au Canada, ce réchauffement rapide et de plus grande ampleur a provoqué une augmentation des précipitations moyennes annuelles de 1948 à 2012, dans plusieurs régions du pays, et il est également anticipé que les précipitations moyennes annuelles, hivernales et extrêmes quotidiennes continuent d'augmenter d'ici la fin du XXIe siècle (Zhang et al., 2019; Ogden et Gachon, 2019). De plus, une réduction de 5 % à 10 % par décennie de l'accumulation de neige saisonnière est projetée jusqu'au milieu du 21<sup>e</sup> siècle, pour une grande partie du sud du Canada (Derksen *et al.*, 2019). Au Québec, les précipitations moyennes annuelles ont augmenté de 10,5 % entre 1948 et 2012, avec des tendances plus marquées en hiver (5,3 %) et au printemps (20,9 %) (Cohen et al., 2019; Zhang et al., 2019). Les précipitations totales annuelles pourraient augmenter également de 7,1 % à 9,4 % de 2031 à 2050, dépendamment du scénario d'émission de GES utilisé (Cohen et al., 2019), voire de plus de 15 % pour la majorité des régions du Canada, par rapport à la période historique, d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle (cf. Figure 1 dans Ogden et Gachon, 2019). La fréquence, la durée et l'intensité anticipées des événements de précipitation extrêmes sont également en augmentation et vont continuer d'augmenter dans les prochaines décennies (Bourque et Simonet, 2007;

Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques (OQACC), 2017), tout particulièrement les précipitations saisonnières, en hiver et au printemps, en plus de la fréquence des événements de précipitation abondante et de forte intensité (Bourque et Simonet, 2007; Cohen *et al.*, 2019; Ouranos, 2015; OQACC, 2017; Gachon *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019).

# c) Liens connus entre régime nivo-pluvial des cours d'eau et conditions météorologiques

Des changements plus ténus dans le régime de précipitation peuvent cependant avoir des impacts non négligeables, voire significatifs, sur le débit annuel moyen des cours d'eau et sur le risque d'inondation (IPCC, 2018; Knox, 2000). À l'échelle planétaire, le nombre de catastrophes d'origine hydrométéorologique comme les inondations a augmenté drastiquement dans les dernières décennies, et il est prévu que leur fréquence et leur intensité augmentent dans les années à venir (Gachon, 2019; GIEC, 2012; Groisman *et al.*, 2004; Held et Soden, 2006; Hubbard *et al.*, 1997; IPCC, 2018, 2019; World Economic Forum, 2018; WMO, 2018).

Au Québec, le régime de la majorité des cours d'eau est de type nivo-pluvial, c'est-àdire affecté par des précipitations liquides et sous forme de neige (Anctil *et al.*, 2012), dépendant donc fortement du régime de températures, et donc de la rétention d'eau sous forme solide qui joue un rôle non négligeable sur les régimes de basses et de hautes eaux. Dans ce régime, le débit des cours d'eau est minimal en été et dans une moindre mesure en hiver (deux périodes d'étiage en général) et maximal au printemps (lors de la phase de dégel), occasionnant fréquemment des inondations majeures durant cette période de l'année (Anctil *et al.*, 2012; Buttle *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 1995; Saad *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2001). Le plus souvent, les processus à l'origine de l'amplification de la crue printanière sont associés à l'accumulation d'un important couvert de neige durant l'hiver, combinée à l'arrivée des températures positives au
printemps favorisant la fonte du manteau de neige et à l'occurrence concomitante d'événements de précipitations liquides abondantes et de forte intensité (Buttle *et al.*, 2016; Etkin *et al.*, 2004; Gachon *et al.*, 2018; Saad *et al.*, 2016).

L'impact du réchauffement climatique futur sur l'intensité de la crue printanière est encore très incertain. En effet, il est encore difficile de prévoir, régionalement, de quelle manière le cycle hydrologique réagira au climat changeant, et l'incidence que ces modifications auront sur les débits et les niveaux d'eau printaniers (Berghuijs *et al.*, 2014; Bonsal *et al.*, 2019; Buttle *et al.*, 2016). Au Québec, les températures et les précipitations connaissent d'importantes variabilités saisonnière, interannuelle et interdécennale (Barrow *et al.*, 2004; Buttle *et al.*, 2016) et la variabilité des températures est d'autant plus grande en hiver alors que les précipitations peuvent fluctuer largement en types et en intensité, mais elle est également considérable au printemps (Ouranos, 2015). Cette importante variabilité, conditionnée par son étendue géographique, l'influence maritime et l'hétérogénéité de son relief (Ouranos, 2015; Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), 2020a), rend d'autant plus complexe la projection des impacts du réchauffement climatique d'origine anthropique sur le cycle hydrologique (Barrow *et al.*, 2004; Kramer et Soden, 2016; Zadeh *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2001).

La variabilité naturelle du climat pourrait contribuer à accentuer les perturbations du cycle hydrologique induites par le réchauffement climatique d'origine anthropique (Cohen *et al.*, 2019; Zadeh *et al.*, 2020). D'après plusieurs études, les changements climatiques ont contribué jusqu'à présent à devancer l'arrivée de la crue printanière dans les rivières du Sud du Québec, apparaissant jusqu'à 20 jours plus tôt que la normale (Cohen *et al.*, 2019), et il est prévu qu'elle ait lieu encore plus tôt dans le futur (Barrow *et al.*, 2004; Cohen *et al.*, 2019). La diminution observée de l'extension

spatiale du couvert neigeux et de son épaisseur dans les dernières décennies (Brown et Braaten, 1998; Derksen *et al.*, 2019; Mudryk *et al.*, 2015; Najafi *et al.*, 2016), davantage marquée en automne et au printemps, est entre autres à l'origine de cette crue printanière plus précoce (Zhang *et al.*, 2001; Vincent *et al.*, 2015). Il est prévu que le couvert de neige continue de diminuer ce qui pourrait contribuer à une tendance à la baisse des débits de crue printaniers futurs (Berghuijs *et al.*, 2014; Derksen *et al.*, 2019; Groisman *et al.*, 2004; Quilbé *et al.*, 2008), mais les débits maximaux annuels pourraient se produire plus tôt au cours de l'année (IPCC, 2019).

Sous un autre angle, l'augmentation anticipée de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitation au printemps pourrait également contribuer à amplifier le ruissellement de surface direct, même si le couvert de neige diminue, en plus d'accélérer la fonte de celui-ci (Berghuijs et al., 2014; Bonsal et al., 2019; Cohen et al., 2019; Groisman et al., 2004; Zhang et al., 2001; Zhang et al., 2019). D'autres études suggèrent également que des périodes d'intensification et de ralentissement du cycle hydrologique vont s'alterner dans les prochaines décennies, sans qu'il soit possible de prévoir des tendances claires à long terme (Koutsoyiannis, 2020; Wang et al., 2008; Zadeh et al., 2020). Les conclusions de l'étude de Zadeh et al. (2020) supposent notamment que les changements récents observés dans l'intensité des inondations au Canada vont persister dans le futur, en raison des impacts des changements climatiques et des modifications dans l'utilisation du sol. De plus amples recherches doivent toutefois encore être menées pour mieux comprendre l'impact de ces changements sur l'évolution probable des débits à des échelles régionales, voire locales, dans un contexte de régime de précipitation mixte (Bonsal et al., 2019; Buttle et al., 2016; Cohen et al., 2019; Derksen et al., 2019; Quilbé et al., 2008; Wang et al., 2008; Zhang et al., 2019).

En définitive, la complexité de la réponse du cycle hydrologique aux changements du climat nécessite de prendre en compte des échelles spatiales et temporelles des phénomènes non explicitement résolus par les modèles globaux du climat à basse résolution (IPCC, 2019). À l'échelle des bassins versants, il est souvent difficile d'anticiper de manière précise et robuste la réponse du cycle hydrologique au réchauffement climatique. Ces enjeux démontrent l'importance de favoriser le développement de modèles régionaux à très haute résolution (couplés à des modèles hydrologiques) qui tiennent compte des particularités physiographiques et climatiques locales, et d'optimiser l'utilisation de données observées à l'échelle du territoire étudié, afin de mieux prévoir les effets des changements du cycle hydrologique à l'échelle des bassins versants (Barrow *et al.*, 2004; Berghuijs *et al.*, 2014).

# 1.1.3 Les risques climatiques et les inondations

# *a) Le concept de risque*

Bien que le risque d'inondation ait longtemps été étudié du seul point de vue de l'aléa hydrologique (Planification d'urgence Canada, 1974; Lawford *et al.*, 1995; Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2006; Québec. MSP, 2008a), il est pourtant beaucoup plus complexe et fait interagir plusieurs composantes. Les risques climatiques, incluant le risque d'inondation, résultent de l'interaction des aléas naturels affectés par les changements du climat, l'exposition des humains, des infrastructures et écosystèmes à ces aléas, et les vulnérabilités des systèmes exposés (IPCC, 2019). Ainsi, en plus de l'aléa hydrométéorologique, d'autres facteurs de vulnérabilité et d'exposition contribuent à modifier l'intensité de la crue (Figure 1.1), voire l'intensité de l'inondation et de ses conséquences (Cardona *et al.*, 2012). Une augmentation de tous les facteurs de risque a d'ailleurs été observée dans les dernières décennies (LaKind *et al.*, 2016; World Economic Forum, 2019).





Le risque n'existe donc que par l'importance des enjeux qui sont potentiellement menacés ou exposés (Manche, 1997) ou plus généralement selon le contexte dans lequel l'aléa hydrométéorologique se produit en termes de vulnérabilité et d'exposition (cf. Figure CB2.1 dans le rapport de l'IPCC, 2019). Le niveau de vulnérabilité et le degré d'exposition des systèmes naturels et humains peuvent d'autant plus conditionner l'ampleur des dommages (Cardona *et al.*, 2012; IPCC, 2019). L'urbanisation croissante, l'augmentation de la valeur totale des biens, la croissance démographique et économique, mais aussi la croissance des inégalités sociales et sociosanitaires en plus du vieillissement des populations et des infrastructures, plus particulièrement au Québec, ont contribué à exacerber les facteurs de vulnérabilité et d'exposition au risque d'inondation dans les dernières décennies (BAC, 2015; Cardona *et al.*, 2012; Gachon, 2019; IPCC, 2019; O'Neill *et al.*, 2017; OQACC, 2017).

#### *b) Les risques d'inondations : De la crue à l'inondation majeure*

La crue printanière se produit périodiquement dans les cours d'eau du sud du Québec. L'occurrence d'événements météorologiques particuliers, au même moment, combinée à la présence de certains facteurs de risque, peut amplifier la crue, voire générer des inondations. Les conditions environnementales des bassins versants peuvent notamment agir comme vecteurs de modification du risque, en contribuant à exacerber l'intensité voire la durée de la crue (Etkin et al., 2004). Le bassin versant est une unité géographique qui délimite le cheminement des eaux de surface, de l'amont vers l'aval, jusqu'à un point de confluence appelé exutoire (Québec. Ministère de l'Environnement, 2004) et il conditionne les processus de transfert des eaux à l'origine des inondations (Scarwell et Laganier, 2004). Par exemple, les propriétés du sol comme sa capacité d'infiltration, la profondeur de la couche de sol et sa porosité contribuent à modifier l'intensité du ruissellement de surface et ultimement l'intensité de la crue en présence d'événements météorologiques extrêmes (Blöschl et al., 2007; Mohamoud, 2004). Les conditions de rétention de l'eau en surface du sol, qui dépendent de l'état de saturation du sol ou de son état de gel jouent également un rôle important sur la réponse hydrologique au sein d'un bassin versant et de son réseau hydrographique (Barrow et al., 2004; Bonsal et al., 2019). Notamment, lors d'un ou des événements de précipitation, les conditions de surface et dans le sol ont une influence significative sur la fréquence des inondations causées par ruissellement excessif, tout particulièrement lors d'événements de précipitation intense (Blöschl et Sivapalan, 1997; Blöschl et al., 2013).

La crue des eaux peut également être exacerbée par des facteurs géomorphologiques, comme les caractéristiques morphologiques ou sédimentaires des territoires concernés, le relief et le réseau hydrographique du bassin versant (Cognard-Plancq *et al.*, 2001; Matheussen *et al.*, 2000; Mohamoud, 2004). Les activités humaines comme la

déforestation, l'urbanisation, l'agriculture ou le drainage et le rehaussement (artificiel versus naturel) des cours d'eau peuvent jouer un rôle d'autant plus important sur la sévérité des inondations en transformant la couverture du sol et son imperméabilité, voire sa capacité d'infiltration, ce qui contribue à augmenter l'ampleur et la vitesse du ruissellement vers les cours d'eau en aval du bassin (Bonsal *et al.*, 2019; Boucher, 2010; Castonguay, 2007; Mayhew, 2009; Mohamoud, 2004; Scarwell et Laganier, 2004). L'influence des types d'utilisation du sol sur les débits en aval ne semble pourtant être significative que durant la saison de croissance, provoquant peu ou pas d'impacts sur les débits hivernaux et printaniers (Fohrer *et al.*, 2001; Quilbé *et al.*, 2008; Scarwell et Laganier, 2004). Mais tout cela dépend du milieu ou de l'endroit et de la taille du bassin versant concerné, voire des processus impliqués dans les crues printanières, notamment lorsque ces dernières sont associées à des embâcles de glace ou d'autres matériaux présents dans le lit des rivières (Biron *et al.*, 2020; Boivin *et al.*, 2019).

En outre, les impacts de l'utilisation du sol sur les débits de pointe peuvent parfois être plus importants lors d'événements d'inondation de faible intensité dans des bassins versants de petite taille (Blöschl et Sivapalan, 1997; Blöschl *et al.*, 2007; Hollis, 1975; Hundecha et Bárdossy, 2004). Plusieurs études ont également démontré que la mise en place de structures d'atténuation (comme les digues ou les ouvrages de protection), aménagées pour mieux se protéger contre les inondations, contribue à modifier la dynamique hydrologique des cours d'eau, et conduit parfois, à des événements majeurs d'inondation, certes plus rares, mais générant des conséquences le plus souvent catastrophiques (Di Baldassarre *et al.*, 2013a, 2013b, 2015; Klein et Zellmer, 2007; Munoz *et al.*, 2018; Randolph, 2018; Werner et McNamara, 2007; White, 1945).

# 1.2 Nature du problème et conséquences des inondations

#### 1.2.1 Les facteurs d'exposition au Canada et au Québec

La plupart des études sur le risque d'inondation se sont le plus souvent intéressées aux seules caractéristiques physiques de l'aléa hydrologique, sans se préoccuper des conséquences de l'aléa et du contexte dans lequel il se produit (IPCC, 2019; Merz et Blöschl, 2008), donnant lieu à une mauvaise compréhension du phénomène dans son ensemble, et à une prise en compte limitée, voire inexistante, des facteurs d'exposition et de vulnérabilité (Cardona *et al.*, 2012; Gachon *et al.*, 2018; Veyret et Reghezza, 2006). L'étude du risque en tenant compte de tous les facteurs en cause contribuant à exacerber l'intensité et l'ampleur des inondations et des dommages associés, et menée en s'inspirant d'une approche géohistorique, peut certainement contribuer à favoriser la résilience des communautés et des écosystèmes vis-à-vis des inondations futures (Lang *et al.*, 1998; Scarwell et Laganier, 2004).

De nombreuses études ont démontré qu'en étudiant l'ensemble des facteurs de risque, il est possible de réduire les risques de catastrophes, ce qui permet d'éviter d'importants coûts économiques et humains (Auld et MacIver, 2007; IPCC, 2019; OQACC, 2017; UNISDR, 2015; Working Group on Adaptation and Climate Resilience, 2016). De plus, comme le souligne Ressources naturelles Canada (RNCan, 2018) :

En investissant de manière proactive dans des activités d'atténuation des inondations, une collectivité assure des investissements utiles à sa croissance et à sa prospérité à venir, en diminuant le risque de coûts importants pour le rétablissement après sinistre, les pertes de productivité, les pertes économiques, la destruction des biens culturels non monétaires, les dommages environnementaux, les blessures et les décès (RNCan, 2018, p.2).

Les meilleures stratégies de réduction du risque consistent notamment à diminuer la vulnérabilité et l'exposition des communautés, des populations et des infrastructures face à l'aléa, tout en renforçant leur résilience (Cardona *et al.*, 2012).

Pour mieux comprendre le risque d'inondation dans le sud du Québec et son évolution dans le futur, le rôle relié aux changements climatiques d'origine anthropique, par rapport aux effets reliés à la variabilité naturelle du climat, doit être étudié, notamment à l'aide des séries de données hydrométéorologiques les plus longues possibles, avant l'effet perceptible des activités humaines sur le climat et sur l'aménagement du territoire, et ce, à l'échelle des bassins versants. Ceci est d'autant plus important que les changements climatiques et les changements apportés à l'utilisation du sol affectent également la variabilité naturelle du climat, et se combine aux effets purement d'origine anthropique (Barrow *et al.*, 2004; Pielke *et al.*, 2016; Wuebbles *et al.*, 2017).

#### 1.2.2 Les coûts économiques et humains associés

Les inondations sont à l'origine des catastrophes les plus fréquentes et les plus coûteuses en moyenne au Canada, incluant le Québec (BAC, 2015; RNCan et SP Canada, 2017). Alors qu'environ 19 % de la population vit en zone inondable, les coûts liés aux inondations ont quadruplé durant les quatre dernières décennies, représentant 75 % des dépenses totales des Accords d'aide financière en cas de catastrophe, soit des montants d'argent substantiels que le gouvernement fédéral verse aux provinces, et continuent d'augmenter chaque année (BAC, 2019). Les pertes combinées par événement extrême ou aléa naturel ont monté en flèche, passant d'une moyenne de 8,3 millions de dollars dans les années 1970 à une moyenne de 112 millions de dollars de dollars de la catastrophe, soit une augmentation spectaculaire de 1 250 % (Sawyer *et al.*, 2020).

Au Québec, la population exposée à ce risque est de plus ou moins 20 % (BAC, 2019). Dans la province, plus d'une inondation majeure en moyenne par année est recensée depuis 25 ans (Institut National de Santé publique du Québec (INSPQ), 2018). Le risque d'inondation est d'autant plus préoccupant dans le contexte actuel des changements climatiques et démographiques, tel que suggéré précédemment.

#### 1.2.3 Les inondations récentes au Québec

### a) Événements des printemps 2011, 2017 et 2019

La dernière décennie a été marquée par plusieurs inondations majeures dans le sud du Québec, notamment les événements historiques des printemps 2011, 2017 et 2019. En 2011, c'est le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui fut principalement touché, après avoir connu une concomitance de températures chaudes, de précipitations record et de fonte rapide d'un manteau neigeux presque record (Saad *et al.*, 2015; Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 2019). Les tributaires du bassin ont enregistré des niveaux d'inondation historiquement parmi les plus élevés, occasionnant des répercussions de grande envergure sur l'économie et la santé des résidents de même que sur l'environnement naturel du bassin (Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 2019).

Plus récemment, les inondations printanières de 2017 et 2019 ont battu des records dans plusieurs régions du sud du Québec (Service de sécurité incendie de Montréal, 2020). L'analyse des territoires inondés lors de ces événements, réalisée par l'Institut de la Statistique du Québec (2019a), rapporte que plus des deux tiers des surfaces urbanisées qui ont été inondées dans les basses-terres du Saint-Laurent n'étaient pas classées comme étant inondables selon la Base de données sur les zones inondables (zone 0 - 100 ans).

À l'exutoire du BVRO, notamment à la périphérie du lac des Deux-Montagnes, les inondations de 2017 et 2019 ont battu des records en termes d'intensité, de durée, mais également d'extension spatiale, en générant des impacts économiques, de près d'un milliard de dollars, et sociaux sans précédent (Gachon et al., 2018; Québec. MAMH, 2020). La ville de Rigaud, située en aval du BVRO, connait fréquemment des inondations lors de la crue printanière de la rivière des Outaouais, compte tenu de sa localisation aux abords du lac des Deux-Montagnes, et de sa géomorphologie particulière (Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2020a; Municipalité régionale de comté de Vaudreuil-Soulanges (MRC-VS), 2004; Service de sécurité incendie de Montréal, 2020; Ville de Rigaud, 2017). La ville est située tout juste en aval de l'exutoire du bassin, au sud-est de la centrale hydroélectrique de Carillon, et sa limite nord longe le lac des Deux-Montagnes. Les volumes d'eau au printemps en provenance du BVRO et qui se jettent dans le lac des Deux-Montagnes, sont considérables, compte tenu de l'immensité du bassin, d'une superficie de 146 334 km<sup>2</sup> (Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2015a). La rivière des Outaouais est d'ailleurs le principal tributaire du fleuve Saint-Laurent, s'y jetant à la hauteur de la pointe ouest de l'île de Montréal. Bien que les inondations printanières soient fréquentes à Rigaud, celle du printemps 2017 fut d'une ampleur jamais vue, selon la ville, en plus de générer des dommages sans pareil (Gachon et al., 2018; Québec. MSP, 2017). Le débit de pointe à Carillon a atteint un nouveau record avec une valeur de 9 094,02 m<sup>3</sup>/s, bien que le débit maximum enregistré au printemps 2019 ait été encore supérieur. Au total, 542 habitations ont été affectées, 250 personnes ont fait une demande d'aide pour un hébergement d'urgence et 300 demandes d'aide financière ont été faites en raison des dommages au terrain ou au bâtiment causés par la crue des eaux (Gachon et al., 2018). L'extension spatiale des eaux a d'ailleurs dépassé la limite de la zone inondable 0 - 100 ans par endroits,

entrainant une réorchestration complète de la gestion du risque à l'échelle de la ville (Gachon *et al.*, 2018). Les dernières inondations majeures sur le territoire furent celles des printemps 1976 et 1974 (Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2018; Gachon *et al.*, 2018). Le Tableau 1.1 présente les principales caractéristiques de l'inondation de 2017 à Rigaud en termes de dommages.

Tableau 1.1. Principaux dommages causés par l'inondation printanière de 2017, recensés à Rigaud (Québec, Canada) (Source : Gachon *et al.*, 2018).

Résidences affectées	Personnes sinistrées	Personnes ayant demandé une aide pour un hébergement d'urgence	Bâtiments endommagés	Demandes d'aide financière
		(Nb)		
542	493	250	380	300

Il est encore impossible de savoir si les événements des printemps 2017 et 2019 sont un avant-goût des inondations auxquelles le Québec pourrait faire face dans le futur; les conséquences des changements climatiques des prochaines décennies sur le cycle hydrologique et l'intensité des crues printanières étant complexes et encore incertaines à l'échelle régionale ou locale (Bonsal *et al.*, 2019; Cohen *et al.*, 2019; Derksen *et al.*, 2019; Quilbé *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2019). Les relations entre l'ensemble des processus et conditions environnementales dans le BVRO et à Rigaud, qui peuvent contribuer à exacerber le risque d'inondation printanière en aval, notamment l'utilisation du sol et l'aménagement du territoire, doivent être étudiées dans une perspective de gestion intégrée du risque d'inondation par bassin versant, afin d'améliorer la compréhension du phénomène et de son comportement futur (Buttle *et al.*, 2016; Etkin *et al.*, 2004).

En particulier, il semble nécessaire de mieux comprendre en quoi les conditions hydrométéorologiques des inondations historiques récentes, d'abord, étaient différentes ou pas des inondations printanières précédentes (Scarwell et Laganier, 20 2004; Villet, 2016), mais également en quoi les caractéristiques et leur occurrence dans le temps et l'espace a contribué à exacerber l'intensité, la durée et l'extension géographique de l'inondation de 2017 (Buttle *et al.*,2016). La superficie du BVRO est telle que l'étude des facteurs de risque doit être réalisée à des échelles spatiales les plus fines possibles, afin de tenir compte des conditions environnementales les plus significatives quant à la réponse hydrologique du réseau hydrographique vis-à-vis de l'aléa météorologique (Castonguay, 2007; Merz et Blöschl, 2008; Québec. MAMH, 2020).

### *b) Initiatives gouvernementales*

Avant les événements de 2011, 2017 et 2019, plusieurs travaux ont mis en évidence la nécessité d'améliorer la gestion du risque de catastrophes avant l'événement, soit en prévention et en préparation, mais également au niveau des leçons apprises (après l'événement), afin d'améliorer de façon itérative et proactive la gestion des risques (Veyret et Reghezza, 2006; Saint-Laurent et Hähni, 2008; Québec. MSP, 2014).

Le gouvernement provincial a récemment adopté le Plan d'action en matière de sécurité civile relatif aux inondations (Québec. MSP, 2019) dans lequel les priorités sont tournées vers l'accroissement ou l'amélioration de la préparation, de la prévention et de la connaissance du risque. Il s'agit de dimensions à travers lesquelles la connaissance des conditions de vulnérabilité et d'exposition des systèmes est tout particulièrement mise de l'avant, afin de mieux atténuer les risques ou les facteurs associés (Québec. MSP, 2019). Cet ajustement de la gestion du risque, par rapport aux façons de faire précédentes du MSP, favorise ainsi une démarche cyclique « avant », « pendant » et « après » les événements, en plus d'accroître les connaissances du territoire, de l'aléa, mais également des conditions présentes lors des inondations passées, afin de mieux comprendre les facteurs en cause et mieux gérer le risque à venir

(Québec. MSP, 2014, 2019). De plus, le tout nouveau Plan de protection du territoire face aux inondations du Québec (Québec. MAMH, 2020) vise à identifier des solutions concrètes et durables pour protéger davantage les communautés riveraines à l'échelle des bassins versants. L'axe d'intervention 3 du Plan prône une meilleure planification de l'aménagement du territoire à l'échelle des bassins versants et l'axe 4, l'amélioration des connaissances du risque.

Dans cette perspective d'amélioration de la connaissance du risque d'inondation au Québec, nous nous intéressons au risque d'inondation dans le BVRO et plus particulièrement à l'inondation historique du printemps 2017 à Rigaud puisqu'aucune étude n'a jusqu'à présent caractérisé intégralement l'aléa d'inondation dans le BVRO ni abordé l'effet combiné des facteurs de risque d'inondation dans le bassin. De plus, comme la rivière des Outaouais est le principal tributaire du fleuve Saint-Laurent (Québec. MDDELCC, 2015a), y déversant un volume d'eau considérable à la hauteur de Montréal lors de chaque crue printanière, une meilleure compréhension des facteurs de risque d'inondation dans le BVRO, permettra nécessairement d'améliorer la résilience du secteur le plus peuplé de tout le Québec face au risque d'inondation (Institut de la statistique du Québec, 2019b), un secteur dont fait partie la ville de Rigaud, mais également la grande région ou communauté métropolitaine de Montréal (CMM, 2017).

# 1.3 Objectifs et hypothèses de l'étude

# 1.3.1 Objectifs principal et spécifiques

L'objectif principal de la recherche est d'évaluer le risque d'inondation à Rigaud (Québec, Canada) en utilisant le cas de l'inondation historique du printemps 2017. Deux objectifs spécifiques de recherche s'inscrivent dans cet objectif général :

- 1. Le 1<sup>er</sup> objectif spécifique est d'évaluer l'aléa d'inondation à Rigaud afin de :
  - Caractériser l'aléa météorologique à l'origine de l'inondation dans l'ensemble du BVRO.
  - Estimer l'ampleur des dommages potentiels causés par l'aléa d'inondation à Rigaud;
  - Estimer la sévérité de l'aléa hydrologique à Rigaud;
- 2. Le 2<sup>e</sup> objectif spécifique est d'évaluer les facteurs environnementaux contribuant à exacerber le risque d'inondation à Rigaud afin de :
  - Caractériser les conditions socio-environnementales dans le BVRO qui peuvent potentiellement aggraver ou exacerber le risque d'inondation;
  - Caractériser l'exposition au risque d'inondation à Rigaud;
  - Estimer la contribution de certains sous-bassins versants (SBV) au risque d'inondation à l'exutoire du BVRO.

# 1.3.2 Hypothèses

Afin de répondre à nos objectifs de recherche, nous posons les hypothèses suivantes :

- Nous considérons que les données hydrométéorologiques et géospatiales disponibles sont suffisantes pour caractériser l'aléa d'inondation à Rigaud, notamment :
  - Les données météorologiques sous forme de grille du Snow water equivalent (SWE), bien qu'entachées d'incertitude, sont suffisamment fiables pour permettre la caractérisation du couvert de neige et des processus d'accumulation et de fonte de neige dans le BVRO;
  - Les données hydrologiques à la centrale de Carillon permettent la caractérisation de l'aléa hydrologique à Rigaud et à l'exutoire du BVRO;

- Les photographies aériennes, qui sont utilisées, qui sont les seules sources d'information relative aux changements dans l'aménagement du territoire à Rigaud, sont suffisantes pour caractériser les principaux changements dans celui-ci à l'exutoire du BVRO.
- 2. Nous considérons que seules les données hydrologiques enregistrées à la centrale de Carillon sont suffisantes pour témoigner de l'effet des processus de ruissellement à l'exutoire du BVRO. La composante du ruissellement dans le bassin n'est pas estimée ou calculée, ce en raison de la complexité qu'impliquerait ce type de traitement de données;
- 3. Nous considérons que les facteurs d'exposition et de vulnérabilité étudiés, outre l'aléa naturel, sont suffisants afin d'évaluer les principales caractéristiques du risque d'inondation à Rigaud, dont certains facteurs seront négligés, et ce pour des raisons de faisabilité, et de l'envergure du travail que nécessiterait l'intégration de l'ensemble des facteurs de risque dans le cadre d'un travail de maîtrise.
- 4. Nous considérons finalement que les données géospatiales relatives à l'utilisation du sol, aux sols et au relief dans le BVRO suffisent à caractériser les principales conditions de vulnérabilité environnementales dans le bassin.

# 1.4 Cadre théorique et concepts

# 1.4.1 Cadre théorique

Dans le cadre de cette recherche, nous n'avons pas de cadre théorique de prime abord compte tenu de notre démarche qui est davantage heuristique, mais le processus emprunté s'apparente fortement à l'approche géohistorique où le terme géohistoire désigne « l'étude de la construction des espaces et des territoires sur la longue durée » (Ribeiro, 2012, p. 341). Au sein de cette approche, l'information historique est utilisée 24 comme première source de données afin de « restituer la dynamique et la structuration des milieux sur le temps long » (Jacob-Rousseau, 2009, p. 211) et permet de comparer des informations à différentes périodes (Scarwell et Laganier, 2004). Cette démarche s'applique concrètement dans l'étude et la gestion des risques naturels (Villet, 2016), bien qu'aucune théorie jusqu'à ce jour n'intègre l'ensemble des facteurs de risques dans l'étude de ceux-ci (Dauphiné et Provitolo, 2013). À partir de cette approche, dans le cadre de l'étude du risque d'inondation à Rigaud, la détermination de l'unité de temps est modulée entre autres par l'accès aux photographies aériennes, aux images satellitales, aux cartes et aux données hydrométéorologiques (Halimo, 2016; Scarwell et Laganier, 2004) et elle doit au mieux tenir compte des dernières inondations historiques des printemps 1974 et 1976 à Rigaud, et des éléments clés dans la caractérisation.

# 1.4.2 Principaux concepts

Notre recherche est construite autour du concept du risque d'inondation dans le contexte des changements climatiques. Les changements climatiques sont un processus clé dans le cadre de notre étude, puisqu'ils modifient le cycle hydrologique et ultimement le risque d'inondation. Nous reprenons la définition de la Conventioncadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) qui les définit comme des « changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (Nations Unies, 1992, p.4). Puis, nous définissons le risque d'inondation comme un événement dommageable, doté d'une certaine probabilité, lié à la conjonction de l'aléa d'inondation, des éléments qui y sont exposés et de leur vulnérabilité (Cardona *et al.*, 2012; IPCC, 2019; Québec. MSP, 2008b; Scarwell et Laganier, 2004). Le bassin versant est notre unité géographique d'étude dans l'analyse du risque d'inondation, puisqu'il conditionne les processus de transfert des eaux qui constituent l'élément déclencheur des inondations (Scarwell et Laganier, 2004).

L'aléa d'inondation est un facteur clé dans la première partie de notre recherche. Nous le définissons comme étant un phénomène ou événement hydrométéorologique d'intensité variable selon sa probabilité d'occurrence, et qui peut engendrer des dommages ou porter atteinte à autrui (Québec. MSP, 2008b; Scarwell et Laganier, 2004). Il est important de bien distinguer l'inondation printanière de la crue printanière. Une crue se définit comme une augmentation importante du débit et du niveau d'eau, le plus souvent attribuable à la fonte de la neige et aux précipitations liquides dans le cas des crues printanières (CEHQ, 2019a), et celle-ci se produit chaque année avec une ampleur variable. L'inondation printanière, quant à elle, est un processus physique qui est défini comme étant le débordement périodique des eaux hors du lit mineur et la submersion des terres avoisinantes par une crue qui excède la capacité normale d'écoulement d'un cours d'eau au printemps (George et Verger, 1970; Québec. MDDELCC, 2015b). Les inondations ne se produisent pas chaque année, et sont généralement des phénomènes rares ou peu fréquents. Afin de caractériser l'aléa d'inondation, nous nous intéressons particulièrement aux conditions météorologiques que nous définissons comme l'ensemble des circonstances atmosphériques comme les régimes de précipitation et de température en matière d'intensité, de durée et de fréquence qui favorisent l'occurrence et la sévérité d'un phénomène extrême, comme les inondations (Canada, 2014; Larousse, 2018; Saad et al., 2015).

Dans la seconde partie de la recherche, nous nous intéressons plutôt aux autres facteurs de risque qui contribuent à exacerber le risque d'inondation, en particulier la composante de l'exposition. L'exposition, face au risque d'inondation dans notre cas, est définie comme l'inventaire des éléments dans un territoire où peuvent se produire des aléas (Cardona *et al.*, 2012), mais elle se traduit également en termes de dommages potentiels proportionnels à l'intensité de l'aléa (Cardona *et al.*, 2012; Scarwell et Laganier, 2004). Il s'agit d'un déterminant essentiel du risque (Cardona *et al.*, 2012).

Nous nous intéressons également à la sensibilité ou vulnérabilité environnementale, que nous définissons comme étant la prédisposition du territoire à contribuer à l'augmentation de l'intensité du ruissellement et de son volume, affectant du même coup l'intensité des débits en aval du bassin versant, ce par la présence de conditions physiques, anthropiques et météorologiques qui la caractérisent (Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec (AGRCQ), 2017; Cardona *et al.*, 2012; Québec. MDDELCC, 2014; Roche, 1963; Scarwell et Laganier, 2004).

Toutefois, la vulnérabilité en tant que composante du risque réfère le plus souvent à la propension des éléments exposés, comme les individus, leur milieu de vie et leurs avoirs, à subir des effets néfastes lors de catastrophes (Cardona *et al.*, 2012). Elle est la manifestation la plus palpable de la construction sociale du risque (Cardonal *et al.*, 2012; Castonguay, 2007). Toute la dimension sociale du risque n'est cependant pas abordée au sein de cette recherche.

# CHAPITRE II CARACTÉRISATION DE L'ALÉA : LE CAS DE L'INONDATION DE 2017

# 2.1 Introduction

Au Canada et au Québec, les catastrophes les plus fréquentes et les plus coûteuses sont les inondations (BAC, 2015; RNCan et SP Canada, 2017) et tout particulièrement les inondations printanières (Buttle *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 2010). Le régime hydrologique nivo-pluvial conditionne l'occurrence des crues les plus importantes de l'année qui se produisent au printemps (Anctil *et al.*, 2012; Buttle *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 2016; Lawford *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2001). En présence de conditions particulières modifiant l'écoulement des cours d'eau, ces crues génèrent parfois des inondations (Québec. MDDELCC, 2015b).

L'inondation, en tant qu'aléa naturel, peut être caractérisée à partir des paramètres physiques de l'aléa hydrologique, comme le niveau d'eau et le débit associés ainsi que sa durée (Lang et Claudet, 2005; Saad *et al.*, 2015), mais également par l'ampleur des dommages associés (Québec. MSP, 2008b; Scarwell et Laganier, 2004). L'envergure de ces derniers dépend notamment de l'extension géographique des eaux sur le territoire et de l'aménagement du territoire dans la zone touchée (Lang et Claudet, 2005). En effet, le degré d'urbanisation dans la plaine inondable et les aménagements des rivières au sein du bassin versant et leur modification au cours du temps sont des facteurs essentiels à considérer pour estimer l'ampleur réelle des dommages (Lang et Claudet, 2005). Les données de débit sont, le plus souvent, un des meilleurs indicateurs de la rareté d'un événement et de l'intensité de l'aléa hydrométéorologique (Lang et

Claudet, 2005), mais la durée de l'inondation permet également de témoigner de la sévérité de la crue (Saad *et al.*, 2015). Les données de niveau d'eau, combinées aux données de topographie et du bâti, mais également la durée de submersion du territoire, traduisent quant à elles l'ampleur potentielle des dommages associés (Lang et Claudet, 2005).

La crue printanière au Québec survient consécutivement à la fonte de la neige en amont dans les bassins versants, mais la sévérité des inondations dépend le plus souvent de la rapidité avec laquelle elle fond et de son accumulation à la fin de l'hiver (Gachon, 2019; Lawford *et al.*, 1995; Saad *et al.*, 2016). L'occurrence d'événements de pluie sur neige, tout particulièrement de précipitation liquide de forte intensité au printemps, amplifie d'autant plus le phénomène (Buttle *et al.*, 2016; Etkin *et al.*, 2004; Gachon *et al.*, 2018; Lawford *et al.*, 1995; Saad *et al.*, 2016; Scarwell et Laganier, 2004). Au Québec, le changement climatique d'origine anthropique, en plus de la variabilité naturelle du climat, pourrait contribuer à l'intensification du cycle hydrologique dans les prochaines décennies (Cohen *et al.*, 2019; Gachon, 2019; GIEC, 2014; Milly *et al.*, 2008; Wuebbles *et al.*, 2017; Zadeh *et al.*, 2020). Cette intensification du cycle hydrologique pourrait potentiellement augmenter l'occurrence de certains aléas hydrométéorologiques extrêmes ainsi que la hausse des débits de crue printanière (Berghuijs *et al.*, 2014; Bonsal *et al.*, 2019; Cohen *et al.*, 2019; Direction de l'expertise hydrique, 2018; Gachon, 2019; Gachon *et al.*, 2018; Knox, 2000; Zhang *et al.*, 2001).

L'inondation historique du printemps 2017 à Rigaud s'est produite dans un contexte météorologique particulièrement extrême, avec des anomalies de précipitation totale mensuelle au printemps largement au-dessus de la normale et des intensités de précipitation encore plus anormales, comme il a été démontré dans le rapport de Gachon *et al.* (2018). Ces conditions ont toutefois été étudiées à l'échelle du BVRO

sans qu'elles rendent compte de la distribution spatiale de l'aléa météorologique à des échelles plus fines. De plus, les conditions de neige et de la fonte de celle-ci dans le bassin au printemps 2017 n'ont pas été décrites. Il est pourtant essentiel d'étudier l'ensemble de conditions et leur distribution spatiale et temporelle à partir de données à haute résolution, afin de mieux comprendre leur relation avec l'aléa hydrologique en aval (Barrow *et al.*, 2004; Berghuijs *et al.*, 2014; Merz et Blöschl, 2008). Les inondations passées ont également été peu étudiées, alors que des analyses des conditions hydrométéorologiques en cause et l'estimation de l'ampleur des dommages associés dans chaque cas peuvent permettre de déterminer les caractéristiques singulières de l'inondation de 2017 par rapport aux autres événements.

L'évaluation de l'aléa d'inondation à Rigaud permet notamment de fournir certains des éléments clés du retour d'expérience, essentiel à l'amélioration de la connaissance du risque sur le territoire (Dantec *et al.*, 2018; Québec. MSP, 2018; UNISDR, 2015). Elle contribue entre autres à améliorer notre compréhension du risque d'inondation et de mettre en perspective ce dernier face aux changements climatiques futurs et à leur impact potentiel sur la réponse hydrologique du réseau hydrographique en aval du BVRO (Berghuijs *et al.*, 2014; Knox, 2000; OQACC, 2016; Quilbé *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008), d'autant plus que les risques associés aux événements météorologiques extrêmes sont voués à augmenter en fréquence et en intensité dans les années à venir (World Economic Forum, 2018, 2019 et 2020).

L'objectif poursuivi dans ce chapitre consiste à **évaluer l'aléa d'inondation à Rigaud**. L'aléa d'inondation est évalué notamment à partir de la caractérisation de l'aléa météorologique dans l'ensemble du BVRO, réalisée à l'aide d'indices d'extrêmes météorologiques de 1963 à 2017. La caractérisation permet entre autres d'identifier et de spatialiser les conditions ayant mené à l'inondation printanière de 2017. L'aléa d'inondation est également évalué depuis 1963 à partir d'une estimation de sa sévérité en tenant compte de l'intensité et de la durée des débits et des niveaux d'eau mesurés à Carillon et des dommages associés.

Dans la section qui suit, la méthodologie employée est d'abord présentée, notamment la région d'étude, les données utilisées et les méthodes de traitement et d'analyse des données. Les résultats des analyses, une discussion des principaux résultats et une brève conclusion sont ensuite présentés.

# 2.2 Méthodologie

L'aléa d'inondation est caractérisé à Rigaud et dans le BVRO en tenant compte de la disponibilité des données hydrométéorologiques issues de stations d'observation ainsi que de celles disponibles sous forme de grille (produits interpolés de stations d'observation ou de réanalyse) et des données géospatiales ou provenant d'autres sources documentaires. Ainsi, l'aléa est caractérisé en utilisant l'ensemble des informations disponibles depuis 1963, date du début de l'enregistrement des données jaugées à la centrale de Carillon. Toutefois, certaines caractéristiques de l'aléa météorologique sont étudiées seulement depuis 1980, en raison de la disponibilité des données météorologiques sous forme de grille (accessibles de 1980 à aujourd'hui). Le cas de l'inondation printanière de 2017 est donc étudié à l'aide de toutes les informations et des données accessibles et disponibles depuis l'origine des séries hydrométéorologiques ou pour une période commune d'analyse.

# 2.2.1 Région d'étude

Le travail est réalisé à deux échelles distinctes; celle du BVRO, soit une échelle plus régionale, et celle d'une zone localisée à l'intérieur des limites de la ville de Rigaud.

# a) BVRO

Tout d'abord le BVRO constitue la zone d'étude régionale, puisque l'ensemble des dynamiques qui s'opèrent au sein du bassin ont une influence sur la crue printanière du lac des Deux-Montagnes, et donc sur le risque d'inondation à Rigaud. La rivière des Outaouais est le principal affluent du fleuve Saint-Laurent, drainant ses eaux depuis le lac Capimitchigama sur une longueur de plus de 1 130 km dans un impressionnant bassin versant transfrontalier d'une superficie de 146 334 km<sup>2</sup> (Figure 2.1) (Québec. MDDELCC, 2015a). La rivière des Outaouais proprement dite constitue la frontière entre l'Ontario et le Québec sur la majeure partie de son cours (Figure 2.1, panneau de gauche) (Québec. MDDELCC, 2015a). Le BVRO est constitué au total de 22 sousgéomorphologiques, ou SBV, lesquels présentent des conditions unités hydrométéorologiques et climatiques ainsi que des caractéristiques physiographiques et hydrographiques très variables sur ce territoire immense, contribuant variablement à l'alimentation en eau du BVRO (Figure 2.1, panneau de droite) (Québec. MDDELCC, 2015a). Le Tableau 2.1 présente le nom de chaque SBV du BVRO, chaque identifiant unique des SBV étant associé au cours d'eau principal qui draine ces bassins. Le SBV 02OAA01, au sein duquel se trouve la ville de Rigaud, est directement relié au cours de la rivière des Outaouais, et inclut également la rivière Rigaud.

Le régime hydrologique qui affecte les cours d'eau du bassin versant est de type nivopluvial (Anctil *et al.*, 2012), ce qui génère, le plus souvent, les crues maximales en aval au printemps (Gachon *et al.*, 2018) comme suggéré précédemment. Deux pointes de crue sont normalement observées à l'exutoire du bassin versant étant donné la fonte plus tardive du manteau neigeux dans la partie nord du bassin (Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2018). Le débit moyen annuel de la rivière des Outaouais à l'exutoire (barrage de Carillon) est d'environ 1 978 m<sup>3</sup>/s, avec un débit de pointe moyen en avril d'environ 3 564 m<sup>3</sup>/s, et un débit moyen d'étiage en août d'environ 1 108 m<sup>3</sup>/s (Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2020b). L'écoulement dans le BVRO est également influencé sur une base quotidienne par la présence de 66 barrages, localisés majoritairement au nord de la rivière des Outaouais en territoire québécois, qui régulent l'écoulement dans une partie du bassin (CEHQ, 2019a; Québec. MDDELCC, 2015a). Les principaux affluents de la rivière des Outaouais, où l'on retrouve les plus importants réservoirs en termes de capacité de stockage de l'eau, sont présentés au Tableau 2.2. Nous ne considérerons toutefois pas l'influence de la gestion des barrages et réservoirs sur le risque d'inondation en aval, en considérant que de toute façon plus de 60 % du volume d'eau qui arrive à Carillon n'est pas régulé. En effet, les principaux réservoirs du BVRO peuvent contenir seulement environ 40 % du ruissellement printanier moyen qui arrive à l'exutoire, donc la majeure partie des eaux du BVRO ne font pas l'objet d'une régulation par des ouvrages (réservoirs ou barrages) (Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2020c).

Figure 2.1 Localisation des zones d'étude régionale et locale (panneau de gauche) et portrait détaillé du BVRO et des SBV (panneau de droite). La zone d'étude régionale comprend l'ensemble du BVRO, illustré en jaune sur la première carte. La zone d'étude locale (ZE) est représentée par les traits quadrillés mauves dans l'encadré de l'agrandissement de la ville de Rigaud (panneau de gauche). La correspondance entre les identifiants des SBV et le principal cours d'eau qui s'y draine est fournie au Tableau 2.1.



Projection: Transverse\_Mercator Datum: D\_Nord\_Américain\_1983\_CSRS

34

Tableau 2.1 Correspondance entre les identifiants des SBV du BVRO et leur nom, ainsi que les cours d'eau qu'ils représentent. Les provinces dans lesquelles les bassins se drainent (Québec et/ou Ontario) sont également précisées. Les données proviennent du Réseau hydrographique national (RHN) du Canada (présenté au Tableau 2.5 de la section 2.2.2c).

ID des SBV du BVRO	Nom du cours d'eau principal	Province				
BVRO	Rivière des Outaouais	Qc – Ont.				
02JA000	Cours supérieur de la rivière des Outaouais - Eaux d'amont	Qc				
02JB000	Cours supérieur de la rivière des Outaouais - Kinojévis	Qc				
02JC000	Rivière Blanche	Qc – Ont.				
02JD000	Rivière Montréal	Ont.				
02JE000	Cours supérieur de la rivière des Outaouais – Rivière Kipawa	Qc – Ont.				
02KA000	Cours moyen de la rivière des Outaouais - Rivière Dumoine	Qc – Ont.				
02KB000	Rivière Petawawa	Ont.				
02KC000	Cours moyen de la rivière des Outaouais - Rivière Bonnechere	Qc - Ont.				
02KD000	Cours supérieur de la rivière Madawaska	Ont.				
02KE000	Cours inférieur de la rivière Madawaska	Ont.				
02KF000	Cours moyen de la rivière des Outaouais – Rivière Mississippi	Qc - Ont.				
02KG001	Rivière Coulonge	Qc				
02KH001	Rivière Noire	Qc				
02KJ001	Rivière Dumoine	Qc				
02LA000	Rivière Rideau	Ont.				
02LB001	Cours inférieur de la rivière des Outaouais - Rivière South Nation	Qc – Ont.				
02LC001	Rivières Rouge et du Nord	Qc				
02LD001	Rivière Petite Nation	Qc				
02LE000	Cours supérieur de la rivière du Lièvre	Qc				
02LF001	Cours inférieur de la rivière du Lièvre	Qc				
02LG000	Cours supérieur de la rivière Gatineau	Qc				
02LH001	Cours inférieur de la rivière Gatineau	Qc				
02OAA011	Rivière des Outaouais (cours aval) <sup>1</sup>	Qc				
<sup>1</sup> SBV tronqué, rattaché au cours aval de la rivière des Outaouais						

Rivière	Principal réservoir	Capacité (Millions de m <sup>3</sup> )	
Catingan	Baskatong	3 049	
Gauneau	Cabonga	1 565	
Kipawa	Kipawa	673	
	Poisson Blanc	625	
Du Lièvre	Mitchinamecus	554	
	Kiamika	379	
Madawaska	Bark Lake	374	
Montréal	Lady Evelyn	308	

Tableau 2.2 Principaux affluents de la rivière des Outaouais, compte tenu des principaux réservoirs avec une capacité supérieure à 200 millions de m<sup>3</sup> (Source : Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2020a).

# *b) Ville de Rigaud*

La deuxième échelle d'intérêt correspond à un territoire plus local occupé par la ville de Rigaud, laquelle se trouve immédiatement en aval de la centrale hydroélectrique de Carillon, l'exutoire du BVRO (Québec. MDDELCC, 2015a). Rigaud est une ville du sud du Québec faisant partie de la région administrative de la Montérégie et de la MRC de Vaudreuil-Soulanges, et est située à moins de 70 km de Montréal et à moins de 20 km de la frontière ontarienne. La ville se trouve également dans la grande province physiographique des basses-terres du Saint-Laurent. Sa limite ouest constitue une partie de la frontière avec la province de l'Ontario, alors que sa limite nord longe la rive du lac des Deux-Montagnes. Sa superficie terrestre est de 99,13 km<sup>2</sup> (Québec. MAMH, 2010) et sa population est de 7 777 habitants selon le recensement de 2016 (Statistique Canada, 2016). La ville de Rigaud et la région environnante sont caractérisées par un climat de type continental à été doux et humide (Québec. MDDELCC, 2018). La température moyenne annuelle est de l'ordre de 6 °C, avec des températures moyennes quotidiennes inférieures à 0 °C une bonne partie de l'hiver (décembre à mars) (Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), 2018). C'est généralement au mois d'avril que les températures moyennes quotidiennes

redeviennent positives, occasionnant une période de dégel prolongé et, du même coup, le début de la crue des eaux des rivières (Canada, 2017). La ville reçoit en moyenne par année une quantité de précipitation totale d'environ 1 000 mm, dont environ 850 mm de pluie et 150 cm de neige (ECCC, 2018).

Plus spécifiquement, la zone présentée dans l'agrandissement de la ville de Rigaud au panneau de gauche de la Figure 2.1 constitue la zone d'étude locale (ZE). Celle-ci longe le lac des Deux-Montagnes, au nord, et englobe l'intégralité des zones inondables, tout en bordant la route 342 et une petite section de l'autoroute 40, au sud (Figure 2.3). La ZE se trouve notamment dans les basses terres de la ville, lesquelles sont sujettes aux inondations lorsque le lac des Deux-Montagnes est en crue (MRC-VS, 2004; Ville de Rigaud, 2017), comme la délimitation des zones inondables, présentée à la Figure 2.3, permet de le constater. La ZE est également considérablement urbanisée, comme le révèle la répartition spatiale des principaux bâtiments également représentés à la Figure 2.2. Les études de Lajoie et Stobbe (1951) et de Larocque et Meyzonnat (2015) fournissent de plus amples informations concernant la géomorphologie du territoire.

Figure 2.2 Portrait de la zone d'étude locale à Rigaud (ZE), représentée par l'encadré mauve. La plaine inondable est composée des zones inondables 0 - 2 ans (ou ligne des hautes eaux), en jaune, 2 - 20 ans, en orange, et 20 - 100 ans, en rouge. Les principaux bâtiments sont représentés par les points noirs. Le modèle numérique de terrain (MNT) superposé au modèle de terrain ombragé, tous deux à 1 m de résolution, issus de relevés LiDAR, mettent en évidence les différentes unités morphologiques de la ville.



# 2.2.2 Données utilisées

#### a) Les données hydrométéorologiques : Les stations d'observation

Les données hydrologiques de la station de la centrale hydroélectrique de Carillon (présentées au Tableau 2.3), gérée par Hydro-Québec (HQ), sont utilisées pour caractériser l'aléa hydrologique à Rigaud et pour l'analyse statistique des conditions hydrologiques locales. Les données de débit sont enregistrées directement à la centrale alors que les données de niveau d'eau sont enregistrées en amont et en aval de celle-ci.

Toutefois, seules les données enregistrées en aval sont utilisées dans les analyses. Afin de caractériser l'aléa météorologique dans le BVRO, les données d'observation des stations météorologiques d'ECCC (présentées au Tableau 2.3), situées dans le BVRO ou à moins de 75 km de distance des limites du bassin (Annexe A) sont utilisées, mais uniquement pour l'analyse des anomalies standardisées des principaux indices et variables météorologiques moyennés sur l'ensemble du BVRO. D'autres analyses réalisées à partir de ces données sont cependant fournies dans Gachon *et al.* (2018).

Tableau 2.3 Les données hydrologiques de débit et de niveau d'eau proviennent de la station d'HQ à la centrale de Carillon et couvrent la période 1963-2019. Seules les données de niveau d'eau en aval de Carillon sont utilisées. Les données météorologiques d'ECCC proviennent de 21 ou 95 stations, dépendamment de la période couverte, localisées dans le BVRO ou à moins de 75 km.

Station	Période	Variable	Description	Unités	Fréquence	Source
Station		Qmoy	Débit à Carillon	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s Moyenne journalière	
hydrométrique à la centrale de Carillon	1963- 2019	Nmoy	Niveau d'eau en amont et en aval de Carillon	m	des données aux 5 minutes	HQ
Stations météorologiques	1963- 1980 (21) Tmax   ques stations) Tmin   .0 ou 1981- 2017 (95) Tmoy   ci stations) PrepTot		Température maximale Température minimale	°C	Moyenne journalière	ECCC
à moins de 75 km de celui-ci			Température moyenne Précipitation totale	mm		

#### *b) Les données de grille et les produits de réanalyses*

Afin de compléter les sources de données météorologiques ponctuelles disponibles via les stations d'observation, pour notamment inclure une information régionale plus représentative des conditions sur tout le territoire à l'étude, d'autres sources de données de grille sont utilisées. Pour la majeure partie des analyses météorologiques dans le BVRO, les données sous forme de grille DAYMET, téléchargées à partir de la plateforme ORNL *Daily Surface Weather and Climatological Summaries* (DACC) de 39 la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de Earth Data (Thornton et al., 2016), sont utilisées. La base de données DAYMET fournie des estimations de différents paramètres météorologiques journaliers couvrant l'ensemble de l'Amérique du Nord à 1 km de résolution, et réalisées à partir de l'interpolation des données de stations d'observation (Thornton et al., 2016). Ces données de grille ont été préparées dans une projection Lambert Conformal Conic. Les variables disponibles dans les séries de DAYMET (présentées au Tableau 2.4) comprennent entre autres les températures (minimales et maximales) et la précipitation totale quotidiennes ainsi que le Snow Water Equivalent (SWE, à une fréquence quotidienne) qui permet notamment d'obtenir un portrait des conditions de neige dans le bassin. Le SWE est fourni en  $kg/m^2$ , ce qui équivaut à des mm, considérant que la densité de l'eau est de 1 000 kg/m<sup>3</sup>. À noter que seules les variables de précipitation et de température maximale et minimale de l'air sont tirées des observations (Thornton et al., 1997). Le SWE est estimé à partir d'analyses spatiales et temporelles empiriques qui sont opérées au sein d'un algorithme en tenant compte des relations entre la température, la précipitation et les données d'élévation de terrain (Thornton et al., 1997).

En plus des données DAYMET, les données de réanalyses ERA5-Land (Hersbach *et al.*, 2020), disponibles à une résolution d'environ 8 km, téléchargées à partir de la plateforme *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2019), sont utilisées pour valider ou comparer le SWE des données DAYMET, ce à partir des indices de neige *snow density* (rsn, en kg/m<sup>3</sup>) et du *snow depth water equivalent* (sde, en m), qui permettent de reconstituer le SWE (en kg/m<sup>3</sup> ou mm) en multipliant l'indice rsn par l'indice sde (SWE = rsn × sde). L'ensemble des variables utilisées et issues des bases de données DAYMET et ERA5-Land est présenté au Tableau 2.4.

Type de données	Période	Variable	Description	Unités	Fréquence	Source
Données de grille DAYMET	1980 - 2019	SWE PrcpTot	Équivalence de la neige en eau Précipitation totale	kg/m <sup>2</sup> mm		
		Tmax	Température maximale	°C	Journalière	NASA
		Tmin	Température minimale			
Données de		rsn	Densité de la neige	kg/m <sup>3</sup>		ECMW
réanalyses ERA5- Land	1950 - 2020	sde	Équivalent en eau de l'épaisseur de neige	m	Horaire	F

Tableau 2.4. Définition des variables utilisées provenant des données sous forme de grille DAYMET (1km de résolution) et des données de réanalyse ERA5-Land (8 km de résolution). Toutes lesdonnées utilisées couvrent l'ensemble du BVRO sur la période 1981 à 2017.

#### c) Autres données utilisées

À l'échelle du BVRO, la base de données du RHN (Tableau 2.5) a servi à créer la couche vectorielle des limites du BVRO et des SBV (présentées à la Figure 2.1, panneau de droite). Des photographies aériennes provenant de la cartothèque de l'UQAM ainsi que des orthophotographies (Tableau 2.5) permettent quant à elle de numériser les bâtiments principaux dans la ZE à Rigaud pour les années d'intérêt. D'autres données géospatiales présentées au Tableau 2.5, notamment le modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution (1 m) dérivé de levés LiDAR (*Light detection and ranging*) aériens et la couche hydrographique géospatiale du lac des Deux-Montagnes, provenant de la base de données géospatiales du Réseau hydrographique national du Canada (RHN) permettent entre autres de modéliser l'extension spatiale des crues majeures à Rigaud depuis 1963. Les données vectorielles d'eau libre du printemps 2017 produites par RNCan à partir d'images satellitaires

Radarsat-2, principalement (RNCan, 2020), permettent de valider le modèle d'extension spatiale des inondations majeures à Rigaud.

Tableau 2.5. Définition des données géospatiales utilisées. Les limites du BVRO et des SBV proviennent du RHN. Le MNT à 1 m de résolution est dérivé à partir de relevés LiDAR produits en 2011 et 2018 par le gouvernement du Québec. Les photographies aériennes sous format papier sont fournies par le gouvernement du Québec entre 1964 et 1997. Les photographies de 2009, 2014 et 2017 sont fournies dans un format numérique, et sont géoréférencées et orthorectifiées. Les photos de 2014 et 2017 proviennent de Géomont. Finalement, les polygones d'étendue d'eau libre sont produits par RNCan à partir du traitement d'images satellites Radarsat-2, principalement.

Type de données	Date	Format	Échelle/résolution	Source	
Réseau hydrographique national (RHN)	2016	Vectoriel	1 : 50 000 m ou mieux	RNCan	
Limites du BVRO et des SBV	2016	Vectoriel	1 : 50 000 m ou mieux	RHN (RNCan)	
Modèle numérique de terrain (MNT) (levés LiDAR) (Feuillets 31G09SO et 31G08NO)	2011 2018		1 m	Ministère des Transports du Québec et Direction des inventaires forestiers	
	1964		1 : 15 840 m	Québec	
	1970	Madaiaial	1 : 20 000 m	Québec	
	1975		1 : 15 000 m	Ouéhaa	
	1983	Matriciel	1 : 15 000 m	Géomathèque (HMQ)	
Dhotographics córionnas at	1992		1 : 15 000 m		
orthophotographies	1997		1 : 15 000 m		
ormophotographics	2009		30 cm	Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Canada	
	2014		30 cm	Géomont	
	2017		30 cm	Géomont	
Polygone d'étendue d'eau libre	2017	Vectoriel	6 et 12 m	RNCan	

# *d)* Sources documentaires (historique des inondations)

Des sources documentaires ont finalement été utilisées afin d'identifier les inondations majeures observées en aval du BVRO au cours du temps, ainsi que leurs caractéristiques générales. Les principales données d'archives ayant permis de recenser ces événements sont issues de la base de données canadienne sur les catastrophes (SP Canada, 2019a) et de celle du Québec sur l'historique des événements provenant du Ministère de la Sécurité publique du Québec (Québec. MSP, 2018). Toutefois, les archives provenant d'articles de Presse consultés au Centre d'archives de Vaudreuil-Soulanges, ainsi que du site de la Bibliothèque et Archives nationales du Québec (BAnQ) et de la base de données AQUARISQ (Mayer-Jouanjean et Bleau, 2018) ont permis de bonifier ou de compléter les informations issues des autres bases de données mentionnées.

# 2.2.3 Méthodes de traitement des données de grille ou géoréférencées

Les analyses hydrométéorologiques ont majoritairement été réalisées dans les environnements PyScriper et Spyder, en utilisant la version 3 de python, mais quelques analyses ont également été réalisées dans l'environnement intégré RStudio Desktop (version 1.2.5) (RStudio, 2021).

Les données météorologiques sous forme de grille (DAYMET et ERA5-Land, présentées à la section 2.2.1) sont disponibles au format *Network Common Data Form* (NetCDF) (version 4), conforme aux conventions des métadonnées de projections climatiques, permettant leur traitement sous forme de matrices géoréférencées (Thornton *et al.*, 2016). Les site-packages *netCDF4* et *xarray*, propres au langage python, ont été utilisés pour traiter les données de grille. Elles ont préalablement été découpées avec les limites du BVRO (Figure 2.1, panneau de droite) à l'intérieur d'un système d'information géographique (SIG, ArcGIS) puis reconverties en fichier de format NetCDF. Pour la validation ou la comparaison du SWE des données DAYMET, les données de réanalyses ERA5-Land ont d'abord été transformées dans la même projection cartographique que les données de grille DAYMET. Ensuite, les données du

SWE de DAYMET ont été échantillonnées à la même résolution spatiale que les données ERA5-Land (*i.e.* environ 8 km).

Les données géomatiques ont été traitées à l'intérieur d'un SIG à partir de l'interface ArcMap de la suite ArcGIS d'ESRI (version 10.5.1) et certains traitements ont été automatisés à partir du site-package *ArcPy* de python, dont le découpage des données météorologiques sous forme de grille avec les limites du BVRO. Le site-package *ArcPy* est compatible avec la version 2 de python et avec un environnement de développement intégré en 32-bit seulement.

# 2.2.4 Traitement et analyse par indices hydrométéorologiques

L'évaluation de l'aléa d'inondation à Rigaud est réalisée en utilisant les séries de débits et de niveaux d'eau mesurés à la centrale de Carillon (Tableau 2.3), et via la détermination de la sévérité de chaque événement majeur s'étant produit entre 1963 et 2019. Celle-ci prend également en considération l'analyse des conditions météorologiques dans le BVRO. Les indices utilisés dans ces analyses sont définis dans cette section.

#### *a)* Indices hydrologiques univariés et multivariés

Des indices hydrologiques univariés mensuels (calculés pour les mois de mars, avril et mai) et printaniers (*i.e.* 1<sup>er</sup> mars au 31 mai) sont d'abord définis à partir des variables hydrologiques de débit et de niveau d'eau moyen (Qmoy et Nmoy, respectivement, définies au Tableau 2.3), lesquels permettent de caractériser l'aléa hydrologique à Carillon.

Des indices multivariés de durée des débits et niveaux d'eau au-delà de seuils d'inondation mineure ( $D_0$  et  $D_N$ , respectivement), sont également calculés à partir des

variables quotidiennes Qmoy et Nmoy, ainsi que des indices printaniers de débits et de niveaux d'eau maximaux (Qmax et Nmax, respectivement), qui sont utilisés pour déterminer les seuils d'inondation mineure (SI<sub>Q</sub> et SI<sub>N</sub>). Les indices  $D_Q$  et  $D_N$  (en nombre de jours) correspondent au nombre de jours ayant enregistré un Qmoy ou Nmoy, respectivement, au-dessus du seuil d'inondation mineure (SI), ce du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai. Les SI<sub>(Q et N)</sub> correspondent aux quantiles de crue associés à une période de retour de 2 ans, estimés à partir d'une analyse fréquentielle (cf. section 2.2.5) des Qmax et des Nmax printaniers, respectivement. Tous les indices hydrologiques univariés et multivariés ainsi que les seuils d'inondation mineure utilisés dans notre étude sont présentés au Tableau 2.6.

Tableau 2.6. Définition des indices hydrologiques univariés et multivariés. Les indices mensuels sont calculés pour tous les mois de novembre à mai alors que les indices printaniers sont calculés pour la période allant du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai.

Type d'indice	Indice	Description	Unités	Fréquence	Variable(s) utilisée(s)
	Qmax	Débit maximum	m <sup>3</sup> /s	Mensuel et	Qmoy
	Qmin	Débit minimum			journalier
	Nmax	Niveau d'eau maximum		printanier	Nmoy
Univarié	Nmin	Niveau d'eau minimum m			journalier
	$SI_Q$	Seuil d'inondation mineure estimé en fonction des Qmax printaniers	Nb de jours	Printanier	Qmax printanier
	$\mathrm{SI}_{\mathrm{N}}$	Seuil d'inondation mineure estimé en fonction des Nmax printaniers			Nmax printanier
Multivarié	$D_Q$	Durée de l'inondation estimée en fonction du Nb de jours avec Qmoy ≥ SI <sub>Q</sub>	Nb de jours	Printanier	Qmoy et SI <sub>Q</sub>
	$D_{\rm N}$	Durée de l'inondation estimée en fonction du Nb de jours avec $Nmoy \ge SI_N$			Nmoy et SI <sub>N</sub>

# b) Indices multicritères

Dans cette section, un indice multicritère de sévérité de l'aléa d'inondation (SAI) est présenté, lequel tient compte de la combinaison des indices suivants :
- La fréquence de l'aléa hydrologique, dénommé IF (indice de fréquence);
- Un indice proportionnel à la durée de l'inondation en termes de débit (D<sub>Q</sub>, cf. Tableau 2.6) dénommé ID (indice de durée);
- Un indice de submersion proportionnel à la durée de l'inondation en termes de niveaux d'eau (D<sub>N</sub>, cf. Tableau 2.6) dénommé IS (indice de submersion);
- Un indice proportionnel au nombre de bâtiments touchés par l'inondation, dénommé IB (indice de bâti). L'indice IB est calculé à partir des photographies aériennes des années disponibles (1964, 1970, 1975, 1983, 1992, 1997, 2009, 2014 et 2017), des données du MNT LiDAR et du Nmax printanier (cf. Tableau 2.5).

Par conséquent, cet indice SAI tient compte à la fois du caractère exceptionnel de l'inondation en termes de période de retour, mais également en termes de dommages. Les valeurs des indices IF, ID et IS varient de 1 à 4, en fonction de classes préalablement déterminées et tous les indices (IF, ID, IS et IB) sont standardisés de 0 à 1 et pondérés. L'indice de sévérité SAI est donc calculé à partir d'une analyse multicritère des indices pondérés IF, ID, IS et IB. Tous ces indices sont présentés au Tableau 2.7.

Tableau 2.7. Définition des indices de sévérité de l'aléa d'inondation. Les indices sont calculés pour chaque année ayant enregistré des événements majeurs d'inondation à Rigaud, depuis 1963 et sont répartis selon 2 catégories; celle des indices relatifs à l'intensité de l'aléa hydrologique et celle des indices relatifs à l'ampleur des dommages potentiels associés.

Catégorie	Nom de l'indice	Description	Période	Indice(s) ou données utilisé(s)
Intensité de l'alée	IF	Indice standardisé proportionnel à la fréquence de l'aléa hydrologique		Qmax printanier
Intensité de l'aléa hydrologique	ID	Indice standardisé proportionnel à la durée de l'inondation en fonction de D <sub>Q</sub>	Printemps des années	$D_Q$
	IS	Indice standardisé proportionnel à la durée de submersion en fonction de D <sub>N</sub>	1972, 1974, 1976, 1979,	$D_N$
Ampleur des dommages potentiels	IB	Indice standardisé proportionnel au nombre estimé de bâtiments touchés par l'inondation	1985, 1997, 1998, 2008, 2017 et 2019	Photographies aériennes des années 1964, 1970, 1975, 1983, 1992, 1997, 2009, 2014 et 2017; MNT LiDAR; Nmax printanier
Sévérité de l'aléa d'inondation	vérité de l'aléa SAI Indice standardisé de sévérité de l'aléa d'inondation			IF, ID, IS et IB

## c) Indices météorologiques

Les conditions météorologiques dans le BVRO sont entre autres caractérisées à partir d'indices météorologiques calculés sur des bases mensuelles et saisonnières. Les indices sont calculés à partir des variables météorologiques présentées aux Tableaux 2.3 et 2.4. Les indices calculés à partir des données de stations d'observation (Tableau 2.3) sont représentés en tant que valeur moyenne pour l'ensemble du BVRO. Ceux calculés à partir des données sous forme de grille DAYMET (Tableau 2.4) sont représentés à une résolution de 1 km pour chaque point de grille du BVRO, mais également en tant que valeur moyenne pour chacun des SBV et pour l'ensemble du BVRO. Le Tableau 2.8 présente l'ensemble des indices météorologiques développés et utilisés à partir des variables de températures et de précipitations quotidiennes, à savoir :

- Les indices de températures :
  - La température moyenne (Tmoy, en °C) est calculée à partir des variables Tmin et Tmax (Tmoy = (Tmax + Tmin) / 2).
- Les indices de précipitation totale :
  - La quantité totale de précipitation saisonnière tombée (AccuSaison, en mm) est représentée de novembre à avril (AccuSaison – Avril) et de novembre à mai (AccuSaison – Mai);
  - La fréquence des événements de précipitation totale dans le mois est déterminée par le nombre total de jours humides (Prcp1, en jours; lorsque la précipitation totale par jour ≥ 1 mm);
  - L'intensité de précipitation par jours humides soit le Simple Daily Intensity Index (SDII, en mm/jour de pluie; lorsque la précipitation totale par jour ≥ 1 mm);
  - Le 90<sup>e</sup> percentile de la précipitation totale (Prcp90, en mm/jour);
  - La durée maximale de précipitation soit l'indice Consecutive Wet Days (CWD, en jours; lorsque la précipitation totale par jour ≥ 1 mm).
- Les indices de neige :
  - L'accumulation de la neige est déterminée par la somme des variations positives du SWE sur deux jours consécutifs (AccuSWEtot, en mm);
  - La fonte de la neige est déterminée par la somme des variations négatives du SWE sur deux jours consécutifs (DimSWEtot, en mm);
  - Le taux d'accumulation de la neige est déterminé par la moyenne mensuelle de AccuSWEtot par jours d'accumulation de neige

(AccuSWEmoy, en mm/jour d'accumulation; lorsque l'accumulation totale par jour  $\geq 1$  mm);

 Le taux de fonte de la neige est déterminé par la moyenne mensuelle de DimSWEtot par jours de fonte (DimSWEmoy, en mm/jour de fonte; lorsque la fonte totale par jour ≥ 1 mm).

Les indices de précipitation font partie des indices normés d'extrêmes mensuels et saisonniers de la précipitation, comme définis par le projet STARDEX (*Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions*) (Haylock, 2005), et repris dans de nombreuses études (*p. ex.* Gachon *et al.*, 2005; Petersen *et al.*, 2005) et à présent sous l'égide du groupe World Meteorological Organization (WMO) Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) et du projet Climdex (cf. Dunn *et al.*, 2020). Ces indices de précipitation ont été sélectionnés parmi ceux disponibles en raison de leur importance et de leur lien avec la durée et l'intensité des inondations printanières (*p. ex.* Saad *et al.*, 2015, 2016; Gachon *et al.*, 2018).

Tableau 2.8. Définition des indices météorologiques mensuels ou saisonniers déterminés à partir des variables des Tableaux 2.3 et 2.4 et permettant de caractériser les conditions météorologiques dans le BVRO. Les indices mensuels sont calculés pour tous les mois de novembre à mai, alors que les indices saisonniers sont calculés pour les périodes de novembre à avril et de novembre à mai.

Indice	Description	Unités	Fréquence	Variable(s) utilisée(s)	
Tmoy	Température moyenne	°C	Journalier et mensuel	Tmax et Tmin	
Accu_Saison	Accumulation totale de la précipitation de novembre à avril et de novembre à mai	mm	Saisonnier		
Prcp90	Percentile 90 de la précipitation journalière	mm/jour			
SDII	Intensité moyenne de la précipitation par jours humides $(Prcp \ge 1 mm)$	tation par jours humides (Prcp $\geq 1$ mm) mm/jours			
CWD	Nombre maximal de jours humides (Prcp $\geq 1 \text{ mm}$ ) consécutifsNb de joursNombre total de jours humides (Prcp $\geq 1 \text{ mm}$ )Nb de jours		Mensuer		
Prcp1					
AccuSWE	Variation positive du SWE sur 2 jours consécutifs	mm/jour	Journalier	CWE	
DimSWE	imSWE Variation négative du SWE sur 2 jours consécutifs mm		et mensuel	SWE	
AccuSWEmoy	Taux d'accumulation de la neige par jours d'accumulation (AccuSWE > 1 mm) d'accumulation		Manayal	AccuSWE	
DimSWEmoy	Taux de fonte de la neige par jours de fonte (DimSWE $\geq$ 1 mm)	mm/jours de fonte	Mensuel	DimSWE	

# 2.2.5 Analyse des variables et indices

## a) Analyses statistiques régionales et standardisation

À partir des variables et indices hydrométéorologiques présentés précédemment, plusieurs analyses statistiques sont réalisées. Tout d'abord, les champs moyens sont calculés sur l'ensemble du BVRO afin de dégager les caractéristiques générales des conditions météorologiques sur tout le territoire. Ces conditions sont analysées sur toute la période de 1963 à 2017 à partir des données de stations d'observation, puis de 1980 à 2017 à partir des données de grille DAYMET. L'aléa hydrologique à Carillon est caractérisé pour toutes les années de 1963 à 2019, avec une attention particulière pour les années marquées par des inondations majeures. Dans les deux cas, l'année 2017 est mise en perspective par rapport aux autres événements historiques d'inondation.

En premier lieu, l'analyse des Qmax printaniers permet de classifier les crues printanières de 1963 à 2019 en termes d'occurrence et de faire ressortir les années ayant enregistré les Qmax printaniers les plus élevés jusqu'à inclure tous les événements recensés dans les archives. Ensuite, la variation temporelle des Qmoy et Nmoy journaliers est représentée à l'intérieur d'un hydrogramme de crue, du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai, pour toutes les années d'intérêt. Des analyses de dispersion des distributions des Qmax, Qmin et Qmoy ainsi que des Nmax, Nmin et Nmoy printaniers (Tableau 2.6), pour toutes les années d'intérêt, sont ensuite réalisées et représentées avec des *box plots* (exemples fournis dans Gachon *et al.*, 2005) ou boîtes à moustache (librairie python *seaborn*, fonction *boxplot*). Les boîtes permettent notamment de représenter les quartiles de la distribution et l'écart interquartile (IQR), et de bien distinguer les valeurs extrêmes de la distribution à l'extérieur de l'IQR (Waskom, 2020).

À l'échelle du BVRO, les variables et indices journaliers moyens météorologiques (Tmoy, PrcpTot, SWE, AccuSWE et DimSWE; définis au Tableau 2.8) sont d'abord représentés par un météogramme du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai 2017 afin de dresser un portrait général des conditions météorologiques qui ont été observées avant et pendant la crue de 2017. Ensuite, afin de caractériser les contextes météorologiques de 2017, et des autres années ayant mené à des événements d'inondations, par rapport aux conditions climatiques normales du BVRO, les anomalies interannuelles absolues ou relatives et standardisées des principaux indices et variables sont calculées comme suit :

 L'anomalie absolue de l'indice ou de la variable de température est calculée à partir de l'équation suivante :

Anomalie absolue = (Indice - Indice moyen (1981 - 2010)) (Équation 1)

• L'anomalie relative de l'indice ou de la variable de précipitation (PrcpTot et SWE surtout) est calculée à partir de l'équation suivante :

Anomalie relative = 
$$\left( \left( \frac{Indice}{Indice \ moyen \ (1981-2010)} - 1 \right) \times 100 \right)$$
 (Équation 2)

• L'anomalie standardisée de l'indice, ou de la variable, concerné est calculée à partir de l'équation suivante :

Anomalie standardisée = 
$$\left(\frac{Indice-Indice moyen (1981-2010)}{std \ de \ l'indice(1981-2010)}\right)$$
 (Équation 3)

Où *std* est l'écart-type de la variable ou de l'indice considéré (période de 1981 à 2010).

Toutes les anomalies sont calculées par rapport à la période climatologique ou normale de 1981 à 2010. À noter que l'anomalie standardisée (Équation 3) permet davantage de rendre compte du caractère extrême ou atypique de l'observation (International Research Institute for Climate and Society (IRI), 2020) et permet de comparer des anomalies entre variables ou indices, sans égard à la variabilité propre de la variable. Les anomalies de la plupart des indices et variables météorologiques sont calculées et représentées sous forme de cartes en utilisant les données DAYMET à 1 km de résolution sur l'ensemble du BVRO pour les mois de mars, avril et mai 2017. Les valeurs moyennes calculées pour chacun des SBV sont notamment cartographiées. Les valeurs moyennes calculées pour l'ensemble du BVRO, incluant les anomalies standardisées des indices hydrologiques à la centrale de Carillon sont également

représentées sous forme d'histogramme, ce pour les mois de mars, avril et mai de toutes les années d'intérêt.

#### *b) Analyses de corrélation des produits de neige*

Les produits de neige DAYMET (le SWE) sont également validés ou comparés aux données de réanalyse ERA5-Land (Tableau 2.4). Les données journalières du SWE des deux produits, pour les mois de janvier à mai 2017, sont corrélées entre-elles à l'aide du test *Spearman* (Spearman, 1904) de la librairie *scipy.stats* de Python et les corrélations statistiquement significatives au seuil de 90 % (p-value < 0,1) sont cartographiées. La corrélation de Spearman est une corrélation de rang qui est moins sensible aux valeurs extrêmes que la corrélation de Pearson; elle n'assume pas d'emblée de distribution particulière des variables à corréler (Spearman, 1904). Les points de grille pour lesquels le SWE est nul (sans couvert de neige) se font attribuer une valeur de données manquantes afin de ne pas biaiser l'analyse de corrélation en présence de valeurs nulles.

#### *c) Analyses fréquentielles*

La fréquence des événements d'inondation est estimée à partir de l'analyse fréquentielle des séries des Qmax et Nmax printaniers, distinctement. Les quantiles de crues sont estimés pour les périodes de retour de 2, 10, 20, 50 et 100 ans. Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité sont d'abord vérifiées à un niveau de confiance de 95 % à partir du test d'indépendance et de stationnarité de Wald-Wolfowitz (package *trend*, fonction *ww.test*) (cf. Wald et Wolfowitz, 1943), du test d'homogénéité de Wilcoxon (package *trend*, fonction *lanzante.test*) (cf. Pohlert *et al.*, 2011), puis du test de stationnarité de Kendall (package *trend*, fonction *mk.test*) (CEHQ, 2019b; Libiseller et Grimwall, 2002). La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour ajuster les distributions (cf. Wilks, 1995). La meilleure

distribution pour l'analyse fréquentielle des Qmax et Nmax printaniers est la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV), selon le test de normalité de Shapiro-Wilk (package *EnvStats v.2.3.1*, fonction *distChoose*). L'analyse fréquentielle des Qmax est réalisée sur les périodes de 1963 à 2019, 1963 à 2017, puis de 1963 à 2019 en excluant les valeurs de 2017 et de 2019 (extrêmes hydrologiques), considérées comme aberrantes par le test de discordance (package *Outlier*, fonction *outlier*), ce afin de mieux comprendre l'influence des valeurs extrêmes sur la distribution statistique. Dans le cas des Nmax, l'analyse fréquentielle est réalisée sur la série temporelle complète, mais également sans considérer les valeurs des années 1974 et 1976, les deux valeurs extrêmes de la série. Dans le cas des Qmax, les distributions respectent à chaque fois les conditions préalables à un niveau de confiance de 95 %, mais ces conditions ne sont pas respectées dans le cas des Nmax.

Le quantile de crue estimé pour période de retour de 2 ans, en considérant les séries temporelles complètes des Qmax et des Nmax, correspond au SI<sub>Q</sub> et au SI<sub>N</sub> (défini au Tableau 2.6), respectivement. En hydrologie, ce quantile est le plus souvent utilisé pour déterminer la ligne des hautes eaux sur le terrain, soit la limite maximale de la zone inondée lors de chaque crue printanière (Québec. MDDELCC, 2015b). En effet, au Québec, le seuil d'inondation mineur tel que défini par le MSP correspond au débit ou niveau d'eau enregistré à la station hydrométrique au-delà duquel les eaux peuvent déborder hors du lit mineur par endroit, et à partir duquel certains enjeux peuvent être menacés (Québec. MSP, 2016).

Finalement, l'analyse fréquentielle des indices printaniers  $D_Q$  et  $D_N$  est réalisée à partir de la série temporelle complète pour déterminer les valeurs des bornes des classes des indices standardisés IF et IS (définis au Tableau 2.7). Les valeurs des bornes supérieures correspondent aux quantiles estimés pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans, telles que proposées par Lang et Claudet (2005), pour un total de quatre classes. La distribution de Weibull (cf. Weibull, 1951) est utilisée pour l'analyse fréquentielle des indices  $D_Q$  et la distribution de Gamma (cf. Cherian, 1941) dans le cas des indices  $D_N$ , toutes deux ayant été déterminées à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les quantiles de crue estimés pour les mêmes périodes de retour à partir de la distribution complète des Qmax servent également à définir les bornes des classes de l'indice standardisé IF (défini au Tableau 2.7).

## *d) Analyse des tendances*

Les tendances par décennie des indices hydrométéorologiques mensuels moyens pour l'ensemble du BVRO sont calculées sur la période complète (1981 à 2017), mais également sur la période récente des vingt dernières années (1998 à 2017) pour les mois de novembre à mai. Les deux périodes sont étudiées afin de distinguer les tendances monotones de celles plutôt associées au contexte climatique récent comme il est suggéré par Koutsoyiannis (2020), Wang *et al.* (2008) et Zadeh *et al.* (2020), alors que le réchauffement s'est accentué au cours des deux dernières décennies (IPCC, 2018, 2019). Le test de Mann-Kendall modifié de l'environnement Python qui utilise l'approche de pré blanchiment sans tendance avant l'application du test, tel que proposé par Yue et Wang (2002), est appliqué (librairie *pymannkendall 1.4.1*). Ce test permet de tenir compte des autocorrélations dans les séries, et lorsqu'elles sont détectées on les exclut en modifiant le test de Kendall, puis on calcule la pente de Sen (pour plus de détails, se référer à Khaliq *et al.*, 2009).

Les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value  $\leq 0,1$ ) sont représentées par des *Heatmaps*. Les tendances à l'échelle de chaque pixel représenté au sein du BVRO sont également calculées pour les mêmes périodes, mais seulement pour les indices et variables Tmoy, PrcpTot et SWE, ce pour les mois de mars, avril et mai. Les tendances

des indices Qmax et Nmax printaniers (1<sup>er</sup> mars au 31 mai) sont également calculées sur la période qui couvre la distribution complète (1963 à 2019).

#### e) Analyses géospatiales

Des analyses géospatiales sont également réalisées afin d'estimer le nombre de bâtiments touchés lors de chaque inondation majeure. Pour ce faire, des photographies aériennes et des orthophotographies de la ZE à Rigaud, datées des années étudiées ou le plus près que possible, ont été utilisées (Tableau 2.5). Avant 2009, les photographies étaient en format papier; elles ont d'abord été numérisées, orthorectifiées et géoréférencées à partir du logiciel Summit Evolution. Pour les années 2009, 2014 et 2017, les photographies étaient déjà numérisées, orthorectifiées et géoréférencées. Toutes les photographies ont ensuite été assemblées en mosaïques dans le logiciel ArcMap. À partir des mosaïques, les principaux bâtiments ont été numérisés par photo-interprétation.

Ensuite, pour estimer le nombre de bâtiments touchés lors de chaque événement, un modèle simple d'inondation a été généré dans chacun des cas à partir des outils d'*ArcHydro* de la suite ArcGIS. Les intrants ayant été nécessaires au modèle sont le Nmax printanier, une couche de terrain créée à partir du MNT LiDAR et une ligne vectorielle représentant le tracé du lac des Deux-Montagnes de la centrale de Carillon jusqu'à la limite maximale de la ville de Rigaud, à l'est, provenant de la base de données du RHN. Les outils *Stream WSE from Point WSE Measurements* et *Flood from Stream WSE* ont permis de générer des couches vectorielles d'extension géographique des inondations sur le territoire de la ville de Rigaud.

Finalement, une analyse spatiale de l'intersection entre la couche vectorielle et la couche des bâtiments a permis de comptabiliser le nombre de bâtiments touchés pour

chacune des inondations étudiées. Dépendamment de l'année, la date associée à la couche des bâtiments ne correspondait pas nécessairement à celle de l'inondation. Lorsque c'était le cas, c'est la couche des bâtiments de l'année la plus près qui a été utilisée (Tableau 2.9). Pour l'année 1979, le nombre de bâtiments touchés a été estimé en calculant la moyenne du nombre de bâtiments comptabilisés en utilisant les données de 1975 et celles de 1983.

Tableau 2.9. Détermination de la couche de bâtiments utilisée pour estimer le nombre de bâtiments touchés pour chaque inondation étudiée. Dépendamment de la disponibilité des données, l'année d'observation ne correspond pas toujours à l'année de l'inondation.

Inondation majeure	Année de la couche des bâtiments
1972	1975
1974	1975
1976	1975
1979	1975 et 1983
1983	1983
1997	1997
1998	1997
2008	2008
2017	2017
2019	2017

Le modèle d'extension géographique de l'inondation a également été validé avec le polygone d'eau libre du 6 mai 2017 (Nmoy = 24,85 m) issu du traitement des images satellitaires radar (*i.e.* Radarsat-2, principalement) par RNCan, en utilisant les matrices de confusion telles que décrites par Beguería (2006). Deux indicateurs de qualité du modèle ont été calculés : l'indicateur de sensibilité ( $I_{Sens}$ ) et celui du pouvoir positif de prédiction ( $I_{PPP}$ ) (Beguería, 2006; Kappes *et al.*, 2012).

Enfin, le polygone d'eau libre issu des données d'observation a été corrigé avec la topographie avant d'être utilisé pour la validation du modèle, de sorte à soustraire certaines zones trop élevées pour avoir été réellement inondées. La précision des

couches vectorielles varie en effet de 6 à 12 m (Québec, 2021), alors que le modèle de terrain représente le relief à 1 m de résolution.

#### *f) Analyse multicritère*

Finalement, une analyse multicritère des indices standardisés et pondérés IF, ID, IS et IB (définis au Tableau 2.7) est réalisée afin d'estimer la sévérité des inondations majeures étudiées et de les classifier selon une échelle de sévérité. Une seule année n'est pas incluse dans l'analyse diagnostique de l'aléa d'inondation, soit l'année 1991, compte tenu de son Nmax printanier largement inférieur à celui de l'année marquée par le Qmax le plus faible, parmi les années retenues.

La première étape de l'analyse multicritère consiste à reprendre les analyses fréquentielles réalisées préalablement (Tableau 2.10, étape 1), puis ensuite de déterminer les limites des classes de chaque indice à partir des quantiles estimés pour les périodes de retour de 2, 10, 20, 50 et 100 ans (Tableau 2.10, étape 2). Une fois les bornes des classes de chaque indice déterminées, les indices relatifs à chaque inondation historique sont répartis au sein des classes. Ils sont ensuite standardisés de 0 à 1 en tenant compte des valeurs de la classe maximale (4) et de la classe minimale (1) (Tableau 2.10, étape 3).

Seul l'indice IB est traité différemment, sans l'aide de classes, puisque le nombre de bâtiments touchés n'est pas nécessairement proportionnel à la sévérité de l'événement. Il est directement standardisé de 0 à 1 en fonction du nombre estimé de bâtiments touchés par l'inondation, dans chacun des cas et du nombre minimal et maximal de bâtiments touchés en considérant toutes les inondations étudiées.

Enfin, un poids est attribué à chacun des quatre indices (IF, ID, IS et IB), la somme des poids totalisant la valeur de 1 (Tableau 2.10, étape 4). La sommation des quatre indices standardisés et pondérés donne le score de sévérité (SAI) de chaque aléa d'inondation étudié (Tableau 2.10, étape 5). Le Tableau 2.10 résume les étapes pour estimer la sévérité de chaque événement.

La moitié des poids a été accordée aux indices d'intensité de l'aléa hydrologique (IF et ID) et l'autre moitié aux indices de dommages potentiels (IS et IB). Nous avons accordé un pointage légèrement supérieur à l'indice IF, car le débit est une variable intégratrice, qui représente bien le ruissellement et les écoulements sur l'ensemble du bassin versant et renseigne particulièrement bien par rapport à l'importance de la crue (Lang et Claudet, 2005), et également à l'indice IB étant donné qu'il s'agit du seul indice qui témoigne réellement de l'exposition au risque d'inondation à Rigaud.

Tableau 2.10. Étapes pour le calcul de l'indice multicritère standardisé de sévérité SAI des inondations majeures à Rigaud à partir des indices relatifs à l'intensité de l'aléa hydrologique et aux dommages potentiels associés (IF, ID, IS et IB). IB est le seul indice pour lequel aucune classe n'est créée à l'étape 2. Le nombre estimé de bâtiments touchés est directement utilisé pour standardiser l'indice à l'étape 3.

Indices	Étape	Description	Méthode			
	1)	Analyse fréquentielle des indices maximums printaniers (Qmax, D <sub>Q</sub> max et D <sub>N</sub> max)	IF : Distribution GEV ID : Distrubtion Weibull IS : Distrubtion Gamma			
IF, ID et IS	Détermination des bornes des classes avec les quantiles estimés pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans.Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4 :	Classe 1 : [Quantile Pret2 – Quantile Pret10] Classe 2 : [Quantile Pret10 – Quantile Pret20] Classe 3 : [Quantile Pret20 – Quantile Pret50] Classe 4 : [Quantile Pret50 – Quantile Pret100]				
	3)	Standardisation des indices de 0 à 1	$Istd = \frac{(I - Max_I)}{(Max_I - Min_I)}$			
Tous les indices	4)	Pondération des indices. La somme des poids doit être égale à 1.	IndicePoidsIF0,3ID0,2IS0,2IB0,3			
	5)	Sommation des indices standardisés et pondérés	$I_{IntAleaInon} = (IF \ std \ \times \ 0,3) + (ID \ std \ \times \ 0,2) + (IS \ std \ \times \ 0,2) + (IB \ std \ \times \ 0,3)$			

## 2.3 Résultats

Les archives disponibles ont permis de recenser sept inondations historiques depuis 1963 à l'exutoire du BVRO, lors des printemps 1974, 1976, 1983, 1998, 2008, 2017 et 2019 (Tableau 2.11). Selon la littérature, les inondations de 2017 et de 2019 sont celles ayant généré les impacts les plus importants à l'échelle du Québec, mais l'événement de 1974 fut également exceptionnel.

Dans la section qui suit, les conditions hydroclimatiques moyennes dans le BVRO et à la centrale de Carillon, et les tendances observées des principaux indices et variables

sont d'abord présentées sommairement. La sévérité de l'inondation de 2017 par rapport aux autres événements est ensuite estimée à partir d'une analyse préalable des conditions hydrométéorologiques dans le BVRO et à son exutoire ainsi que d'une estimation des dommages associés à Rigaud. Seules les analyses météorologiques réalisées dans les BVRO à partir des données DAYMET sont présentées à même le texte. Celles réalisées à partir des données de stations d'observation d'ECCC, moyennées spatialement sur l'ensemble du BVRO, sont fournies aux Annexes E et F.

Les résultats présentés dans cette section permettront ainsi de mieux comparer ces inondations historiques, et ce, en termes d'intensité des conditions hydrométéorologiques, mais également de dommages associés.

Année	Localisation	Municipalités touchées	Résidences affectées	Personnes sinistrées	Dommages estimés	Durée
(-)	(-)	(Nb)	(Nb)	(Nb)	(M\$)	(-)
1974	Sud du Québec	~ 300	(-)	(-)	~ 60	Janvier à juin
1976	Sud du Québec, région de Montréal	~ 100	(-)	(-)	~ 20	Mars à mi-juin
1983	Région de Montréal et bassin du Richelieu	< 20	(-)	(-)	~ 10.4	Mars et mai (moins d'une semaine)
1998	Sud du Québec	~ 140	(-)	(-)	~ 28	Fin mars à mi- avril
2008	Région de Montréal et ville de Québec	< 20	(-)	(-)	(-)	Fin avril à début mai
2017	Sud du Québec	~ 291	~ 5 400	> 4 000	~ 367	Début avril à fin mai
2019	Sud du Québec	~ 310	> 1 000	> 10 000	(-)	Plusieurs semaines

Tableau 2.11. Principales caractéristiques des inondations historiques s'étant produites dans le sud du Québec depuis 1963 et ayant touché la ville de Rigaud. Les informations sont tirées des archives (voir section 2.2.2 b).

#### 2.3.1 Conditions hydroclimatiques du BVRO et à l'exutoire

#### *a) Conditions climatiques moyennes (variables de base et indices)*

Pour l'ensemble du BVRO, les conditions climatiques moyennes mensuelles pour la période de 1981 à 2010, déterminées à partir des données de grille DAYMET (présentées à la section 2.2.2), sont présentées pour les mois de janvier à décembre au Tableau 2.12.

En moyenne, au printemps, c'est au mois d'avril que la température redevient positive dans le BVRO. Le mois de juillet est celui où les précipitations sont les plus importantes en termes de quantité; au printemps, c'est au mois de mai. Le SWE le plus élevé est observé au mois de mars, alors que les volumes d'eau qui sont libérés par la fonte de la neige (DimSWE) sont les plus élevés au mois de mai (Tableau 2.12), compte tenu du temps nécessaire après l'arrivée progressive des températures positives pour que le volume de neige accumulé sur l'ensemble du BVRO, qui s'étend au nord jusqu'en Abitibi-Témiscamingue, fonde. Les accumulations de neige les plus importantes sont quant à elles observées aux mois de décembre et de janvier (indice AccuSWE, Tableau 2.12).

Les conditions climatiques moyennes, établies sur la période normale de 1981 à 2010, des principaux indices des mois de mars, avril et mai sont également représentées spatialement à une résolution de 1 km pour l'ensemble du BVRO à l'Annexe B.

Mois	Tmin	Tmax	Tmoy	PrcpTot	SDII	Prcp90	SWE	Dim SWE	TauxDim SWE	Accu SWE	TauxAccu SWE
(-)	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/jours de pluie)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/jours de fonte)	(mm)	(mm/jours d'accumulation)
Janvier	-19,7	-8,1	-13,9	72,9	4,8	6,5	97,5	3,5	1,9	57,0	6,0
Février	-18,1	-5,2	-11,7	58,0	5,0	5,9	147,4	4,6	4,0	46,7	6,2
Mars	-11,7	0,8	-5,5	64,7	5,9	6,5	184,0	14,8	4,0	36,1	6,9
Avril	-2,6	9,3	3,3	72,9	6,4	7,5	170,5	51,5	4,2	7,9	6,5
Mai	3,9	17,2	10,5	90,9	7,1	8,8	95,1	96,5	4,9	0,4	6,1
Juin	9,3	22,2	15,8	103,5	7,8	10,3	17,9	45,3	5,8	0,0	4,0
Juillet	12,0	24,4	18,2	108,9	8,2	10,4	0,5	2,5	6,9	0,0	0,0
Août	10,9	23,1	17,0	103,4	8,3	10,1	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0
Septembre	6,7	18,1	12,4	108,1	8,1	10,2	0,0	0,0	4,2	0,1	8,0
Octobre	0,9	10,5	5,7	98,2	6,7	9,1	0,2	1,3	4,0	1,9	7,1
Novembre	-5,2	2,8	-1,2	93,4	6,3	8,5	6,2	8,6	4,0	24,5	6,8
Décembre	-14,1	-4,5	-9,3	80,1	5,2	7,1	42,2	6,3	4,0	57,8	6,2

Tableau 2.12 Valeurs moyennes des principaux indices et variables sur la période de référence de 1981 à 2010 pour l'ensemble du BVRO. Les valeurs sont données pour tous les mois de l'année.

Le SWE de DAYMET a également été comparé avec les données de neige des produits de réanalyse ERA5-Land pour les mois de janvier à mai 2017, et pour chaque point de grille à une résolution d'environ 8 km, soit celle des produits ERA5-Land. La Figure 2.3 présente les corrélations significatives (p-value  $\leq 0,1$ ) entre le SWE de DAYMET et celui des données ERA5-Land (en utilisant les valeurs quotidiennes du SWE), pour l'ensemble du BVRO et pour chacun des mois de janvier à mai 2017.

L'entièreté du bassin versant était encore recouverte de neige jusqu'au 22 avril 2017, selon les données DAYMET, et jusqu'au 11 avril 2017 selon les données ERA5-Land. Dans l'ensemble, pour les mois analysés, des corrélations très élevées (majoritairement > 0.8) ont été observées, excepté pour le sud-est du BVRO, où les corrélations n'étaient pas significatives pour la majorité des points de grille du bassin. Les analyses pour le mois de mars 2017 révèlent des corrélations significatives supérieures à 0,7 entre les deux produits, mais uniquement au nord de la rivière des Outaouais. L'absence de corrélations significatives au sud de la rivière des Outaouais au mois de mars pourrait notamment être attribuée au SWE de DAYMET qui peut générer des biais potentiels dans le moment de la fonte de la neige en fin de saison (ORNL DAAC, 2021). Les corrélations sont également très élevées (> 0,8) entre les deux produits sur l'ensemble du BVRO au mois de février, mais aussi au mois d'avril, le mois à partir duquel les températures redeviennent positives en moyenne. Les points de grille où il n'y a pas de corrélation dans le sud-est du bassin, au mois d'avril, correspondent à des secteurs pour lesquels les deux produits enregistrent, le plus souvent, des valeurs nulles du SWE quotidien (Figure 2.3). Donc, le plus souvent et pour la majorité des points de grille du BVRO, les deux produits fournissent une information très similaire (sauf pour les secteurs sud en mars).

Figure 2.3 Cartographie des corrélations de Spearman entre les produits quotidiens de neige (SWE) DAYMET et ERA5-Land pour les mois de janvier à mai 2017 dans le BVRO. Seules les corrélations significatives (p-value  $\leq 0,1$ ) entre les valeurs non nulles sont cartographiées.



Coefficient de corrélation de Spearman - Mai 2017

Délimitation du BVRO

" "a "a ta ta o to to to to to

## *b) Conditions hydrologiques moyennes*

Les conditions hydrologiques moyennes à l'exutoire du BVRO pour la période de 1981 à 2010 sont d'abord présentées par l'hydrogramme fourni à la Figure 2.4. Elles ont été déterminées à partir des données hydrologiques de débit et de niveau d'eau (aval) à la centrale de Carillon, opérée par Hydro-Québec. Les débits et les niveaux d'eau maximaux sont observés en moyenne au mois d'avril. Durant ce mois, le débit maximum atteint en moyenne 7 239 m<sup>3</sup>/s, le débit moyen est de 3448 m<sup>3</sup>/s, et le débit minimum est de 1 023 m<sup>3</sup>/s. Les niveaux d'eau atteignent des valeurs moyennes maximales, moyennes et minimales, de 24,54 m, 22,9 m et 21,55 m, respectivement. Les débits et niveaux d'eau d'étiage sont observés au mois de septembre. Pour ce mois, les débits les plus bas observés ont une valeur moyenne de 535 m<sup>3</sup>/s, et les niveaux d'eau les plus bas observés ont une valeur moyenne de 21,14 m.

Figure 2.4 Hydrogramme des débits (panneau du haut) et des niveaux d'eau (panneau du bas) moyens observés à l'exutoire du BVRO pour la période de 1981 à 2010 et pour tous les mois de l'année. Les valeurs sont calculées à partir des données d'HQ, présentées au Tableau 2.3.



Hydrogramme des débits et des niveaux d'eau moyens à Carillon (Période de 1981 à 2010)

#### 2.3.2 Analyses des tendances : variables de base et indices hydrométéorologiques

# *a)* Variables et indices météorologiques (1981 – 2017)

Les tendances par décennie des principaux indices et variables de température, de précipitation et de neige ont été calculées à partir des données de grille DAYMET pour les mois de novembre à mai, sur les périodes de 1981 à 2017 et de 1998 à 2017. Elles ont été calculées à partir des valeurs moyennes spatiales sur tout le BVRO. Les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value  $\leq 0,1$ ) sont représentées à l'intérieur de *heatmaps* fournis à la Figure 2.5.

Peu importe la période considérée, aucune tendance significative n'est observée pour les indices de température, moyennés spatialement sur tout le BVRO. Cependant, sur la période complète (1981 à 2017), tous les indices de précipitation et de neige, également moyennés spatialement sur tout le BVRO, excepté l'indice Prcp90, sont affectés par une tendance à la baisse au mois de novembre, tout comme les indices SDII et SWE pour le mois de février. Pour ce mois, les indices Prcp1 et CWD sont quant à eux affectés par une tendance à la hausse. Aucune tendance n'est constatée pour les indices printaniers. Toutefois, sur la période plus récente de 1998 à 2017, les indices et variables de précipitation PrcpTot, SDII, Prcp90 et Prcp1 sont tous affectés par une tendance à la hausse au mois d'avril. Une tendance à la hausse des indices Prcp1 et CWD est également observée au mois de janvier.

Les tendances significatives au seuil de 90 % des indices principaux (Tmoy, PrcpTot et SWE) des mois de mars, avril et mai ont également été calculées à partir des données de grille DAYMET à 1 km de résolution pour l'ensemble du BVRO pour la période de 1981 à 2017 (fournies à l'Annexe C). Certains indices pour lesquels aucune tendance n'avait été observée à partir des valeurs moyennes pour l'ensemble du BVRO révèlent cette fois-ci des tendances significatives au printemps sur certains secteurs du bassin.

L'indice PrcpTot révèle des tendances significatives à la hausse sur moins de 1 % de la superficie du BVRO au moins de mars, sur 13 % du bassin au mois d'avril et sur 1 % du bassin au mois de mai. L'indice SWE révèle quant à lui des tendances significatives à la hausse sur 1,5 % et 1,8 % du BVRO pour les mois de mars et avril, respectivement, et à la baisse sur 29,1 % et 19,9 % du bassin, pour les mois de mars et avril respectivement. L'indice Tmoy révèle des tendances significatives à la hausse sur 7,8 % du bassin pour le mois de mai seulement.

Donc en résumé, durant la période de 1998 à 2017 pour certains secteurs du BVRO et en moyenne spatiale, l'occurrence de jours humides, l'intensité moyenne par jours humides, le cumul total et les extrêmes (90<sup>e</sup> centile) de précipitation augmentent au mois d'avril, alors que les indices de neige et de précipitation diminuent en novembre (dans ce cas aussi pour toute la période de 1981 à 2017). Pour les autres mois, les changements semblent moins systématiques et plus sporadiques, et varient selon les indices. Il ne semble pas non plus y avoir de tendances majeures significatives pour les températures au printemps (que ce soit pour la période de 1981 à 2017 ou celle de 1998 à 2017). Ces changements sont donc de nature à augmenter les risques de débits élevés ou de fonte rapide de la neige au début du printemps, même si la neige semble diminuer sur environ 20 % du bassin en avril. Figure 2.5 Tendances par décennie des indices et variables météorologiques, calculées pour chaque mois de novembre à mai pour les périodes de 1981 à 2017 (panneau du haut) et de 1998 à 2017 (panneau du bas) à partir des données DAYMET. Les tendances sont calculées à partir des valeurs moyennées spatialement sur tout le BVRO. Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value  $\leq 0,1$ ) sont représentées.



Tendances par décennie (1981-2017) (p-value <= 0,1)

Tendances par décennie (1998-2017) (p-value <= 0,1)



69

# *b)* Variables et indices hydrologiques (1963 – 2019 et 1981 – 2017)

Les tendances par décennie des variables hydrologiques (Qmin/Nmin, Qmoy/Nmoy et Qmax/Nmax) à l'exutoire du BVRO pour les mois de novembre à mai ont également été calculées sur la période de 1981 à 2017 (période commune avec les variables et indices météorologiques), présentées à la Figure 2.6, mais également sur la période complète de 1963 à 2019 et sur la période récente de 1998 à 2017, ces dernières informations étant fournies à l'Annexe D. Les tendances ont été calculées à partir des données de débit à la centrale de Carillon et de niveau d'eau, en aval de la centrale de Carillon.

Au printemps, seuls les débits minimums du mois de mars sont à la hausse sur la période de 1981 à 2017, et ne révèlent pas de tendances significatives pour les autres mois. Toutefois, les débits moyens et maximaux sont marqués par une tendance à la hausse en hiver, durant les mois de janvier et février. Ces hausses sont encore plus marquées sur la période complète de 1963 à 2019 (Annexe D, Figure D.1, panneau du haut). Les débits hivernaux ont donc augmenté au cours des dernières décennies. Les niveaux d'eau sont quant à eux marqués par des tendances le plus souvent à la baisse, lorsque celles-ci sont significatives. Toutefois, des tendances significatives à la hausse des niveaux d'eau moyens et minimaux sont observées pour les mois de février, mars et de mai durant la période récente de 1998 à 2017. Cette différence peut notamment être attribuée aux niveaux d'eau printaniers particulièrement élevés observés jusqu'au milieu des années 1980 (cf. section 2.3.3).

Au Tableau 2.13, une comparaison est faite pour toutes les tendances calculées pour les indices printaniers Qmax et Nmax (du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai), pour les trois périodes (de 1963 à 2019, de 1981 à 2017 et de 1998 à 2017). Aucune tendance significative au seuil de 90 % n'est le plus souvent observée, exceptée pour les Nmax printaniers qui

sont à la baisse sur la période complète. L'hypothèse de stationnarité pour ces deux indices (Qmax et Nmax) et les autres indices hydrologiques est donc le plus souvent respectée pour l'analyse fréquentielle (période de retour) présentée dans la prochaine section. Par ailleurs, il ne semble pas que l'augmentation de l'occurrence de jours humides, l'intensité moyenne par jours humides, le cumul total et les extrêmes (90<sup>e</sup> centile) de précipitation au mois d'avril ait engendré d'effet significatif sur les débits maxima durant ce mois, lesquels semblent stationnaires, peu importe la période considérée (de 1998 à 2017 ou de 1981 à 2017). Les débits maxima et minima en hiver, surtout en janvier, sont cependant affectés par une augmentation substantielle d'environ 130 m<sup>3</sup>/s par décennie (de 1981 à 2017, cf. Figure 2.6).

Figure 2.6 Tendances décennales des indices et variables hydrologiques Qmoy, Qmin et Qmax (Tableau 2.6) des mois de novembre à mai pour la période de 1981 à 2017. Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value ≤ 0,1) sont représentées.



Tendances par décennie (1981-2017) (p-value <= 0,1)

Tableau 2.13. Tendances décennales des indices printaniers Qmax et Nmax, calculées pour les périodes de 1963 à 2019, de 1981 à 2017 et de 1998 à 2017. Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value  $\leq 0,1$ ) sont données.

Période	Qmax printanier	Nmax printanier
(-)	((m <sup>3</sup> /s)/décennie)	(m/décennie)
1963 à 2019	Nan	-0,11
1981 à 2017	Nan	Nan
1998 à 2017	Nan	Nan

# 2.3.3 L'inondation de 2017 et ses caractéristiques par rapport aux autres événements

#### *a) Conditions météorologiques durant l'hiver et au printemps 2017*

Le météogramme de la Figure 2.7, produit à partir des variables et indices provenant des données de grille DAYMET, présente un aperçu des conditions météorologiques hivernales et printanières de 2017. L'inondation historique du printemps 2017 s'est produite à la suite d'un mois de mars plus froid que la normale, avec des Tmin et Tmax journalières moyennes qui se sont maintenues en bas du point de congélation durant tout le mois, excepté pour quelques jours où la Tmax a atteint des valeurs au-dessus de 0 °C. Le mois de mars a également été marqué par plusieurs épisodes importants de chutes de neige, ces derniers ayant contribué à augmenter le SWE moyen dans le BVRO à la fin du mois.

Le mois d'avril a quant à lui marqué le début de la crue printanière, avec une rapide augmentation des températures dès le début du mois, et des Tmax qui se sont maintenues largement au-dessus de 0 °C durant tout le mois et des Tmin oscillant autour de 0 °C (mois marqué par une anomalie positive de températures, cf. Gachon *et al.*, 2018). Ce réchauffement des températures a donc occasionné une fonte rapide et continue du couvert de neige (indice DimSWE), et donc un volume d'eau important libéré chaque jour, alors que très peu d'épisodes de fonte avaient été enregistrés durant le mois de mars. La fin avril a été marquée par trois épisodes consécutifs de fonte importante de neige, via une rapide augmentation des Tmin. Par ailleurs, durant ce mois, quatre événements de précipitation de plus de 10 mm/jour ont été observés en moyenne pour l'ensemble du BVRO (moyenne spatiale des données de grille DAYMET) voire de plus de 30 mm/jour parfois d'après les données de stations (cf. Gachon *et al.*, 2018, et Annexe E).

Au mois de mai, les Tmin sur l'ensemble du BVRO se sont maintenues au-dessus de 0 °C, à quelques exceptions près. La fonte de la neige a été encore plus importante que durant le mois d'avril (indice DimSWE), ponctuée par d'autres événements de fortes pluies. En effet, trois épisodes de précipitation de plus de 15 mm (valeur moyenne pour l'ensemble du BVRO), dont un épisode de précipitation de près de 25 mm, ont été enregistrés entre le 1<sup>er</sup> et le 8 mai 2017. Ces épisodes de précipitation intense, combinés aux importants volumes d'eau libérés par la fonte du couvert de neige, ont donc contribué à l'atteinte du débit historique record de 9 094,02 m<sup>3</sup>/s enregistré à la centrale de Carillon le 8 mai 2017.

Figure 2.7 Météogramme des indices journaliers Tmoy, PrcpTot, SWE, AccuSWEtot, DimSWEtot au printemps 2017 (1<sup>er</sup> mars au 31 mai), calculés à partir des données DAYMET en tant que moyennes spatiales à l'échelle du BVRO. Le panneau du haut correspond aux Tmax (en rouge) et Tmin (en bleu) quotidiennes. La précipitation totale (en bleu) et le SWE moyen (en vert), quotidiens, sont représentés dans le panneau du milieu. Le panneau du bas correspond à la variation positive (en bleu) et négative (en rouge) du SWE quotidien.



# b) Anomalies des variables et des indices météorologiques

Les conditions météorologiques du printemps 2017 et des autres années marquées par des inondations historiques ont également été comparées aux valeurs normales (période de 1981 à 2010) afin d'établir les anomalies des variables et des indices météorologiques.

D'abord, le Tableau 2.14 présente les valeurs minimales, maximales et moyennes ainsi que l'écart-type des principaux indices mensuels pour les mois de mars, avril et mai 2017, calculés à partir des données DAYMET en tant que valeurs moyennes pour l'ensemble du BVRO. Les valeurs pour la période normale de 1981 à 2010 sont également fournies comme référence au Tableau 2.12 pour l'ensemble du BVRO et tous les indices. Comme suggéré ci-dessus, le mois de mars fut en moyenne plus froid et le mois d'avril fut en moyenne légèrement plus chaud que la normale (Tableau 2.14). Les précipitations totales des mois d'avril et de mai ont cependant largement dépassé les valeurs normales, mais les conditions de neige dans le BVRO révèlent quant à elles des quantités inférieures à la normale aux mois de mars, avril et de mai. Les écarts-types des conditions moyennes révèlent toutefois d'importantes disparités des conditions dans le BVRO. La valeur maximale du SWE observée dans le BVRO au mois de mars 2017 était d'ailleurs supérieure aux valeurs normales.

Tableau 2.14. Statistiques générales des principaux indices météorologiques mensuels des mois de mars, avril et mai pour l'année 2017 et pour la climatologie (1981 – 2010). Les indices maximums, minimums et moyens ainsi que l'écart-type des indices Tmoy, PrcpTot et SWE sont fournis en tant que valeurs moyennes pour l'ensemble du BVRO et sont calculés à partir des données DAYMET.

Indice	Mois	Maximum		Minimum		Moyen		Écart-Type	
		2017	1981 à 2010	2017	1981 à 2010	2017	1981 à 2010	2017	1981 à 2010
Tmoy (°C)	Mars	-3,7	-1,4	-11,8	-9,6	-7,9	-5,5	1,7	1,8
	Avril	8,2	6,7	0,8	-0,1	4,3	3,3	1,7	1,5
	Mai	13,0	13,3	7,3	7,5	9,9	10,5	1,2	1,2
Duen Te4	Mars	139,0	106,8	26,0	42,6	68,7	64,7	22,1	8,3
(mm)	Avril	238,0	120,0	70,0	51,0	142,7	72,9	36,7	8,4
	Mai	285,0	135,5	81,0	68,5	153,6	90,9	30,2	9,8
SWE (mm)	Mars	434,1	383,3	68,5	99,4	174,2	184,0	51,2	36,6
	Avril	399,3	400,0	27,7	57,6	155,8	170,5	61,1	47,2
	Mai	362,1	339,9	0,0	1,5	75,9	95,1	60,8	52,7

Les anomalies standardisées (cf. section 2.2.5a) des principaux indices météorologiques (incluant les Qmoy et Nmoy) ont ensuite été calculées pour les six inondations historiques depuis 1981 jusqu'à 2017 (période couverte par les données DAYMET) telles que présentées au Tableau 2.11, ce pour les mois de mars, avril et mai. Les histogrammes de la Figure 2.8 permettent de comparer les anomalies des différentes années entre elles. La Figure F.1 (Annexe F) représente les mêmes anomalies, mais calculées à partir des données de stations d'observation, en incluant les années 1974 et 1976, lesquelles ont été marquées par des inondations historiques.

Dans tous les cas, les débits et les niveaux d'eau étaient au-dessus des valeurs normales aux mois de mars et avril, excepté pour l'année 1983, où les valeurs étaient sous la normale au mois d'avril. Les anomalies étaient d'autant plus importantes au mois de mai pour les années 2017, 1983 et 1997, avec des valeurs au-dessus ou près de deux écarts-types au-dessus des valeurs normales.

L'année 2017, tout comme les années 1997 et 2008, fut caractérisée par un mois de mars anormalement froid. Dans presque tous les cas, le mois d'avril était également plus froid que la moyenne. Les années 1997 et 2008 se démarquent particulièrement des autres années en raison du SWE largement supérieur à la normale aux mois de mars, avril et mai. Les années 2017, 1983 et 1991 présentent des anomalies positives importantes de PrcpTot au mois d'avril, tout comme au mois de mai, sauf pour 1991. L'année 1998 est quant à elle caractérisée par des anomalies positives de PrcpTot plus tôt en saison (en mars).

Le caractère anormal des conditions météorologiques dans le BVRO aux printemps 1974 et 1976, en comparaison à celui des conditions du printemps 2017, a quant à lui été évalué à partir des données d'observation de station (Annexe F), sans considération des conditions de neige. L'inondation historique de 1976 s'est produite dans le contexte 76 d'un mois de mars anormalement pluvieux, avec des quantités de pluie tombées dans le BVRO largement supérieures à celles des années 2017 et 1974. La pointe de crue a d'ailleurs été observée le 4 avril, soit plus tôt que les autres événements. L'inondation historique de 1974 s'est quant à elle produite dans le contexte d'un mois de mai particulièrement pluvieux, avec des quantités de précipitation et un nombre total de jours de pluie dans le mois de près de deux écarts-types au-dessus des valeurs normales. Toutefois, que ce soit pour 1974 ou pour 1976, l'intensité de la précipitation (SDII) aux mois d'avril et mai n'était en rien exceptionnelle, alors qu'elle fut particulièrement élevée au printemps 2017. En effet, l'anomalie standardisée de l'indice SDII au printemps 2017 bat tous les records, excepté pour le mois de mars, où l'année 1998 fut encore plus anormale que 2017.

L'année 2017 se démarque donc de toutes les autres années étudiées par des anomalies exceptionnellement élevées des occurrences, des intensités et des cumuls de pluie, avec des valeurs de plus ou moins deux écarts-types de différence par rapport à la normale aux mois d'avril et de mai. Le SWE en 2017 était quant à lui sous les valeurs normales pour les mois de mars, avril et mai. Pourtant, l'indice de fonte DimSWEtot, aux mois d'avril et de mai, était au-dessus des valeurs normales, ce qui indique tout de même un apport d'eau important et accéléré en provenance de la fonte de la neige, en lien avec des températures minimales plus chaudes que la normale. Le taux de fonte de la neige atteint presque un écart-type de différence au-dessus des valeurs normales à la fin de l'hiver.

Figure 2.8 Anomalies standardisées par rapport à la climatologie des indices de température, de précipitation et de neige pour les mois de mars, avril et mai. Les indices sont représentés en tant que valeurs moyennes à l'échelle du BVRO, ce pour les 6 années ayant enregistré les inondations les plus intenses, en ordre décroissant, selon le Qmax printanier enregistré à la centrale de Carillon, de 1980 à 2017.



En résumé, il semble se dégager une relation entre la présence de conditions météorologiques printanières marquées par des épisodes de précipitation d'intensité exceptionnelle et l'occurrence de débits extrêmes à l'exutoire (comme en 2017). Toutefois, la présence de conditions marquées plutôt par des précipitations abondantes exceptionnelles, sans être particulièrement intenses, conditionnerait plutôt l'occurrence de niveaux d'eau exceptionnels (comme en 1974 et en 1976). L'absence de données de

Mai

neige pour les années 1974 et 1976 ne permet toutefois pas de tirer de conclusions définitives sur ce dernier lien.

D'après les histogrammes des indices d'anomalie standardisée pour toutes les années de 1981 à 2017, présentés à l'Annexe G, il semble également que les années qui n'ont pas été marquées par des inondations historiques ne présentent pas de conditions météorologiques printanières atypiques. Il s'agit là d'un indicateur important qui témoigne des liens potentiels entre la présence de conditions météorologiques anormales à la fin de l'hiver et au printemps et l'occurrence de crues exceptionnelles à l'exutoire du BVRO.

Le cas de l'inondation printanière de 2017 est étudié plus finement dans la suite. Les anomalies relatives ou absolues (Figure 2.9), et standardisées (Figure 2.10) des variables et des indices du printemps 2017 (calculées à partir des données DAYMET pour les mois de mars, avril et mai) sont représentées spatialement pour l'ensemble du BVRO ou à l'échelle des SBV. Ces distributions spatiales des anomalies permettent notamment d'établir un portrait plus détaillé à l'échelle régionale pour tout le BVRO.

En mars 2017, l'indice Tmoy était inférieur en tout point du bassin versant, avec des anomalies standardisées sous les valeurs normales pour l'ensemble des SBV, atteignant parfois des valeurs jusqu'à 1,2 écart-type sous la normale. Ceci corrobore l'indice moyen calculé et présenté précédemment pour le BVRO. À l'opposé, le mois d'avril 2017 a enregistré des températures moyennes (Tmoy) supérieures aux valeurs normales sur l'ensemble du BVRO, avec également des anomalies standardisées positives observées pour l'ensemble des SBV. Les anomalies positives (de plus de 1,5 °C, cf. Figure 2.9) sont d'autant plus importantes pour la portion sud-est du BVRO. Ceci confirme le dégel printanier brusque et rapide sur l'ensemble des SBV du BVRO, en particulier près de l'exutoire.

Les anomalies relatives du SWE sont plutôt variables d'un secteur à l'autre du BVRO pour le mois de mars, mais en général, une plus grande proportion du bassin présente des valeurs moyennes de l'indice SWE inférieures aux valeurs normales. Toutefois, au mois d'avril 2017, certaines zones présentent des valeurs anormalement élevées de l'indice SWE, tout particulièrement dans le secteur aval du bassin, au sud de la rivière des Outaouais. Ces valeurs plus élevées peuvent entre autres correspondre aux importantes chutes de neige de la fin mars à proximité de Rigaud ou au sud du bassin, comme le suggèrent les analyses des conditions météorologiques moyennes réalisées à partir des données de stations d'observation d'ECCC (Annexe E). En outre, comme le mois de mars fut plus froid que la normale, de plus grandes quantités de neige sont restées au sol jusqu'au mois d'avril. Toutefois, les anomalies standardisées révèlent que les valeurs du SWE n'ont rien de particulièrement exceptionnel tant au mois de mars qu'au mois d'avril. Les chutes de neige importantes de la fin mars ne semblent donc pas avoir contribué à la mise en place d'un couvert de neige exceptionnel à la fin de l'hiver 2017. Les secteurs qui présentent des anomalies relatives positives particulièrement élevées de l'indice SWE, mais dont l'anomalie standardisée est beaucoup moins prononcée sont des secteurs où l'on peut présumer une variabilité interannuelle du SWE très importante, et donc des écarts-types plus élevés dans ces endroits qu'ailleurs. Cependant, l'indice DimSWEtot du mois d'avril révèle que même si les quantités de neige au sol en mars et en avril n'avaient rien d'exceptionnel, la fonte totale de la neige durant le mois d'avril était supérieure à la normale, ce pour l'ensemble des SBV. Les indices DimSWEtot du mois d'avril sont particulièrement élevés pour les SBV au sud de la rivière des Outaouais, à proximité de l'exutoire, avec des valeurs entre 1,2 et 1,9 écart-type au-dessus des valeurs normales. Cette fonte de neige importante à proximité de l'exutoire peut avoir affecté de manière importante la pointe de crue à la centrale de Carillon.

Finalement, les anomalies relatives des indices PrcpTot pour les mois d'avril et de mai révèlent des portraits spatiaux distincts. En plus des quantités d'eau importantes apportées par le ruissellement dues à la fonte du couvert neigeux, la quantité totale de précipitation tombée durant les mois d'avril et de mai dépasse largement les valeurs normales sur l'ensemble du BVRO, avec des anomalies atteignant parfois jusqu'à 225 % des valeurs normales au mois de mai, et jusqu'à 189 % des valeurs normales pour le mois d'avril. Les anomalies standardisées des indices PrcpTot et Prcp90 illustrent d'autant plus le caractère exceptionnel des épisodes de précipitation du printemps 2017. Les indices du mois d'avril révèlent également des cumuls totaux de précipitations plus exceptionnelles que les fortes intensités (90<sup>e</sup> centile) par événement de pluie (i.e. des occurrences plus importantes que d'habitude comme suggéré précédemment) (Figure 2.11), alors que les fortes intensités par jours humides sont plus exceptionnelles que les quantités totales au mois de mai (Figure 2.12). Toutefois, il faut préciser que le caractère extrême des indices de précipitation varie d'un SBV à l'autre, et n'a pas affecté les mêmes territoires avec la même intensité aux mois d'avril et de mai. Des apports importants de précipitation au nord de la rivière des Outaouais ont été observés en avril, et davantage au sud au mois de mai. Plus spécifiquement, le mois d'avril a connu des anomalies extrêmes de précipitation totale pour les SBV au nordest du bassin (Figure 2.11). Le SBV du cours supérieur de la Gatineau présente d'ailleurs une valeur de 4,2 écarts-types au-dessus de la normale pour l'indice PrcpTot. Les fortes intensités de précipitation au mois d'avril (i.e. indice Prcp90) étaient également exceptionnelles pour l'ensemble des SBV de la rivière des Outaouais, en particulier dans les SBV où les anomalies les plus élevées de l'indice PrcpTot ont également été observées. Le SBV du cours inférieur de la Gatineau a été affecté par ces importantes anomalies. Au mois de mai, des conditions météorologiques extrêmes ont également affecté le sud-est du bassin versant (Figure 2.12), exacerbant d'autant plus la crue majeure qui sévissait déjà en aval de la rivière des Outaouais. Les anomalies
des indices PrcpTot ont atteint jusqu'à 4 écarts-types au-dessus de la normale dans les SBV des rivières Madawaska et Mississippi, et entre 3,0 et 3,7 écarts-types dans les SBV des rivières Bonnechère, Rideau et South Nation, en aval du bassin versant.

En définitive, les apports d'eau importants en provenance de la précipitation liquide au nord de la rivière des Outaouais au mois d'avril 2017, combinés aux volumes d'eau importants en provenance de la fonte du couvert neigeux au sud de la rivière des Outaouais dans le même temps, ont certainement contribué aux valeurs de débit exceptionnelles enregistrées à la centrale de Carillon à la fin avril et au début mai. En plus des quantités exceptionnelles de précipitation totale reçue, celles-ci se sont également réalisées via des événements d'une intensité particulièrement inhabituelle, contribuant à augmenter le volume et la durée du ruissellement de surface vers la rivière des Outaouais, à proximité de son exutoire. De plus, considérant que le mois de mars fut anormalement froid, le sol probablement encore gelé sur la grande majorité du territoire au mois d'avril a certainement contribué à limiter l'infiltration de l'eau dans le sol, avec une quantité d'eau importante atteignant l'aval du BVRO par ruissellement de surface. Les événements de précipitation intense qui se sont produits sur le territoire au mois de mai au sud de la rivière des Outaouais ont donc indubitablement concouru au maintien des valeurs journalières de Qmoy au-dessus du seuil d'inondation, et contribué à générer une durée exceptionnelle de l'inondation de 2017; les événements météorologiques extrêmes du mois d'avril avaient déjà contribué à générer la première pointe de crue à Carillon. Dans les prochaines sections, une analyse détaillée du caractère exceptionnel de l'inondation de 2017 est présentée.

Figure 2.9 Anomalies absolues des indices mensuels Tmoy pour les mois de mars et avril 2017 (panneaux du haut, respectivement) et anomalies relatives des indices mensuels SWE (panneaux du centre, respectivement) et PrcpTot (panneaux du bas, respectivement). Les anomalies sont représentées pour l'ensemble du BVRO, à partir des données DAYMET.





Figure 2.10 Anomalies standardisées par rapport à la climatologie des indices Tmoy, SWEmoy, DimSWEtot et PrcpTot du mois de mars 2017, représentées spatialement en tant que valeurs moyennes à l'échelle des SBV du BVRO à partir des données DAYMET.







Figure 2.11 Anomalies standardisées par rapport à la climatologie des indices Tmoy, DimSWEtot, PrcpTot, Prcp90 et SWEmoy du mois d'avril 2017, représentées spatialement en tant que valeurs moyennes à l'échelle des SBV du BVRO à partir des données DAYMET.



Figure 2.12 Anomalies standardisées par rapport à la climatologie des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot du mois de mai 2017, représentées spatialement en tant que valeurs moyennes à l'échelle des SBV du BVRO à partir des données DAYMET.



# *c) Conditions hydrologiques du printemps 2017*

Comme il a été suggéré précédemment, les conditions météorologiques dans l'ensemble du BVRO ont une influence majeure sur les valeurs de débit et de niveau d'eau observées à l'exutoire, à la centrale de Carillon. Les conditions hydrologiques à Carillon sont donc présentées dans cette section pour le printemps 2017 en comparant avec les autres événements d'inondations historiques observées depuis 1963.

Les onze années ayant enregistré les Qmax printaniers les plus élevés sur la période de 1963 à 2019, calculés à partir des moyennes journalières sont présentées au Tableau 2.15. Les Nmax printaniers y sont également fournis.

Au cours de toute la période d'observation, les années 2019, 2017, 1976 et 1974 ont enregistré les Qmax printaniers records à Carillon, avec des valeurs au-dessus de 8 000 m<sup>3</sup>/s. Le Qmax printanier enregistré à Carillon en 2017 (9 094 m<sup>3</sup>/s) est légèrement sous le Qmax printanier enregistré au printemps 2019 (9 217 m<sup>3</sup>/s), la valeur record. Les années 1991, 1979, 1997 et 1972 n'avaient pas été recensées dans les archives bien qu'elles aient enregistré des Qmax supérieurs à celui de 2008 (Tableau 2.15). Il est également intéressant de constater que les Nmax printaniers records n'ont pas été observés en 2019 et en 2017, mais plutôt en 1976 et en 1974. L'année 1991, quant à elle, a enregistré un Nmax qui la classe au dernier et 11<sup>e</sup> rang par rapport aux valeurs enregistrées des autres années à l'étude, alors qu'elle se classe au 7<sup>e</sup> rang pour les Qmax. Ces premières observations révèlent que les valeurs de débit à elles seules ne peuvent renseigner adéquatement sur l'ampleur des crues printanières à Rigaud.

Le Tableau 2.16 permet de constater qu'en utilisant les données observées de débit et de niveau d'eau aux 5 minutes, plutôt que les moyennes journalières, les débits et les niveaux de pointe de 2017 et 2019 ont atteint des valeurs plus élevées que les débits moyens quotidiens. Le niveau d'eau en aval de Carillon en 2017 a même atteint des valeurs supérieures à celles observées en 2019. Le débit de pointe record, observé en avril 2019, est de 9 492,77 m<sup>3</sup>/s.

Tableau 2.15. Principales caractéristiques des Qmax et Nmax printaniers (moyennes quotidiennes) à la centrale de Carillon, ce pour les 11 inondations printanières ayant enregistré les Qmax printaniers les plus élevés à la centrale de Carillon, depuis 1963. Les années sont classées par ordre décroissant selon le Qmax enregistré (du plus élevé au plus faible).

Carillo	n	Carillon	(aval)
Date Qmax (Année – Mois - Jour)	Date QmaxQmaxnnée – Mois - Jour)(m³/s)		Nmax (m)
2019-04-30	9217	2019-04-28	25,11
2017-05-08	9094	2017-05-08	25,11
1976-04-04	8190	1976-04-04	25,32
1974-05-23	8105	1974-05-21	25,27
1998-04-04	7239	1998-04-04	24,54
1983-05-12	6907	1983-05-12	24,36
1991-04-11	6728	1991-04-12	24,14
1979-05-06	6686	1979-04-30	24,41
1997-05-07	6382	1997-05-08	24,19
1972-05-08	6329	1972-04-22	24,28
2008-04-22	6053	2008-04-24	24,19

Tableau 2.16 Débits et Niveaux maximums mensuels (Qmax et Nmax, respectivement) en 2017 et 2019 calculés pour les mois de mars, avril et mai à partir des données observées aux cinq minutes à la centrale de Carillon.

Année	Qmax (m <sup>3</sup> /s)			Qmaxnnée(m³/s)				Nmax (m)	
	Mars	Avril	Mai	Mars	Avril	Mai			
2017	4055,37	7143,18	9232,76	23,25	24,39	25,16			
2019	3619,45	9492,77	9372,31	22,73	25,15	25,13			

Dans la suite, afin de bien décrire les conditions hydrologiques à l'exutoire du BVRO au printemps 2017 par rapport aux autres événements historiques, les moyennes journalières des débits et des niveaux d'eau (Q et N), du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai, sont représentées par l'hydrogramme de crue présenté à la Figure 2.13. Les seuils d'inondation mineure (SI<sub>Q</sub> et SI<sub>N</sub> définis au Tableau 2.20) sont également représentés par la ligne en pointillés noirs. La crue de 1976 a été la plus précoce avec des valeurs journalières de débit dépassant le SI<sub>Q</sub> dès la fin mars, tout comme la crue de 1998, pour laquelle les débits ont dépassé le SI<sub>Q</sub> au début du mois d'avril. Les inondations de 2017 et 2019 ont atteint leur apogée plus tardivement, au début mai et à la fin avril, respectivement. Toutefois, elles se distinguent des autres inondations représentées, à première vue, par des valeurs journalières de débit (Qmoy) particulièrement élevées et qui ont été maintenues pour une durée beaucoup plus grande que pour les autres événements, dans les deux cas. Au printemps 2017, comme dans la plupart des autres cas, deux pointes de crue ont été observées; la première a eu lieu le 21 avril après une augmentation prononcée des Qmoy au début avril, et la seconde a eu lieu le 8 mai, détrônant le record de 1976. Les deux pointes de crues se sont succédé, sans que le débit diminue réellement d'intensité ou redescende en dessous du seuil d'inondation mineure, comme ce fut le cas en 1976 (Figure 2.13).

Les valeurs journalières de niveau d'eau (Nmoy) de 2017 et 2019 ont sensiblement les mêmes caractéristiques d'ensemble que celles des Qmoy. Alors que les Nmax printaniers sont les mêmes pour les années 2017 et 2019 (en considérant les moyennes journalières), les niveaux d'eau se sont maintenus à des valeurs près du maximum bien plus longtemps en 2019 qu'en 2017. Les années 1976 et 1974, marquées par les Nmax printaniers records, présentent des fluctuations temporelles bien distinctes. En effet, le niveau d'eau maximum de 1976 a été enregistré très tôt au début du mois d'avril. Celuici a grimpé au-dessus du SI<sub>N</sub> pour rapidement atteindre son maximum, puis est redescendu tout aussi rapidement à des valeurs près du SI<sub>N</sub> vers la mi-avril. Le niveau d'eau en 1974 a plutôt atteint plus progressivement le SI<sub>N</sub> vers la mi-avril et fut maximum beaucoup plus tardivement vers la fin mai. Les niveaux d'eau se sont d'ailleurs maintenus à des valeurs au-dessus du SI<sub>N</sub> sur une plus longue durée qu'en 1976.

Figure 2.13 Hydrogramme de crue des Qmoy journaliers (panneau du haut) et des Nmoy journaliers (panneau du bas) à la centrale Carillon (données fournies par HQ), du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai, ce pour les six années ayant enregistré les Qmax printaniers les plus élevés. Les lignes noires hachurées représentent les seuils d'inondation mineure estimés à 5 175,91 m<sup>3</sup>/s pour les valeurs de débit (SI<sub>Q</sub>) et à 23,8 m pour les valeurs de niveau d'eau (SI<sub>N</sub>) (cf. section 2.2.4a).



Les distributions statistiques des valeurs maximales, minimales et moyennes des débits (Qmax, Qmin et Qmoy) et des niveaux d'eau (Nmax, Nmin et Nmoy) printaniers (1<sup>er</sup> mars au 31 mai) sont présentées sous forme de *box plots* à la Figure 2.14 pour la période complète de 1963 à 2019. Les années marquées par des inondations historiques sont représentées par des points.

Les valeurs médianes des distributions (présentées au Tableau 2.17), représentées par les lignes noires à l'intérieur des boîtes, sont près des SI<sub>(Q et N)</sub>. Les inondations des années 2019, 2017, 1976 et 1974 se distinguent des autres inondations historiques en raison des Qmax atteints, qui dans les quatre cas, se retrouvent à l'extérieur des intervalles interquartiles (IQR > (1,5 × écart interquartile), soit des valeurs exceptionnelles). Les Qmax atteints dans les autres cas sont situés dans les limites de la distribution IQR. Les Qmoy en 2017 et en 2019 sont également en dehors de la distribution, mais pas ceux des années 1976 et 1974, ce qui suggère que les débits journaliers en 2017 et en 2019 se sont maintenus dans des gammes de valeurs plus élevées sur une plus longue durée qu'en 1974 et en 1976. L'inondation de 1974 a toutefois enregistré des valeurs journalières de débit plus élevées qu'en 1976, bien que la crue de 1976 ait atteint un débit de pointe supérieur.

Les distributions des Nmax, Nmoy et Nmin présentent moins de valeurs extrêmes (Figure 2.14, panneau de droite), mais des différences importantes sont observées entre les Nmax et les Nmoy. Tout comme pour les débits, la crue de 1974 est marquée par un Nmoy plus élevé que celui de l'inondation de 1976, malgré un Nmax inférieur. Également, l'inondation de 2019 est caractérisée par un Nmoy à la limite de la distribution et supérieur à celui de l'année 1976, alors que le Nmoy du printemps 2017 laisse supposer une inondation marquée par des valeurs quotidiennes de niveau d'eau moins élevées que celles des crues de 1974, 2019, 1976 et même 1979, ce même si les Nmax étaient les mêmes pour les printemps 2017 et 2019. Les plus faibles débits et les plus bas niveaux d'eau ont été observés en 1998, où le Qmin est d'ailleurs situé à la limite inférieure de la distribution (Figure 2.14).

Figure 2.14 *Box plots* des Qmax, Qmoy et Qmin printaniers (*box plot* de gauche) et des Nmax, Nmoy et Nmin printaniers (*box plot* de droite) à la centrale de Carillon et en aval de celle-ci, respectivement. Les limites des boîtes représentent le premier et le troisième quartile, et la médiane est représentée par la ligne noire à l'intérieur des boîtes. Les limites des moustaches de la boîte représentent les limites de la distribution sans tenir compte des valeurs extrêmes, déterminées automatiquement à partir d'une fonction de l'écart interquartile.



Historique des données hydriques (1<sup>er</sup> avril au 31 mai) à la centrale de Carillon (1963-2019)

Tableau 2.17. Valeurs médianes pour les distributions des débits et niveaux d'eau printaniers maximaux, moyens et minimaux à Carillon, sur la période de 1963 à 2019.

Valeurs médianes							
Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Nmax (m)	Nmoy (m)	Nmin (m)		
5208,5	3244,1	1667,6	23,8	23,0	22,1		

#### *d) Anomalies des débits et des niveaux d'eau (2017 versus autres événements)*

Les anomalies standardisées des débits et des niveaux d'eau maximums printaniers (Qmax et Nmax, respectivement) ont également été calculées pour chaque année de 1963 à 2019 par rapport à la période de référence (1981 à 2010). Elles sont représentées sous forme d'histogramme à la Figure 2.15.

Comme suggéré dans l'analyse des distributions statistiques, les Nmax montrent d'importantes anomalies positives jusqu'au milieu des années 1980, puis à partir de 1983, les anomalies sont le plus souvent négatives. Compte tenu du contraste flagrant entre les deux périodes, il est possible que des modifications dans la gestion des barrages au sein du BVRO, mais également dans le bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, en amont de Montréal, aient affecté à partir des années 1980 les niveaux d'eau en aval de Carillon. Toutefois, de plus amples recherches sur cet aspect devraient être menées afin de conclure ou pas à l'effet de la régulation des ouvrages de rétention ou de régulation des niveaux d'eau.

Alors que les Nmax records ont été atteints en 1976, puis en 1974, les anomalies de ces indices sont les plus élevées, avec des valeurs atteignant près de quatre écarts-types audessus des valeurs normales. Pour les années 2017 et 2019, les Nmax sont également anormalement élevées, mais moins prononcées que pour les années 1974 et 1976.

Les anomalies standardisées des Qmax printaniers montrent les valeurs les plus extrêmes pour les années 2017 et 2019, lesquelles atteignent plus de quatre écarts-types au-dessus des valeurs normales. Les années 1976 et 1974 sont également marquées par des indices aux valeurs élevées, mais plus faibles que celles observées pour les années 2019 et 2017. Malgré les niveaux d'eau anormalement élevés avant 1983 et plus faibles après, la période plus récente de 1983 à 2019 est marquée par cinq crues majeures, contre six avant 1983. En plus des inondations de 1974, 1976, 2017 et de 2019, celle du printemps 1998 se distingue d'ailleurs avec d'importantes anomalies des indices Qmax et Nmax, dépassant deux écarts-types.





Anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981-2010) des Qmax et Nmax printaniers à la centrale de Carillon, de 1963 à 2019

e) Analyse des périodes de retour des débits et des niveaux d'eau de 2017

L'analyse fréquentielle des Qmax et Nmax printaniers a également été effectuée, ce à partir de différentes périodes, pour estimer la fréquence des inondations historiques, mais également pour déterminer les  $SI_{(Q et N)}$ , lesquels ont ultimement permis de calculer la durée de chacun des événements.

La Figure 2.16 présente la distribution des quantiles de crue des Qmax printaniers estimés et les intervalles de confiance correspondant selon la série temporelle considérée (avec ou sans les valeurs extrêmes de 2017 et de 2019). Les quantiles de

crue estimés des Qmax et Nmax pour les périodes de retour de 2, 10, 20, 50, 100 ans sont également fournis au Tableau 2.19.

En considérant la série temporelle complète (1963 à 2019), la période de retour de l'inondation de 2017 est estimée à 70,1 ans, mais elle est estimée à 123,6 ans lorsque le Qmax du printemps 2019 est exclu de l'analyse, et à 389,1 ans lorsque les Qmax des printemps 2019 et 2017 ne sont pas considérés (Tableau 2.18). Les intervalles de confiance sont d'autant plus larges lorsque la série temporelle complète est considérée dans l'analyse.

L'inclusion d'une seule année dans l'analyse, ou son exclusion, a donc des conséquences majeures sur l'estimation des quantiles de crue, lesquels sont largement utilisés par les ingénieurs pour la construction des ponts et des digues, et en aménagement du territoire pour la délimitation des zones inondables, notamment. Le quantile de crue estimé pour une période de retour de 100 ans est de 9 497,3 m<sup>3</sup>/s, en considérant la période complète de 1963 à 2019, une valeur bien au-delà du seuil de référence utilisé par la ville de Rigaud (*i.e.* 8 100 m<sup>3</sup>/s) (Éric Martel, Ville de Rigaud, communication personnelle). L'écart entre la valeur de ce quantile et celui estimé sans tenir compte des valeurs de 2017 et de 2019 (8 243 m<sup>3</sup>/s) est de plus de 1 000 m<sup>3</sup>/s, donc un écart non négligeable et une sous-estimation des débits de pointe avec l'exclusion des années 2017 et 2019 dans les séries de débits.

En considérant l'analyse fréquentielle des Nmax, la période de retour de la crue de 2017 est estimée à 27,1 ans, en tenant compte de la série temporelle complète, et à 54,1 ans, si les valeurs extrêmes de 1976 et 1974 sont exclues de l'analyse. Il est néanmoins important de préciser que les séries des Nmax ne satisfont pas, dans les deux cas, les conditions d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité, nécessaires pour l'ajustement de la distribution statistique de ces échantillons. Ces derniers résultats 95

permettent à tout le moins de constater que la fréquence d'apparition des aléas d'inondation varie considérablement en fonction de la variable hydrologique analysée, avec des incertitudes sur les estimations des périodes de retour des quantiles de crues qui augmentent lorsqu'on considère plus de valeurs extrêmes. Par contre, les quantiles des débits et des niveaux d'eau de pointe (peu importe la période de retour considérée) sont systématiquement sous-estimés de façon majeure lorsqu'on exclut les valeurs les plus extrêmes.

Figure 2.16 Débits estimés au barrage de Carillon selon la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) à partir de la série des Qmax printaniers observés pour les périodes 1963-2019, en rouge, 1963 – 2019 (sans 2019), en bleu, et 1963 – 2019 (sans 2017 et 2019), en vert. Les lignes en pointillés correspondent aux intervalles de confiance respectifs.



Période de retour (ans)

Tableau 2.18 Périodes de retour des 10 inondations majeures à Rigaud depuis 1963, estimées à partir des séries temporelles complètes des Qmax et Nmax printaniers, et également sans considérer les valeurs extrêmes. Les périodes de retour ont été estimées à partir de la distribution de GEV et les distributions ont été ajustées par la méthode du maximum de vraisemblance. Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité sont validées dans les trois cas en considérant les Qmax printaniers. Elles sont toutefois rejetées dans tous les cas en considérant les Nmax printaniers.

	Période de retour estimée (Années)								
Inondation		Qmax		N	Nmax				
majeure	1963 à 2019	1963 à 2019 (sans 2019)	1963 à 2019 (sans 2017 et 2019)	1963 à 2019	1963 à 2019 (sans 1974 et 1976)				
1972	5,4	6,1	7,0	10,5	15,0				
1974	28,6	41,6	81,1	39,1	91,2				
1976	31,0	45,7	92,3	43,8	107,9				
1979	7,6	8,8	11,0	11,7	17,2				
1983	9,3	11,2	14,7	5,3	6,5				
1992	2,3	2,3	2,4	1,7	1,7				
1998	12,8	16,1	23,1	7,8	10,2				
2008	4,2	4,6	5,1	3,8	4,3				
2017	70,1	123,6	389,1	27,1	54,1				
2019	78,1	141,5	477,7	27,1	54,1				

Tableau 2.19. Quantiles de crue associés aux périodes de retour de 2, 10, 20, 50, 100, 350 et 500 ans, estimés à partir des séries temporelles complètes des Qmax et Nmax printaniers et sans considérer les valeurs extrêmes. Les quantiles ont été estimés à partir de la distribution de GEV et les distributions ont été ajustées par la méthode du maximum de vraisemblance. Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité sont validées dans les 3 cas en considérant les Qmax printaniers. Elles sont toutefois rejetées dans tous les cas en considérant les Nmax printaniers.

		Quantiles de crue estimés						
Période de		Qmax (m <sup>3</sup> /s)			Nmax (m)			
retour	1963 à 2019	1963 à 2019 (sans 2019)	1963 à 2019 (sans 2017 et 2019)	1963 à 2019	1963 à 2019 (sans 1974 et 1976)			
2	5175,9	5150,2	5137,3	23,8	23,8			
10	6980,4	6801,2	6611,6	24,7	24,5			
20	7718,6	7439,7	7134,6	25,0	24,8			
50	8716,7	8272,5	7780,7	25,4	25,1			
100	9497,3	8901,3	8243	25,7	25,3			

Enfin, la durée de chaque inondation historique a pu être calculée à partir des quantiles de crue estimés pour une période de retour de 2 ans (SI<sub>Q</sub> et SI<sub>N</sub>), lesquels ont été définis au Tableau 2.6. Les quantiles estimés en tenant compte de la période complète de 1963 à 2019 ont été retenus, dans les deux cas, et sont fournis au Tableau 2.20. La durée correspond au nombre de jours consécutifs où les débits (D<sub>Q</sub>) ou les niveaux d'eau (D<sub>N</sub>) se sont maintenus au-dessus de leur seuil respectif (SI<sub>Q</sub> ou SI<sub>N</sub>).

Tableau 2.20. Seuils d'inondation mineure estimés à partir de la distribution GEV des Qmax printaniers (série complète) et des Nmax printaniers (série sans considérer les valeurs de 1976 et 1974). Les seuils correspondent aux quantiles estimés pour une période de retour de 2 ans.

Seuil d'inondation (SI)					
SI <sub>Q</sub> SI <sub>N</sub>					
(m <sup>3</sup> /s)	(m)				
5175,9	23,79				

La durée  $D_Q$  des inondations de 2017 et de 2019 est nettement supérieure à celle des inondations de 1974 et de 1976 (Figure 2.17). Toutefois, la durée  $D_N$  des inondations de 1974 et de 1976 est supérieure à celle des événements de 2017 et de 2019. Bien que le débit renseigne sur l'intensité de la crue, la durée déterminée en fonction des valeurs de niveau d'eau atteint est un élément crucial à considérer. En effet, le niveau d'eau renseigne directement sur la hauteur d'eau observée sur le territoire inondé, et donc sur l'ampleur des dommages potentiels (Lang et Claudet, 2005). La durée des événements est fournie pour chacune des inondations majeures à la Figure 2.17.





Une analyse fréquentielle a également été réalisée sur les durées ( $D_Q$  et  $D_N$ ) à l'aide de la période complète de 1963 à 2019. Les quantiles estimés pour les périodes de retour de 2, 10, 20, 50 et 100 ans sont présentés au Tableau 2.21. Ces quantiles sont repris pour la détermination des indices de durée (ID) et de submersion (IS) (présentés dans la section qui suit), qui permettent entre autres d'estimer la sévérité des inondations historiques.

	Quantile estimé				
Période de retour	DQ	D <sub>N</sub>			
	(Nb de jours)	(Nb de jours)			
2	2,7	4,0			
10	17,5	28,9			
20	26,4	42,1			
50	40,1	60,7			
100	51,8	75,2			

 $\begin{array}{l} \mbox{Tableau 2.21 Quantiles estimés à partir de l'analyse fréquentielle des séries temporelles complètes (1963 à 2019) des D_Q et des D_N pour les périodes de retour de 2, 10, 20, 50 et 100 ans. La distribution de Weibull a été utilisée dans le cas des D_Q et la série de Gamma dans le cas des D_N. \end{array}$ 

En résumé, cette analyse des différents facteurs qui caractérisent les inondations historiques pour la période de 1963 à 2019, et notamment les plus extrêmes de 2017 et de 2019 selon les conditions hydrologiques observées à l'exutoire du BVRO, révèle donc que les débits et les niveaux d'eau observés au printemps varient considérablement en termes d'occurrence, d'intensité et de durée. C'est cette combinaison des divers facteurs qui permet d'évaluer la sévérité de l'aléa d'inondation, celle-ci ayant été estimée et présentée dans la section qui suit.

## f) Sévérité de l'aléa d'inondation du printemps 2017

Dans cette section, la sévérité des inondations historiques est présentée. Elle est estimée en considérant autant des paramètres relatifs à l'intensité de l'aléa hydrologique à Carillon (les indices de fréquence (IF) et de durée (ID)) que les dommages potentiels associés (les indices de submersion (IS) et du bâti (IB)).

Les valeurs des indices non standardisés et standardisés des indices IF, ID, IS et IB ainsi que le score final de sévérité SAI pour chaque inondation sont présentés au Tableau 2.22.

	I	F	Ι	D	]	IS	]	В	SAI
Année	Poids	s = 0,3	Poids	s = 0,2	Poid	s = 0,2	Poid	s = 0,3	Score
	Ι	I std	Ι	I std	Ι	I std	Ι	I std	final
1972	1	0,00	1	0,00	2	0,33	89	0,37	0,18
1974	3	0,67	3	0,67	4	1,00	211	0,95	0,82
1976	3	0,67	2	0,33	3	0,67	215	0,97	0,69
1979	1	0,00	2	0,33	2	0,33	104	0,44	0,26
1983	1	0,00	1	0,00	1	0,00	32	0,09	0,03
1997	1	0,00	2	0,33	1	0,00	13	0,00	0,07
1998	2	0,33	1	0,00	1	0,00	68	0,26	0,18
2008	1	0,00	2	0,33	1	0,00	13	0,00	0,07
2017	4	1,00	4	1,00	2	0,33	221	1,00	0,87
2019	4	1,00	4	1,00	3	0,67	221	1,00	0,93

Tableau 2.22. Classification des dix inondations printanières majeures à Rigaud, depuis 1963, en fonction de leur intensité ou sévérité. Les événements sont classés en ordre décroissant d'intensité. Le score de sévérité (SAI) est fonction des indices IF, ID, IS et IB.

### • Indice IB

L'indice IB est le seul indice de sévérité pour lequel aucune analyse préalable à son calcul n'a été présentée précédemment. Celui-ci est déterminé pour chacune des inondations historiques par le nombre estimé de bâtiments touchés lors de l'inondation. Le nombre de bâtiments touchés est fourni avec les autres indices (IF, ID et IS) au Tableau 2.22 (voir indice non standardisé sous l'indice IB). Le modèle ayant permis d'estimer cet indice est présenté à la Figure 2.18, où les zones affectées par l'inondation de 1976 (Nmax printanier record) et par celle de 2017 sont représentées au sein de la ZE à Rigaud. Les bâtiments principaux, numérisés à partir des photographies aériennes de 1975 et de 2017, y sont également représentés et les bâtiments touchés par les inondations sont ainsi comptabilisés. La Figure 2.18 permet de constater que les eaux du lac des Deux-Montagnes ont recouvert une plus grande superficie du territoire en 1976 qu'en 2017. Lors de l'inondation de 2017, environ 221 bâtiments ont été touchés, alors que si le niveau d'eau avait été le même qu'en 1976, on estime à 261 le nombre

de bâtiments touchés, compte tenu de l'urbanisation des dernières décennies dans la plaine inondable. Il faut toutefois préciser que très peu de bâtiments se trouvent dans la zone ayant seulement été inondée en 1976. Le nombre estimé de bâtiments touchés lors des inondations de 1974, 1976, 2017 et 2019 est pratiquement similaire. Pour des Nmax printaniers plus importants en 1976 et en 1974 qu'en 2017 et en 2019, seulement 6 et 11 bâtiments de moins ont été touchés, respectivement.

Les indicateurs de la qualité du modèle hydrologique, utilisé pour produire l'information présentée à la Figure 2.18, sont présentés au Tableau 2.23, en plus des autres indicateurs ayant servi à leur calcul. L'Annexe H présente une carte de l'extension de l'inondation à Rigaud à cette date selon le modèle, mais également selon les données d'observation. Les indicateurs I<sub>Sens</sub> et I<sub>PPP</sub> (définis à la section 2.2.5) sont très près de 1 (1 correspondant à une simulation du modèle identique aux observations disponibles), soit des valeurs suffisamment élevées pour confirmer que notre modèle produit des informations très proches ou compatibles aux valeurs observées.

Figure 2.18 Modélisation des inondations printanières de 1976 et de 2017 dans la ZE à Rigaud à partir des valeurs du Nmax printanier enregistré en aval de la centrale de Carillon. Les principaux bâtiments de la ZE en 1975 sont représentés en jaune et ceux de 2017 sont représentés en rouge.



Tableau 2.23. Comparaison des superficies des polygones d'étendue d'eau du 6 mai 2017 issus des données d'observation (selon les images satellites radar) et issus de la modélisation. Les quatre premiers indices (TP – *True positive*, FN – *False negative*, FP – *False positive* et TN – *True negative*) ont permis de calculer les deux indices de qualité du modèle : I<sub>Sens</sub> (indicateur de sensibilité) et I<sub>PPP</sub> (indicateur du pouvoir positif de prédiction).

ТР	FN	FP	TN	ISens	IPPP
Observé et prédit	Non prédites, mais observées	Prédites, mais non observées	Non prédites, non observées	$\left(\frac{TP}{TP+FN}\right)$	$\left(\frac{TP}{TP+FP}\right)$
(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(-)	(-)
6,09	0,33	0,71	7,82	0,95	0,90

• Évaluation et analyse des indicateurs (IF, ID, IS et IB) et de l'indice de sévérité multicritère SAI

Les valeurs des bornes supérieures des classes pour les indices IF, ID, IS et IB sont d'abord présentées au Tableau 2.24, lesquelles ont été déterminées préalablement par l'analyse fréquentielle des débits et des durées de crue, telle que présentée précédemment, excepté pour l'indice IB où seules les valeurs minimum et maximum du nombre de bâtiments touchés pour l'ensemble des inondations historiques ont été utilisées pour standardiser cet indice. Par exemple, l'indice IF de l'événement de 2017 est de 4 (indice maximal) puisque le Qmax atteint est de 9 094 m<sup>3</sup>/s (cf. Tableau 2.15), une valeur supérieure à 8 716,7 m<sup>3</sup>/s, la borne supérieure de la classe 3 (Tableau 2.24).

Classe	IF (m <sup>3</sup> /s)	ID (Nb de jours)	IS (Nb de jours)	IB (Nb de bâtiments)
Min	[-]	[-]	[-]	13
1	6 980,4	17,5	28,9	[-]
2	7 718,6	26,4	42,1	[-]
3	8 716,7	40,1	60,7	[-]
4	9 497,3	51,8	75,2	[-]
Max	[-]	[-]	[-]	221

Tableau 2.24. Valeurs de la borne supérieure de chaque classe pour les indices de sévérité de l'aléa d'inondation (IF, ID, IS et IB).

Finalement, les indices de sévérité SAI, présentés au Tableau 2.22, permettent de constater que l'inondation printanière de 2019, puis celle de 2017 à Rigaud, ont été les aléas les plus sévères à affecter le territoire de la ville pour toute la période étudiée (1963 à 2019) où les données hydrologiques sont disponibles. Ceci tient compte des quatre indices pondérés de sévérité IF, ID, IS et IB.

Selon l'échelle de sévérité (indice SAI) (Tableau 2.22), l'inondation de 2019 fut l'événement le plus sévère parmi tous les autres épisodes d'inondations, en raison du débit record atteint et de sa durée exceptionnelle en considérant les valeurs de débit. L'inondation de 2017 a atteint le deuxième score le plus élevé. En effet, les indices IF et ID sont les plus élevés pour l'année 2019, mais également pour l'année 2017. L'inondation de 2017 a effectivement été marquée par le deuxième débit de pointe record, après 2019, mais les débits journaliers moyens, maintenus durant 44 jours audessus du SI<sub>Q</sub>, témoignent également de la durée exceptionnelle de cet événement. Au printemps 2019, cette durée a été de 50 jours.

L'inondation de 1974 est le troisième événement le plus sévère, avec un score légèrement inférieur à celui de l'inondation de 2017. En effet, il s'agit de l'événement dont l'indice IS fut le plus élevé, compte tenu de la durée exceptionnelle durant laquelle

les niveaux d'eau se sont maintenus au-dessus du SI<sub>N</sub>. Le Nmax printanier observé en aval de la centrale de Carillon, lors de cet événement, a également occasionné une submersion du territoire au-delà des limites atteintes par les événements de 2017 et de 2019, ce qui a contribué à lui conférer un indice IB très élevé, malgré l'urbanisation moins importante dans la plaine inondable à cette époque par rapport aux années les plus récentes.

Même si le Nmax printanier record a été observé lors de l'inondation de 1976, la valeur de sévérité de cet événement est plus faible que celui de l'inondation de 1974. L'inondation de 1976 fut effectivement marquée par des durées beaucoup moins exceptionnelles qu'en 1974, que ce soit en considérant les valeurs de débit ou celles des niveaux d'eau. Ces résultats corroborent notamment les informations tirées des archives (Tableau 2.11). Dans les deux cas, un nombre similaire de bâtiments a été atteint par la submersion des eaux, en supposant que l'ampleur des dommages de l'événement de 1974 fut supérieure à celle engendrée par l'inondation de 1976 en raison de sa durée de submersion somme toute considérable.

Parmi les dix inondations historiques analysées, c'est l'inondation de 1983 qui fut l'événement le moins sévère, suivi des événements de 1997 et de 2008, avec des indices de sévérité identiques (Tableau 2.22). Les quatre événements les plus sévères (2019, 2017, 1974 et 1976, par ordre d'importante) se distinguent des autres, lesquels ont tous obtenu des scores inférieurs à 0,3.

Dans le cas des inondations historiques de 2019, 2017, 1974 et 196, l'indice IB est très similaire, sans égard à la valeur des bâtiments qui a augmenté évidemment dans le temps, laquelle aurait pu faire s'accroître la valeur des indices de sévérité des événements de 2017 et de 2019. Il faut toutefois considérer que dépendamment de la pondération utilisée dans l'analyse multicritère, la sévérité de l'inondation de 2017 106

aurait pu être inférieure à celle de l'inondation de 1974, tout particulièrement si une pondération supérieure avait été accordée aux indices relatifs au niveau d'eau.

## 2.4 Discussion et conclusion

#### 2.4.1 Discussion

#### *a) Conditions météorologiques dans le BVRO au printemps 2017*

L'analyse des conditions météorologiques dans le BVRO au printemps 2017 a révélé des caractéristiques particulières qui témoignent de la sévérité de l'inondation qui s'est produite à l'exutoire du bassin. Au printemps 2017, les intensités et les quantités de précipitation dans l'ensemble du BVRO ont atteint des valeurs extrêmes par rapport à la normale, ce depuis 1963 (sans inclure 2019). Bien que les séries de données DAYMET ne révèlent pas de tendances monotones dans les indices de précipitation au printemps sur la période complète (1981 à 2017), des tendances positives significatives en termes d'occurrence, de cumul, d'intensité moyenne et d'extrême de précipitation (90<sup>e</sup> centile) sont décelées en avril, lorsqu'on considère les deux décennies récentes de 1998 à 2017. Les résultats de Zadeh et al. (2020) suggèrent notamment une augmentation des intensités de débit au Canada dans les 30 dernières années, avec toutefois aucune tendance observée sur des périodes plus longues, de 40 à 60 ans. Ces tendances à la hausse observées au mois d'avril, calculées sur la période des vingt dernières années, coïncident notamment avec les valeurs exceptionnelles de débit enregistrées à l'exutoire du BVRO lors des printemps 2017 et 2019, jamais enregistrées auparavant.

Ces constats ne sont pas sans conséquence considérant l'augmentation anticipée de la fréquence et de l'intensité des épisodes de pluie abondante au Québec, tout particulièrement en hiver et au printemps (Bourque et Simonet, 2007; Cohen *et al.*, 107

2019; Ouranos, 2015; OQACC, 2017; Gachon *et al.*, 2018). En effet, en 2017, le débit de pointe record enregistré à Carillon s'est produit dans un contexte exceptionnel dû à la combinaison des facteurs suivants :

- La rapidité de la fonte de la neige, conditionnée par le dégel brusque du début avril après un mois de mars exceptionnellement froid et sans dégel notable ayant favorisé le maintien d'une couche de neige importante (mais non exceptionnelle);
- Des précipitations régulières, abondantes et intenses du mois d'avril et prolongées jusqu'au mois de mai.

Donc, même avec un couvert de neige sous les valeurs normales à la fin de l'hiver dans le BVRO, dans un contexte de tendances à la baisse du SWE sur la période de 1981 à 2017, en accord avec les observations et les projections de la diminution du couvert de neige (Brown et Braaten, 1998; Mudryk *et al.*, 2015; Najafi *et al.*, 2016), l'aléa hydrologique de 2017 a battu des records d'intensité. Tous ces facteurs en cause et ce contexte confirment la complexité de la réponse saisonnière du cycle hydrologique aux changements climatiques (Berghuijs *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2004).

De ce point de vue, nos résultats sont en accord avec les conclusions de nombreuses études récentes qui suggèrent de considérer les inondations printanières en régime nivo-pluvial comme des événements multifactoriels dont les caractéristiques d'occurrence, d'intensité et de durée ne peuvent simplement résulter d'un simple changement dans les conditions de neige (IPCC, 2019).

Bien que le type de précipitation soit le facteur majoritairement déterminant en ce qui a trait au débit moyen (Berghuijs *et al.*, 2014), nos résultats révèlent que les conditions de neige ne peuvent expliquer seules l'ampleur des crues printanières à l'exutoire du 108 BVRO. Ainsi, même si le couvert de neige venait à diminuer considérablement dans les années à venir, d'autres facteurs tels des changements dans les distributions des précipitations ou des événements de pluie sur neige selon leur intensité pourraient compenser localement pour cette modification du débit relié purement à la diminution du couvert de neige (Berghuijs *et al.*, 2014). Nos résultats soulèvent d'ailleurs un doute sur les projections à la baisse des débits de crue printanière dans le BVRO, suggérées dans l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (cf. Québec. MELCC, 2020b). En effet, ces projections sont basées sur des simulations de modèles globaux à basse résolution, qui ne tiennent pas compte des conditions physiographiques du bassin et qui offrent une piètre représentation des conditions régionales ou locales (Freudiger *et al.*, 2014; IPCC, 2013). Ces projections ont été réalisées sur la base des observations de débit seulement et relèvent de moins d'une dizaine de stations à l'intérieur du bassin pour établir les changements anticipés (Direction de l'expertise hydrique, 2018).

Bien évidemment, des données décrivant les conditions de neige dans tout le BVRO sur la période d'étude complète ou depuis au moins 1974 auraient permis de mieux décrire les conditions météorologiques lors de chacune des inondations historiques. Avec une série temporelle complète des données de neige, il aurait notamment été intéressant de vérifier si la tendance à la baisse des Nmax printaniers, observée sur la période de 1963 à 2019, concorde avec une tendance à la baisse du couvert de neige pour la même période.

Nos résultats quant à la répartition des extrêmes météorologiques dans le BVRO ont également révélé la pertinence d'étudier les phénomènes hydrométéorologiques à plusieurs échelles, comme il a été suggéré par Groisman *et al.* (2004). En effet, les

extrêmes de la précipitation des mois d'avril et de mai ont été principalement observés dans les SBV situés près de l'exutoire du BVRO, à proximité de la rivière des Outaouais. Les mêmes événements exceptionnels auraient contribué à augmenter le temps de réponse hydrologique du bassin s'ils s'étaient produits dans les limites amont du bassin (Anctil et al., 2012; Blöschl et al., 2013; Mohamoud, 2004; Scarwell et Laganier, 2004). Également, les indices de précipitation les plus extrêmes ont été observés au mois d'avril en aval du BVRO, au nord de la rivière des Outaouais, avec une fonte du couvert neigeux plus importante dans les SBV à proximité de l'exutoire, ce qui a sans doute amplifié la première pointe de crue, laquelle se produit normalement à la suite de la fonte de la neige dans le sud du bassin (CMM, 2017; Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2018). Ensuite, au mois de mai, des événements de précipitation d'intensité exceptionnelle ont également eu lieu, mais au sein des SBV situés au sud de la rivière des Outaouais, contribuant cette fois-ci à augmenter la seconde pointe de crue, laquelle est normalement observée à la suite de la fonte de la neige dans le nord du bassin (CMM, 2017; Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, 2018).

Les données de grille utilisées dans l'analyse ont démontré la pertinence de travailler à des échelles aussi fines que possible (*p. ex.* 1 km de résolution) afin de représenter au mieux la distribution spatiale des conditions météorologiques, qui peut varier largement d'un secteur à l'autre du bassin surtout dans le cas du régime de précipitation. De plus, le nombre limité de stations météorologiques dans le BVRO et partout au Québec (Ouranos, 2015) constitue un facteur favorable à l'utilisation de données de grille comme DAYMET ou autres, bien qu'elles ne soient pas nécessairement exemptes de biais ou d'incertitudes potentiellement plus élevées que les données provenant de stations d'observation (en particulier pour les produits de neige). En effet, les analyses réalisées à partir des données sous forme de grille ne

permettent pas de rendre compte précisément des précipitations extrêmes (Benyahya *et al.*, 2014) ou même de la fonte de la neige. Notamment, selon les méthodes d'interpolation utilisées, celles-ci ont des effets parfois considérables sur les valeurs extrêmes (Benyahya *et al.*, 2014), bien que les données journalières DAYMET reproduisent particulièrement bien la relation entre le cumul de la précipitation et son intensité (Thornton *et al.*, 1997). En outre, une densité plus importante de stations dans le BVRO contribuerait certainement à améliorer l'exactitude des données produites ou interpolées sous forme de grille.

# *b) L'inondation du printemps 2017 à Rigaud*

L'évaluation de la sévérité des inondations historiques à l'exutoire du BVRO révèle le caractère exceptionnel des inondations récentes de 2017 et de 2019, en considérant à la fois les données de débit et celles du niveau d'eau de la rivière des Outaouais. La superficie du territoire inondé lors des inondations de 1976 et de 1974 fut toutefois plus grande qu'en 2017 selon notre modèle, malgré le caractère historique de l'inondation de 2017 (Gachon *et al.*, 2018).

Nos résultats ont entre autres mis en évidence le caractère très variable des conditions météorologiques selon les échelles temporelles et spatiales considérées, mais également des effets que peut avoir la combinaison des facteurs météorologiques sur les niveaux et débits de pointe à l'exutoire du BVRO. Notre étude a pu en particulier montrer que le débit et le niveau d'eau à Carillon répondent de manière différente en termes d'occurrence, de durée et d'intensité des valeurs de pointe selon les conditions météorologiques dans le BVRO. Elle a confirmé que le BVRO est particulièrement sensible et peut avoir une réponse parfois rapide et majeure d'un point de vue hydrologique aux effets combinés des régimes de température et de précipitation durant la phase de transition hivernale – printanière ou durant la période de fonte de la neige.

En particulier, malgré les niveaux d'eau records atteints en 1976 et en 1974, les débits atteints n'ont pas atteint les valeurs exceptionnelles de 2017 et 2019. L'analyse des conditions météorologiques révèle que l'absence d'événements de précipitation d'intensité exceptionnelle lors des printemps de 1974 et de 1976 pourrait être en cause, alors que c'est le caractère intense de la précipitation en 2017 qui a, entre autres, conditionné l'atteinte des débits records à l'exutoire du bassin. Cela dit, tout porte à croire que les inondations majeures de 1974 et 1976 se sont produites dans un contexte de couvert de neige au sol à la fin de l'hiver plus exceptionnel qu'en 2017. Il se pourrait donc que les grands volumes d'eau libérés par la fonte progressive de la neige aient eu une influence plus importante sur l'ampleur des niveaux d'eau à Carillon dans les années 1974 ou 1976. En 2017 et 2019, les événements de précipitation de forte intensité ayant quant à eux eu une influence notable sur réponse hydrologique rapide et l'augmentation également et prononcée des débits à l'exutoire (Buttle *et al.*, 2016; Etkin *et al.*, 2004; Gachon *et al.*, 2018; Lawford *et al.*, 1995; Saad *et al.*, 2016; Scarwell et Laganier, 2004).

Au regard de ces résultats, l'augmentation anticipée de l'intensité et de la fréquence des événements de précipitation au printemps pourrait donc potentiellement avoir plus d'impacts sur les débits futurs que sur les niveaux d'eau, notamment en raison de l'accélération du processus de fonte de la neige et de l'intensification du ruissellement de surface provoqués par ce type d'événement (Bourque et Simonet, 2007; Zhang *et al.*, 2001), surtout s'il se combine à des phénomènes persistants de pluie sur neige intense au printemps.

À Rigaud, alors que l'inondation de 2017 a dépassé la limite de la zone inondable 0 - 100 ans par endroit sur le territoire (Gachon *et al.*, 2018), l'analyse fréquentielle des Qmax printaniers qui tient compte de la série temporelle complète (1963 - 2019) a permis d'estimer que la période de retour de l'inondation de 2017 est seulement de 70,1 ans. L'analyse des Nmax printaniers révèle que la période de retour estimée de l'événement est encore plus courte, bien que ces résultats ne soient pas valides d'un point de vue statistique (niveaux d'eau non stationnaires et affectés par la gestion du barrage par HQ). Sans considérer le Qmax printanier de 2019 dans l'analyse, la période de retour de l'inondation de 2017 est estimée à 123,6 ans. Ceci confirme à quel point l'inclusion d'une seule valeur extrême peut avoir une incidence majeure dans l'estimation et l'incertitude des quantiles de crue.

En définitive, la délimitation des zones inondables à Rigaud pourrait être toute autre si la période considérée dans l'analyse fréquentielle des débits maximaux intégrait les années 2017 et 2019. Pourtant, la gestion du risque d'inondation nécessaire pour établir les politiques ou les stratégies d'aménagement du territoire ne repose le plus souvent que sur une cartographie statique (stationnaire) des zones inondables, laquelle ne tient pas compte des facteurs d'exposition et de vulnérabilité en évolution, ni des plus récentes données hydrologiques et des informations régionales ou locales sur le changement climatique, qui est non perceptible ou détectable dans les tendances basées sur les séries historiques anciennes ou passées (BAC, 2015). Rappelons que plus des deux tiers des surfaces urbanisées inondées en 2017 et en 2019 dans les basses-terres du Saint-Laurent se trouvaient à l'extérieur des limites cartographiées de la plaine inondable 0 - 100 ans (Institut de la Statistique du Québec, 2019a).

À la vue de ces résultats, il va de soi que la cartographie actuelle des zones inondables n'est plus à jour (BAC, 2015), mais en s'appuyant uniquement sur l'analyse hydrologique des débits, elle ne permet également pas de rendre compte de toute la complexité du phénomène. Une approche hydrométéorologique d'analyse fréquentielle des inondations, en permettant une meilleure représentation des processus en cause lors de tels événements, serait pertinente pour mieux cartographier le risque (Merz et Blöschl, 2008). Les approches multivariées ou mixtes (statistique et déterministe) semblent de ce point de vue plus prometteuses, car elles apportent une compréhension physique du phénomène et permettent de « sortir du cadre d'analyse purement hydrologique » en intégrant l'évaluation des effets combinés de plusieurs facteurs hydrométéorologiques sur l'aléa d'inondation (RNCan, 2019; Saad *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'inclusion d'autres types de données de nature paléohydrologique ou bien dendrohydrologique permettrait sans doute de mieux reconstituer l'historique de la fréquence et de l'intensité des inondations, bien avant la période de jaugeage (Ballais *et al.*, 2007; Knox, 2000; Munoz *et al.*, 2018), alors que les séries temporelles utilisées pour étudier le phénomène sont souvent trop courtes ou limitées (Groisman *et al.*, 2004; Milly *et al.*, 2008), et les archives, trop pauvres. Les archives sont par nature essentielles afin de tirer les leçons des événements passés, lesquels permettent d'améliorer la compréhension du phénomène, avant, pendant et après son occurrence.

Dans les dernières décennies, l'absence d'une politique d'aménagement cohérente avec le risque réel d'inondation et sa gestion globale aura certainement contribué à l'urbanisation dans une zone particulièrement exposée au risque d'inondation à Rigaud, occasionnant des dommages inusités lors des plus récents événements. Rappelons que l'urbanisation croissante chaque année se conjugue avec une hausse de la valeur des biens, occasionnant des dommages toujours plus importants lorsqu'une inondation survient (BAC, 2015). Cela dit, il aurait été intéressant d'intégrer des indicateurs de dommages économiques et/ou sociaux au sein de notre recherche afin d'obtenir une meilleure estimation de l'ampleur des dommages associés aux inondations historiques étudiées.

### 2.4.2 Conclusion

Cette première partie de l'évaluation du risque d'inondation à Rigaud aura permis de caractériser les conditions météorologiques dans le BVRO de 1963 à 2017, lesquelles constituent le facteur déclencheur des inondations printanières (Scarwell et Laganier, 2004), et d'estimer la sévérité des inondations historiques à Rigaud.

Au printemps 2017, les conditions météorologiques qui ont touché le BVRO furent particulièrement extrêmes par rapport à la normale (1981 – 2010), notamment les événements de précipitation intense et récurrente qui se sont produits dans la partie centre et aval du bassin aux mois d'avril et de mai. Jamais de telles conditions n'avaient été observées lors des autres inondations majeures recensées depuis 1963. Le dégel particulièrement rapide du début avril a également provoqué la fonte accélérée d'un couvert de neige qui n'avait rien d'exceptionnel, mais dont le taux de fonte a tout de même occasionné la libération de volumes d'eau supérieurs à la normale dans l'ensemble du BVRO. La combinaison de tous ces facteurs aura certainement contribué à exacerber le ruissellement printanier et à générer, ultimement, la pointe de crue historique du 8 mai 2017.

L'inondation printanière de 2017 à Rigaud fut un événement particulièrement marquant dans l'histoire récente, en raison de l'intensité des débits enregistrés à la centrale de Carillon, aux mois d'avril et de mai 2017, avec une durée exceptionnelle de 44 jours avec des Qmoy au-dessus de 5 175,9 m<sup>3</sup>/s et un Qmax record de 9 094,02 m<sup>3</sup>/s. Bien que le Nmax printanier enregistré en aval de la centrale de Carillon n'ait pas atteint les valeurs de 1976 et de 1974, les conséquences sur le territoire auront été encore plus importantes que par le passé, compte tenu de l'urbanisation des dernières décennies dans la plaine inondable ou à proximité.

Dans le cadre de futures recherches, il serait pertinent d'analyser les conditions météorologiques des autres inondations historiques, de manière tout aussi approfondie que pour 2017. Pour mieux comprendre les impacts futurs des changements climatiques sur le cycle hydrologique, des analyses multivariées devraient également être réalisées, et ce, en intégrant l'ensemble des facteurs qui contribuent à affecter l'intensité de la crue printanière (Milly *et al.*, 2008; Saad *et al.*, 2015), mais également en tenant compte des particularités régionales et locales qui affectent la variabilité naturelle du climat, et ultimement la réponse hydrologique dans le réseau hydrographique du bassin (Berghuijs *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2004).

Dans le futur, il semble crucial de miser sur la valorisation des données probantes et à haute résolution, notamment par la mise en place d'un réseau de stations hydrométéorologiques suffisamment dense pour permettre de mieux comprendre la réponse du cycle hydrologique aux variations du climat (la surveillance et le suivi des conditions adverses sont de mises). Effectivement, il est important d'étudier et de documenter les tendances climatiques régionales, et ce, à partir de stations d'observation permettant de mieux prévoir la nature des changements d'une région à une autre (Groisman *et al.*, 2004). La combinaison d'un tel réseau avec d'autres bases de données temporelles et géospatiales permettant l'évaluation des extrêmes hydrométéorologiques des années marquées par des crues exceptionnelles est également de mise. Ceci permettrait potentiellement d'améliorer la préparation et la prévention vis-à-vis du risque d'inondation, en facilitant le suivi et la surveillance des situations potentiellement préoccupantes par les autorités, et ce, plus tôt au printemps.

L'intensité de la crue de la rivière des Outaouais est majoritairement responsable des inondations printanières dans l'archipel de Montréal, alors que le bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, régulé en majeure partie, y contribue bien moins que

l'apport d'eau en provenance du BVRO (Service de sécurité incendie de Montréal, 2020). La mise en place d'un système de vigilance intégré et multisectoriel, reposant par exemple sur une prévision basée sur les impacts, permettrait d'améliorer la gestion future du risque d'inondation dans le secteur le plus peuplé de tout le Québec (Institut de la statistique du Québec, 2019b).
# CHAPITRE III CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUE

### 3.1 Introduction

Il y a aujourd'hui consensus par rapport à l'importance de considérer tant les caractéristiques des aléas météorologiques extrêmes qui affectent par exemple la montée des eaux et l'augmentation du débit des rivières, mais également les différentes caractéristiques des systèmes naturels et humains qui contribuent à exacerber la sévérité des inondations et leur extension sur le territoire (Cardona *et al.*, 2012; Gachon, 2019; GIEC, 2012, 2014; Knox, 2000; O'Neill *et al.*, 2017; Saint-Laurent et Hähni, 2008; UNISDR, 2015; Veyret et Reghezza, 2006; UNDRR, 2019). En effet, les catastrophes naturelles ne peuvent être comprises que par le simple examen des caractéristiques physiques de l'aléa, puisqu'elles relèvent tout autant d'une production sociale, déterminée par les actions humaines, les représentations sociales du risque et les dommages potentiels associés (Castonguay, 2007). Donc le contexte dans lequel l'aléa se produit, en termes de caractéristiques de vulnérabilité et d'exposition des systèmes naturels et humains, est crucial à établir, parce qu'il détermine à la fois le risque lui-même, mais également ses conséquences (UNDRR, 2019).

D'abord, la composante de l'exposition face au risque d'inondation est entre autres exacerbée par l'urbanisation croissante ainsi que par la croissance démographique et économique dans les zones où peuvent se produire les aléas (BAC, 2015; BAC et Fédération canadienne des municipalités (FCM), 2020; Gachon, 2019; Cardona *et al.*, 2012; O'Neill *et al.*, 2017; OQACC, 2017). Ces conditions socio-économiques et

socio-environnementales continueront d'être profondément modifiées dans les années à venir, ce qui laisse présager des dommages toujours plus importants occasionnés par les inondations si aucune mesure d'adaptation ou de résilience n'est appliquée, même sans égards aux changements climatiques (BAC et FCM, 2020; SP Canada, 2019b; Gachon, 2019; O'Neill *et al.*, 2017).

Outre les caractéristiques de l'aléa météorologique, la vulnérabilité socioenvironnementale au sein d'un bassin versant peut modifier l'intensité et l'ampleur de l'inondation, et ainsi contribuer à modifier le niveau de risque. La vulnérabilité socioenvironnementale, au sens large, concerne le rôle des écosystèmes et leur dégradation sur le risque d'inondation (Cardona *et al.*, 2012). Il s'agit donc de tenir compte dans l'évaluation du risque des conditions qui peuvent l'exacerber (Cardona *et al.*, 2012; Scarwell et Laganier, 2004) telles que les caractéristiques physiques et anthropiques du bassin versant, comme la géomorphologie, la pente, les propriétés du sol en plus de la couverture du sol et l'utilisation qui en est faite (Anctil *et al.*, 2012; Blöschl *et al.*, 2013; Boucher, 2010; Mohamoud, 2004; Québec. MDDELCC, 2014; Roche, 1963; Scarwell et Laganier, 2004), sans compter les caractéristiques de l'aléa météorologique (Buttle *et al.*, 2016 ; GIEC, 2014; Kite, 1993).

Les activités humaines comme la déforestation, l'urbanisation ou les activités agricoles peuvent effectivement augmenter le risque en accentuant les impacts des aléas météorologiques extrêmes, par exemple en contribuant à exacerber l'ampleur et la vitesse du ruissellement de surface vers les cours d'eau (AGRCQ, 2017; Castonguay, 2007; Cohen *et al.*, 2019; GIEC, 2014; Knox, 2000; Mayhew, 2009; Québec. MDDELCC, 2014). Les modifications dans l'utilisation du sol par l'être humain peuvent également contribuer à intensifier les changements climatiques à des échelles régionales, voire locales, qui à leur tour, perturbent le cycle hydrologique (Pielke *et al.*,

2016). Les zones urbaines, par l'imperméabilisation des sols qu'elles entrainent, contribuent le plus à exacerber ou à modifier le ruissellement en présence d'aléas météorologiques (Blöschl et al., 2013; Boucher et al., 2010). Les terres cultivées peuvent également exacerber le ruissellement comme elles sont souvent exemptes de végétation, mais également en raison de la compaction des sols entrainée par l'utilisation qui en est faite (Mailhot et al., 2018; Quilbé et al., 2008). Les milieux humides, en se comportant comme des réservoirs ou des zones tampons, favorisent une réponse hydrologique lente en aval du bassin (Mailhot et al., 2018). Ils procurent en plus un effet de régulation sur le climat local en modifiant les bilans d'énergie et d'eau en surface, ou sur le climat global via le stockage de carbone qu'ils permettent (Loisel et al., 2021; Poulin et al., 2016). Les forêts permettent également de limiter le ruissellement dans le bassin lors de la saison de croissance par des processus d'évapotranspiration et d'interception (Mailhot et al., 2018; Quilbé et al., 2008). L'urbanisation et la croissance démographique sont quant à eux souvent associées à une diminution du couvert forestier, ce qui exacerbe le risque d'inondation (Bonsal et al., 2019). Finalement, les affleurements rocheux sont considérés comme des surfaces imperméables de manière générale, étant donné l'absence de sol qui empêche l'eau de s'y infiltrer (Mohamoud, 2004; Québec. MDDELCC, 2014). Ils contribuent à exacerber le ruissellement, bien que la perméabilité varie également selon la géologie en place (Mohamoud, 2004).

Les caractéristiques des sols comme la capacité d'infiltration, la profondeur du sol et sa porosité contrôlent également les processus d'infiltration, de percolation et de stockage des apports d'eau (Mohamoud, 2004). La conductivité hydraulique à saturation est également un paramètre particulièrement pertinent pour estimer le ruissellement par saturation en présence d'apports d'eau importants, car elle est directement reliée à la capacité d'infiltration de l'eau du sol (Mohamoud, 2004;

Québec. MDDELCC, 2014). Les facteurs géomorphologiques comme l'aire et la densité de drainage, la superficie occupée par l'hydrographie, la pente, la longueur du chenal principal et le rapport du relief et de la superficie du bassin sont d'autres facteurs qui modifient le temps de réponse hydrologique vers les secteurs situés en aval du bassin versant (Mohamoud, 2004). La pente du bassin détermine notamment les directions et les vitesses d'écoulement, en plus de contrôler l'érosion dans les versants et peut être responsable d'une partie importante des apports d'eau vers les chenaux en aval (Mohamoud, 2004; Québec. MDDELCC, 2014).

Somme toute, le processus de ruissellement au sein d'un bassin versant sera d'autant plus exacerbé en présence d'un apport de précipitation à forte intensité, surtout lors d'événements de pluie sur neige (au printemps ou en hiver) ou de fortes pluies à l'échelle sous-quotidienne (Blöschl *et al.*, 2013; Ferguson, 1995) dans des secteurs fortement imperméabilisés, où la capacité d'infiltration du sol est piètre et où les pentes sont fortes (Boucher *et al.*, 2010; Kite, 1993; Québec. MDDELCC, 2014; Scarwell et Laganier, 2004).

Au Québec, le risque d'inondation majeure est plus important au printemps, alors que le sol parfois encore gelé peut limiter le processus d'infiltration au moment même où d'importantes quantités d'eau sont libérées par la fonte du couvert neigeux (Québec. MDDELCC, 2014; Scarwell et Laganier, 2004). Des facteurs tels que la quantité de neige au sol et la rapidité de sa fonte, combinés à des événements de précipitations liquides abondantes et/ou intenses contribuent d'autant plus à exacerber le risque (Buttle *et al.*, 2016; Québec. MDDELCC, 2014; Scarwell et Laganier, 2004), comme ce fut le cas récemment en 2011 dans le cas de la rivière Richelieu (Saad *et al.*, 2016) ou en 2017 pour la rivière des Outaouais (Gachon *et al.*, 2018).

L'objectif de cette deuxième partie de la recherche consiste à **évaluer les facteurs socio-environnementaux clés contribuant à exacerber le risque d'inondation à Rigaud**. Pour y parvenir nous caractérisons d'abord la composante de l'exposition au risque d'inondation à Rigaud en tenant uniquement compte du bâti. Ensuite, nous caractérisons les principales conditions socio-environnementales, dans le BVRO, qui aggravent le risque d'inondation, telles que l'utilisation du sol, les pentes et les caractéristiques des sols. Finalement, à partir d'une analyse multicritère qui tient compte des conditions récentes de vulnérabilité environnementale et de la sévérité de l'aléa météorologique du printemps 2017, le niveau de risque en aval du BVRO est estimé à partir de la contribution des SBV et de certaines de leurs caractéristiques aux apports en eau vers l'exutoire.

Dans la section qui suit, nous présentons la méthodologie employée pour cette deuxième partie de la recherche, les résultats des analyses ainsi qu'une discussion des principaux résultats et une brève conclusion.

### 3.2 Méthodologie

Dans cette section, les données géomatiques utilisées pour caractériser les principales caractéristiques socio-environnementales dans le BVRO ainsi que la composante d'exposition face au risque d'inondation dans la ZE à Rigaud sont d'abord présentées. Certaines données ou indices présentés au Chapitre II sont notamment repris, dont les données géomatiques des bâtiments dans la ZE, qui ont été créées à partir des photographies aériennes entre 1970 et 2017 (cf. Tableau 2.5 et section 2.2.5d) et des matrices à 1 km de résolution représentant les anomalies standardisées des indices mensuels PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot calculées à partir des données DAYMET (cf. section 2.2.5a) des mois de mars, avril et mai, pour l'ensemble du BVRO.

Enfin, les indices de risque sont définis et les analyses permettant d'évaluer les principaux facteurs socio-environnementaux contribuant à exacerber le risque d'inondation à Rigaud, notamment les analyses temporelles et multicritères, sont présentées.

### 3.2.1 Données utilisées

### a) Données géospatiales dans la ZE

Pour caractériser l'exposition au risque d'inondation à Rigaud, les informations spatiales et géoréférencées des bâtiments dans la ZE, pour les années d'intérêt, ainsi que la couche des zones inondables à Rigaud sont utilisées (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Données géospatiales utilisées pour la caractérisation de l'exposition au risque d'inondation à Rigaud. Les données relatives à la délimitation des zones inondables à Rigaud ont été produites par Géomont (en 2014) et les bâtiments principaux ont été numérisés à partir des mosaïques d'orthophotographies (voir Tableau 2.5).

Donnée(s)	Description	Couverture	Période	Туре	Source
Délimitation des zones inondables	Délimitation des zones inondables : • 0 - 2 ans • 2 - 20 ans • 20 - 100 ans	Territoire de la ville de Rigaud	2014	Vectoriel (polygones)	Géomont (2014)
Bâtiments principaux	Principaux bâtiments numérisés dans la ZE à Rigaud	ZE à Rigaud	1975 1983 1992 1997 2009 2014 2017	Vectoriel (points)	Photographies aériennes et orthophotographies (Tableau 2.5)

### b) Données géospatiales dans le BVRO

Pour décrire les conditions environnementales dans le BVRO, les bases de données spatiales et géoréférencées « Utilisation des terres du Canada » pour les années 1990,

2000 et 2010 (Tableau 3.3) ont été utilisées afin tout d'abord de caractériser l'aménagement du territoire et son évolution dans l'ensemble du BVRO. Ces dernières ont été produites à partir de diverses sources de données déjà existantes (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2015). La base de données « Couverture des terres du Canada » en 2015 (Tableau 3.3), produite à partir des observations des capteurs *Landsat Operational Land Imager* (OLI) (Canada, 2019), est également utilisée pour caractériser l'utilisation du sol récente dans le BVRO.

La méthode de production des données, en plus des catégories d'utilisation du sol, diffère selon la base de données utilisées (Tableau 3.2).

Tableau 3.2. Grandes catégories d'utilisation du sol utilisées par la base de données « Utilisation des terres du Canada » (à gauche) et par la base de données « Couverture des terres du Canada » (à droite). Les identifiants ou *gridcode* (GC) associés aux catégories sont donnés.

Uti	Utilisation des terres du Canada (1990, 2000 et 2010)		Couverture des terres du Canada (2015)
GC	Catégorie	GC	Catégorie
41	Forêts	1	Temperate or sub-polar needleleaf forest
31	Eaux	2	Sub-polar taiga needleleaf forest
51	Terres cultivées	5	Temperate or sub-polar broadleaf deciduous forest
42	Terres humides en foret	6	Mixed forest
21	Lieux habités	8	Temperate or sub-polar shrubland
25	Routes	10	Temperate or sub-polar grassland
73	Terres humides arbustives	11	Sub-polar or polar shrubland-lichen-moss
71	Terres humides	12	Sub-polar or polar grassland-lichen-moss
46	Terres humides arborées	13	Sub-polar or polar barren-lichen-moss
74	Terres humides herbacées	14	Wetland
45	Arbres	15	Cropland
62	Prairies non aménagées	16	Barren lands
91	Autres terres	17	Urban
		18	Water
		19	Snow and Ice

Pour caractériser la morphologie du BVRO et son relief, le modèle numérique d'élévation (MNE) produit par la *Shuttle Radar Topographie Mission* (SRTM), une

collaboration entre la NASA et la *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) lancée en 2000 (NASA, 2016), est utilisé (Tableau 3.3). Ce modèle permet entre autres de produire la courbe hypsométrique du BVRO, qui représente la relation entre l'aire des sections transversales du bassin et l'altitude relative (Strahler, 1952) et qui permet d'améliorer la prévision du comportement entre la précipitation et le ruissellement dans un bassin versant (Harlin, 1984).

Puis, afin de caractériser ses sols, les versions v.3.2 (2010) et v.2.2 (1996) de la base de données « Pédo-paysages du Canada » sont utilisées (Tableau 3.3), lesquelles donnent de l'information sur les classes de drainage des sols (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013).

Finalement, les conditions de vulnérabilité récentes dans le BVRO sont mises en relation avec les conditions météorologiques du printemps 2017, qui sont données par les anomalies standardisées des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot (Tableau 2.8), qui ont été définis dans le chapitre II (section 2.2.5) à partir des données sous forme de grille DAYMET à 1 km de résolution.

Les couches vectorielles du BVRO et des SBV permettent d'évaluer ces conditions en tenant compte des contextes physiographiques particuliers locaux. Les caractéristiques et la définition des données géospatiales utilisées sont présentées au Tableau 3.3.

Nom	Date	Туре	Échelle/Résolution	Couverture	Source
MNE - Shuttle Radar Topographie Mission	2000	Matriciel	1 arc sec (30 m)	80 % des terres totales de la planète (Farr <i>et al.</i> , 2007)	NASA et NGA (plateforme USGS Earth Explorer)
Pédo-paysages du Canada	1996 (v.2.2); 2010 (v.3.2)	Vectoriel	1/1 000 000	Régions du Canada au sud de 60º N	Agriculture et Agroalimentaire Canada
Utilisation des terres du Canada	1990; 2000; 2010	Matriciel	30 m	Régions du Canada au sud de 60° N	Agriculture et Agroalimentaire Canada
Couverture des terres du Canada	2010; 2015	Matriciel	30 m	Canada	RNCan

Tableau 3.3. Définition des données géospatiales utilisées pour l'évaluation de la sensibilité du BVRO au risque d'inondation.

## 3.2.2 Analyse par indices de risque

Tous les indices présentés dans cette section sont calculés à partir d'analyses spatiales matricielles réalisées dans le logiciel ArcMap, et produits sous forme d'images matricielles géoréférencées, à une résolution de 30 m sur l'ensemble du BVRO. Toutes les données géospatiales ont d'abord été transformées dans la projection *North American Datum* (NAD) 1983 CSRS Québec Lambert, puis découpées avec les limites du BVRO. Le Tableau 3.7 (présenté à la fin de la section 3.2.2c) résume l'ensemble des indices de risque utilisés permettant de caractériser les conditions de vulnérabilité les plus récentes dans le BVRO compte tenu de la disponibilité des données géospatiales.

### *a) Indice d'utilisation du sol*

L'effet du type d'utilisation du sol sur le ruissellement est analysé via un indice d'utilisation du sol (US) (cf. Tableau 3.7), dont la valeur augmente lorsque l'interception de l'eau est limitée, tout comme l'évaporation et l'infiltration de l'eau dans le sol. L'indice US est calculé à partir de la base de données « Couverture des terres du Canada », datant de 2015 (Tableau 3.3), en créant d'abord quatre classes générales de catégories d'utilisation du sol. Les classes sont créées de sorte que la classe maximale intègre les types d'utilisation du sol contribuant le plus au ruissellement de surface. La contribution au ruissellement a été évaluée qualitativement à partir de la littérature. La classification de l'utilisation du sol est présentée au Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Définition des classes d'utilisation du sol selon la contribution des différentes catégories à exacerber le ruissellement de surface en présence d'aléas météorologiques. Les valeurs de ces classes (1 à 4) augmentent avec leur contribution au ruissellement.

Classe	Catégorie	Gridcodes
1	Eaux et forêts	31,41, 42, 45, 46
2	Prairies et milieux humides	61, 62, 71, 73, 74
3	Terres cultivées, terres rocheuses et arides	51,91
4	Urbain	21, 25

### *b) Indice de pente*

La contribution de la pente au ruissellement de surface est représentée par un indice de pente (P) (cf. Tableau 3.7) qui est d'autant plus élevé que la pente est forte. Pour calculer l'indice P, une couche des pentes (en %) à 30 m de résolution est d'abord générée à partir du MNE du BVRO. À cette étape, les pentes moyennes des SBV et du BVRO sont également calculées. Puis, l'indice P est ensuite généré en transformant la couche des pentes selon quatre classes telles que proposées par Mailhot *et al.* (2018) (Tableau 3.5).

Classe	Pente (%)
1	[0-3[
2	[3-8[
3	[8-13]
4	≥13

Tableau 3.5. Définition des bornes des classes de pente (en %) selon la contribution de la pente à exacerber le ruissellement de surface en présence d'aléas météorologiques.

### *c) Indice de drainage*

La propension du sol à laisser l'eau s'y infiltrer et donc à limiter la part de l'eau contribuant au ruissellement de surface est représentée par un indice de drainage (Dr) (cf. Tableau 3.7), qui est d'autant plus faible que le drainage est efficace.

Pour calculer l'indice Dr, les couches vectorielles des pédopaysages ont été utilisées (Tableau 3.3). Le niveau de détail de la version 3.2 est supérieur à celui de la version 2.2; c'est donc la version 3.2 qui est privilégiée dans l'analyse. Toutefois, comme des informations relatives au drainage de certains polygones de sol de la version 3.2 étaient manquantes, ces entités ont été remplacées par celles de la version 2.2, de sorte à n'avoir qu'une seule couche complète issue de la fusion des deux premières. L'Annexe I présente une carte illustrant les secteurs du BVRO pour lesquels chaque base de données a été utilisée. À noter qu'une nouvelle version complète des données combinant les versions 2.2 et 3.2 est maintenant disponible sur le portail de données ouvertes du Canada (Canada, 2013).

La couche fusionnée est ensuite transformée en couche matricielle, à une résolution spatiale de 30 m, puis reclassifiée selon quatre classes de drainage afin de simplifier l'analyse et d'être en accord avec la classification du Québec (Tableau 3.6). Effectivement, au Québec, les sols sont classés en quatre groupes hydrologiques en fonction de leur conductivité hydraulique, qui correspond au volume d'eau mobile par unité de volume de sol qui est traversé par le liquide (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013). Le groupe A possède un faible potentiel de ruissellement, le groupe B un potentiel modérément faible, le groupe C un potentiel modérément élevé et le groupe D un potentiel élevé (Mailhot *et al.*, 2018; Québec. MDDELCC, 2014).

Tableau 3.6. Définition des classes de drainage selon la contribution du type de drainage à exacerber le ruissellement de surface en présence d'aléas météorologiques.

Classe	Code de drainage	Drainage
1	E; R	Excessif; Rapide
2	M; W	Modéré; Bon
3	I; P	Imparfait; Mauvais
4	V; #	Très mauvais; non applicable

#### *d) Indice multicritère de niveau de risque*

Deux indices multicritères sont finalement définis, lesquels permettent de calculer un indice spatial et standardisé de niveau de risque moyen à l'échelle des SBV (NR) (Tableau 3.7) qui représente la contribution des SBV au risque d'inondation à Rigaud.

D'abord, un indice de vulnérabilité environnementale (VE) (Tableau 3.7) est défini, lequel est calculé à partir d'une analyse multicritère des indices pondérés US, P et Dr. Ensuite, un indice d'intensité de l'aléa météorologique au printemps 2017 (IAM) (Tableau 3.7) est calculé pour les mois de mars, avril et mai en tenant compte du caractère extrême des indices météorologiques contribuant à amplifier la crue printanière (*i.e.* les anomalies standardisées des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot, présentées aux sections 2.2.4 et 2.2.5). Ces derniers indices permettent notamment de mettre en évidence l'abondance des précipitations (en termes de cumul) et leur intensité ainsi que l'importance du couvert neigeux et la rapidité de sa fonte, soit des facteurs qui contribuent à exacerber la sévérité des inondations printanières (Saad *et al.*, 2015). L'indice IAM est d'abord représenté à une résolution de 1 km sur l'ensemble du BVRO, mais est par la suite ré-échantillonné à la même résolution que l'indice VE (30 m). La résolution de 30 m a été choisie afin que les spécificités de la couche à plus haute résolution soient conservées dans l'analyse. Les caractéristiques de l'aléa météorologique sont exclues du calcul de l'indice VE afin d'identifier les secteurs du BVRO les plus vulnérables sans considération de l'aléa météorologique, lequel est beaucoup plus variable dans le temps. Finalement, l'indice NR est obtenu par la pondération des indices VE et IAM, à poids égal, et par leur combinaison au sein d'une analyse multicritère. L'ensemble des indices présentés dans cette section, dont l'indice multicritère NR, est présenté au Tableau 3.7.

Indice	Sous-indice	Définition	Période	Résolution	Donnée(s) utilisée(s)	
Indice de	US	indiceDéfinitionPérioIndice standardisé de penteIndice standardisé de drainageLa p récentPIndice standardisé de d'utilisation du solLa p 		30 m	Modèle numérique des pentes	
vulnérabilité environnementale	Р		La plus récente	30 m	Couche des sols	
(VE)	Dr	Indice standardisé d'utilisation du sol		30 m	Couche d'utilisation du sol (2015)	
	Ano. Std PrcpTot	Indice de l'anomalie standardisée de la précipitation totale		1 km	(cf. sections 2.2.4 et 2.2.5)	
Indice de l'intensité de l'aléa météorologique	Ano. Std Prcp90	Indice de l'anomalie standardisée du 90° percentile de la précipitation	Mars, avril et	1 km		
(IAM)	Ano. Std DimSWEtot	Indice de l'anomalie standardisée de la quantité totale de neige fondue	2017	1 km		
Indice du niveau de risque (NR)	VE et IAM	Indice standardisé du niveau de risque	DéfinitionPériodeRésolutionstandardisé de pente30 nstandardisé de drainageLa plus récente30 nstandardisé de drainageLa plus récente30 nstandardisé de l'anomalie ardisée de la pitation totale1 knde l'anomalie ardisée de la pitationMars, avril et mai 20171 knde l'anomalie ardisée de la ntité totale de ige fondue standardisé du au de risqueMars, avril et mai 20171 kn	30 m	(cf. indices VE et IAM)	

Tableau 3.7. Définition des différents sous-indices de risque (VE, IAM et IR) calculés pour chacun des SBV du BVRO.

#### 3.2.3 Analyse temporelle des facteurs de risque

#### *a) Analyse de l'exposition face au risque d'inondation*

Dans un premier temps, l'ampleur de l'exposition au risque d'inondation est quantifiée à partir d'un indice temporel d'exposition dans la ZE à Rigaud ( $\Delta$ Expo) (Tableau 3.8).

Pour calculer l'indice, le nombre de bâtiments est d'abord comptabilisé dans chacune des zones inondables (0 - 2 ans, 2 - 20 ans et 20 - 100 ans) ainsi que dans la ZE externe à la plaine inondable pour les années 1970, 1975, 1983, 1992, 1997, 2009, 2014 et 2017 (cf. Tableau 3.1), ce à partir d'une analyse spatiale dans ArcGIS. Les taux de changement annuel (en %) du nombre de bâtiments dans les différentes zones d'exposition sont ensuite calculés pour chaque période.

Les taux sont ensuite pondérés en fonction de la zone d'exposition respective (la somme des poids étant égale à 1) (Tableau 3.9), puisque l'exposition face au risque varie en fonction de la probabilité d'occurrence de l'aléa, laquelle varie d'une zone à l'autre, avec une probabilité d'occurrence très faible hors de la plaine inondable (Cardona *et al.*, 2012; Québec. MSP, 2008b). L'exposition au risque est plus marquée dans les zones inondables associées à de courtes périodes de retour. Toutefois, les taux de changements calculés dans la zone inondable 0 - 2 ans étant presque nuls, le calcul de l'indice  $\Delta$ Expo n'est donc pas considéré dans ce secteur.

Un poids beaucoup plus important a été attribué aux taux calculés dans la zone inondable 2 - 20 ans, car la probabilité d'occurrence d'un événement d'inondation est beaucoup plus élevée que dans les autres zones, hormis la zone 0 - 2 ans. Un poids très faible a été accordé à la zone située à l'extérieur de la plaine inondable étant donné qu'elle n'est pas considérée à risque selon la cartographie actuelle disponible à Rigaud. Le risque nul n'existe toutefois pas et il faut se rappeler que les inondations de 2017 et

de 2019 ont dépassé par endroit les limites de la zone inondable 0 - 100 ans (cf. Gachon *et al.*, 2018). Les poids attribués à chaque zone sont présentés au Tableau 3.9. La moyenne pondérée, soit la sommation des taux pondérés de chaque zone, permet finalement de calculer l'indice  $\Delta$ Expo pour chaque période.

Analyse	Définition	Échelle spatiale	Périodes	Indice(s) ou chouche(s) utilisé(s)
<b>ДЕхро</b> (%)	Moyenne pondérée des taux de changement annuel du nombre de bâtiments dans la ZE en fonction de la zone concernée	ZE (zone inondable 2 - 20 ans + zone inondable 20 - 100 ans + ZE externe à la plaine inondable)	1970 à 1975; 1975 à 1983; 1983 à 1992; 1992 à 1997; 1997 à 2009; 2009 à 2014; 2014 à 2017.	Couche des bâtiments et des zones inondables

Tableau 3.8 Définition de l'indice temporel d'exposition face au risque d'inondation dans la ZE à Rigaud (ΔExpo).

Tableau 3.9 Pondération attribuée aux taux de changement du nombre de bâtiments calculés pour chacune des zones de la ZE (hormis la zone inondable 0 - 2 ans) considérées dans le calcul de l'indice  $\Delta$ Expo, la somme des poids étant égale à 1. La moyenne pondérée des taux permet de calculer l'indice  $\Delta$ Expo pour chaque période étudiée.

Poids							
Zone inondable 2 - 20 ans	Zone inondable 20 - 100 ans	Zone d'étude externe à la zone inondable 0 - 100 ans					
0,7	0,25	0,05					

### b) Analyse des changements dans l'utilisation du sol

Les changements dans les facteurs de risque d'inondation à l'échelle du BVRO sont déterminés à partir des taux de changement des superficies des grandes catégories d'utilisation du sol pour toute la période de 1990 à 2010, puis pour les décennies de 1990 à 2000, et de 2000 à 2010. L'utilisation du sol est le seul facteur de risque ou condition environnementale étudiée temporellement dans le BVRO en raison de la disponibilité des données géospatiales.

Pour connaître les changements, les couches d'utilisation du sol sont d'abord reclassifiées en six grandes catégories et leur contribution au ruissellement de surface est évaluée de manière qualitative en fonction de la littérature (Tableau 3.10). Ensuite, pour chaque année, la superficie occupée dans le BVRO et dans les SBV par chacune des catégories d'utilisation du sol est calculée à partir d'une analyse spatiale qui permet de calculer la somme de l'ensemble des pixels d'une même catégorie. La superficie totale est obtenue par la multiplication de cette sommation avec la résolution spatiale de l'image matricielle. Les superficies totales pour l'ensemble du BVRO sont présentées dans un histogramme. Les taux de changement (en %) des superficies des grandes catégories sont ensuite calculés pour chaque période par rapport aux superficies initiales (Tableau 3.11). Les taux de changement moyens des superficies à l'échelle du BVRO sont représentés à l'aide d'un histogramme, et les taux moyens à l'échelle des SBV sont cartographiés.

Tableau 3.10. Définition des grandes catégories d'utilisation du sol (cf. base de données « Utilisation des terres du Canada », Tableau 3.3) pour lesquelles les changements de superficies sont quantifiés dans le temps. La contribution au ruissellement est « Favorable » si la catégorie est connue pour contribuer à exacerber le ruissellement en présence d'aléas météorologiques et « Défavorable » dans le cas opposé.

Catégorie	Utilisation(s) du sol (GC) <sup>1</sup>	Contribution au ruissellement
Eaux	Eaux (31)	Nan
Autres terres (Zones rocheuses)	Autres terres (91)	Favorable
Forêts	Forêts (41), Terres humides en forêt (42), Arbres (45), Terres humides arborées (46)	Défavorable
Milieux humides et prairies	Prairies aménagées (61), Prairies non aménagées (62), Terres humides (71), Terres humides arbustives (73) et Terres humides herbacées (74)	Défavorable
Terres cultivées	Terres cultivées (51)	Favorable
Urbain	Lieux habités (21), Routes (25)	Favorable
<sup>1</sup> La base de données	utilisée est celle de l' « Utilisation des terres du Canada » (cf	Tableau 3.3)

Analyse	Définition	Échelle spatiale	Périodes	Indice(s) ou couche(s) utilisé(s)
ΔSuperficies (%)	Taux de changement des superficies des catégories d'utilisation du sol	BVRO et SBV	1990 à 2000; 2000 à 2010; 1990 à 2010.	Utilisation du sol en 1990, 2000 et 2010

Tableau	3.11	Résumé	de	l'analyse	temporelle	des	changements	dans	les	superficies	des	grandes
catégories d'utilisation du sol dans le BVRO, de 1990 à 2010.												

### 3.2.4 Analyse multicritère des indices de risque

### a) Analyse de la vulnérabilité environnementale dans le BVRO

Afin d'identifier les secteurs du BVRO les plus vulnérables au ruissellement de surface en fonction des conditions environnementales les plus récentes dans le BVRO, les indices spatiaux US, P et Dr sont d'abord standardisés de 0 à 1 à partir de l'outil *Raster Calculator* dans le logiciel ArcMap, ce en fonction des valeurs minimales et maximales des pixels de la couche matricielle initiale. Chaque indice est ensuite pondéré de sorte que la somme des poids soit égale à 1.

L'indice P est l'indice pour lequel le poids le plus élevé a été attribué puisque la pente est le facteur qui affecte le plus le ruissellement de surface, tout particulièrement dans un contexte où le sol est encore potentiellement gelé ou couvert de neige (Québec. MDDELCC, 2014). L'indice Dr est l'indice le plus faiblement pondéré puisqu'il s'agit de la variable empreinte de la plus grande incertitude. En effet, une partie des données provient d'une version particulièrement ancienne, et les données de la plus récente version (v.3.2) comportaient plusieurs valeurs de drainage pour un même polygone de sol, relativement au pourcentage occupé dans le polygone par le type de sol en question. À cet effet, seul le type de sol occupant la plus grande superficie du polygone a été considéré afin de simplifier l'analyse. Précisons que de nombreux autres facteurs temporels intervenant dans la capacité de drainage du sol tels que la teneur initiale du sol en eau et son état de surface (Blöschl *et al.*, 2013) ne sont pas considérés dans la classification. Le Tableau 3.12 présente la pondération retenue pour chaque indice. Finalement, l'indice VE est obtenu en calculant la sommation des indices standardisés et pondérés US, P et Dr.

Tableau 3.12. Pondération des indices de vulnérabilité environnementale (US, P et Dr) utilisés dans l'analyse multicritère pour l'estimation de l'indice VE.

Indice	Poids
US	0,3
Р	0,5
Dr	0,2

#### *b) Analyse de l'intensité de l'aléa météorologique au printemps 2017*

L'intensité de l'aléa météorologique (indice IAM) est évaluée en fonction de son caractère extrême, qui est bien représenté par les anomalies standardisées par rapport à la normale (1981-2010) des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot, calculés à partir des données DAYMET. Chaque indice spatial, représenté sous forme de matrice, est d'abord reclassifié selon cinq classes d'intensité déterminées en fonction des valeurs de l'anomalie standardisée. Les classes sont définies au Tableau 3.13.

Les couches géospatiales des indices reclassifiés sont ensuite standardisées de 0 à 1 de la même manière que pour les indices précédents. Elles sont ensuite pondérées de sorte que les indices relatifs à la précipitation totalisent la moitié du pointage et l'indice de fonte de la neige, l'autre moitié. Une valeur légèrement plus élevée est attribuée à l'indice d'intensité de la précipitation puisque le facteur d'intensité permet d'expliquer davantage l'occurrence ou la sévérité des inondations. La somme des poids est égale à 1 (Tableau 3.14). L'indice IAM est finalement obtenu par la sommation des couches géospatiales pondérées des indices météorologiques à l'aide de l'outil *Raster Calculator*.

Tableau 3.13. Limites des classes pour le calcul de l'indice d'intensité de l'aléa météorologique (IAM). Les bornes des classes sont données en fonction des valeurs de l'anomalie standardisée pour chaque indice météorologique considéré dans l'analyse multicritère. Plus la valeur de l'IAM augmente selon les classes, plus sa contribution au niveau d'inondation augmente.

Classe	Intervalle des valeurs
1	< 0
2	[0 - 1[
3	[1 - 2[
4	[2 - 3[
5	$\geq$ 3

Tableau 3.14. Pondération des anomalies standardisées des indices DimSWE, PrcpTot et Prcp90 servant à calculer l'indice IAM.

Indice	Poids accordé
Ano. Std DimSWE	0,5
Ano. Std PrcpTot	0,2
Ano. Std Prcp90	0,3

### c) Analyse du niveau de risque dans le BVRO

L'indice du niveau de risque (NR) est finalement obtenu par la combinaison des couches géospatiales représentant les indices pondérés VE et IAM, à partir de l'outil *Raster Calculator* dans ArcGIS. Le même poids est attribué aux deux indices (*i.e.* 0,5). L'indice NR est calculé et cartographié comme indice moyen à l'échelle des SBV, et ce pour les mois de mars, avril et mai 2017. Les indices moyens NR sont cartographiés à l'échelle des SBV.

### 3.3 Résultats

Dans la section qui suit, l'évolution des conditions environnementales dans le BVRO, entre 1990 et 2010, est d'abord présentée, en tenant compte des principaux changements dans les superficies occupées par les grandes catégories d'utilisation du sol. Les changements ayant eu lieu dans l'aménagement du territoire de la ZE à Rigaud, entre 1970 et 2017, sont ensuite présentés en tenant compte de l'évolution du nombre de bâtiments dans les différentes zones d'exposition au risque d'inondation. Des indices temporels d'exposition sont fournis pour différentes périodes.

Enfin, les principales caractéristiques concernant les conditions environnementales récentes dans le BVRO sont présentées, lesquelles permettent d'identifier les secteurs du bassin les plus vulnérables au ruissellement de surface. Finalement, en tenant compte de ces conditions, mais également des caractéristiques de l'aléa météorologique du printemps 2017 dans le BVRO, le niveau de risque est estimé pour la même période, ce pour chacun des sous-bassins de la rivière des Outaouais.

### 3.3.1 Conditions environmementales dans le BVRO

### *a) Évolution des conditions entre 1990 et 2010*

D'abord, l'analyse des superficies occupées par les grandes utilisations du sol dans le BVRO (Figure 3.1) révèle que les forêts constituent l'utilisation du sol dominante, avec une superficie totale qui occupe presque 80 % du bassin. L'hydrographie (incluant cours d'eau et lacs) occupe la deuxième plus grande superficie en importance représentant 11 % de la superficie du bassin. Les terres cultivées (agricoles) représentent un peu plus de 5 % du territoire et les zones urbaines à peine 3 %. Les autres terres, qui représentent le plus souvent des secteurs où le socle rocheux affleure, sans présence de végétation, sont presque inexistantes avec une couverture de seulement 0,05 % du bassin. L'histogramme de la Figure 3.1 permet de constater que les changements dans les superficies des grandes catégories d'utilisation du sol dans l'ensemble du BVRO sont minimes de 1990 à 2010, voire non perceptibles ou significatifs.

Figure 3.1 Histogramme des superficies relatives à la superficie totale du BVRO occupées par chaque catégorie d'utilisation du sol, ce en 1990 (bandes rouges), 2000 (bandes jaunes) et 2010 (bandes orange). Les catégories représentées sont les eaux, les forêts, les milieux humides (MH) et prairies, les autres terres, les terres cultivées et le milieu urbain.



Toutefois, la Figure 3.2, qui présente les taux de changement des superficies occupées par les quatre catégories d'utilisation du sol principales du BVRO, de 1990 à 2010, et pour les deux décennies de 1990 à 2000 et de 2000 à 2010, révèle que des modifications ont bel et bien eu lieu. Les taux de changement concernant l'hydrographie n'ont pas été inclus puisque les superficies sont restées inchangées.

Depuis les années 1990, le BVRO a été modifié par les activités humaines, surtout par une urbanisation qui s'est grandement accrue, en particulier au cours de la décennie 2000 à 2010. Pour la période complète de 1990 à 2010, les catégories d'utilisation du sol qui contribuent le plus à augmenter le risque d'inondation (*i.e.* urbain et terres cultivées) ont connu une augmentation de leur superficie, alors que celles jouant le rôle 138 d'atténuer le risque ont plutôt connu une diminution de leur superficie (Figure 3.2). De manière générale, les modifications dans l'aménagement du territoire entre 1990 et 2010 dans le BVRO pourraient avoir contribué à augmenter le risque d'inondation en aval. Le territoire urbain est celui qui a pris le plus d'expansion avec une augmentation des superficies de 22,2 % de 1990 à 2010 (Figure 3.2). Cette forte augmentation est surtout due à l'urbanisation qui s'est accrue de 2000 à 2010, comme il a été suggéré précédemment. La superficie des terres cultivées a également augmenté, mais de seulement 0,57 % par rapport aux valeurs de 1990, avec une augmentation des superficies dans la décennie de 1990 à 2000, suivie d'une diminution de 2000 à 2010. Les forêts ainsi que les milieux humides et les prairies ont vu leurs superficies diminuer de 0,57 % et de 1,33 %, respectivement par rapport aux valeurs de 1990, bien que les forêts constituent encore l'utilisation du sol largement dominante dans le bassin versant.

Figure 3.2 Taux de changement des superficies des différentes catégories d'utilisation du sol pour les périodes de 1990 à 2010 (en rouge), de 1990 à 2000 (en jaune) et de 2000 à 2010 (en orange).



La Figure 3.3 présente les taux de changement moyens des superficies des principales catégories d'utilisation du sol entre 1990 et 2010 à l'échelle des SBV. Ces taux révèlent que ce sont majoritairement les SBV situés en aval du BVRO, au nord de la rivière des Outaouais, qui ont connu les plus importantes augmentations des superficies relatives aux types d'utilisation du sol contribuant à exacerber leur vulnérabilité au ruissellement (p. ex. reliées à l'urbanisation), au détriment des milieux humides, des prairies et des forêts. Ce sont d'ailleurs les SBV du cours inférieur des rivières Rouge et du Nord, de la rivière Dumoine et de la rivière Gatineau qui ont connu les plus importantes augmentations des superficies urbaines, avec des taux d'accroissement de 50,4 %, 42,3 % et 41,7 % respectivement. Alors que le taux de diminution des superficies des milieux humides et prairies à l'échelle de l'ensemble du BVRO n'atteignait même pas 2 % entre 1990 et 2010, certains SBV situés en aval du BVRO ont connu une perte de ces milieux allant jusqu'à 8 % des superficies initiales rapportées en 1990. Le bassin de la rivière Petawawa (situé en Ontario au nord-est de Pembroke) a également connu une hausse spectaculaire de 152,1 % des superficies occupées par les terres cultivées en plus d'un taux d'urbanisation qui s'est accru de 20 % entre 1990 et 2010, affectant d'autant plus sa vulnérabilité environnementale. Somme toute, une relation se dégage entre l'urbanisation ou la dégradation de l'environnement naturel de certains SBV situés à proximité de la rivière des Outaouais et notamment ceux les plus proches de l'exutoire du BVRO et de l'île de Montréal.

Figure 3.3 Cartographie des taux de changement moyens des superficies des grandes catégories d'utilisation du sol entre 1990 et 2010 pour chacun des SBV du BVRO. Les changements concernant les catégories « Urbain » (panneau du haut à gauche), « Terres cultivées » (panneau du haut à droite), « Milieux humides et prairies » (panneau du bas à gauche) et « Forêts » (panneau du bas à droite) sont représentés.



### b) Caractéristiques physiographiques générales

Les principales caractéristiques physiographiques du BVRO et de ses SBV, notamment la superficie, l'altitude moyenne ainsi que la pente moyenne, sont présentées au 141 Tableau 3.15. Elles sont également décrites par la courbe hypsométrique du BVRO, présentée à la Figure 3.4. Les différents paramètres ont été calculés à partir du MNE couvrant l'ensemble du BVRO à 30 m de résolution (Tableau 3.3) et des couches vectorielles représentant les limites du BVRO et des SBV provenant du RHN (Tableau 2.5).

L'altitude moyenne du BVRO est de 313 m environ. Une part importante de la superficie du bassin est d'ailleurs située à des altitudes près de cette valeur (Figure 3.4). Le sommet du BVRO atteint 929 m d'altitude, tout près de Mont-Tremblant. Seule une petite proportion du territoire (moins de 5 %) est caractérisée par de telles altitudes. Finalement, l'altitude la plus faible est de 13 m, à l'exutoire de la rivière des Outaouais, mais également au sein du SBV des rivières Rouge et du Nord.

Parmi les SBV, le bassin de la rivière Gatineau est celui qui possède la plus grande superficie, suivi de près par le bassin de la rivière Kipawa. Le bassin des rivières Rouge et du Nord possède quant à lui un gradient altitudinal remarquable; les altitudes peuvent atteindre 929 m par endroits (le sommet du BVRO) et 13 m en d'autres points (l'altitude la plus faible du BVRO). Le bassin du cours inférieur de la rivière du Lièvre est celui où la pente moyenne est la plus importante (15 %).

ID SBV	Nom SBV	Superficie (km²)	Altitude moyenne (m)	Altitude maximum (m)	Altitude minimum (m)	Pente moyenne (%)
BVRO	Rivière des Outaouais	145 927	313	929	13	8
02JA000	Eaux d'amont	10 243	391	644	309	8
02JB000	Rivière Kinojévis	13 201	314	570	175	5
02JC000	Rivière Blanche	5 101	293	506	171	6
02JD000	Rivière Montréal	6 532	362	678	205	8
02JE000	Rivière Kipawa	15 400	311	517	140	8
02KA000	Cours moyen de la rivière des Outaouais – Dumoine	4 457	289	496	100	10
02KB000	Rivière Petawawa	4 170	357	562	108	9
02KC000	Rivière Bonnechere	6 278	203	518	54	8
02KD000	Rivière Madawaska (cours supérieur)	6 249	407	582	261	11
02KE000	Rivière Madawaska (cours inférieur)	2 279	277	510	59	10
02KF000	Rivière Mississippi	4 936	197	478	46	7
02KG001	Rivière Coulonge	5 226	349	568	102	9
02KH001	Rivière Noire	2 644	320	552	100	10
02KJ001	Rivière Dumoine	4 372	359	548	149	9
02LA000	Rivière Rideau	3 974	129	263	38	4
02LB001	<b>Rivière South Nation</b>	5 541	74	229	14	4
02LC001	Rivières Rouge et du Nord	8 262	347	929	13	12
02LD001	<b>Rivière Petite Nation</b>	2 330	263	566	36	13
02LE000	Rivière du Lièvre (cours supérieur)	6 886	393	751	182	10
02LF001	Rivière du Lièvre (cours inférieur)	3 172	277	607	31	15
02LG000	Rivière Gatineau (cours supérieur)	15 632	395	771	212	9
02LH001	Rivière Gatineau (cours inférieur)	8 709	253	556	31	11
020AA01	Rivière des Outaouais (cours aval)	333	55	227	13	4

Tableau 3.15 Principales caractéristiques physiographiques du BVRO et des SBV. La superficie, les altitudes moyennes, maximum et minimum, et la pente moyenne ont été calculées dans un SIG à partir du MNE du BVRO (Tableau 3.3) et des couches vectorielles provenant du RHN représentant les limites des bassins.





Courbe hypsométrique du bassin versant de la rivière des Outaouais

#### *c) Conditions de vulnérabilité récentes*

Les indices moyens d'utilisation du sol (US), de pente (P) et de drainage (Dr) à l'échelle des SBV sont présentés sous forme de carte à l'Annexe J. L'indice US est maximal dans les SBV en aval du BVRO, au sud de la rivière des Outaouais. Ces entités géographiques sont celles qui sont constituées des plus grandes superficies quant à l'utilisation du sol de types urbain et agricole, avec très peu de forêts en comparaison avec le reste du bassin. Les SBV avec les pentes moyennes les plus prononcées sont majoritairement situés en aval du BVRO, mais au nord de la rivière des Outaouais cette fois-ci (rivières du Lièvre, Rouge, du Nord et Petite Nation). Le SBV du cours inférieur de la rivière du Lièvre est celui qui possède l'indice P le plus élevé. Finalement, ce sont majoritairement les SBV du côté ontarien qui ont les sols avec une plus piètre capacité de drainage, et avec les indices Dr les plus élevés (drainage médiocre) à l'extrémité nord-ouest du BVRO (ouest et sud du lac Abitibi).

L'indice moyen VE, représenté cartographiquement pour chacun des SBV à la Figure 3.5, reflète les résultats de ces trois indices, avec une prise en compte plus importante (poids relatif) de l'indice P. C'est le SBV du cours inférieur de la rivière du Lièvre qui est le plus vulnérable ou susceptible de générer une quantité importante de ruissellement en présence de conditions météorologiques extrêmes, en raison notamment d'un indice de pente élevé comme suggéré précédemment (la pente moyenne la plus élevée parmi tous les SBV, cf. Annexe J). Le SBV de la rivière Montréal (situé au sud-ouest du lac Témiscamingue) possède le deuxième indice le plus élevé (Figure 3.5). En effet, c'est le SBV qui possède l'indice Dr le plus élevé (drainage médiocre), en plus d'avoir un indice P assez important (cf. Annexe J). Le SBV du cours supérieur de la Madawaska possède également un score de vulnérabilité élevé (Figure 3.5) qui relève de l'indice P, mais également de la capacité de drainage plutôt médiocre des sols en place. Les SBV du cours inférieur de la rivière Gatineau, de la rivière Petite Nation ainsi que des rivières Rouge et du Nord possèdent également des indices élevés (Figure 3.5), majoritairement en raison du facteur de pente. Le SBV du cours inférieur de la rivière Madawaska (situé en Ontario) est aussi vulnérable que le SBV des rivières Rouge et du Nord, malgré un indice P légèrement inférieur, car son indice Dr est plus élevé que celui de ses voisins au nord de la rivière des Outaouais (cf. Annexe J). Son indice US est également plus élevé que celui de la majorité des SBV, quoique plutôt faible. Il est également intéressant de constater que les quatre SBV au sud de la rivière des Outaouais, les plus en aval du BVRO, ne révèlent pas de vulnérabilité au ruissellement particulièrement élevée par rapport aux autres SBV du bassin, malgré qu'ils soient les plus urbanisés de tous. Ce sont en effet les SBV où les pentes moyennes sont les moins prononcées dans l'ensemble du BVRO (cf. Annexe J).



Figure 3.5 Indices spatiaux standardisés moyens VE, représentés à l'échelle des SBV. Les indices ont été calculés à partir d'une analyse multicritère qui tient compte des indices US, P et Dr.

#### 3.3.2 Exposition au risque d'inondation à Rigaud

À l'échelle de la ZE à Rigaud, le nombre estimé de bâtiments présents dans les zones exposées au risque d'inondation pour chacune des années étudiées est présenté au Tableau 3.16. L'indice  $\Delta$ Expo qui représente la moyenne pondérée des taux de changement annuels calculés pour les différentes zones est fourni au Tableau 3.17, pour chaque période étudiée, en plus des taux de changement annuel du nombre de bâtiments pour chaque zone.

De 1970 à 2017, le nombre de bâtiments dans la ZE a augmenté de 262, soit de 49,4 % par rapport à l'année 1970 (Tableau 3.16). Au sein de la plaine inondable, telle que définie par Géomont en 2014, le nombre de bâtiments est passé de 205 à 254 bâtiments, une augmentation de 23,9 % par rapport à 1970 (Tableau 3.16). Il est intéressant de 146

noter qu'aucune nouvelle construction n'a été observée dans la zone inondable 0 - 2 ans depuis 1970. Après 1992, les nouvelles constructions se sont faites à l'extérieur de la plaine inondable (Tableau 3.16). Par ailleurs, après l'événement de 2017, de nombreux bâtiments ont été complètement démolis et les terrains rachetés par la ville (Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT), 2017).

L'indice  $\Delta$ Expo est le plus élevé entre 1975 et 1983, et c'est également durant cette période que le taux de changement du nombre de bâtiments dans la ZE a été le plus élevé (Tableau 3.17). C'est durant cette période que les nouveaux bâtiments ont été construits dans les zones les plus exposées au risque d'inondation. Entre 1983 et 1992, bien que le taux de changement annuel dans la ZE soit quasi identique à celui de la période précédente, l'indice  $\Delta$ Expo est pondéré vers le bas puisque les nouvelles constructions ont majoritairement été observées dans des zones moins exposées. Après 1992, l'indice est le plus souvent négatif, sinon pratiquement nul (Tableau 3.17). L'urbanisation dans les zones les plus exposées au risque d'inondation à Rigaud a donc été beaucoup moins importante après 1992.

Tableau 3.16. Recensement des bâtiments principaux dans la ZE et dans la plaine inondable. Le nombre de bâtiments respectif à chacune des zones est fourni, ce pour chacune des mosaïques d'orthophotographies interprétées.

A	Bâtiments comptabilisés (Nb)						
Annee	ZE complète	Zone inondable 0 - 2 ans	Zone inondable 2 - 20 ans	Zone inondable 20 - 100 ans	Plaine inondable (0 - 100 ans)		
1970	530	7	123	75	205		
1975	563	7	128	75	210		
1983	641	7	144	88	239		
1992	736	6	160	93	259		
1997	747	6	159	93	258		
2009	785	6	160	91	257		
2014	786	6	158	92	256		
2017	792	6	157	91	254		

Tableau 3.17. Moyenne pondérée du taux de changement annuel du nombre de bâtiments dans la ZE à Rigaud (ΔExpo) pour chaque période étudiée, y compris la période complète de 1970 à 2017. Les taux de changements du nombre de bâtiments pour chacune des zones ayant servi au calcul de la moyenne pondérée sont également présentés, en plus des valeurs observées pour la ZE complète.

Période	ΔExpo (%)	Taux de changement annuel (%)					
		Zone 2 - 20 ans	Zone 20 - 100 ans	ZE externe à la plaine inondable	ZE complète		
1970 - 1975	0,66	0,81	0,00	1,72	1,25		
1975 - 1983	1,72	1,56	2,17	1,74	1,73		
1983 - 1992	1,13	1,23	0,63	2,07	1,65		
1992 - 1997	-0,06	-0,13	0,00	0,50	0,30		
1997 - 2009	0,03	0,05	-0,18	0,66	0,42		
2009 - 2014	-0,12	-0,25	0,22	0,08	0,03		
2014 - 2017	-0,21	-0,21	-0,36	0,50	0,25		
1970 - 2017	0,59	0,59	0,45	1,39	1,05		

### 3.3.3 Niveau de risque au printemps 2017

Les indices moyens IAM et NR des mois d'avril et de mai sont représentés à l'échelle des SBV à la Figure 3.6, ceux du mois de mars sont présentés à l'Annexe K. Au mois d'avril, les conditions météorologiques les plus propices à engendrer un ruissellement de surface important, et à augmenter la pointe de crue en aval, ont touché les SBV du cours inférieur de la rivière Gatineau, du cours inférieur de la rivière du Lièvre et de la rivière Petite Nation, des bassins qui possèdent des pentes moyennes parmi les plus élevées de tout le BVRO. C'est notamment au sein du bassin de la rivière du Lièvre que l'indice NR était le plus élevé au mois d'avril (Figure 3.6, panneau du bas à gauche). En effet, il s'agit du SBV le plus vulnérable au ruissellement en présence de conditions météorologiques extrêmes ou de pluie sur neige abondante. Les deux autres SBV ayant été marqués par un IAM particulièrement extrême au mois d'avril présentent également des indices NR élevés, se classant parmi les trois SBV où le niveau de risque était le plus important au mois d'avril 2017 (Figure 3.6, panneaux de gauche). Au mois de mai, les indices IAM étaient plus élevés pour les SBV du côté

ontarien, au sud de la rivière des Outaouais (Figure 3.6, panneau du haut à droite). Les conditions les plus propices à générer un ruissellement important ont été observées dans les SBV des cours inférieur et supérieur de la rivière Madawaska. Ce sont par ailleurs ces SBV pour lesquels le niveau de risque a été maximum au mois de mai (Figure 3.6, panneau du bas à droite). Les deux SBV voisins ont également été touchés par des événements hydrométéorologiques particulièrement extrêmes au mois de mai, ce qui leur confère un indice NR très près de celui des deux premiers SBV mentionnés. L'indice NR dans le bassin du cours inférieur de la rivière du Lièvre était encore particulièrement élevé au mois de mai (Figure 3.6, panneau du bas à droite).

En résumé, les indices spatiaux NR permettent de constater des scores élevés pour la quasi-majorité des SBV du BVRO au mois d'avril, malgré des conditions de vulnérabilité préalables qui n'étaient pas particulièrement préoccupantes, ce qui témoigne du caractère exceptionnel des conditions météorologiques dans l'ensemble du BVRO durant ce mois. Seuls les SBV de la pointe nord-ouest du BVRO ont été épargnés. Au mois de mai, les observations sont similaires, l'aléa météorologique a également affecté la majorité des SBV, mais avec une intensité moins exceptionnelle qu'au mois d'avril. Les SBV des pointes nord-ouest et nord-est du bassin présentent cependant des conditions beaucoup moins anormales qu'au mois d'avril. Il est intéressant de constater que le SBV de la rivière Montréal, situé à la pointe nord-ouest du BVRO, n'était pas particulièrement à risque aux mois d'avril et mai, malgré les caractéristiques physiques du bassin propices à générer un ruissellement important, en présence de conditions météorologiques extrêmes (indice VE, Figure 3.5).

Le Tableau 3.18 résume l'ensemble des indices moyens de risque (VE, IAM et NR) calculés pour chacun des SBV.

Figure 3.6. Indices spatiaux standardisés moyens IAM (panneaux du haut) et NR (panneaux du bas), du mois d'avril (panneaux de gauche) et du mois de mai (panneaux de droite), représentés à l'échelle des SBV. L'indice IAM révèle l'intensité de l'aléa hydrométéorologique qui tient compte des anomalies standardisées des indices PrcpTot, Prcp90 et DimSWEtot. L'indice NR est l'indice final de niveau de risque qui tient compte des indices VE et IAM.



SBV	ID	VE	IAMAvril	IAM <sub>Mai</sub>	NRAvril	NR <sub>Mai</sub>
Cours supérieur de la rivière des Outaouais - Eaux d'amont	02JA000	0,34	0,49	0,43	0,42	0,39
Cours supérieur de la rivière des Outaouais – Kinojévis	02JB000	0,33	0,31	0,27	0,32	0,30
Rivière Blanche	02JC000	0,40	0,24	0,12	0,32	0,26
Rivière Montréal	02JD000	0,47	0,25	0,20	0,36	0,34
Cours supérieur de la rivière des Outaouais –Kipawa	02JE000	0,42	0,41	0,19	0,41	0,30
Cours moyen de la rivière des Outaouais – Dumoine	02KA000	0,39	0,53	0,30	0,46	0,35
Rivière Petawawa	02KB000	0,42	0,52	0,37	0,47	0,40
Cours moyen de la rivière des Outaouais –Bonnechere	02KC000	0,41	0,59	0,49	0,50	0,45
Rivière Madawaska (cours supérieur)	02KD000	0,46	0,52	0,53	0,49	0,50
Rivière Madawaska (cours inférieur)	02KE000	0,44	0,52	0,57	0,48	0,50
Cours moyen de la rivière des Outaouais –Mississippi	02KF000	0,38	0,52	0,51	0,45	0,45
Rivière Coulonge	02KG001	0,40	0,55	0,43	0,47	0,41
Rivière Noire	02KH001	0,40	0,55	0,38	0,47	0,39
Rivière Dumoine	02KJ001	0,36	0,43	0,40	0,39	0,38
Rivière Rideau	02LA000	0,34	0,51	0,45	0,42	0,39
Cours inférieur de la rivière des Outaouais - South Nation	02LB001	0,37	0,49	0,39	0,43	0,38
Rivières Rouge et du Nord	02LC001	0,44	0,54	0,36	0,49	0,40
Rivière Petite Nation	02LD001	0,45	0,62	0,41	0,53	0,43
Rivière du Lièvre (cours supérieur)	02LE000	0,38	0,53	0,30	0,46	0,34
Rivière du Lièvre (cours inférieur)	02LF001	0,50	0,63	0,43	0,57	0,47
Rivière Gatineau (cours supérieur)	02LG000	0,36	0,55	0,35	0,45	0,35
Rivière Gatineau (cours inférieur)	02LH001	0,45	0,60	0,41	0,52	0,43
Rivière des Outaouais (cours aval)	020AA01	0,34	0,55	0,23	0,45	0,29

Tableau 3.18. Récapitulatif des indices de risque moyens (VE, IAM et NR) calculés à l'échelle des SBV.

#### 3.4 Discussion et conclusion

#### 3.4.1 Discussion

#### *a) Facteur d'exposition*

Tout d'abord, en ce qui concerne l'exposition au risque d'inondation à Rigaud, les années 1970 à 1992 ont été marquées par une urbanisation notable dans la plaine inondable; le nombre de bâtiments en 1992 a connu une augmentation de 26,3 % par rapport à celui de 1970. La Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, adoptée le 22 décembre 1987, a été appliquée à l'ensemble des cours d'eau du Québec dès 1991. Elle devait, entre autres, assurer la sécurité des personnes et des biens dans la plaine inondable et accorder une protection minimale adéquate aux rives, au littoral et aux plaines inondables (Québec. MDDELCC, 2015b). De 1992 à 2017, le nombre de bâtiments dans la plaine inondable est donc resté stable ou a légèrement diminué, en accord avec les mesures prônées par cette politique qui interdit les constructions, ouvrages ou travaux dans les zones de grand et de faible courant de la plaine inondable (Québec. MDDELCC, 2015b). Toutefois, l'exacerbation de l'exposition au risque d'inondation dans la ZE à Rigaud entre 1975 et 1992 démontre que malgré les événements printaniers majeurs de 1974 et 1976, les autorités compétentes n'ont pas, par la suite, fait preuve d'une vigilance suffisante quant à la réglementation dans les plaines inondables (Etkin et al., 2004).

#### *b) Facteurs de vulnérabilité liés à l'urbanisation et à l'occupation du territoire*

L'urbanisation soutenue des populations, des activités économiques et de l'environnement bâti pose un réel enjeu à l'adaptation aux changements climatiques en plus de provoquer de fortes pressions sur l'environnement naturel (Bourque et Simonet, 2007). Ce facteur et son analyse au cours du temps révèlent en effet que cet enjeu s'est exacerbé depuis les années 1970. Les SBV ayant connu la plus forte urbanisation entre 1990 et 2010, au détriment des milieux humides et des forêts, sont majoritairement ceux situés en aval du BVRO, de part et d'autre de la frontière entre le Québec et l'Ontario. Parmi ces bassins, ce sont ceux du côté québécois qui ont connu la plus grande urbanisation durant cette période. Ce sont sensiblement ces mêmes bassins qui ont enregistré les événements hydrométéorologiques les plus extrêmes au mois d'avril 2017, en plus d'être parmi les plus vulnérables au ruissellement de surface. L'intensité de la crue printanière de 2017 est sans aucun doute le résultat de l'interaction de ces particularités physiques, anthropiques et climatiques locales, et leur répartition spatiale au sein du bassin, celles-ci ayant contribué à des degrés divers à modifier le risque d'inondation (Blöschl *et al.*, 2013; Kite, 1993; Mohamoud, 2004; Quilbé *et al.*, 2008). De plus, nos résultats ont permis d'identifier des secteurs du BVRO caractérisés par des conditions hautement atypiques, plus exposés et vulnérables par exemple à l'exacerbation du ruissellement, démontrant d'autant plus la pertinence d'étudier l'ensemble des conditions à des échelles locales (Berghuijs *et al.*, 2014).

D'autres exemples, comme le cas du bassin de la rivière Chaudière, montrent à quel point l'emprise croissante des terres agricoles au détriment des forêts, de 1970 à 2003, est fortement corrélée à l'augmentation du ruissellement dans le bassin et des débits à l'exutoire, et ce de juin à novembre (Quilbé *et al.*, 2008). Durant cette période, la végétation dense permet de réduire considérablement le ruissellement par des processus d'interception et d'évapotranspiration (Quilbé *et al.*, 2008). Le BVRO quant à lui est encore constitué à très grande majorité de denses forêts, et il est certain que cette condition permet de réduire le risque d'inondation en aval du bassin durant la saison de croissance, en ralentissant et en interceptant une part importante du volume d'eau. Le risque d'inondation printanier est certes moins affecté par l'utilisation du sol, compte tenu du couvert neigeux et de l'état de gel du sol qui conditionnent la plus
grande part du ruissellement durant cette période (Blöschl *et al.*, 2013; Québec. MDDELCC, 2014). Toutefois, une attention particulière devrait être portée à la préservation de ce riche milieu naturel (forêts et milieux humides), tout particulièrement dans les SBV les plus vulnérables, compte tenu des connaissances connues quant à l'interaction entre les conditions environnementales et le risque d'inondation en aval, mais également en sachant que le cycle hydrologique continuera d'être affecté par la rapidité et l'ampleur des changements climatiques futurs (Knox, 2000).

#### 3.4.2 Conclusion

Cette deuxième partie de la recherche a tout d'abord permis de dresser le portrait des changements dans l'exposition au risque d'inondation à Rigaud entre 1970 et 2017. L'urbanisation dans la plaine inondable a été particulièrement notable avant 1992. À partir de cette période, sans doute en lien avec la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables mise en place à partir de 1991, les nouvelles constructions ont surtout été érigées à l'extérieur de la zone inondable (20 - 100 ans). On peut donc difficilement attribuer la sévérité de l'inondation de 2017 à une exacerbation de l'exposition dans la ZE à Rigaud dans les deux dernières décennies. Toutefois, sachant que l'ensemble des facteurs d'exposition et de vulnérabilité jouent un rôle important sur le risque d'inondation et qu'ils sont voués à augmenter dans le futur, il aurait été pertinent de les intégrer dans l'étude (cf. O'Neill *et al.*, 2017). Par exemple, l'intégration d'indices permettant de quantifier l'évolution de la valeur des biens et/ou représentant les facteurs de vulnérabilité sociale dans le calcul de l'indice d'exposition ( $\Delta$ Expo) aurait sans doute révélé des taux d'exposition potentiellement en augmentation au cours des dernières décennies.

Par ailleurs, l'urbanisation dans tout le BVRO a pris de l'expansion entre 1990 et 2010, en particulier dans un secteur hautement vulnérable, localisé à proximité de l'exutoire, contribuant le plus à exacerber le ruissellement de surface vers l'aval en présence de conditions météorologiques extrêmes. Ceci est de nature à accélérer le transit de l'eau et à augmenter l'apport en eau dans le lac des Deux-Montagnes et les rivières des Prairies et des Mille Îles (autour de l'île de Montréal). De plus, au printemps 2017, les conditions météorologiques les plus extrêmes ont touché presque l'ensemble de ces secteurs les plus vulnérables incluant ceux ayant été les plus transformés par les activités humaines entre 1990 et 2010. Ce portrait général témoigne d'une augmentation du risque d'inondation à Rigaud dans les dernières décennies, et ce même sans égard aux changements climatiques. Toutefois, une quantification des contributions de ces facteurs aux apports en eaux reste à réaliser.

Dans de futures études, puisqu'il existe un lien entre les modifications du territoire par les activités humaines et les changements dans les régimes hydrométéorologiques (Blöschl *et al.*, 2007; Pielke *et al.*, 2016; Quilbé *et al.*, 2008), il serait pertinent d'étudier les relations entre la distribution spatiale des changements d'utilisation du sol dans le BVRO et ceux reliés aux conditions météorologiques qui sont affectées par les changements climatiques. Il serait également important de pouvoir quantifier la contribution de chacune des conditions environnementales, autant anthropique, physique que météorologique, aux apports en eaux et aux effets sur les débits et les niveaux d'eau enregistrés à l'exutoire du BVRO au printemps. Parmi ces conditions, de nombreux facteurs contribuant à perturber la dynamique hydrologique au sein d'un bassin versant, non considérés dans notre étude, devraient être intégrés au sein de futures analyses, notamment les caractéristiques morphologiques du bassin autres que la pente, les conditions d'écoulement souterrain et en surface, les conditions de gel du sol et les processus de transport des sédiments qui peuvent être amplifiés par l'urbanisation ainsi que par les événements hydrométéorologiques extrêmes (Boucher *et al.*, 2010; Castonguay, 2007; Hu *et al.*, 2017).

#### CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude a permis dans un premier temps de caractériser globalement l'aléa d'inondation à Rigaud depuis 1963. L'inondation printanière de 2017 fut le deuxième aléa le plus intense à se produire à Rigaud, après celui de 2019, en raison du débit maximal atteint à la centrale de Carillon, de la durée de l'événement en considérant les valeurs de débit, et du dommage potentiel aux bâtiments touchés. Les inondations de 1974 et de 1976 ont toutefois été particulièrement intenses compte tenu d'une part des niveaux d'eau maximums records enregistrés en aval de la centrale de Carillon, et d'autre part, de la durée de submersion, tout particulièrement en 1974.

Les conditions météorologiques exceptionnelles du printemps 2017, mises en évidence par les anomalies extrêmes par rapport aux conditions normales des indices relatifs aux quantités de précipitation et à leur intensité, mais également aux volumes de neige à fondre et à la rapidité avec laquelle ils ont fondu, ont sans aucun doute contribué à l'ampleur de l'inondation printanière. Dans un deuxième temps, l'étude a permis d'établir un portrait plus complet des facteurs de risque dans le BVRO et sur le territoire de la ville. Les indices de vulnérabilité environnementale (VE) et de niveau de risque (NR) ont permis de dégager certaines particularités spatiales et temporelles clés des conditions dans le bassin qui peuvent expliquer en grande partie la sévérité de l'inondation de 2017 en aval du BVRO, notamment l'occurrence de conditions météorologiques exceptionnelles qui ont touché les SBV avec les plus fortes pentes, mais également les plus urbanisés et les plus près de l'exutoire du bassin. Notre étude a révélé ou confirmé que la réponse hydrologique dans le BVRO est particulièrement sensible aux événements de pluie sur neige, à la rapidité du dégel au printemps, et à une combinaison des régimes de précipitation et de températures qui affectent le volume d'eau énorme que le bassin draine compte tenu de sa superficie. À une échelle plus locale, l'exposition au risque d'inondation dans la ZE à Rigaud s'est exacerbée entre 1970 et 1992, alors qu'aucune nouvelle construction n'a été observée dans les zones les plus exposées au risque après cette date.

Compte tenu des résultats obtenus, force est de constater que les inondations printanières qui se produisent à l'exutoire du BVRO peuvent être exacerbées par bien d'autres facteurs que l'importance du couvert neigeux au sol présent à la fin de l'hiver. Un dégel printanier rapide peut libérer d'importantes quantités d'eau stockées sous forme de neige, sans que la quantité de neige au sol soit anormalement élevée à la fin de l'hiver. Les quantités de précipitation et surtout l'intensité avec laquelle elles tombent au printemps sont autant de facteurs à considérer pour estimer l'ampleur de la crue printanière. Les tendances des vingt dernières années des indices d'occurrence, d'intensité et de cumul total de précipitation révèlent d'ailleurs une augmentation significative au mois d'avril sur presque l'ensemble du BVRO.

La répartition spatiale des extrêmes hydrométéorologiques au printemps dans les différents secteurs hydrologiques au sein du bassin joue sans aucun doute un rôle prépondérant dans la vitesse de transfert des eaux (Scarwell et Laganier, 2004). En effet, au printemps 2017, les conditions météorologiques les plus extrêmes par rapport à la normale ont touché des secteurs hautement susceptibles d'exacerber la vitesse et l'ampleur du ruissellement vers l'aval du BVRO en raison de leurs caractéristiques physiographiques, notamment la présence de fortes pentes et de types d'utilisation du sol qui contribuent à réduire le temps de parcours des eaux vers l'exutoire. Les secteurs les plus fortement touchés étaient également les secteurs les plus près de l'exutoire, ce qui a pu considérablement contribuer à diminuer le temps de réponse hydrologique. Cependant, tout ceci devrait être confirmé avec un modèle hydrologique détaillé, afin

en particulier de quantifier les taux de ruissellement et d'apport d'eau global à l'exutoire.

Advenant qu'un changement dans le régime de précipitation et de températures vienne à éliminer complètement le couvert de neige dans le bassin en hiver ou à modifier considérablement les conditions de surface du sol au printemps, il serait d'autant plus important de considérer plus finement la contribution des changements d'utilisation du sol sur le risque d'inondation (Quilbé et al., 2008; Scarwell et Laganier, 2004), alors que ceux-ci jouent également un rôle sur l'ampleur des changements climatiques (Pielke et al., 2016), dans un contexte où les émissions des différents gaz à effets de serre et aérosols dans l'atmosphère continueront d'augmenter (Cohen et al., 2019). L'augmentation anticipée de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes pourrait potentiellement contribuer sans doute à l'amplification du risque d'inondation dans le futur (Bourque et Simonet, 2007; Cohen et al., 2019; Ouranos, 2015; OQACC, 2017; Gachon et al., 2018), alors que l'inondation historique du printemps 2017 s'est produite dans un contexte hydrométéorologique déjà extrêmement anormal. Une analyse détaillée des conditions aux printemps 1974, 1976 et 2019 devrait également être réalisée, afin de continuer à améliorer nos connaissances sur les catastrophes hydrométéorologiques récentes par opposition à celles qui se sont produites dans les années 1970.

Il est important de préciser que l'étude a négligé de nombreux facteurs qui contribuent également au risque d'inondation en aval du BVRO, car rappelons-le, le risque est par nature extrêmement complexe. D'abord, l'indice de sévérité des aléas d'inondation (SAI) mériterait d'être davantage exhaustif en intégrant l'ensemble des facteurs qui contribuent à modifier l'ampleur des dommages potentiels. La valeur des biens, qui est en augmentation croissante chaque année, ainsi que les conditions de vulnérabilité des

infrastructures, des personnes et des communautés sont notamment des facteurs qui, intégrés au calcul de l'indice de sévérité, permettraient d'obtenir un portrait plus complet du risque (BAC, 2015; Cardona et al., 2012; OQACC, 2017). La hauteur d'eau sur le terrain devrait également être considérée puisqu'il s'agit d'un facteur prépondérant pour estimer l'ampleur des dommages aux bâtiments (Scarwell et Laganier, 2004) et aux personnes affectées (Généreux et al., 2020), tout comme la durée de submersion, qui a quant à elle été considérée dans notre étude. Par ailleurs, l'indice de vulnérabilité environnementale (VE) pourrait être amélioré afin d'inclure l'ensemble des caractéristiques des bassins versants qui influencent la réponse hydrologique en aval du réseau hydrographique telles que la morphologie du bassin, la géologie et l'ensemble des caractéristiques du réseau hydrographique, dont la pente hydraulique (Biron et al., 2020; Blöschl et al., 2013; Boucher, 2010; Mohamoud, 2004; Québec. MDDELCC, 2014). De plus, l'indice du niveau de risque (NR), en plus d'intégrer les caractéristiques de l'aléa météorologique et les caractéristiques physiques du BVRO, considérées stables dans le temps, pourrait également inclure les conditions de surface du sol comme son niveau de gel et ses conditions hydriques préalables, de même que les caractéristiques de l'eau souterraine qui participent tout autant au cycle de l'eau au sein des bassins versants (Mohamoud, 2004; RNCan, 2019; Québec. Ministère de l'Environnement, 2004; Scarwell et Laganier, 2004). Finalement, une approche hydrogéomorphologique de l'étude du risque d'inondation permettrait de mieux comprendre les processus de sédimentation dans le BVRO, qui peuvent également avoir des impacts sur la bathymétrie et ultimement les niveaux d'eau lors de la crue printanière (Biron et al., 2020).

L'intégration de tous les facteurs mentionnés à un modèle hydrodynamique permettrait notamment de reproduire avec justesse les processus de ruissellement et d'écoulement de l'eau dans le BVRO et de quantifier la contribution de chaque facteur au risque d'inondation en aval (RNCan, 2019). La diversité des facteurs à considérer et leur variabilité spatiale et temporelle nécessitent donc d'étudier le risque d'inondation à partir de nouvelles approches globales et intersectorielles (Gachon, 2019) sur des échelles temporelles variées et à des échelles spatiales les plus fines que possible (Barrow *et al.*, 2004; Berghuijs *et al.*, 2014; Blöschl et Sivapalan, 1997)

Dans le futur proche, il est peu probable que l'intensité des crues printanières diminue. La hausse anticipée de l'intensité et de la fréquence des événements de précipitation abondante dans des contextes de climat nordique comme le nôtre où l'état de la cryosphère terrestre joue un rôle majeur pour modifier les régimes thermiques et hydriques (IPCC, 2019), mais également la dégradation des territoires les plus vulnérables par une urbanisation peu susceptible de s'atténuer (BAC, 2015), sont autant de facteurs qui contribueront à exacerber le risque d'inondation au printemps, du moins tant que le cycle saisonnier sera tel qu'il est actuellement (Bonsal *et al.*, 2019). De plus, des mesures plus strictes en aménagement du territoire, et conciliantes avec le risque d'inondation, au sens intégral, devraient être mises en place pour limiter au maximum l'augmentation de l'exposition et pour favoriser la résilience des secteurs contribuant le plus au ruissellement de surface dans le BVRO. Les retours d'expérience sont également une étape clé pour l'amélioration de la compréhension du risque d'inondation (Dantec *et al.*, 2018) et notamment tirer les leçons apprises pour améliorer notre capacité d'adaptation et notre résilience collective (UNDRR, 2019).

L'étude approfondie des conditions printanières de 2017, dans le BVRO et à Rigaud, a certainement permis d'identifier des facteurs de risque qui n'étaient jusqu'alors pas ou peu étudiés, tels l'influence de la distribution spatiale des conditions météorologiques extrêmes sur l'ampleur des crues printanières. L'amélioration de la compréhension des dynamiques qui s'opèrent dans l'ensemble du BVRO permettrait de réduire le risque

d'inondation printanier à Rigaud, mais également sur le territoire de la grande région métropolitaine et de nombreuses villes voisines exposées (CMM, 2017). Il va sans dire qu'il est impératif de développer des bases de données probantes et à haute résolution, incluant les outils de modélisation du cycle hydrologique complet (atmosphérique, en surface, et dans le sol) mises à jour régulièrement et concernant l'ensemble des facteurs de risque, en plus de miser sur la diffusion des données à tous les niveaux (Gachon, 2019). Un système de surveillance des conditions hydrométéorologiques en temps réel permettrait également d'améliorer le suivi et de faciliter les analyses, et ainsi de mieux prévoir à l'avance l'ampleur de la crue printanière et son extension géographique. L'intégration de ces données à haute résolution dans les modèles de changement climatique, en plus des informations concernant les particularités locales des bassins versants, notamment des données relatives à l'aménagement du territoire, permettrait de mieux comprendre les relations qui existent entre le changement climatique, les changements dans l'utilisation du sol, les changements dans les extrêmes des indices hydrométéorologiques et le temps de réponse hydrologique dans le BVRO pour ultimement améliorer la gestion du risque (Fortin et al., 2020; Quilbé et al., 2008).

ANNEXES

#### ANNEXE A

## STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES D'ECCC SITUÉES DANS LE BVRO OU À MOINS DE 75 KM DE DISTANCE UTILISÉES POUR L'ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE RÉGIONALE

Tableau A.1 Stations d'ECCC dont les données ont été utilisées pour le calcul des anomalies standardisées moyennes des différents indices à l'échelle du BVRO, pour les huit années à plus fort débit enregistré à Carillon depuis 1973. Pour la période 1963-1980, 21 stations ont été utilisées, alors que pour la période 1981-2017, un total de 95 stations a été utilisé, compte tenu de la période d'enregistrement des données de chacune des stations. Les stations sont situées dans le BVRO ou à moins de 75 km de distance. Pour plus de détails, consulter Gachon *et al.* (2018).

Nom	Période	Variables	Description	Unités	Fréquence	Source
21 stations	1963- 1980	Tmax Tmin	Température maximale Température minimale	°C °C	Journalier	ECCC
95 stations	1981- 2017	Tmoy PrcpTot	Température moyenne Précipitation totale	°C mm	moyen	EUU

Figure A.1 Cartographie des stations d'ECCC dont les données ont été utilisées pour le calcul des anomalies standardisées moyennes pour l'ensemble du BVRO. Les stations sont situées à l'intérieur du BVRO ou à moins de 75 km de distance.



#### ANNEXE B

## CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE (1981 - 2010) DES PRINCIPAUX INDICES ET VARIABLES DES MOIS DE MARS, AVRIL ET MAI AU SEIN DU BVRO

Figure B.1 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois de mars pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.



xxviii

Figure B.2 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois d'avril pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.











Figure B.3 Climatologie (1981 à 2010) des principaux indices et variables (Tmoy, PrcpTot, SWE et DimSWEtot, de gauche à droite, respectivement) du mois de mai pour l'ensemble du BVRO, calculée à partir des données DAYMET.











### ANNEXE C

# CARTOGRAPHIE DES TENDANCES DÉCENNALES DES INDICES ET VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES DANS LE BVRO

Figure C.1 Tendances par décennie calculées pour la période 1981 – 2017 des indices Tmoy, PrcpTot et SWE. Les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value ≤ 0,1) sont représentées spatialement à 1 km de résolution sur l'ensemble du BVRO et ont été calculées à partir des données DAYMET.



xxxii

### ANNEXE D

# TENDANCES DÉCENNALES DES DÉBITS ET DES NIVEAUX D'EAU À CARILLON SUR LES PÉRIODES DE 1963 À 2019 ET DE 1998 À 2017

Figure D.1 Tendances par décennies des débits et des niveaux d'eau (Qmoy, Qmin et Qmax, cf. Tableaux 2.3 et 2.6) des mois de novembre à mai pour la période de 1963 à 2019 (panneaux du haut) et de 1998 à 2017 (panneaux du bas). Seules les tendances significatives au seuil de 90 % (p-value  $\leq 0,1$ ) sont représentées.



Tendances par décennie (1963-2019) (p-value <= 0,1)





xxxiv

#### ANNEXE E

### MÉTÉOGRAMME QUOTIDIEN DU PRINTEMPS 2017 ÉTABLI AVEC LES DONNÉES DE LA STATION D'OBSERVATION D'ECCC À RIGAUD

Figure E.1 Météogramme quotidien du 1<sup>er</sup> novembre au 1<sup>er</sup> juin 2017 réalisé à partir des variables météorologiques journalières observées à la station de Rigaud d'ECCC. Le panneau du haut correspond aux températures maximales (en rouge), minimales (en bleu) et moyennes (en vert) quotidiennes. Le panneau du milieu représente les accumulations journalières totales de la précipitation liquide (en bleu) et solide (en vert). Le panneau du bas correspond à la quantité de neige au sol (en vert) telle que mesurée à la station (Source : Gachon *et al.*, 2018, p. 26)



#### ANNEXE F

## COMPARAISON DES ANOMALIES STANDARDISÉES MOYENNES À L'ÉCHELLE DU BVRO DES INDICES ET VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES DES MOIS DE MARS, AVRIL ET MAI POUR LES HUIT ANNÉES À PLUS FORT DÉBIT ENREGISTRÉ À CARILLON DEPUIS 1963 ET CALCULÉES À PARTIR DES DONNÉES DE STATION D'ECCC

Figure F.1 Histogrammes des anomalies standardisées moyennes à l'échelle du BVRO des indices et variables météorologiques des mois de mars (panneau du haut à gauche), d'avril (panneau du haut à droite) et de mai (panneau du bas), calculées à partir des données d'observation aux stations d'ECCC, pour les huit années à plus fort débit enregistré à Carillon depuis 1963.



xxxvi

#### ANNEXE G

# COMPARAISON DES ANOMALIES STANDARDISÉES MOYENNES À L'ÉCHELLE DU BVRO DES INDICES ET VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES CALCULÉES À PARTIR DES DONNÉES DAYMET POUR LES MOIS DE MARS, AVRIL ET MAI, DE 1981 À 2017

xxxvii







xxxviii



Figure G.2 Histogrammes des anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 à 2010) des indices météorologiques moyennés spatialement sur l'ensemble du BVRO du mois d'avril, de 1981 à 2017, calculées à partir des données sous forme de grille DAYMET.

xxxix



Figure G.3 Histogrammes des anomalies standardisées par rapport à la climatologie (1981 à 2010) des indices météorologiques moyennés spatialement sur l'ensemble du BVRO du mois de mai, de 1981 à 2017, calculées à partir des données sous forme de grille DAYMET.

#### ANNEXE H

### COMPARAISON DES DONNÉES D'OBSERVATION ET MODÉLISÉES DE L'EXTENSION GÉOGRAPHIQUE DE L'INONDATION DE 2017 À RIGAUD, EN DATE DU 6 MAI

Figure H.1 Extension géographique de l'inondation du lac des Deux-Montagnes à Rigaud le 6 mai 2017. La couche en bleu représente l'extension spatiale issue des données d'observation par satellite, corrigée à partir des données de topographie, et la couche jaune, superposée à la couche bleue, représente l'extension géographique obtenue par modélisation à partir des outils d'Arc Hydro.



#### ANNEXE I

## CARTOGRAPHIE DES VERSIONS DE DONNÉES DE DRAINAGE RELATIVES AUX POLYGONES DE SOL UTILISÉES DANS LE BVRO (V.2.2 ET V.3.2)

Figure I.1 Cartographie des versions de données géospatiales de la pédologie utilisées pour caractériser le BVRO. La portion en jaune représente la part du BVRO pour laquelle les polygones de sol de la version 2.2 ont été utilisés dans les analyses. Les données concernant le drainage étaient manquantes pour ce secteur dans la version plus récente. La portion en bleu représente la part du BVRO pour laquelle les polygones de sol de la version 3.2 ont été utilisés dans les analyses.



### ANNEXE J

# CARTOGRAPHIE DES INDICES SPATIAUX STANDARDISÉS MOYENS D'UTILISATION DU SOL, DE PENTE ET DE DRAINAGE POUR L'ENSEMBLE DES SBV DU BVRO

Figure J.1 Indices spatiaux standardisés moyens d'utilisation du sol (US) (panneau du haut à gauche), de pente (P) (panneau du haut à droite) et de drainage (Dr) (panneau du bas) pour chacun des SBV du BVRO. Plus l'indice est près de 1 (ou tend vers le rouge), plus celui-ci témoigne d'une contribution importante du secteur au ruissellement de surface en présence d'aléas météorologiques.



#### ANNEXE K

## CARTOGRAPHIE DES INDICES SPATIAUX STANDARDISÉS MOYENS DE L'INTENSITÉ DE L'ALÉA MÉTÉOROLOGIQUE ET DU NIVEAU DE RISQUE AU MOIS DE MARS, POUR L'ENSEMBLE DES SBV DU BVRO

Figure K.1 Indices spatiaux standardisés moyens IAM (panneau de gauche) et NR (panneau de droite) au mois de mars pour chacun des SBV du BVRO.



#### BIBLIOGRAPHIE

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013). Sols du Canada, produit dérivé - Spécification de contenu informationnel produite conformément à la norme ISO 19131. Ottawa : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2015). Utilisation des terres en 1990, 2000, 2010 – Spécifications de contenu informationnel produites conformément à la norme ISO 19131. Ottawa : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Révision : A.
- Ali, H. et al. (2021). Consistent large-scale response of hourly extreme precipitation to temperature, *Geophysical Research Letters*, 48, « s.p. ». https://doi.org/10.1029/2020GL090317
- Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N. (2012). *Hydrologie Cheminements de l'eau*, 2e éd. Presses Internationales Polytechnique, collection Cursus.
- Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec (AGRCQ) (2017). Guide sur la gestion des cours d'eau du Québec. Granby : Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec.
- Auld, H. & MacIver, D. (2007). Changing weather patterns, uncertainty and infrastructure risks: Emerging adaptation requirements. Toronto: Environnement Canada, occasional paper 9.
- Ballais, J.-L. *et al.* (2007). Hydrogéomorphologie et inondabilité, *Géographie physique et Quaternaire*, 61, 1, 75-84.
- Barrow, E., Maxwell, B. & Gachon, P. (2004). Climate Variability and Change in Canada : Past, Present and Future, in E. Barrow, B. Maxwell & P. Gachon (dir.) ACSD Science Assessment Series No. 2, Toronto : Meteorological Service of Canada, Environment Canada, p. 1-114.

- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, *Natural Hazards*, 37, 3, 315-329.
- Benyahya, L. et al. (2014). Frequency analysis of seasonal extreme precipitation in southern Quebec (Canada): an evaluation of regional climate model with respect to gridded observed datasets, *Hydrology Research*, 45, 1, 115-133. <u>http://dx.doi.org/10.2166/nh.2013.066</u>
- Berghuijs, W., Woods, R. & Hrachowitz, M. (2014). A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow, *Nature Climate Change*, 4, 5, 583-586.
- Biron, P., Boucher, E. et Taha, W. (2020). Comité expert visant à identifier des solutions porteuses pour la réduction de la vulnérabilité des risques liés à l'inondation par embâcles de glace sur la rivière Chaudière. (Rapport final). Québec: Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. <u>https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/rapport/rapport-chaudiere-comite-expert.pdf</u>
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1997). Process controls on regional flood frequency: Coefficient of variation and basin scale, *Water Resources Research*, 33, 12, 2967-2980.
- Blöschl, G. et al. (2007). At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows?, *Hydrological Processes*, 21, 1241-1247.
- Blöschl, G. et al. (2013). Runoff Prediction in Ungauged Basins, Synthesis across Processes, Places and Scales. New-York: Cambridge University Press.
- Boivin M., Maltais M., et Buffin-Bélanger, T. (2019). *Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière*. (Guide scientifique présenté au Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie et à la Fondation de la Faune du Québec). <u>http://recherche.uqac.ca/lerga/wp-content/uploads/sites/9/2019/03/Boivin-et-al.-2019.-Guide-dynamique-du-bois-en-riviere-UQAC-UQAR\_.pdf</u>
- Bonsal, B.R. *et al.* (2019). Évolution de la disponibilité de l'eau douce au Canada, inE. Bush & D.S. Lemmen (dir) *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa: gouvernement du Canada, p. 262-342.

- Boucher, I. (2010). La gestion durable des eaux de pluie : Guide des bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Québec: Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Direction générale des politiques, Unité ministérielle de recherche et de veille.
- Bourque, A. et Simonet, G. (2007). Québec, in D.S. Lemmen *et al.* (dir.) *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007*, Ottawa: Gouvernement du Canada, p. 171-226.
- Brown, R. D. & Braaten, R. O. (1998). Spatial and temporal variability of Canadian monthly snow depths, 1946–1995. *Atmosphere-Oceans*, 36, 1, 37-54.
- Bureau d'Assurances du Canada (BAC) (2015). La gestion financière du risque d'inondation, *Revue internationale : leçons apprises des programmes de gestion des inondations des pays du G8*, [En ligne]. (http://assets.ibc.ca/Documents/Natural%20Disasters/The\_Financial\_Managem ent\_of\_Flood\_Risk\_FR.pdf). Page consultée le 18 janvier 2021.
- Bureau d'Assurances du Canada (BAC) (2019) (Page consultée le 18 janvier 2021). *Inondations*, [En ligne]. (<u>https://bac-quebec.qc.ca/fr/enjeux-en-assurance-de-dommages/inondations/</u>).
- Bureau d'Assurances du Canada (BAC) et Fédération canadienne des municipalités (FCM) (2020) (Page consultée le 18 janvier 2021). *Le coût de l'adaptation aux changements climatiques à l'échelle locale Rapport final*, [En ligne]. (https://data.fcm.ca/documents/reports/investir-dans-avenir-du-canada-le-cout-de-adaptation-au-climat.pdf).
- Bush, E. *et al.* (2019). Comprendre les changements climatiques mondiaux observés, in E. Bush et D.S. Lemmen (dir) *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa: gouvernement du Canada, p. 24-73.
- Buttle, J. et al. (2016). Flood processes in Canada: Regional and special aspects, *Canadian Water Resources Journal*, 41, 7-30.
- Canada (2013). *Pédo-paysages du Canada (PPC), v.2.2/v.3.1 Carte à l'échelle 1:1 000 000*, [En ligne], Canada. (<u>https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/51e7677b-a8d0-4dc2-ad50-6b5e82cdeef6</u>). Page consultée le 17 janvier 2019.

- Canada (2014). *TERMIUM Plus*, [En ligne], Canada. (<u>http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=HYDROMETEOROLOGIE&index=alt&codom2nd\_wet=1%20-%20resultrecs</u>). Page consultée le 5 avril 2018.
- Canada (2017). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000 – Rigaud, Québec, [En ligne], Canada. (http://climat.meteo.gc.ca/climate\_normals/results\_f.html?stnID=5252&autofw d=1). Page consultée le 11 janvier 2018.
- Canada (2019). *Couverture des terres du Canada 2015*, [En ligne], Canada. (https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/4e615eae-b90c-420b-adee-2ca35896caf6). Page consultée le 15 février 2020.
- Cardona, O.D. et al. (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability, in C. B. Field et al. (dir.) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation - A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge: University Press, p. 65-108.
- Castonguay, S. (2007). The production of flood as natural catastrophe: Extreme events and the construction of vulnerability in the drainage basin of the St. Francis River (Quebec), mid-nineteenth to mid-twentieth century, *Environmental History*, 12, 820-844.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2006). *Révision des cotes de crues de la rivière des Prairies*. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec et Direction de l'expertise et de la gestion des barrages publics.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2019a). *Lignes directrices pour l'estimation des débits de crue sur le territoire québécois*, [En ligne], Québec. (<u>https://www.cehq.gouv.qc.ca/debits-crues/methodes-estimation.htm</u>). Page consultée le 8 octobre 2019.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (2019b). *Débits de crue aux stations hydrométriques du Québec*, [En ligne], Québec. (https://www.cehq.gouv.qc.ca/debits-crues/stations-hydrometriques.htm). Page consultée le 8 octobre 2019.

- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) & United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2020) (Page consultée le 18 janvier 2021). *Human cost of disasters – An overview of the last 20 years – 2000-2019*, [En ligne]. (https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Human%20Cost%20of% 20Disasters%202000-2019%20Report%20-%20UN%20Office%20for%20Disaster%20Risk%20Red uction.pdf).
- Cherian, K. C. (1941). A Bivariate Correlated Gamma Type Distribution Function, Journal of the Indian Mathematical Society, 5, 133-144.
- Cognard-Plancq, A.-L. et al. (2001). The role of forest cover on streamflow down Sub-Mediterranean Mountain watersheds: A modelling approach, *Journal of Hydrology*, 254, 229-243.
- Cohen, S. *et al.* (2019). Le contexte national et mondial des changements régionaux au Canada, in E. Bush et D.S. Lemmen (dir) *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa: gouvernement du Canada, p. 426-446.
- Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais (2018) (Page consultée le 18 janvier 2021). *Sommaire de la crue printanière 2017*, [En ligne]. (<u>http://ottawariver.ca/wp-content/uploads/2019/02/Sommaire-crue-printaniere-2017a.pdf</u>).
- Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais (2020a) (Page consultée le 15 mars 2020). *Le bassin versant de la rivière des Outaouais*, [En ligne]. (<u>http://rivieredesoutaouais.ca/renseignements/le-bassin-de-la-riviere-des-outaouais/</u>).
- Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais (2020b) (Page consultée le 15 mars 2020). *Rivière des Outaouais à Carillon*, [En ligne]. (http://rivieredesoutaouais.ca/renseignements/sommaire-chronologiqueniveaux-et-ecoulements/riviere-des-outaouais-a-carillon/).
- Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais (2020c) (Page consultée le 18 janvier 2021). Crue printanière 2019 – Questions et
*réponses*, [En ligne]. (http://ottawariver.ca/wp-content/uploads/2020/03/FAQ\_2019\_CPRROV.24oct.pdf).

- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) (2017). Portrait des inondations printanières de 2017 sur le territoire métropolitain, du cadre légal et des règles applicables en matière d'aménagement de développement du territoire pour les plaines inondables : Volets 1 et 2 du mandat sur les inondations printanières de 2017. Montréal : Commission de l'aménagement.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019) (Page consultée le 20 mars 2020). *C3S ERA5-Land reanalysis, Copernicus Climate Change Service*, [En ligne]. (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home).
- Dantec, G., Galibert, T. et Pipien, G. (2018). Retours d'expérience des inondations : Proposition d'un dispositif d'organisation et d'un guide méthodologique. Paris : République française, Ministère de la Transition écologique et solidaire, Rapport n°011553-01.
- Dauphiné, A. et Provitolo, D. (2013). Chapitre 1 Définir les notions de risque et de catastrophe in A. Dauphiné et D. Provitolo (dir.) *Risques et catastrophes Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Paris : Armand Colin, p. 14-47.
- Derksen, C. *et al.* (2019). Évolution de la neige, de la glace et du pergélisol à l'échelle du Canada, in E. Bush et D.S. Lemmen (dir) *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa: gouvernement du Canada, p. 195-260.
- Di Baldassarre, G. et al. (2013a). Socio-hydrology: conceptualizing human-flood interactions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3295-3303.
- Di Baldassarre, G. et al. (2013b). Towards understanding the dynamic behavior of floodplains as human-water systems, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3235-3244.
- Di Baldassarre, G. et al. (2015). Debates Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes, *Water Resources Research*, 51, 4770-4781.

- Direction de l'expertise hydrique (2018). Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Québec : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- Dunn, R. J. H., et al. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, 1-28.
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (2018). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010, [En ligne]. (https://climat.meteo.gc.ca/climate\_normals/results\_1981\_2010\_f.html?searchT ype=stnName&txtStationName=rigaud&searchMethod=contains&txtCentralLa tMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&st nID=5252&dispBack=1). Page consultée le 6 avril 2018.
- Etkin, D. et al. (2004). Évaluation des catastrophes et des dangers naturels au Canada
   *Rapport à l'intention des décideurs et des praticiens*. Ottawa, Sécurité publique et Protection civile Canada et Environnement Canada, Projet canadien d'évaluation des catastrophes et des dangers naturels.
- Farr, T.G. et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 45, 1-33.
- Ferguson, B. K. (1995). Storm-water infiltration for peak-flow control, Journal of Irrigation and drainage engineering, 121, 6, 463-466.
- Fohrer, N. et al. (2001). Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale, *Oceans and Atmosphere*, 26, 7, 577-582.
- Fortin, G. et al. (2020). Risques d'inondation et vulnérabilité : l'exemple du bassin versant de la rivière Kennebecasis, Nouveau-Brunswick, Canada. Idées d'Amériques, 15, 1-16. <u>https://doi.org/10.4000/ideas.7999</u>
- Freudiger, D. et al. (2014). Large-scale analysis of changing frequencies of rain-onsnow events with flood-generation potential, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 7, 2695-2709.

- Gachon, P. et al. (2005). A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Final Report. Montréal : Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada. 10.13140/RG.2.1.2404.5200
- Gachon, P. et al. (2018). Appréciation et traitement du risque Aléas géologiques et hydrométéorologiques dans le secteur de Rigaud-sur-le-Lac pour le chemin du Bas-de-la-Rivière à Rigaud. Rapport rédigé pour le compte de la ville de Rigaud. Montréal : Chaire sur les risques hydrométéorologiques dans le contexte des changements climatiques, Université du Québec à Montréal.
- Gachon, P. (2019). Leçons à tirer des inondations récentes : L'importance de l'intersectorialité, in F. Huot (dir.) L'état du Québec 2020, Montréal : Del Busso, p. 148-155.
- Généreux, M. et al. (2020) (Page consultée le 23 décembre 2020). Impacts des inondations sur la santé mentale des Québécois : pourquoi certains citoyens sont-ils plus affectés que d'autres, [En ligne]. (http://www.monclimatmasante.qc.ca/impacts-des-inondations-sur-la-santementale-des-quebecois).
- George, P. et Verger, F. (1970). *Dictionnaire de la géographie*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Groisman, P.Y. et al. (2004). Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations, *Journal of hydrometeorology*, 5, 64-85.
- Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (2019) (Page consultée le 18 janvier 2021). Causes et impacts des inondations passées dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, Renseignements historiques sur les inondations, Un rapport à la Commission mixte internationale, [En ligne]. (<u>https://ijc.org/sites/default/files/2020-03/9056-</u>CMI%20Rapport%20public%20FR-FINAL-HR.pdf).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2012). Résumé à l'intention des décideurs, in C.B. Field *et al.* (dir.) *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au*

*changement climatique - Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 1-20.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du* climat. Genève : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).
- Halimo, E.A. (2016). Méthode d'identification et de cartographie de l'occupation du sol à fine échelle par analyse d'images, mémoire de Master 2<sup>e</sup> année. Marne-la-Vallée : Université de Marne-la-Vallée, département de Sciences, Technologies, Santé.
- Harlin, J.M. (1984). Watershed morphometry and time to hydrograph peak, *Journal of Hydrology*, 67, 1-4, 141-154.
- Haylock, M. (2005). *Stardex*, [En ligne]. (<u>https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/</u>). Page consultée le 20 avril 2020.
- Held, I.M. & Soden, B. J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming, *Journal of Climate*, 19, 5686-5699.
- Hersbach, H. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis, *Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
- Hollis, G.E. (1975). The effects of urbanization on floods of different recurrence intervals, *Water Resources Research*, 11, 3, 431-435.
- Hu, G.-M. et al. (2017). Role of flood discharge in shaping stream geometry: Analysis of a small modern stream in the Uinta Basin, USA, *Journal of Paleogeography*, 6, 1, 84-95.
- Hubbard, E.F. et al. (1997). Temporal variability in the hydrological regimes of the United States, *IAHS-AISH Publication*, 246, 97-103.

- Hundecha, Y. & Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model, *Journal of Hydrology*, 292, 281-295.
- Institut canadien pour des choix climatiques. (2020) (Page consultée le 15 janvier 2021). La pointe de l'iceberg: composer avec les coûts connus et inconnus des changements climatiques au Canada, [En ligne]. (https://choixclimatiques.ca/wp-content/uploads/2020/12/COCC-Final-FRENCH-1209.pdf).
- Institut de la statistique du Québec (2019a). Analyse des territoires inondés en 2017 et en 2019 à l'aide des Comptes des terres du Québec méridional, [En ligne], Québec. (www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/environnement/comptes-terresinondations.pdf). Page consultée le 12 mars 2020.
- Institut de la statistique du Québec (2019b). Le bilan démographique du Québec, Édition 2019. Québec : Institut de la statistique du Québec.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) (2018). *Inondations Des catastrophes coûteuses*, [En ligne], Québec. (<u>http://www.monclimatmasante.qc.ca/inondations.aspx</u>). Page consultée le 20 février 2018.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). Summary for Policymakers, in V. Masson-Delmotte et al. (dir.) *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* In Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, in H.-O. Pörtner et al. (dir.) In Press.

- International Research Institute for Climate and Society (IRI) (2020) (Page consultée le 5 juillet 2020). *Climatologies and Standardized Anomalies*, [En ligne]. (https://iridl.ldeo.columbia.edu/dochelp/StatTutorial/Climatologies/index.html).
- Jacob-Rousseau, N. (2009). Géohistoire/géo-histoire : quelles méthodes pour quel récit?, *Géocarrefour*, 84, 4, 211-216.
- Kappes et al. (2012). The Multirisk Platform : The technical concept and application of a regional-scale multihazard exposure analysis tool, *Geomorphology*, 151, 152, 139-155.
- Khaliq, M.N. et al. (2009). Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers, *Journal of Hydrology*, 368, 117-130.
- Kite, G. W. (1993). Application of a land class hydrological model to climatic change, *Water Resources Research*, 29, 7, 2377-2384.
- Klein, C. & Zellmer, S. (2007). Mississippi River Stories: Lessons from a Century of Unnatural Disasters, *College of Law, Faculty Publications*, 60, 1471-1538.
- Knox, J. C. (2000). Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change, *Quaternary Science Reviews*, 19, 439-457.
- Koutsoyiannis, D. (2020). Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3899-3932.
- Kramer, R. J. & Soden, B. J. (2016). The Sensitivity of the Hydrological Cycle to Internal Climate Variability versus Anthropogenic Climate Change, *American Meteorological Society*, 29, 3661-3673.
- Lajoie, P. et Stobbe, P. (1951). Étude des sols des comtés de Soulanges et de Vaudreuil dans la province de Québec. Ottawa : Ministère fédéral de l'Agriculture.
- Lakind, J.S. et al. (2016). Exposure science in an age of rapidly changing climate: challenges and opportunities, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 26, 529-538.

- Lang *et al.* (1998). Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation : application au bassin du Guiers, *Ingénieries EAT*, 16, 3-13.
- Lang, M. et Claudet, R. (2005). Les échelles de gravité sur les inondations : réflexion nationale et exemple dans l'Hérault, *La Houille Blanche Revue internationale de l'eau*, 1, 52-59.
- Larocque, M. et Meyzonnat, G. (2015). *Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil-Soulanges*, rapport final. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère.
- Larousse (2018). Dictionnaire de français Larousse : condition. Paris : Éditions Larousse, [En ligne]. (http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/condition/18014?q=condition#17 888). Page consultée le 4 avril 2018.
- Lawford, R.G. et al. (1995). Hydrometeorological aspects of flood hazards in Canada, *Atmosphere-Ocean*, 33, 2, 303-328.
- Libiseller, C. & Grimvall, A. (2002). Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates, *Environmetrics*, 13, 1, 71-84.
- Loisel, J. et al. (2021). Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink, *Nature Climate Change*, 11, 70-77. <u>https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0</u>
- Mailhot, A., Bolduc, S. et Talbot, G. (2018). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km<sup>2</sup> et moins dans un contexte de changements climatiques, Rapport final, [En ligne], Québec. Transports, Mobilité durable et Électrification des transports et Fondsvert. (http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1220191.pdf).
- Manche, Y.M. (1997). Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles, *Revue de géographie alpine*, 85, 2, 49-62.

- Matheussen, B. et al. (2000). Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada), *Hydrological Processes*, 14, 867-885.
- Mayer-Jouanjean, I. et Bleau N. (2018). *Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées Rapport final*. Montréal: Ouranos.
- Mayhew, S. (2009). *Oxford dictionary of geography*. New York : Oxford University Press Inc.
- Merz, R. & Blöschl, G. (2008). Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, *Water Resources Research*, 44, 8, 1-17.
- Milly, P. et al. (2008). Climate change: Stationarity is dead: Whither water management?, *Science*, 319, 5863, 573-574.
- Mohamoud, Y. (2004). *Comparison of Hydrologic Responses at Different Watershed Scales*. Athens: National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Mudryk, L. R. et al. (2015). Characterization of Northern Hemisphere snow water equivalent datasets, 1981–2010, *Journal of Climate*, 28, 8037-8051.
- Municipalité régionale de comté de Vaudreuil-Soulanges (MRC-VS) (2004). *Schéma d'aménagement révisé*, [En ligne], Québec. (<u>https://mrcvs.ca/wp-content/uploads/2018/12/Pages-de-Schema-damenagement-revise-refondu-Notes-au-lecteur-et-table-des-matieres i.pdf</u>). Page consultée le 18 janvier 2021.
- Munoz, S. et al. (2018). Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering, *Nature*, 556, 7699, 95-98.
- Najafi, M.R., Francis, Z.W. & Gillett, N.P. (2016). Attribution of the spring snow cover extent decline in the Northern Hemisphere, Eurasia and North America to anthropogenic influence. *Climatic Change*, 136, 571-586.

- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2016) (Page consultée le 17 janvier 2021). *Shuttle Radar Topography Mission*, [En ligne]. (<u>https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm</u>).
- Nations Unies (1992) (Page consultée le 15 janvier 2020). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, [En ligne]. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf.
- O'Neill, B.C. et al. (2017). IPCC reasons for concern regarding climate change risks, *Nature climate change*, 7, 28-37.
- Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques (OQACC) (2016). *Développement d'indices liés à l'adaptation aux inondations au Québec*. Québec : Université Laval.
- Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques (OQACC) (2017). Développement d'indices de la préparation à l'adaptation dans les municipalités du Québec. Québec : Université Laval.
- Ogden, N.H. & Gachon, P. (2019). Climate change and infectious diseases: What can we expect?, *Canada Communicable Disease Report*, 45, 4, 76-80.
- ORNL DAAC (2021) (Page consultée le 18 janvier 2021). Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 2, [En ligne]. (https://daac.ornl.gov/DAYMET/guides/Daymet mosaics.html).
- Ouranos (2015). Vers l'adaptation Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec - Édition 2015. Montréal : Ouranos.
- Peterson, T.C. (2005). Climate change indices, WMO Bulletin, 54, 2, 83-86.
- Pielke, R.A., Mahmood, R., & McAlpine, C. (2016). Land's complex role in climate change, *Physics Today*, 69, 40-46.
- Planification d'urgence Canada (1974). *Rapport sur les crues printanières en 1974*. Ottawa : Planification d'urgence Canada.

- Pohlert, T., Hillebrand, G. & Breitung, V. (2011). Trends of persistent organic pollutants in the suspended matter of the River Rhine, *Hydrological Processes*, 25, 3803-3817.
- Poulin, M. et al. (2016). Inefficacy of wetland legislation for conserving Quebec wetlands as revealed by mapping of recent disturbances, *Wetlands Ecology and Management*, 24, 651-665.
- Québec (2021). Polygones d'étendue d'inondation dérivé d'image Radarsat-2, [En ligne], Québec. (<u>https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartographie-des-inondations-majeures-avril-mai-2017/resource/0cae6b80-4ebd-4b02-b6f4-b73317eef38e</u>). Page consultée le 18 janvier 2021.
- Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) (2010). *Répertoire des municipalités – Rigaud*, [En ligne], Québec. (<u>https://www.mamh.gouv.qc.ca/repertoire-des-</u> <u>municipalites/fiche/municipalite/71133/</u>). Page consultée le 10 octobre 2020.
- Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) (2020). Des solutions durables pour mieux protéger nos milieux de vie, Plan de protection du territoire face aux inondations. Québec : Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Québec. Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT) (2017). Rapport de consultation Déclaration d'une zone d'intervention spéciale sur le territoire de certaines municipalités locales affectées par les inondations survenues au printemps 2017, [En ligne], Québec. (https://www.mamot.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/ministere/inondations\_printanieres\_2017/rapport\_de\_consultation\_inondations2017.pdf). Page consultée le 27 avril 2018.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Luttle contre les changements climatiques (MDDELCC) (2014). Guide de gestion des eaux pluviales. Québec : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Luttle contre les changements climatiques.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015a). *Portrait sommaire*

*du bassin versant de la rivière des Outaouais*, [En ligne], Québec. (<u>http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/outaouais/portrait-sommaire.pdf</u>). Page consultée le 18 janvier 2017.

- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015b). *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*. Québec : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction des politiques de l'eau, Guide d'interprétation, 131.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) (2018). Normales climatiques 1981-2010 – Climat du Québec, [En ligne], Québec. (http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm). Page consultée le 15 janvier 2018.
- Québec. Ministère de l'Environnement (2004). *Gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et application*. Québec : Direction des politiques de l'eau.
- Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (2020a). Normales climatiques 1981 – 2010 – Climat du Québec, [En ligne], Québec. (<u>http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm</u>). Page consultée le 20 juin 2020.
- Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (2020b). Atlas hydroclimatique du Québec méridional, [En ligne], Québec. (<u>https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm</u>). Page consultée le 24 mai 2020.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2008a). Gestion des risques en sécurité civile. Québec : Ministère de la Sécurité publique.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2008b). *Concepts de base en sécurité civile*. Québec : Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2014). Politique québécoise de sécurité civile 2014-2024 : Vers une société québécoise plus résiliente aux catastrophes. Québec : Ministère de la Sécurité publique.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2016). *Caractéristiques des différents seuils d'inondation*, [En ligne], Québec. (https://geoegl.msp.gouv.qc.ca/adnv2/seuils\_inondation.php). Page consultée le 15 juin 2020.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2017). *Inondations du printemps* 2017 – Bilan + perspectives, [En ligne], Québec. (https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite\_civile/ inondation/retrospective\_bilan\_inondations2017.pdf). Page consultée le 6 avril 2018.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2018). *Plan d'action en matière de sécurité civile relatif aux inondations : Vers une société québécoise plus résiliente aux catastrophes*. Québec : Ministère de la Sécurité publique.
- Québec. Ministère de la Sécurité publique (MSP) (2019). *Inondations*, [En ligne], Québec. (<u>https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-</u> <u>civile/inondation.html</u>). Page consultée le 15 juillet 2019.
- Quilbé, R. et al. (2008). Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 101-110.
- Randolph, N. (2018). River Activism, « Levees-Only » and the Great Mississippi Flood of 1927, *Media and Communication*, 6, 1, 1-9.
- Ressources naturelles Canada (RNCan) (2018). *Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations, Version 2.0.* Ottawa : Sa Majesté la Reine du chef du Canada.
- Ressources naturelles Canada (RNCan) (2019). Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables, Version 1.0. Ottawa : Sa Majesté la Reine du chef du Canada.

- Ressources naturelles Canada (RNCan) (2020). *Inondations au Canada Spécifications de produit*, [En ligne], Canada. (<u>SGU\_EtendueDesInondations\_GuideDeProduit.pdf</u>). Page consultée le 15 janvier 2020.
- Ressources naturelles Canada (RNCan) et Sécurité publique Canada (SP Canada) (2017). *Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté, Version 1.0.* Ottawa : Sa Majesté la Reine du chef du Canada.
- Ressources naturelles Canada (RNCan) et Sécurité publique Canada (SP Canada) (2018). *Cadre fédéral de la cartographie des plaines inondables, Version 2.0.* Ottawa : Sa Majesté la Reine du chef du Canada.
- Ribeiro, G. (2012). La genèse de la géohistoire chez Fernand Braudel : un chapitre de l'histoire de la pensée géographique, *Anales de la géographie*, 686, 329-346.
- Roche, M. (1963). Hydrologie de surface. Paris : Gauthier-Villars.
- RStudio (2021). *RStudio*, [En ligne]. (<u>https://rstudio.com/products/rstudio/</u>). Page consultée le 12 janvier 2021.
- Saad, C. et al. (2015). A nested multivariate copula approach to hydrometeorological simulations of spring floods: the case of the Richelieu River (Québec, Canada) record flood, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 275-294.
- Saad, C. et al. (2016). The 2011 flood event in the Richelieu River basin: Causes, assessment and damages, *Canadian Water Resources Journal*, 41, 1-2, 129-138.
- Saint-Laurent, D. et Hähni, M. (2008). Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie : variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada), *Environnement Urbain*, 2, 50-72.
- Scarwell, H.-J. et Laganier R. (2004). Les excès hydrologiques : processus, rythmes et impacts anthropiques, in H.-J. Scarwell et R. Laganier (dir.) *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*, Villeneuve-d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion, p. 21-53.

- Sécurité publique Canada (SP Canada) (2019a). *The Canadian Disaster Database*, [En ligne], Canada. (<u>https://www.publicsafety.gc.ca/cnt/rsrcs/cndn-dsstr-dtbs/index-en.aspx</u>). Page consultée le 8 octobre 2019.
- Sécurité publique Canada (SP Canada) (2019b). Évaluation du Programme national d'atténuation des catastrophes. Ottawa : Sa Majesté la Reine du chef du Canada.
- Service de sécurité incendie de Montréal (2020). *Inondations 2019 : Événement et rétroaction, Rapport*. Montréal : Service de sécurité incendie de Montréal.
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things, *American Journal of Psychology*, 15, 1, 72-101.
- Statistique Canada (2016). Profil du recensement, Recensement de 2016, [En ligne], Canada. (<u>https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/details/page.cfm?Lang=F&Geo1=CSD&Code1=2471133&Geo2=CD& Code2=2471&SearchText=Rigaud&SearchType=Begins&SearchPR=01&B1= All&TABID=1&type=0). Page consultée le 10 octobre 2019.</u>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 11, 1117-1142.
- Thornton, P.E. et al. (1997). Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain, *Journal of Hydrology*, 190, 214-251.
- Thornton, P.E. et al. (2016). *Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 3.* Oak Ridge: ORNL DAAC.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) (2015). *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes 2015-2030*. Sendai : United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR).
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2019). *Global* Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Genève : United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR).

- Veyret, Y. et Reghezza, M. (2006). Vulnérabilité et risques : L'approche récente de la vulnérabilité, *Responsabilité & Environnement*, 43, 9-13.
- Ville de Rigaud (2017). *Règlement de remplacement relatif au plan d'urbanisme*, Québec : Sotar, Numéro 272-2010.
- Villet, O. (2016). Étude géohistorique des crues torrentielles dans le bassin-versant du Malnant, Haute-Savoie, mémoire de maîtrise. Lyon : Université Jean Moulin – Lyon III, Faculté des Lettres et Civilisations.
- Vincent, L. A. *et al.* (2015). Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes, *Journal of Climate*, 28, 4545-4560.
- Wald, A. & Wolfowitz, J. (1943). An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation, *Annual Mathematical Statistics*, 14, 378-388.
- Wan, H., Zhang, X. & Zwiers, F. (2018). Human influence on Canadian temperatures, *Climate Dynamics*, 52, 479-494.
- Wang, J.-W. et al. (2008). Towards a robust test on North America warming trend and precipitable water content increase, *Geophysic Research Letters*, 35, 1-5.
- Waskom, M. (2020). *Seaborn 0.10.1*, [En ligne]. (https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.boxplot.html). Page consultée le 12 juillet 2020.
- Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal* of Applied Mechanics, Transactions ASME, 18, 3, « s. p. ».
- Werner, B. & McNamara, D. (2007). Dynamics of coupled human-landscape systems, *Geomorphology*, 91, 393-407.
- White, G.F. (1945). *Human Adjustments to Floods*, paper no. 29. Chicago : University of Chicago, Department of Geography Research.
- Wilks, D.S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Second Edition, International Geophysics Series, 59, 2, « s. p. ».

- Working Group on Adaptation and Climate Resilience (2016) (Page consultée le 15 janvier 2021). Working Group on Adaptation and Climate Resilience, Final Report, [En ligne]. (<u>https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/cc/content/6/4/7/64778dd5</u>-e2d9-4930-be59-d6db7db5cbc0/wg report acr e v5.pdf).
- World Economic Forum (2018) (Page consultée le 18 janvier 2021). The *Global Risks Report* 2018, 13<sup>th</sup> Edition, [En ligne]. (http://www3.weforum.org/docs/WEF GRR18 Report.pdf).
- World Economic Forum (2019) (Page consultée le 18 janvier 2021). The Global Risks Report 2019, 14<sup>th</sup> Edition, [En ligne]. (http://www3.weforum.org/docs/WEF Global Risks Report 2019.pdf).
- World Economic Forum (2020) (Page consultée le 18 janvier 2021). The Global Risks Report 2020, 15<sup>th</sup> Edition, [En ligne]. (http://www3.weforum.org/docs/WEF Global Risk Report 2020.pdf).
- World Meteorological Organization (WMO) (2018) (Page consultée le 15 janvier 2021). Guidelines for NMHSs to contribute to Climate Risk Management, [En ligne]. (https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/documents/CRMGuidelinesvs16Febr uary-2018.pdf).
- Wuebbles, D.J. et al. (2017). Our globally changing climate, in D. J. Wuebbles et al. (dir.) Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, p. 35-72.
- Yue, S. & Wang, C.Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test, *Water Resources Research*, 38, 6, 1-7.
- Zadeh, S.M., Burn, D.H. & O'Brien, N. (2020). Detection of trends in flood magnitude and frequency in Canada, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 1-13.
- Zhang, X. et al. (2001). Trends in Canadian streamflow, *Water Resources* Research, 37, 987-998.

- Zhang, X., Zwiers, F.W. & Stott, P.A. (2006). Multimodel multisignal climate change detection at regional scale, *Journal of Climate*, 19, 4294-4307.
- Zhang, X. *et al.* (2019). Les changements de température et de précipitations pour le Canada, in E. Bush et D.S. Lemmen (dir.) *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa: gouvernement du Canada, p. 113-193.