

Évaluation de l'impact des changements climatiques sur le ruissellement des bassins versants urbains

par

Emilie BILODEAU

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 19 DÉCEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emilie Bilodeau, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Luc Martel, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Richard Arsenault, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Janie Masse-Dufresne, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 DÉCEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

C'est avec une sincère reconnaissance que je souhaite exprimer ma gratitude envers ceux qui ont joué un rôle central dans la réalisation de ce mémoire de maîtrise. Leur soutien constant et leurs encouragements ont constitué des piliers indispensables tout au long de mon parcours académique.

En premier lieu, mes directeurs, Jean-Luc Martel et Richard Arsenault, méritent un hommage particulier. Leurs conseils perspicaces et leur accompagnement attentionné ont été des catalyseurs essentiels de ma réussite. Leur disponibilité et leur dévouement ont fortement enrichi mon expérience de recherche. Leur contribution éclairée et leur soutien constant ont joué un rôle significatif dans l'élaboration de ce travail, faisant de leur collaboration une source constante d'inspiration. Merci de croire en moi depuis le début, parfois plus que je ne le fais moi-même, et de me pousser à m'épanouir dans ce domaine merveilleux. Mes remerciements s'étendent également à vous et à l'École de technologie supérieure pour le soutien financier sans lequel cette aventure n'aurait pas été possible.

Un chaleureux remerciement à ma famille, qui a été bien plus qu'une simple source de soutien moral. Leur générosité s'est manifestée de manière tangible en m'offrant gîte et couvert lors de mes séjours à l'école. Leur présence et leur appui indéfectible ont été essentiels tout au long de mon parcours académique. Je suis infiniment reconnaissante pour leur amour, leur écoute attentive et leur intérêt envers mon projet au fil du temps.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude envers mon conjoint, Maxime, et mon fils, Charles. Leur présence constante, leur compréhension infinie et leur croyance inébranlable en mes capacités ont été des sources d'inspiration quotidienne. Rien n'aurait été possible sans leur amour et leur soutien inconditionnel.

Merci du fond du cœur à tous ceux qui ont partagé cette aventure avec moi, m'encourageant à chaque étape de cette passionnante quête de connaissance.

Évaluation de l'impact des changements climatiques sur le ruissellement des bassins versants urbains

Emilie BILODEAU

RÉSUMÉ

Les systèmes de drainage en milieu urbain, déjà vulnérables à la détérioration en raison de leur vétusté, font face à des défis croissants liés aux changements climatiques, compromettant ainsi leur efficacité. Ce projet vise à élaborer une nouvelle méthodologie pour évaluer l'impact des changements climatiques sur le ruissellement urbain. Il repose sur la modélisation, à l'aide du logiciel SWMM, de bassins versants urbains synthétiques, auxquels sont appliquées des données de pluies provenant de différentes stations météorologiques, présentant diverses durées et fréquences.

Au total, 4 860 bassins versants aux caractéristiques variées ont été évalués en utilisant 30 séries temporelles de pluies, de durées et de fréquences différentes, pour 12 stations météorologiques du Québec en tenant compte du climat actuel et futur. Cela représente un total de 3 499 200 simulations SWMM qui ont ainsi été générées et analysées.

L'analyse des paramètres des pluies (intensité, durée et fréquence) a montré une augmentation du débit maximal dépassant le facteur de majoration des pluies, tandis que l'augmentation du volume de ruissellement avait une variation médiane équivalente au facteur de majoration. Les stations météorologiques du sud du Québec avec de grandes périodes de retour (100 ans) et de longues durées (24h) ont montré une plus grande variabilité des résultats quant au volume de ruissellement.

Une analyse de sensibilité (ANOVA) a entre autres permis de mettre en lumière l'influence significative de l'imperméabilité, de la superficie et de la pente sur le débit de pointe. En outre, elle a révélé que, pour l'ensemble des stations, l'imperméabilité était le paramètre le plus important en ce qui concerne le volume de ruissellement, exception faite de certaines stations où le type de sol jouait un rôle plus prépondérant.

Mots-clés : SWMM, ANOVA, modélisation, modèle hydrologique, changements climatiques, ruissellement, bassins versants urbains

Evaluation of the impact of climate change on runoff in urban watersheds

Emilie BILODEAU

ABSTRACT

Urban drainage systems, already vulnerable to deterioration due to their aging infrastructure, are facing increasing challenges related to climate change, compromising their effectiveness. This project aims to develop a new methodology to assess the impact of climate change on urban runoff. It relies on modeling, using the SWMM software, of synthetic urban watersheds subjected to rainfall data from various meteorological stations, with different durations and frequencies.

In total, 4,860 watersheds with diverse characteristics were evaluated using 30 different time series of rainfall, durations, and frequencies, for 12 meteorological stations in Québec, considering both current and future climates. This represents a total of 3,499,200 SWMM simulations that were generated and analyzed.

The analysis of rainfall parameters (intensity, frequency and duration) demonstrated an increase in peak flow exceeding the rainfall scaling factor, while the increase in runoff volume had a median variation equivalent to the rainfall scaling factor. Meteorological stations in southern Quebec, with long return periods (100 years) and durations (24 hours), showed greater variability in results regarding runoff volume.

A sensitivity analysis (ANOVA) highlighted the significant influence of impermeability, area, and slope on peak flow. Additionally, it revealed that, across all stations, impermeability was the most important parameter concerning runoff volume, with some exceptions where soil type played a more predominant role.

Keywords : SWMM, ANOVA, modeling, hydrological models, climate change, runoff, urban watersheds

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Précipitations.....	3
1.1.1 Courbes intensité-durée-fréquence (IDF)	4
1.1.2 Fréquence.....	6
1.1.3 Durée.....	6
1.1.4 Distribution temporelle.....	7
1.2 Changements climatiques	9
1.2.1 Scénarios de projection des changements climatiques	9
1.2.2 Méthodes de majoration des pluies extrêmes	11
1.3 Modélisation hydrologique.....	13
1.4 Études d'impact des changements climatiques.....	16
1.5 Analyse de sensibilité	18
1.6 Objectifs de recherche.....	22
CHAPITRE 2 EVALUATION OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON RUNOFF IN URBAN WATERSHEDS.....	23
2.1 Abstract.....	23
2.2 Introduction.....	24
2.3 Methodology.....	27
2.3.1 Input data	28
2.3.2 Climate change majoration method	29
2.3.3 Hydrological model	30
2.3.4 Synthetic watersheds characteristics.....	30
2.3.5 ANOVA sensitivity analysis.....	32
2.4 Results.....	33
2.4.1 Analysis of the influence of rainfall parameters	33
2.4.1.1 Rainfall intensity.....	34
2.4.1.2 Rainfall frequency.....	36
2.4.1.3 Rainfall duration	37
2.4.2 Analysis of the influence of watershed parameters	38
2.5 Discussion.....	44
2.5.1 Relationship between projected increase in rainfall and peak flow.....	44
2.5.2 Relationship between projected increase in rainfall and runoff volume...	46
2.5.3 Most important watershed characteristics for drainage infrastructure design	47
2.5.4 Limitations	48
2.6 Conclusion and recommendations	49

CHAPITRE 3	DISCUSSION	50
3.1	Analyse de l'influence des paramètres des pluies	50
3.2	Analyse de l'influence des paramètres des bassins versants	53
3.3	Résilience face aux changements climatiques	54
3.4	Limites de l'étude	55
CONCLUSION.....		57
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		58

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	ECCC information on selected weather stations28
Tableau 2.2	Ranges of values used for each watershed characteristics.....31
Tableau 2.3	Soil type classes and corresponding Horton parameters.....32

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Exemple de courbe IDF pour la station #702S006 située à l'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau à Montréal Tirée d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC, 2021)	5
Figure 1.2	Scénario de changements globaux du forçage radiatif Adaptée de Riahi et al. (2017)	10
Figure 1.3	Schéma du concept du modèle SWMM Adaptée de Rossman & Huber (2015).....	14
Figure 2.1	Median variation in peak flow (P) and runoff volume (V) between historical and increased rainfall to account for climate change, according to the meteorological station	33
Figure 2.2	Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events for current and future climate for each station	34
Figure 2.3	Multiple comparison of mean ranks of peak flow between stations.....	36
Figure 2.4	Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events considering and neglecting the impacts of climate change, for each rainfall frequency tested.....	37
Figure 2.5	Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events taking climate changes into account and those not taking them into account for each duration.....	38
Figure 2.6	Results of the ANOVA evaluating the sensitivity of peak flow with (blue) and without (orange) rainfall scaling due to climate change to watershed physiographic characteristics across different meteorological stations (identified with their station number on each subplot)	40
Figure 2.7	Results of the ANOVA evaluating the sensitivity of runoff volume with (blue) and without (orange) rainfall scaling due to climate change to watershed physiographic characteristics across different meteorological stations (identified with their station number on each subplot)	41
Figure 2.8	Results of the Kruskal-Wallis test on peak flow for current and future climate rainfall events	42

Figure 2.9	Hydrographs of the minimum, mean, and maximum values of watershed input parameters with the greatest impact on peak flow, with and without majoration to consider the influence of climate change for the Montreal station #702S006 with a 10-yr rainfall return period and 6h duration43
Figure 2.10	Rainfalls and infiltration in actual and future climate for stations #7040813 and #7060400, for a rainfall with a 2-yr frequency and a duration of 6h, and infiltration from soil class A.....45
Figure 3.1	Médiane de la variation du débit de pointe et du volume de ruissellement entre les pluies en climat actuel et futur51
Figure 3.2	Portion de la variance du volume de ruissellement expliquée par le paramètre du type de sol en climat actuel et en climat futur54

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMS	Annual Maximum Series
ANOVA	Analyse de la variance
ASCE	American Society of Civil Engineers
CSA	Association canadienne de normalisation
BRIC	Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
CPM	Convection Permitting Model
DEM	Digital Elevation Model
GCM	Modèles Climatiques Globaux
GES	Gaz à effet de serre
GEV	Generalized Extreme Value (loi d'extremum généralisée)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrological Modeling System
IDF	Intensité-durée-fréquence
JWMM	Journal of Water Management Modeling
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MEO	Ministère de l'Environnement de l'Ontario
PGO	Pratiques de gestion optimale
RCM	Modèles Climatiques Régionaux
RCP	Representative Concentration Pathways

XVIII

SSP	Shared Socio-economic Pathways
SWMM	Storm Water Management Model
SWMM5	Storm Water Management Model, version 5
USDA	United States Department of Agriculture
US EPA	United States Environmental Protection Agency
WEF	Water Environment Federation

INTRODUCTION

Les infrastructures de drainage sont essentielles à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain en visant. Elles visent à réduire les impacts futurs engendrés par le développement urbain. Les systèmes de gestion des eaux pluviales incluent le réseau mineur (infras de transport souterrain), le réseau majeur (réseau de transport de surface), ainsi que d'autres infrastructures servant à la rétention, au traitement et à l'infiltration de l'eau pluviale (Rivard, 2005).

Le Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes souligne que « 30 % de nos actifs linéaires (conduites principales, égouts, etc.) sont en état passable ou en mauvais état. » (Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (BRIC), 2019). Les infrastructures de drainage, déjà sujettes à la dégradation, font aujourd'hui face à des obstacles croissants notamment liés aux changements climatiques, exacerbant davantage leur vulnérabilité et mettant en péril leur fonctionnalité (Mailhot, Rivard, Duchesne, & Villeneuve, 2007). La défaillance de ces infrastructures peut se traduire par des conséquences graves, allant des inondations de surface jusqu'aux refoulements d'égouts, en passant par la perte d'infrastructures essentielles tel que des routes, des ponts où des ponceaux.

Dans ce contexte, les différents paliers de gouvernement canadien investissent conjointement chaque année des milliards de dollars dans le maintien, le renouvellement et la construction d'infrastructures (Gouvernement du Canada, 2023). L'objectif de ces investissements est de garantir une fiabilité maximale tout en minimisant à la fois les coûts des dommages futurs et les dépenses de construction actuelles (Kind, 2014 ; Merisalu, Sundell, & Rosén, 2021). Avec une durée de vie pouvant aller jusqu'à un siècle (BRIC, 2019), une conception tenant compte des changements climatiques devient donc essentielle pour éviter des catastrophes imprévues et assurer une résilience de notre environnement bâti.

En effet, les changements climatiques entraîneront une augmentation des précipitations extrêmes (rares et de courtes durées) (Seth Westra, Alexander, & Zwiers, 2013). Cela se traduira par des débits et des volumes de ruissellement considérablement accrus, imposant ainsi une pression croissante sur les infrastructures de drainage urbaines. Ces dernières, conçues en se basant sur des données de précipitations historiques, se retrouveront confrontées à un risque grandissant de dommages et de défaillances. L'augmentation d'inondations dépassant les conditions initiales de conception pourrait ainsi engendrer des contraintes supplémentaires sur ces infrastructures, en réduisant leur durée de vie prévue (Association canadienne de normalisation (CSA), 2019).

Ce projet vise à élaborer une nouvelle méthodologie pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les débits et les volumes de ruissellement de surface en milieu urbain. Cette méthodologie exploitera un nombre significatif de bassins versants synthétiques et de données de précipitations pour réaliser une analyse approfondie des différents paramètres pouvant influencer le ruissellement. Cette approche permettra d'analyser les caractéristiques des précipitations ayant le plus d'influence sur le ruissellement en période de changements climatiques et d'estimer le ruissellement dans divers types de bassins versants afin d'analyser leurs caractéristiques ayant le plus d'impact sur le ruissellement, notamment en contexte de changements climatiques. Il sera ainsi possible de dresser un portrait détaillé des sites les plus sensibles face au climat futur.

Ce mémoire se divise en trois chapitres, chacun dédié à une phase clé dans l'élaboration de la méthodologie. Le premier explore la littérature existante, mettant en lumière l'état de la science et le manque qui sera comblé par l'approche proposée. Dans le deuxième chapitre, le cœur de ce mémoire, un article scientifique soumis au *Journal of Water Management Modeling* (JWMM) est présenté. Ce chapitre englobe une analyse approfondie des données utilisées, la méthodologie élaborée, les résultats obtenus, ainsi que leur interprétation. Le troisième chapitre consiste en une discussion générale qui permet d'élargir les conclusions de l'article en y ajoutant des résultats complémentaires pour les étayer. Enfin, le dernier chapitre constitue la conclusion, offrant aux lecteurs une synthèse des points clés de cette étude.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présentera d'abord les différentes variables en jeu lors de la modélisation hydrologique de bassins versants urbains dans le but d'estimer le ruissellement engendré par des précipitations en climat futur. Il sera premièrement question de la principale variable météorologique impliquée dans le ruissellement : la précipitation. Les enjeux liés aux changements climatiques et les différentes méthodes mises en œuvre au Québec ainsi qu'ailleurs dans le monde pour s'y adapter seront ensuite abordés. La troisième section traitera des modèles hydrologiques existants ainsi que des paramètres physiographiques des bassins versants devant être modélisés. La quatrième section présentera la méthode d'analyse des données utilisée. Enfin, les principaux objectifs de la recherche seront exposés.

1.1 Précipitations

L'objectif de la modélisation hydrologique est de convertir les précipitations en ruissellement. La précipitation représente donc son paramètre d'entrée le plus crucial. Il existe divers types de précipitations, chacune avec des caractéristiques variées. Elles peuvent prendre la forme solide pour la neige ou liquide pour la pluie. Bien que la fonte des neiges puisse, dans certains cas, entraîner un ruissellement important, en milieu urbain, c'est généralement la pluie qui joue un rôle clé dans ce processus, générant les volumes et les débits de ruissellement les plus critiques. Plus spécifiquement, les pluies extrêmes sont celles étudiées lors de la conception des infrastructures de drainage urbain. Les pluies extrêmes sont associées à quatre principaux processus atmosphériques : les tempêtes synoptiques, les événements convectifs, les tempêtes tropicales et les processus régionaux orographiques (CSA, 2019), toutes ayant des échelles spatio-temporelles variant de l'ordre de quelques kilomètres (sous journaliers) à plusieurs centaines de kilomètres (journalier) (CSA, 2019). Il est donc important de tenir compte de ces échelles lors de la modélisation hydrologique afin de bien représenter ces processus ayant un caractère extrême.

1.1.1 Courbes intensité-durée-fréquence (IDF)

Lors de la conception d'infrastructures de drainage, les ingénieurs se basent sur des données de pluies historiques propres à la région, représentées sous forme de courbes *intensité-durée-fréquence* (IDF). Au Québec, les données proviennent des stations météorologiques d'*Environnement et Changement climatique Canada* (ECCC) et du *ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs* (MELCCFP).

Les pluies sont collectées quotidiennement sur une plage de 24 heures via des pluviomètres à un pas de temps de 5 minutes, puis regroupées en maximas journaliers, représentant les pluies maximales enregistrées dans la journée pour des durées entre 5 minutes et 24 heures (CSA 2019 ; Mailhot, Talbot, & Panthou, 2014).

Un enregistrement minimal de données sur plusieurs années est requis pour une analyse statistique représentative, avec une durée dépendante de la fréquence. La *loi sur la qualité de l'environnement* (LQE) stipule des fréquences minimales de 5 ans pour une fréquence de 2 ans ou moins et de 25 ans pour une fréquence de 100 ans (Gouvernement du Québec, 2023).

Une fois ces données recueillies, les maximas annuels sont ensuite déduits à partir des maximas journaliers. Une analyse de fréquence des extrêmes est effectuée à partir des maximas annuels afin de déterminer la fréquence des intensités pour chaque durée de pluie (Hogg, Carr, & Routledge, 1985). La méthode statistique recommandée est l'utilisation de la distribution des *valeurs extrêmes généralisées* (GEV) ou loi d'extrémum généralisée, en particulier sous la forme de la loi de Gumbel (CSA, 2019), également préconisée par l'ECCC. Les paramètres de régression de la distribution sont par la suite ajustés aux séries de maxima annuels de chaque durée de pluie grâce à la méthode des moments ou une autre méthode similaire, telle que la méthode du maximum de vraisemblance (CSA, 2019).

Les résultats sont finalement présentés sous forme graphique, communément appelée « courbes intensité-durée-fréquence », ou « courbes IDF ». Un exemple de courbe IDF produite par ECCC est présenté à la figure 1.1. Les courbes IDF sont tracées sur un graphique à échelle logarithmique, l'axe horizontal représente la durée de la pluie et l'axe vertical représente son intensité. Chaque courbe correspond à une fréquence, allant de 2 ans à 100 ans.

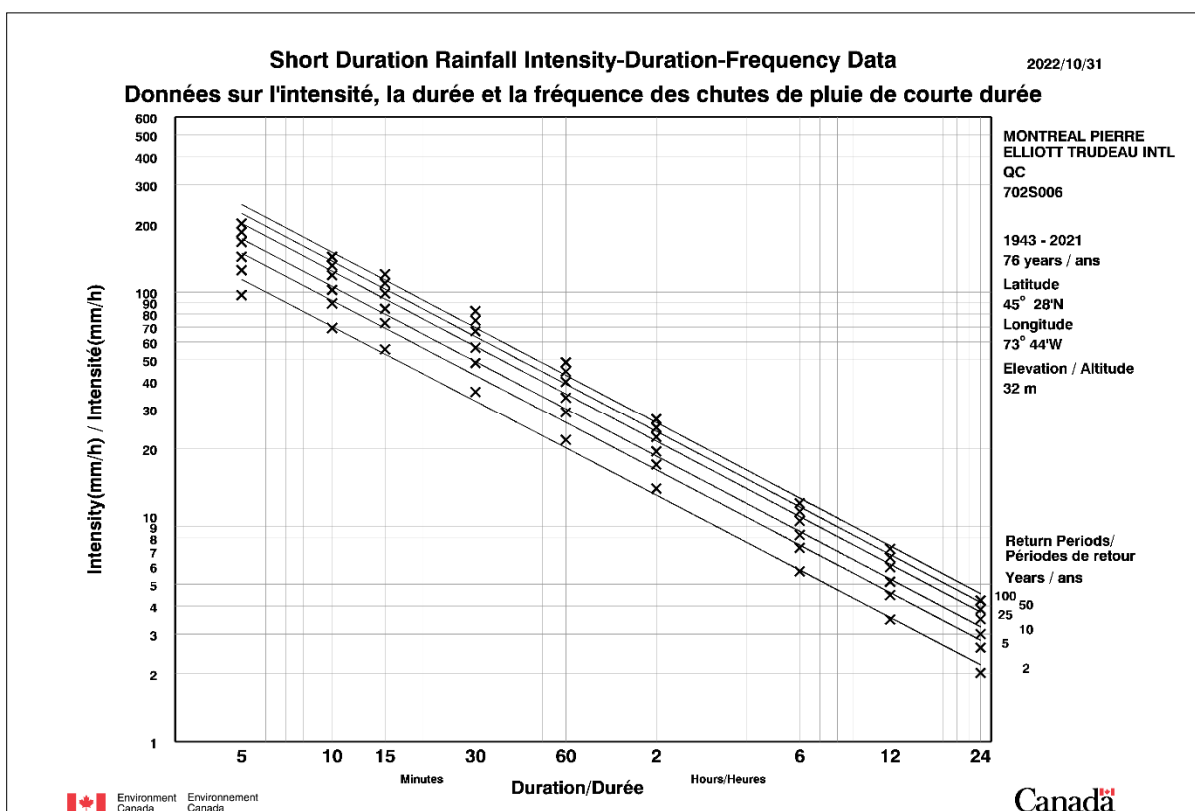


Figure 1.1 Exemple de courbe IDF pour la station #702S006 située à l'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau à Montréal
Tirée d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC, 2021)

Les courbes IDF permettent donc de déterminer l'intensité de la pluie de référence en fonction de la durée et de la fréquence choisie. Chaque pluviomètre a ses propres courbes IDF qui représentent sa région.

1.1.2 Fréquence

La fréquence, aussi appelée période de retour ou période de récurrence, est l'intervalle de temps moyen entre des pluies d'intensités égales ou supérieures à une intensité donnée (Hogg et al., 1985). La fréquence de conception est déterminée afin que le coût des dommages futurs, en cas de dépassement de la capacité de l'infrastructure, soit inférieur aux coûts de construction actuels d'une infrastructure de plus grande dimension (Martel, Brissette, Lucas-Picher, Troin, & Arsenault, 2021). Les fréquences couramment utilisées en conception d'infrastructures de drainage varient généralement entre 2 et 100 ans (CSA, 2019) selon le type d'ouvrage et les conséquences potentielles d'un dépassement.

La sélection de la fréquence de conception, basée sur des données historiques, est un choix crucial lors de la conception puisque plusieurs facteurs propres au projet doivent être pris en compte. Ce choix est généralement guidé par le respect des règles de l'Art. Par exemple, les fréquences entre 2 et 10 ans sont généralement utilisées pour dimensionner le réseau de transport souterrain des eaux pluviales (réseau mineur), tandis que celles entre 25 et 100 ans guident habituellement le dimensionnement du réseau de transport en surface (réseau majeur) et des ouvrages de rétention (Rivard, 2011).

1.1.3 Durée

La durée de la pluie est un autre paramètre important à déterminer lors de la conception d'infrastructures de drainage. Comme le montre la figure 1.1, plus la durée est courte, plus l'intensité de la pluie sera grande, et vice-versa.

Pour évaluer de manière précise le débit de pointe maximal à l'exutoire d'un bassin versant, il est essentiel de prendre en compte son temps de réponse hydrologique, soit son temps de concentration. Cela permet de déterminer la durée de pluie à considérer lors de la conception (American Society of Civil Engineers (ASCE) & Water Environment Federation (WEF), 1992).

Selon Packman et Kidd (1980), il est usuel d'estimer le ruissellement à partir de plusieurs durées de la pluie et de prendre celle donnant le ruissellement maximal. Les durées correspondantes au temps de réponse hydrologique des bassins versants urbains sont généralement entre 5 minutes et quelques heures (CSA, 2019).

1.1.4 Distribution temporelle

L'intensité de la pluie n'étant pas constante sur toute sa durée, il faut aussi établir sa distribution temporelle afin de bien la représenter. La répartition de l'intensité de la pluie dans le temps est appelée hyétogramme.

Les hyétogrammes de pluie se regroupent en deux groupes; les hyétogrammes réels et les hyétogrammes synthétiques. Les hyétogrammes réels reproduisent intégralement la distribution des pluies pour des orages déjà survenus. En revanche, les hyétogrammes synthétiques peuvent être dérivés d'analyses statistiques d'événements pluvieux historiques ou construits à partir de courbes IDF. Dans la première catégorie, on retrouve des exemples notables tels que la pluie SAE (Hogg, 1980, 1982) et les pluies NRCS (Cronshey & United States Department of Agriculture (USDA), 1986). La pluie de Chicago (Keifer & Chu, 1957) est, quant à elle, un exemple représentatif de la deuxième catégorie.

La pluie de Chicago a été développée par Keifer & Chu (1957). Ils ont établi ces équations à partir des courbes IDF. Elles permettent de déterminer la courbe de la pluie avant (1.1) et après (1.2) l'intensité de pointe.

$$i_{avant} = \frac{a \left[(1 - b) \cdot \left(\frac{t_{avant}}{r} \right)^b + c \right]}{\left[\left(\frac{t_{avant}}{r} \right)^b + c \right]^2} \quad (1.1)$$

$$i_{\text{après}} = \frac{a \left[(1 - b) \cdot \left(\frac{t_{\text{après}}}{1 - r} \right)^b + c \right]}{\left[\left(\frac{t_{\text{après}}}{1 - r} \right)^b + c \right]^2} \quad (1.2)$$

où i_{avant} et $i_{\text{après}}$ sont les intensités de la pluie avant et après la pointe, a , b et c sont les paramètres de régression des courbes IDF, t_{avant} et $t_{\text{après}}$ sont les temps avant et après la pointe et r est le facteur de symétrie.

Le facteur de symétrie r est la position de la pointe en fonction de la durée totale de la pluie. Il est déterminé à partir de l'analyse de données de pluies locales de différentes durées (Bandyopadnyay, 1972 ; Keifer & Chu, 1957). Au Canada, Watt, Chow, & Lathem (1986) ont utilisé un dérivé de la méthode des moments afin de déterminer les valeurs des facteurs de symétrie de différentes régions. Ces valeurs sont celles imposées dans la réglementation au Québec (Gouvernement du Québec, 2023).

Le hyétogramme de la pluie de Chicago a une forme très pointue et peut engendrer des débits de pointe trop importants. Le ministère de l'Environnement de l'Ontario (MEO, 1987) recommande donc un pas de temps minimal de 10 minutes pour pallier ce problème. C'est aussi ce qui est dicté dans la réglementation en vigueur au Québec (Gouvernement du Québec, 2023).

En résumé, la première phase de la modélisation implique la détermination de pluies de conception représentatives des conditions historiques de la région étudiée. Celles-ci sont déterminées en prenant en compte la durée et la fréquence de conception. Il est également nécessaire d'établir un hyétogramme de pluie pour obtenir des séries temporelles représentatives des pluies réelles. Chaque étape de cette phase initiale constitue une source potentielle d'incertitude.

1.2 Changements climatiques

Il y a un consensus scientifique au sujet du climat planétaire changeant rapidement, en grande partie en raison de l'activité humaine (Begum et al., 2022). Une augmentation de la concentration des *gaz à effet de serre* (GES) résultant des activités humaines depuis l'ère préindustrielle est observable, elle se traduit notamment par une hausse de la température moyenne à la surface de la Terre (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023).

Dans le contexte du réchauffement planétaire, une augmentation anticipée de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes est à prévoir (Douville et al., 2021). Ce phénomène découle, entre autres, de la capacité accrue de l'atmosphère à retenir davantage d'humidité à mesure que le réchauffement planétaire progresse (Myhre et al., 2019). Cette capacité est régie par l'équation de Clausius-Clapeyron qui établit à environ 7% d'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère par degré Celsius d'élévation de sa température (S. Westra et al., 2014).

1.2.1 Scénarios de projection des changements climatiques

Des scénarios évaluant les futurs changements climatiques ont été développés, se distinguant par leur niveau de forçage radiatif, défini comme la variation nette de l'énergie disponible dans le bilan radiatif du système climatique, pouvant résulter, entre autres, de modifications de la production de gaz à effet de serre (Bellouin, 2015). Cette variation peut notamment être causée par une variation de la production de GES d'origine anthropique (Enting, 2018).

Le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC; ou *Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC* en anglais), dans son cinquième rapport, a présenté les scénarios *Representative Concentration Pathways* (RCP), et dans son sixième rapport, a introduit les scénarios *Shared Socio-economic Pathways* (SSP), intégrant des considérations socio-économiques déterminantes dans la production de GES (Arias et al., 2021 ; Meinshausen et al., 2011).

La figure 1.2 montre les différents scénarios de forçage radiatif développés par l'IPCC jusqu'à maintenant.

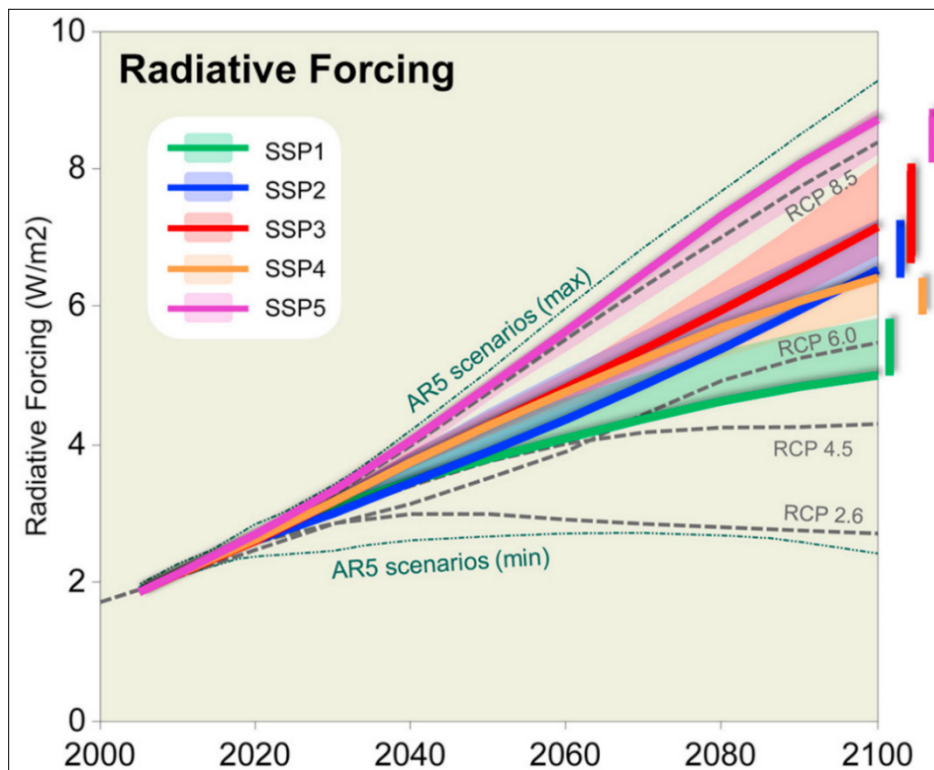


Figure 1.2 Scénario de changements globaux du forçage radiatif
Adaptée de Riahi et al. (2017)

Une fois les scénarios établis, ils sont utilisés afin d'alimenter des modèles climatiques et produire des projections climatiques selon le scénario retenu.

Les scénarios peuvent être qualifiés d'optimistes lorsque le niveau de forçage radiatif est minimal et pessimiste lorsque le niveau de forçage radiatif est maximal. Le scénario RCP8.5, par exemple, implique un apport supplémentaire de 8.5 W/m² au bilan radiatif de la Terre. Le choix du scénario approprié dépend du degré d'optimisme concernant les décisions que la société prendra en réponse aux changements climatiques projetés (Mailhot, Bolduc, Talbot, & Vaittinada, 2021).

1.2.2 Méthodes de majoration des pluies extrêmes

Une fois les pluies historiques déterminées au moyen des courbes IDF, comme énoncé à la section 1.1, plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour les adapter aux changements climatiques. Il est toutefois essentiel de souligner que ces méthodes d'adaptation comportent un degré élevé d'incertitude, tant au niveau des scénarios, des modèles climatiques, de la variabilité naturelle du climat, ou des scénarios d'émissions de GES (Martel et al., 2021).

La première méthode, la plus simple d'application, est la majoration constante en pourcentage simple. Il s'agit d'appliquer un facteur de majoration à l'intensité de pluie historique afin de déterminer l'intensité en climat futur. Cette méthode ne tient pas compte de la durée, de la région, ni de la fréquence (Gouvernement du Québec, 2023). Jusqu'au mois d'août 2023, il s'agissait de la méthode utilisée au Québec avec un facteur de majoration de 18% sur l'ensemble des courbes IDF (Gouvernement du Québec, 2023).

Une seconde méthode est la majoration adaptative en pourcentage. Cette méthode est semblable à la première à la différence que le facteur de majoration peut être modulé selon l'horizon temporel, la fréquence, la durée ou encore la région (Martel et al., 2021). Depuis août 2023, il s'agit de la méthode utilisée au Québec, avec un facteur de majoration modulé selon l'horizon temporel de conception et la durée de la pluie considérée (MELCCFP, 2023).

Une troisième méthode consiste à majorer l'intensité de pluie historique suivant un taux basé sur la relation Clausius-Clapeyron. Il s'agit simplement de multiplier la variation de la température projetée par ce taux afin d'obtenir le facteur de majoration à appliquer à l'intensité de pluie de référence. Cette méthode ne permet cependant pas de tenir compte de la fréquence ou de la durée de la pluie.

Une quatrième méthode est la mise à jour des courbes IDF historiques en utilisant des projections de modèles climatiques. Ces nouvelles courbes IDF peuvent être élaborées pour diverses plages temporelles et adaptées à différentes fréquences et durées. Il est en revanche souvent difficile d'obtenir des résultats fiables avec cette méthode puisque les courbes IDF sont principalement générées à partir de *modèles climatiques globaux* (GCM) qui sont caractérisés par une faible résolution spatio-temporelle (Martel et al., 2021). Il est également possible de réaliser des courbes IDF en climat futur au moyen de *modèles climatiques régionaux* (RCM) ou de *modèles climatiques permettant la convection* (CPM). Ces derniers, bien qu'ils soient plus performants, ne sont que rarement disponibles pour les régions étudiées.

La faiblesse de ces quatre méthodes réside dans leur incapacité à prendre en compte le consensus selon lequel l'augmentation de la pluie sera plus importante pour les pluies extrêmes de courte durée ou de plus grande fréquence (Martel et al., 2021).

Martel et al. (2021) ont donc proposé une nouvelle méthode pour pallier ce problème. Elle consiste à majorer les intensités de pluies historiques au moyen de GCM et de RCM. L'intensité de pluie historique pour une fréquence de 2 ans et une durée de 24 heures est premièrement déterminée au moyen des courbes IDF. La variation de la température projetée est ensuite estimée au moyen d'un GCM. Celle-ci permet par la suite de calculer, grâce à la relation Clausius-Clapeyron, l'intensité de pluie en climat futur pour une fréquence de 2 ans et une durée de 24 heures. Un RCM est par la suite utilisé afin d'établir des facteurs de majoration propre à la région étudiée pour les fréquences et les durées souhaitées. Ces facteurs sont ensuite appliqués à l'intensité de pluie en climat futur ayant une fréquence de 2 ans et une durée de 24 heures afin d'obtenir les intensités futures pour toutes les fréquences et toutes les durées souhaitées. Cette méthode permet ainsi de tenir compte à la fois de la région, des pluies de plus courtes durées ou de plus grande fréquence.

1.3 Modélisation hydrologique

La réponse hydrologique d'un bassin versant peut être linéaire ou non linéaire lors de la transformation pluie-débit (Rivard, 2011).

Une réponse hydrologique linéaire signifie que l'augmentation du ruissellement est proportionnelle à celle de la pluie. Leurs fréquences sont donc considérées comme les mêmes (Hogg et al., 1985). Par exemple, une pluie de fréquence de 100 ans engendrera un débit de 100 ans. Deux principales approches reposent sur cette hypothèse; la méthode rationnelle et les méthodes issues de la théorie de l'hydrogramme unitaire (Rivard, 2011).

Un modèle non linéaire considère quant à lui que le ruissellement ne varie pas au même taux que la pluie et que le débit maximal de ruissellement ne se produit pas au même moment que la pluie maximale (Rivard, 2011). Les principales approches utilisées sont les équations de Saint-Venant (Saint-Venant, 1871), les bassins linéaires disposés en cascades (Nash, 1957) et la méthode déterministe du réservoir non linéaire (Rossman & Huber, 2015).

Lors de l'évaluation des besoins futurs en infrastructures de drainage, il est crucial de tenir compte de l'urbanisation projetée et des impacts des changements climatiques futurs. Ces deux éléments joueront un rôle déterminant dans la quantité d'eau pluviale que ces infrastructures auront à gérer (CSA, 2019 ; Bronstert, Niehoff, & Bürger, 2002). Pour ce faire, l'utilisation de la modélisation hydrologique se révèle souvent comme l'outil principal considéré (Rivard, 2011). Elle permet de quantifier et de qualifier le ruissellement en conditions actuelles et futures pour des bassins versants complexes et ce, rapidement et à moindre coût (Rivard, 2005).

Les modèles hydrologiques, comme le modèle *Storm Water Management Model* (SWMM) développé par l'*United States Environmental Protection Agency* (US EPA), qui est l'un des plus utilisés en modélisation hydrologique urbaine, représentent les processus physiques en lien avec le cycle de l'eau. La figure 1.3 montre un schéma du concept du modèle SWMM.

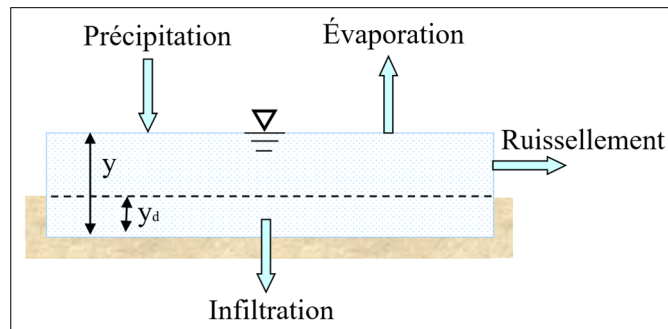


Figure 1.3 Schéma du concept du modèle SWMM
Adaptée de Rossman & Huber (2015)

Le modèle reçoit premièrement la pluie brute issue de séries temporelles de pluie. La portion de la surface du bassin versant qui est imperméable va transformer cette pluie brute en ruissellement ou pluie nette alors que la portion perméable va en infiltrer une partie. Le modèle peut aussi considérer le processus d'évaporation. SWMM est un modèle déterministe discrétisé à chaque pas de temps. Chaque processus est donc calculé à chaque pas de temps et permet de simuler l'évolution de chaque variable dans le temps (Rossman & Huber, 2015). Ceux-ci dépendent des paramètres des bassins versants. On compte parmi les plus importants l'aire, la pente, l'imperméabilité, la rugosité des surfaces perméables et imperméables ainsi que le modèle d'infiltration.

Le processus d'évaluation du ruissellement dans un bassin versant urbain sous des conditions climatiques futures implique plusieurs étapes. Tout d'abord, un modèle hydrologique est créé en se basant sur les conditions existantes du bassin versant. Ensuite, ce modèle est évalué au moyen de données de pluies historiques afin de définir le ruissellement en conditions actuelles. Une fois que le modèle représente bien ces conditions, il peut être ajusté pour tenir compte des projections d'urbanisation futures. Enfin, des simulations sont effectuées en utilisant des données de pluies majorées pour tenir compte des changements climatiques prévus (Rivard, 2005).

Il en résulte une estimation des débits et des volumes de ruissellement projetés à l'exutoire du bassin versant (Rossman & Simon, 2022). Ces résultats sont essentiels pour élaborer des stratégies d'adaptation aux changements climatiques en matière de gestion du transport et du stockage des eaux pluviales. La modélisation pose cependant plusieurs défis, particulièrement lors de l'évaluation de bassins versants urbains.

Les bassins versants urbains, généralement de petite taille, ont un temps de réponse hydrologique court. Ainsi, il est impératif de mener l'analyse du ruissellement à un pas de temps sous-journalier afin de refléter ses variations avec précision (Mailhot et al., 2021). Les séries de données d'entrées du modèle telles que les pluies doivent donc elles aussi être enregistrées à un pas de temps sous-journalier. Concernant les données de pluies historiques, elles doivent de plus avoir été recueillies à une station météorologique suffisamment près du bassin versant pour fournir des résultats représentatifs (CSA, 2019).

L'évaluation des caractéristiques physiques des bassins versants est également sujette à certaines incertitudes. Bien que les bassins soient subdivisés en sous-bassins aux caractéristiques physiques homogènes, il est rare qu'ils présentent une homogénéité totale sur toute leur étendue. Par conséquent, il est souvent nécessaire d'utiliser des valeurs moyennes pour représenter les diverses caractéristiques physiques de ces bassins par exemple pour la pente ou les caractéristiques du sol.

Développer un modèle hydrologique représentatif des conditions réelles d'un petit bassin versant urbain représente donc un défi de taille. Il faut en plus ajouter à cela les incertitudes liées aux changements climatiques. Toutes ces contraintes peuvent entraîner des conséquences telles qu'un sous-dimensionnement ou un surdimensionnement des ouvrages, ce qui pourrait engendrer des coûts supplémentaires inutiles ou des dommages inattendus pouvant parfois s'avérer importants.

1.4 Études d'impact des changements climatiques

Plusieurs études sur l'impact projeté des changements climatiques ont été menées au fil des ans. La revue de celles-ci a permis de faire ressortir différents modèles hydrologiques utilisés dans la modélisation de bassins versants urbains.

Le modèle *Hydrologic Engineering Center – Hydrological Modeling System* (HEC-HMS) a été utilisé en modélisation urbaine. Il a été conçu pour simuler le ruissellement d'un bassin versant en utilisant des données physiographiques et météorologiques (Bartles et al., 2022).

Markus, Wuebbles, Liang, Hayhoe, & Kristovich (2012) ont évalué l'impact des changements climatiques dans six bassins versants en banlieue de Chicago au nord-est de l'Illinois. Ils ont montré qu'en raison de la relation non linéaire entre les pluies et le ruissellement, une certaine variation dans les pluies entraînait une variation de plus grande amplitude du ruissellement. Ils ont aussi décelé une hétérogénéité régionale quant à la réponse des bassins versants face aux changements climatiques.

Un plus grand nombre d'études porte sur le modèle de simulation SWMM de l'US EPA lorsqu'il est question de l'évaluation des impacts de l'urbanisation et des changements climatiques de bassins versants urbains.

Alamdari, Claggett, Sample, Easton, & Nayeb Yazdi (2022), Alamdari, Sample, Ross, & Easton (2020) et Alamdari, Sample, Steinberg, Ross, & Easton (2017) ont utilisé SWMM pour modéliser le bassin versant urbain Difficult Run à Fairfax en Virginie afin d'évaluer l'impact des changements climatiques et de l'urbanisation sur la quantité et la qualité de l'eau dans le futur. Leurs études ont montré que l'effet combiné de l'urbanisation et des changements climatiques augmenterait le ruissellement ainsi que les charges polluantes dans le futur et que des mesures devaient être mises en place afin de protéger les milieux récepteurs sensibles.

Mitsova (2014) a utilisé SWMM afin de réaliser une analyse de sensibilité sur une partie du bassin versant de la rivière East Fork Little Miami en Ohio et a évalué un total de dix scénarios. Ces scénarios combinaient des variations des projections climatiques, d'imperméabilité des sols et de différents niveaux d'utilisation de *pratiques de gestion optimale* (PGO) tels que les jardins de pluie, les bassins d'infiltration, les revêtements poreux, etc. Ils ont ainsi montré que l'utilisation de PGO pouvait contrer l'augmentation de l'imperméabilité des sols engendrée par l'urbanisation croissante en favorisant l'infiltration.

Mitsova (2018) a modélisé le bassin versant de Gowan dans la vallée de Las Vegas, au Nevada à l'aide de SWMM. Ils ont pu montrer, qu'utilisés seuls ou conjointement, l'ajout de pavé perméable et de toits verts représentait une solution efficace pour atténuer le ruissellement supplémentaire engendré par les changements climatiques.

Wu, Thompson, Kolka, Franz, & Stewart (2013) ont évalué cinq bassins versants dans le centre de l'IOWA ayant des taux d'imperméabilisation différents sur lesquels ils ont appliqué trois scénarios combinant l'effet des changements climatiques et du changement d'occupation des terres. Ils ont montré que ces facteurs ont de grands impacts sur l'hydrologie des rivières urbaines particulièrement sur la qualité de l'eau et sur les débits de pointe.

Zahmatkesh, Karamouz, Goharian, & Burian (2015) et Zahmatkesh, Karamouz, Goharian, Burian, & Tavakol-Davani (2014) ont montré que l'augmentation des pluies en raison des changements climatiques dans le bassin versant de la Bronx river à New York City augmenterait les débits et les volumes de ruissellement. Ils ont aussi effectué une analyse de fréquence qui a montré que la fréquence des événements extrêmes augmenterait de manière considérable en climat futur. Ils ont en plus développé un indice de sensibilité du bassin versant afin d'en évaluer ses caractéristiques les plus critiques. Il s'est révélé que la pente était le paramètre ayant le plus d'impact sur le ruissellement de ce bassin versant.

Une étude de Nguyen (2013) ayant pour objectif d'évaluer une méthode de réduction d'échelle statistique pour estimer l'impact des changements climatiques sur les pluies de conception a eu recours à 36 bassins versants synthétiques dont il a fait varier l'aire, la forme et l'imperméabilité à l'aide du modèle SWMM afin d'évaluer l'impact des bassins versants sur le ruissellement. L'étude a montré les mêmes tendances pour tous les bassins versants étudiés.

1.5 Analyse de sensibilité

Les analyses rapportées dans la section 1.4, bien que pertinentes, ont leurs limites. En effet, elles ont été conduites sur un échantillon restreint de bassins versants locaux. Chacun de ses bassins versants a des caractéristiques variées et une généralisation des résultats de ces études est donc difficile sans introduire une part significative d'incertitude dans leurs conclusions. Comprendre de manière approfondie les facteurs influençant l'hydrologie des bassins versants urbains en contexte de changements climatiques est tout de même nécessaire et l'analyse de sensibilité peut répondre à ce besoin.

L'objectif de l'analyse de sensibilité est d'expliquer comment un paramètre d'entrée influence la sortie d'un modèle (Bucci, 2021). Ces variations peuvent être examinées à des échelles locales et globales. C'est l'analyse de sensibilité globale qui permet de mesurer l'influence de la variation des paramètres d'entrée et de leurs interactions sur la sortie du modèle. Trois catégories de méthodes d'analyse de sensibilité globale existent; le criblage, l'établissement de mesures d'importance et l'exploration du modèle (Bucci, 2021). Celle d'intérêt dans le cas présent est l'établissement des mesures d'importance.

L'une des analyses de la sensibilité globale permettant d'établir des mesures d'importance souvent utilisées en hydrologie est l'*analyse de la variance* (ANOVA). Elle a pour objectif de déterminer la distribution de la variance totale observée à la sortie d'un modèle entre ses variables d'entrées (Aryal, Shrestha, & Babel, 2019).

La première étape de l'ANOVA consiste à calculer la dispersion totale des données avec l'équation (1.3) qui est la somme des carrés totaux.

$$SCT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^{n_{ij}} (y_{ijk} - \bar{y} \dots)^2 \quad (1.3)$$

où a et b sont les nombres de modalités des variables A et B, i est l'indice qui va de 1 à a , j est l'indice qui va de 1 à b , n_{ij} est le nombre d'observations de l'interaction entre les modalités i et j , k est l'indice qui va de 1 à n_{ij} , y_{ijk} est l'observation k de l'interaction entre les modalités i et j et $\bar{y} \dots$ est la moyenne globale de la réponse étudiée.

Il faut ensuite calculer la dispersion des variables A et B (équations (1.4) et (1.5)), la dispersion de l'interaction entre les variables A et B (équation (1.6)) ainsi que la dispersion imputable aux résidus (équation (1.7)).

$$SCA = bn \sum (\bar{y}_{i.} - \bar{y} \dots)^2 \quad (1.4)$$

$$SCB = an \sum (\bar{y}_{.j} - \bar{y} \dots)^2 \quad (1.5)$$

$$SCAB = n \sum (\bar{y}_{ij} - \bar{y} \dots)^2 - SCA - SCB \quad (1.6)$$

$$SCR = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2 \quad (1.7)$$

où n est le nombre d'observations par modalité, $\bar{y}_{i.}$ et $\bar{y}_{.j}$ sont les moyennes marginales des modalités produites par les variables A et B, \bar{y}_{ij} est la moyenne de chaque cellule (i, j) .

Finalement, il ne reste qu'à calculer la variance des variables A et B (équations (1.8) et (1.9)), la variance d'interaction (équation (1.10)) et la variance résiduelle (équation (1.11)).

$$VA = \frac{SCA}{a - 1} \quad (1.8)$$

$$VB = \frac{SCB}{b - 1} \quad (1.9)$$

$$VAB = \frac{SCAB}{(a - 1)(b - 1)} \quad (1.10)$$

$$VR = \frac{SCR}{ab(n - 1)} \quad (1.11)$$

L'ANOVA peut avoir plusieurs objectifs en modélisation hydrologique tels que l'évaluation de l'incertitude des modèles climatiques ou hydrologiques, la détermination de l'importance relative des variables d'entrée, ou encore l'optimisation de la performance de ces modèles. Son utilité s'étend à des contextes variés, de l'estimation des projections climatiques à l'exploration de la qualité et de la quantité du ruissellement, et même à l'évaluation des solutions d'adaptation face aux changements climatiques.

Yin et al. (2020) ont, par exemple, utilisé l'ANOVA pour déterminer la résolution du *modèle numérique de terrain* (DEM) à appliquer dans le cadre du modèle hydrologique CADDIES 2D, tout en évaluant les différences entre les modèles MIKE URBAN et SWMM.

Les facteurs de conception et environnementaux influençant la performance des toits verts ont également été soumis à une analyse de la variance par Li & Liu (2023). De même, Mobilia, D'Ambrosio, Claverie, & Longobardi (2021) ont étudié le comportement d'un toit vert pour déterminer le facteur déterminant dans la capacité de rétention du substrat pendant les périodes de pluie.

Wang, Huang, Chang, & Yu (2023) ont employé l'ANOVA pour mieux comprendre l'hétérogénéité spatiale de la pollution par le ruissellement des routes dans 14 villes de Chine. La variabilité spatio-temporelle du réservoir Xili, réservoir d'eau potable de la ville de Shenzhen en Chine, a quant à lui été évaluée par Yunlong et al. (2017). Ils ont pu ainsi déterminer que le mois de l'année, plutôt que le site, exerçait une influence plus marquée sur la qualité de l'eau.

Lawrence (2020) et Meresa, Murphy, Fealy, & Golian (2021) ont recouru à l'ANOVA pour mieux comprendre les variables engendrant de l'incertitude dans les projections d'inondation et leurs interactions mutuelles. Köplin, Schädler, Viviroli, & Weingartner (2013) ont établi l'importance des paramètres influençant le ruissellement dans différents scénarios d'occupation des sols et de couverture forestière grâce à l'ANOVA.

Les différentes sources d'incertitude dans les projections hydrologiques ont également été étudiées via l'ANOVA. Finger, Heinrich, Gobiet, & Bauder (2012) l'ont fait dans le but de mieux anticiper la production hydroélectrique, tandis qu'Addor et al. (2014) et Bosshard et al. (2013) l'ont utilisé afin de tenter de mieux prédire les débits futurs des rivières.

L'incertitude des projections climatiques produites par des GCM et des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP a été évaluée, entre autres, par Cai, Liu, Zhu, Zhao, & Zhang (2022), Gao, Booij, & Xu (2020), Millionshchikova (2019), Morim et al. (2019), Senatore et al. (2022), Shi et al. (2022) et Yip, Ferro, Stephenson, & Hawkins (2011). Yuan, Thorarinsdottir, Beldring, Wong, & Xu (2023) ont, quant à eux, étudié la variabilité interne du climat et son importance dans la détermination de la variabilité globale du climat.

L'ensemble de ces études souligne la polyvalence de l'ANOVA en tant qu'outil d'analyse statistique dans le domaine de la modélisation. Ces applications variées mettent en lumière la capacité de l'ANOVA à traiter des questions diverses qui en font un outil analytique de choix dans le domaine de la recherche environnementale.

1.6 Objectifs de recherche

L'accroissement des pluies, comme prévu selon divers scénarios de changements climatiques, est de mieux en mieux documenté (Arias et al., 2021). Bien que l'occurrence réelle d'un scénario spécifique demeure indéterminée, plusieurs méthodes d'adaptation aux changements climatiques ont été avancées pour faire face aux variations prévues des pluies.

La question centrale concerne désormais l'impact de l'augmentation des pluies sur le ruissellement des petits bassins versants urbains. Existe-t-il un lien entre les pluies actuelles et le ruissellement anticipé? Les débits de pointe et les volumes de ruissellement réagiront-ils de manière uniforme à cette augmentation? Le ruissellement variera-t-il en fonction de la région, de la fréquence ou de la durée des pluies? Quels paramètres des bassins versants seront plus sensibles à ces changements climatiques?

Bien que la modélisation hydrologique soit une avenue envisageable pour aborder ces questions, sa mise en œuvre en l'absence de données de terrain pose un défi majeur. De plus, de multiples modèles seraient nécessaires pour tirer des conclusions sur certaines de ces questions.

L'objectif de ce projet de recherche est de créer une nouvelle méthodologie pour évaluer le ruissellement dans un contexte de changements climatiques ainsi que l'impact des caractéristiques des bassins versants sur celui-ci en utilisant un nombre important de bassins versants synthétiques. Cette approche permettra d'estimer le ruissellement de bassins versants à partir de n'importe quelle station météorologique. En utilisant un grand nombre de bassins versants aux caractéristiques variées, il sera possible d'évaluer le ruissellement pour différents types de bassins versants. Il sera de plus possible d'évaluer les caractéristiques des bassins versants ayant le plus d'impact sur le ruissellement, en particulier dans un contexte de changements climatiques, et dresser un portrait des lieux les plus vulnérables en climat futur.

CHAPITRE 2

EVALUATION OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON RUNOFF IN URBAN WATERSHEDS

Émilie Bilodeau^a, Jean-Luc Martel^b, Richard Arsenault^c, François Brissette^d

^{a,b,c,d} Département de construction Engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, Canada, H3C 1K3

Paper submitted for publication in “Journal of water management modeling”,
Octobre 2023

2.1 Abstract

Existing drainage systems, which were already susceptible to degradation, are now facing even greater challenges due to the impacts of climate change. This could compromise their overall effectiveness. This project aims to develop a new methodology for assessing the impacts of climate change on urban runoff. The proposed methodology relies on modeling synthetic urban watersheds using the *United States Environmental Protection Agency's (US EPA) Storm Water Management Model (SWMM)* software, and the use of rainfall data from different meteorological stations with a variety of durations and frequencies.

Results showed that using a simple increase of 18% in rainfall to estimate the impacts of climate change led to larger relative increases in peak flow, with median variation of 24.7%, and median variations in runoff volumes of 18.0% and a result dispersion depending on the station, frequency, and duration of rainfall. This suggests that the impacts of climate change on extreme rainfall events cannot simply be translated into similar increases for peak flow and runoff volumes.

Through a sensitivity analysis (ANOVA), it was found that among all the criteria tested, impermeability, area, and slope have a greater influence on peak flow changes under a future climate. Additionally, impermeability emerged as the most critical parameter affecting runoff volume across all stations, although certain stations exhibited variations where soil type played a more prominent role. This study reiterates the importance of reducing soil impermeability in the urban water cycle, notably through the use of blue-green infrastructures, to mitigate the impact of climate change on existing urban drainage systems.

2.2 Introduction

The Canadian Infrastructure Report Card (CRIC, 2019) has revealed a concerning statistic: around 30% of the country's municipal water assets, such as sewers and culverts, are in very poor, poor or fair condition. Moreover, drainage infrastructures, which were already susceptible to degradation, are now facing increasing stress related to the impacts of climate change. The current consensus suggests that the increase in anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions will lead to a rise in the global average temperature (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). This global warming will result in various impacts, notably an increase in the frequency and intensity of extreme precipitation events (Douville et al., 2021). This situation could put the drainage infrastructure functionality at risk (Mailhot et al., 2007). Such vulnerability can lead to severe consequences, ranging from surface floods to sewage backups. To address these issues, Canadian governments invest billions of dollars annually in infrastructure maintenance to ensure reliability while minimizing future costs (Government of Canada, 2023 ; Kind, 2014 ; Merisalu et al., 2021).

When assessing the needs of drainage infrastructure, it is imperative to consider projected urbanization and future climate change (Bronstert et al., 2002 ; Canadian Standards Association (CSA), 2019). Hydrological modeling can play a crucial role as it allows for a better understanding of how a watershed responds to precipitation and provides an efficient and cost-effective means of estimating both current and future runoff patterns.

Modeling runoff under future climate conditions requires the use of historical precipitation data adjusted to account for the impact of climate change. The results of these models provide estimates of both peak flows and runoff volumes, which are essential for developing strategies to adapt to climate change in stormwater management (Rivard, 2005).

Hydrological modeling, however, presents significant challenges, particularly when dealing with small urban watersheds. In such cases, the use of sub-daily time steps is essential to accurately capture the fluctuations in runoff (Mailhot et al., 2021). The presence of uncertainties related to the physical characteristics of watersheds and climate change can potentially lead to costly consequences.

Several studies have explored the projected impacts of climate change on peak flow and runoff volume over the years using hydrological modeling. Markus et al. (2012) conducted an assessment of climate change impacts in six suburban watersheds located near Chicago using the *Hydrologic Engineering Center – Hydrological Modeling System* (HEC-HMS) (Bartles et al., 2022). Their findings highlighted the non-linear relationship between precipitation and runoff, indicating that even minor variations in precipitation could result in significant variations in runoff. Additionally, their research revealed regional heterogeneity in watershed responses to climate change.

A substantial body of research has focused on the *United States Environmental Protection Agency's* (US EPA) *Storm Water Management Model* (SWMM) (Rossman & Simon, 2022) to evaluate the impacts of urbanization and climate change on urban watersheds. This model incorporates various parameters, including area, slope, impermeability, surface roughness, and infiltration, into its calculations. Alamdari et al. (2022, 2020, 2017) utilized SWMM to model an urban watershed in Virginia, assessing the impact of climate change and urbanization on future water quantity and quality. Their studies revealed that the combined impact of urbanization and climate change could lead to an increase in runoff of up to 67.6%, nearly four times the projected increase in precipitation.

Mitsova (2014) employed SWMM to conduct a sensitivity analysis on a watershed located in Ohio. Ten different scenarios were evaluated, which involved testing variations in climate projections, soil impermeability, and the use of different levels of low impact development (LID). Their results demonstrated that the use of LID techniques could effectively counteract the increase in soil impermeability associated with urbanization growth. Also using SWMM, Thakali et al. (2018) modeled a watershed in Nevada. Their research highlighted the efficacy of incorporating permeable pavement and green roofs, either individually or in combination, as effective measures to mitigate the additional runoff induced by climate change.

Wu et al. (2013) assessed five watersheds located in Iowa, each characterized by varying levels of impervious surfaces. They explored three different scenarios that combined the effects of both climate change and land use change. Their findings showed significant impacts on urban river hydrology, particularly in terms of water quality and peak flows. An 18% increase in precipitation resulted in an average increase of 20.8% in peak flow, considering only the impact of climatic change.

Zahmatkesh et al. (2015, 2014) conducted a study on the Bronx River watershed in New York City using SWMM. Their results showed that increased extreme rainfall due to climate change would result in higher peak flows and runoff volumes. Additionally, they developed a watershed sensitivity index and found that the slope parameter had the greatest influence on runoff in this particular watershed.

A study by Nguyen (2013) aimed to assess a statistical downscaling method for estimating the impact of climate change on design rainfall. This study utilized 36 synthetic watersheds, varying in terms of area, shape, and impermeability, using the SWMM model to assess how these watershed characteristics impacted runoff. The results of the study revealed similar trends regardless of the type of watershed studied.

It is worth noting that while these studies provide valuable insights, they do have their limitations. They were conducted on a relatively small and localized set of local watersheds, each characterized by diverse characteristics. Consequently, generalizing the findings of these studies can be challenging, and doing so may introduce a significant level of uncertainty into their conclusions. Nevertheless, it remains important to develop a comprehensive understanding of the factors influence urban watershed hydrology within the context of climate change.

The primary objective of this study is to develop a new methodology for assessing runoff in the context of climate change and understanding the influence of watershed characteristics on peak flow and runoff volume. To accomplish this, a substantial number of synthetic watersheds with various characteristics and regional climatology will be modeled using the SWMM model. Additionally, this study seeks to assess which watershed characteristic has the most significant impact on peak flow and runoff volume, particularly in the context of climate change. This will allow providing insights into the regions most vulnerable to future climate conditions.

2.3 Methodology

The proposed method for evaluating runoff in the context of climate change using multiple synthetic watersheds was developed through the application of various tools. To begin, extreme rainfall time series of different return periods and duration were generated for multiple weather stations. A second set of rainfall time series, this time adjusted to account for climate changes, was then produced. Then, an algorithm was designed to manipulate the SWMM hydrological/hydraulic modeling software. This enabled to model a large number of synthetic watersheds to evaluate the previously generated rainfall time series for SWMM simulations. SWMM simulation reports were used to analyze the results through statistical analyses and an ANOVA sensitivity analysis. All these steps are described in the upcoming subsections.

2.3.1 Input data

The rainfall data employed in this study were sourced from meteorological data provided by *Environment and Climate change Canada* (ECCC) for 12 weather stations located in 12 cities across the province of Quebec, Canada. This approach aimed to capture a wide range of rainfall patterns. Tableau 2.1 present metadata from the selected stations and the Chicago rainfall hyetograph r ratios selected for each station. These represent the ratios between the time before the peak of the rain and the total duration of the rain.

Tableau 2.1 ECCC information on selected weather stations

ID	Latitude	Longitude	Elevation	Years*	Ratio (r)**
7060400	48° 20' N	71° 00' W	159 m	45	0,42
7080468	46° 43' N	79° 06' W	181 m	52	0,40
7052603	48° 47' N	64° 50' W	360 m	26	0,40
710S005	58° 28' N	78° 05' W	26 m	32	0,40
7113534	58° 06' N	68° 25' W	39 m	32	0,40
7040813	51° 27' N	57° 11' W	37 m	28	0,40
702S006	45° 28' N	73° 44' W	32 m	76	0,45
701S001	46° 48' N	71° 23' W	60 m	61	0,38
7056480	48° 27' N	68° 31' W	35 m	25	0,40
7117827	54° 48' N	66° 48' W	517 m	26	0,40
7047914	50° 13' N	66° 15' W	52 m	41	0,40
7028124	45° 26' N	71° 41' W	241 m	32	0,40

* Number of years of rainfall data recording.

** The ratio is used to compute design storm rainfall intensities.

ECCC provides the equations of least squares-adjusted intensity-duration-frequency (IDF) curves for each return period, interpolated for each duration with two coefficients. However, establishing the rainfall Chicago hyetograph, required three parameters (i.e., a, b, and c). Consequently, MATLAB programming software was employed to extract annual maximum series (AMS) from IDF files provided by ECCC. A rainfall frequency analysis was conducted with the Gumbel distribution, followed by the fitting of IDF curves using a three-parameter regression equation. The intensities obtained this way were similar to those provided by ECCC.

The return periods (2-, 5-, 10-, 25- 50-, and 100-years) and rainfall durations (1-, 3-, 6-, 12- and 24-hour) studied are those commonly provided by IDF curves and also used in the design of urban drainage infrastructure. The selected data all have a minimum recording period of 25 years, allowing to reduce the impact from epistemic uncertainty.

The Chicago rainfall hyetograph was selected for this study because it is widely used in engineering design and can be easily applied for all frequencies and rainfall durations. These Chicago storms were derived using r ratios, developed by Watt et al. (1986) (see tableau 2.1), and were used alongside the a , b , and c parameters from the three-parameter IDF curve regressions. A 10-minute time step was used for the time series to avoid overestimating peak flows generated by the design storm (Rivard, 2011). These data were used to generate 60 rainfall time series for each of the 12 cities, for a total of 360 reference rainfall time series.

2.3.2 Climate change majoration method

To assess the impacts of climate change, additional rainfall time series were derived from the reference rainfall time series, which included adjustments to account for the effect of climate change. The method used in this study is a simple constant percentage increase with an 18% scaling factor. That was, until recently, the recommended method in the Province of Quebec (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), 2023). The application of this method allows facilitating the comparison between the rainfall increases due to climate change and the projected changes in peak flow or runoff volume. This scaling factor of 18% is applied to all reference rainfall time series, regardless of duration, return period, time horizon, or region. Thus, a total of 720 rainfall time series will be considered to account for the impacts of climate change (360 in current and future climates).

2.3.3 Hydrological model

The US EPA *Storm Water Management Model version 5* (SWMM5) (Rossman & Huber, 2015), a widely-used hydrological and hydraulic model to design urban drainage infrastructure in North America, was selected for this study. This choice allows generating watershed runoff in the form of a sub-daily hydrograph based on temporal rainfall series (CSA, 2019).

To supply the SWMM simulation models, the 720 temporal rainfall time series were utilized. An algorithm was developed using the Python programming language in conjunction with the *swmm-api* module (Pichler, 2022). This module serves as an interface for controlling SWMM, enabling the creation of watersheds with diverse characteristics and the execution of simulations based on the rainfall time series.

The algorithm developed comprises a series of nested loops. During each iteration, the algorithm creates a watershed with specific parameters, applies a rainfall time series, generates an SWMM simulation, and produces a report detailing the simulation results. These iterations sequentially modify watershed parameters and rainfall data, providing a comprehensive exploration of watershed response scenarios. Using this method, 4,860 synthetic watersheds (i.e., combinations of watershed characteristics) were modeled for each temporal rainfall time series from each analyzed weather station, resulting in a total of 3,499,200 simulations.

2.3.4 Synthetic watersheds characteristics

The following watershed characteristics were varied to generate the 4,860 synthetic watersheds: area, width, slope, impermeability, surface roughness (i.e., Manning coefficient), and soil type. Tableau 2.2 summarizes the range of values used for each characteristic.

Tableau 2.2 Ranges of values used for each watershed characteristics

Area (km ²)	Width	Slope (%)	Impermeability (%)	Manning's coefficient		Soil class
				Impervious	Pervious	
0.01	Long	0.1	5	0.010	0.05	A
12.5	Square	10.0	25	0.015	0.25	B
25	Wide	20.0	50	0.025	0.50	C
			75			D
			95			

The selection included minimum, average, and maximum areas, all of which corresponded to relatively small urban watersheds. It is worth noting that applying IDF curves to areas larger than 25 km² is not recommended, as per guidelines from the (CSA, 2019).

Three typical rectangular watershed shapes were established, enabling to evaluate length-to-width ratios. These shapes include a long watershed with a length (L) twice its width (W), a square watershed with equal width and length, and a wide watershed with a length of half its width. The algorithm computed the width based on these predefined proportions, using the given area value as input. The flow length was then automatically estimated by the software.

Additionally, slopes were selected to represent urban watersheds with low (0.01%), medium (10%), and high (20%) gradients. This diversity of gradients aims to reflect the potential variability of hydrological characteristics in urban environments with different topographies.

As discussed earlier, the impermeability of surfaces plays a crucial role in the runoff process. To effectively illustrate this phenomenon, a range of impervious percentages, spanning from very low (5%) to nearly complete impermeability (95%), were selected.

Minimum (0.010), average (0.015), and maximum (0.025) values were selected for the roughness coefficients of both permeable and impermeable surfaces. These values were sourced from the SWMM user manual by Rossman & Huber (2015), which itself is based on research by McCuen, Johnson, Ragan, & United States Federal Highway Administration (1996).

The Horton infiltration model was chosen to simulate infiltration processes. The parameters used originate from the study of Terstriep & Stall (1974) and are grouped into four hydrological soil classes (i.e., A, B, C, D) from Cronshey & United States Department of Agriculture (USDA) (1986). A brief description of each soil class and the corresponding Horton parameters are presented in tableau 2.3.

Tableau 2.3 Soil type classes and corresponding Horton parameters

Class	Description	f_0 (mm/h)	f_c (mm/h)	k (1/h)
A	Sand, loamy sand, or sandy loam	254.0	25.4	2.0
B	Silt loam or loam	203.2	12.7	2.0
C	Sandy clay loam	127.0	6.4	2.0
D	Clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, or clay	76.2	2.5	2.0

2.3.5 ANOVA sensitivity analysis

A global sensitivity analysis was conducted based on the decomposition of the ANOVA sensitivity analysis, originally introduced by Fisher (1920). The primary aim of this analysis is to evaluate the influence of the model's input parameters on its output variables. The input parameters are the watershed characteristics as described previously, and the output variables under study are the peak flow and runoff volume.

The MATLAB library Anovan (The MathWorks, inc., 1994), which is an n-way ANOVA, was then employed to conduct the sensitivity analysis. This analysis allowed for the calculation of the portion of variance explained by each input parameter of the model, while also accounting for interactions between them. Additionally, it quantified the proportion of residual variance, contributing to a comprehensive assessment of parameter sensitivity.

2.4 Results

2.4.1 Analysis of the influence of rainfall parameters

A descriptive analysis was conducted to better understand the relationship between rainfall and runoff in the context of climate change. This analysis considered the three main characteristics of rainfall: intensity, duration, and frequency. Peak flow and runoff volume produced by the hydrological model were evaluated based on these three parameters. Figure 2.1 illustrates the median variation of peak flow and runoff volume between historical and increased rainfall of 18% to account for climate change for the studied meteorological stations.

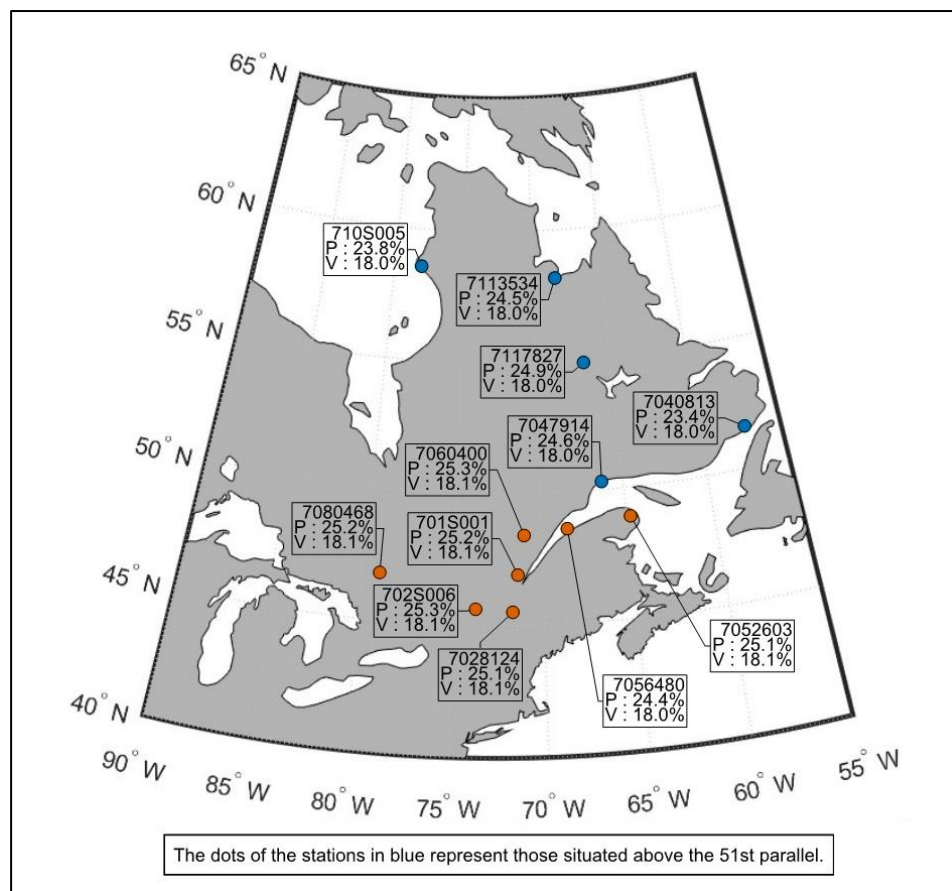


Figure 2.1 Median variation in peak flow (P) and runoff volume (V) between historical and increased rainfall to account for climate change, according to the meteorological station

The blue stations represent those located in northern Quebec (above the 51st parallel), and the orange ones represent those situated in southern Quebec (below the 51st parallel). All weather stations experience an increase in runoff volume by a median value of approximately 18%. However, this value is exceeded for peak flow, with a median value around 24.7%.

2.4.1.1 Rainfall intensity

The first variable examined is rainfall intensity, which exhibits variations depending on the meteorological station under study. Each station presents a unique set of IDF curves derived from its recorded historical rainfall data. The peak flow and runoff volume variation between historical and increased rainfall for each meteorological station is presented in figure 2.2.

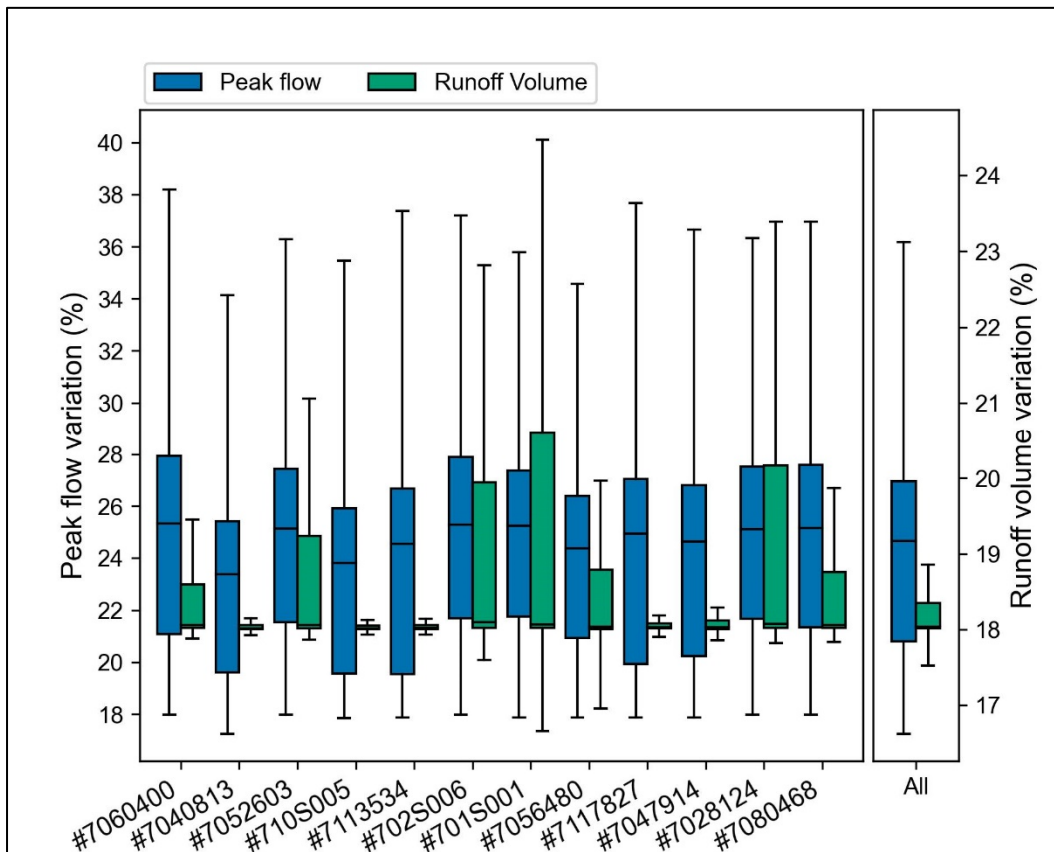


Figure 2.2 Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events for current and future climate for each station

Although the rainfall increased by 18%, the increase in peak flow exceeds this, ranging from 23.4% (station #7040813) to 25.3% (station #7060400). The overall value for all meteorological stations is 24.7%. This represents an average difference of 6.7% from the rainfall increase factor of 18%.

The stations with the greatest variations in peak flow are located south of the 51st parallel. This southern area of Quebec is characterized by a cold and humid continental climate, resulting in a higher amount of rainfall, with 75% of it occurring as rainfall throughout the year (Government of Québec, 2023). The northern area of Quebec (above the 51st) is, in contrast, characterized by a subpolar continental climate, bringing less rain as it occurs over a shorter period due to lower temperatures (Government of Québec, 2023). An examination of the IDF curves of meteorological stations has confirmed that historical rains from the stations in southern area of Quebec generate higher rainfall intensities than the others.

A Kruskal-Wallis analysis was conducted to compare differences between mean variations of peak flow in regards of the stations. The results of this test, as illustrated in figure 2.3, showed significant differences between the sample means, except for two stations: #7052603 and #7080468. These two stations, the first located in the city of Gaspé and the other at the Témiscamingue dam, do not seem to exhibit similarities that could explain this result.

The median variations in runoff volume between historical and increased rainfall ranges from 18.0% (station #7040813) to 18.1% (station #702S006). The overall median variation across all stations is 18.0%, corresponding to the increased rainfall factor. It is noteworthy that the Kruskal-Wallis test showed significant differences in mean variations among all stations. This can be attributed to diverse distributions observed from one station to another, as shown in figure 2.2. The interquartile range varies between 0.05% and 2.58%. Stations with the largest interquartile ranges are located in the southern part of Quebec, characterized by heavier rainfall.

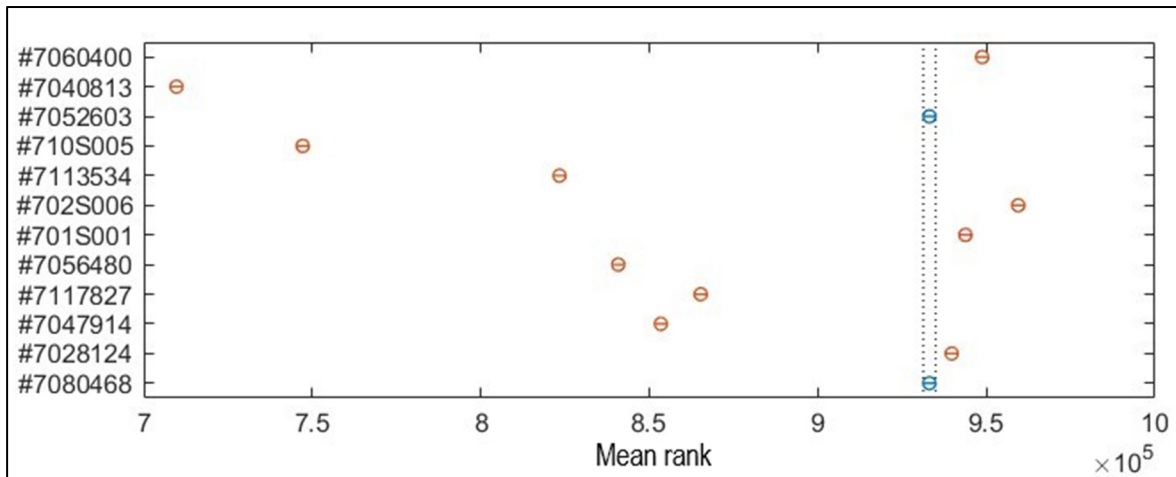


Figure 2.3 Multiple comparison of mean ranks of peak flow between stations

2.4.1.2 Rainfall frequency

The second IDF curve variable studied is rainfall frequency. The variation in peak flow and runoff volume between historical and increased rainfall variation is presented in figure 2.4.

The median variation in peak flow, across all frequencies, remains at 24.7%. However, this value gradually varies between 24.3% (2-year frequency) and 25.0% (100-year frequency). Regardless of the frequency, the variation consistently exceeds the 18% rainfall scaling factor. The Kruskal-Wallis test detects significant differences in means variations of peak flow across frequencies.

Examining runoff volume, the variation in median volume between historical and increased rainfall for each frequency ranges from 18.0% (for the 2-year frequency) to 18.1% (for the 100-year frequency). The median variation across all periods is 18.0%. The interquartile range varies between 0.05% and 3.22% as the rainfall frequency increase. As for the peak flow, the Kruskal-Wallis test detected significant differences in the average variation across frequencies.

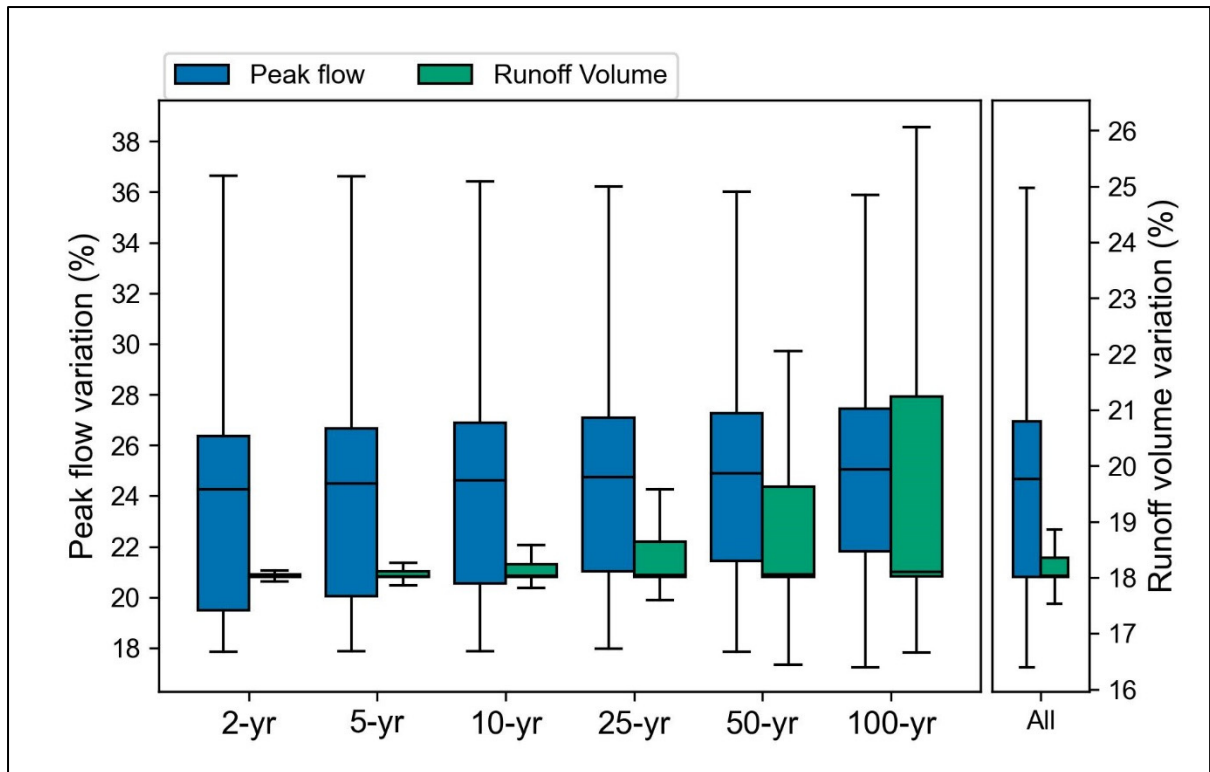


Figure 2.4 Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events considering and neglecting the impacts of climate change, for each rainfall frequency tested

2.4.1.3 Rainfall duration

The third determining parameter in IDF curves is the rainfall duration. The variation in peak flow rate and runoff volume between historical and increased rainfall to account for climate change is presented in figure 2.5.

The median variation in runoff volume shows slight variability, ranging from 18.0% (for a 12-hour duration) to 18.1% (for a 1-hour duration). Across all stations, this variation is 18%, which is the same as the rainfall scaling factor. The interquartile range varies between 0.16% and 1.49% as the rainfall duration increase. The Kruskal-Wallis test also indicates significant differences between the means of variations for each rainfall duration due to the increasing data dispersion with rainfall duration.

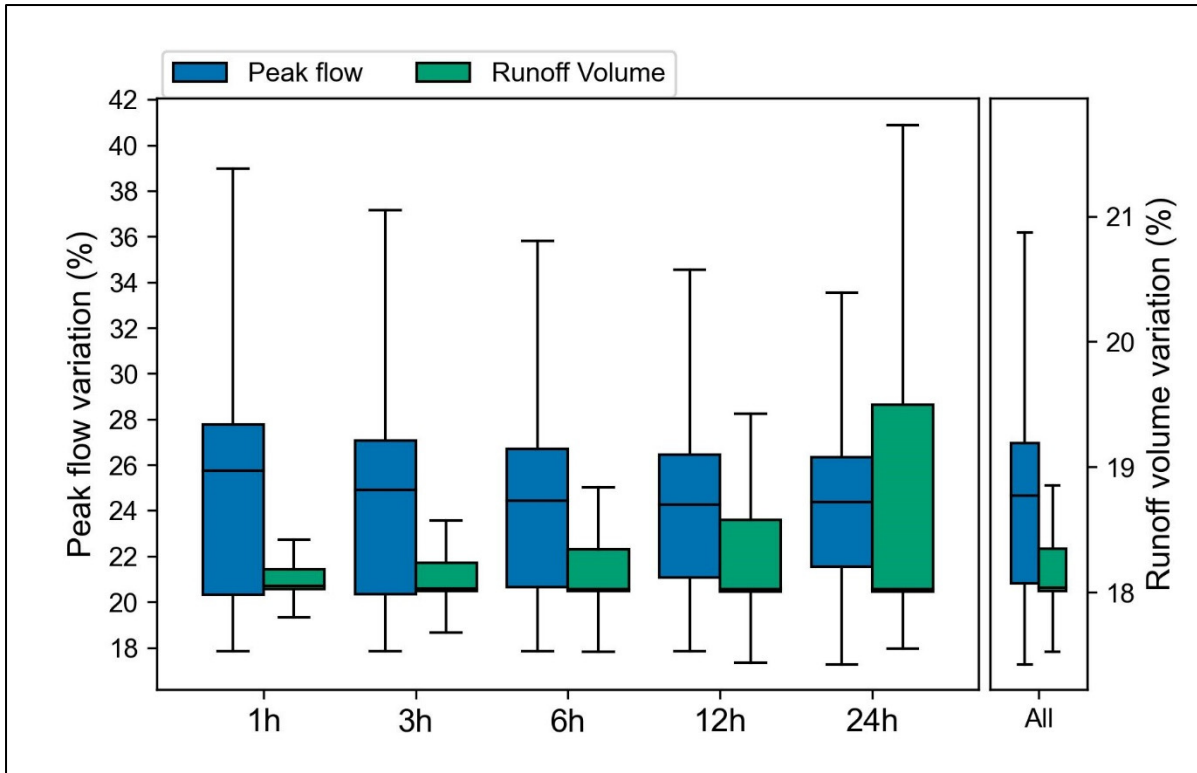


Figure 2.5 Variations in peak flow and runoff volume between rainfall events taking climate changes into account and those not taking them into account for each duration

2.4.2 Analysis of the influence of watershed parameters

As part of the sensitivity analysis, an ANOVA was conducted to examine various watershed input parameters. These parameters encompassed the area, shape, slope, impermeability, surface roughness for both impervious and pervious areas, as well as soil types. The ANOVA results for peak flow and runoff volume are presented in figures .8 and .9 respectively.

Notably, across all meteorological stations, the two most influential parameters with regard to peak flow are watershed area and impermeability. They account for an average of 41.8% and 39.7% of the total variance, respectively. However, their influence tends to slightly diminish in response to increased rainfall as a result of climate change, settling at an average of 41.3% and 38.3%, respectively.

The slope, identified as the third most important parameter, contributes on average to 11.8% of the peak flow variance when rainfall is not increased to account for climate change and 12.4% when it is increased.

As for the other physiographic parameters, they collectively explain an average of 4.5% of the total variance for the historical rainfall and 5.4% for the increased rainfall. Finally, there remain 2.2% and 2.5% of unexplained variance

representing residual error, i.e., which signifies the variance not explained by the studied physiographic parameters with and without considering increased rainfall but related to higher-order interactions that were not considered here.

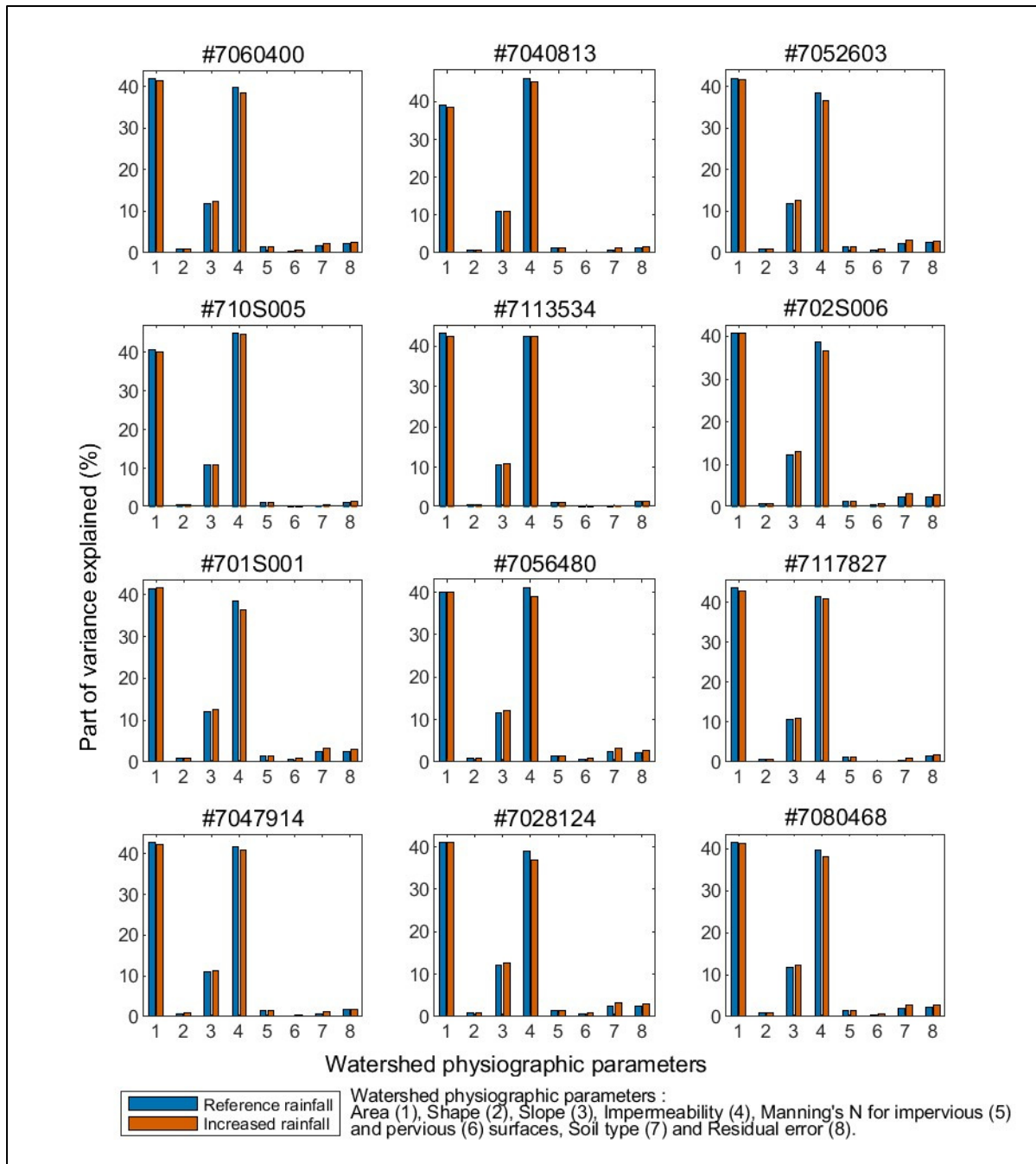


Figure 2.6 Results of the ANOVA evaluating the sensitivity of peak flow with (blue) and without (orange) rainfall scaling due to climate change to watershed physiographic characteristics across different meteorological stations (identified with their station number on each subplot)

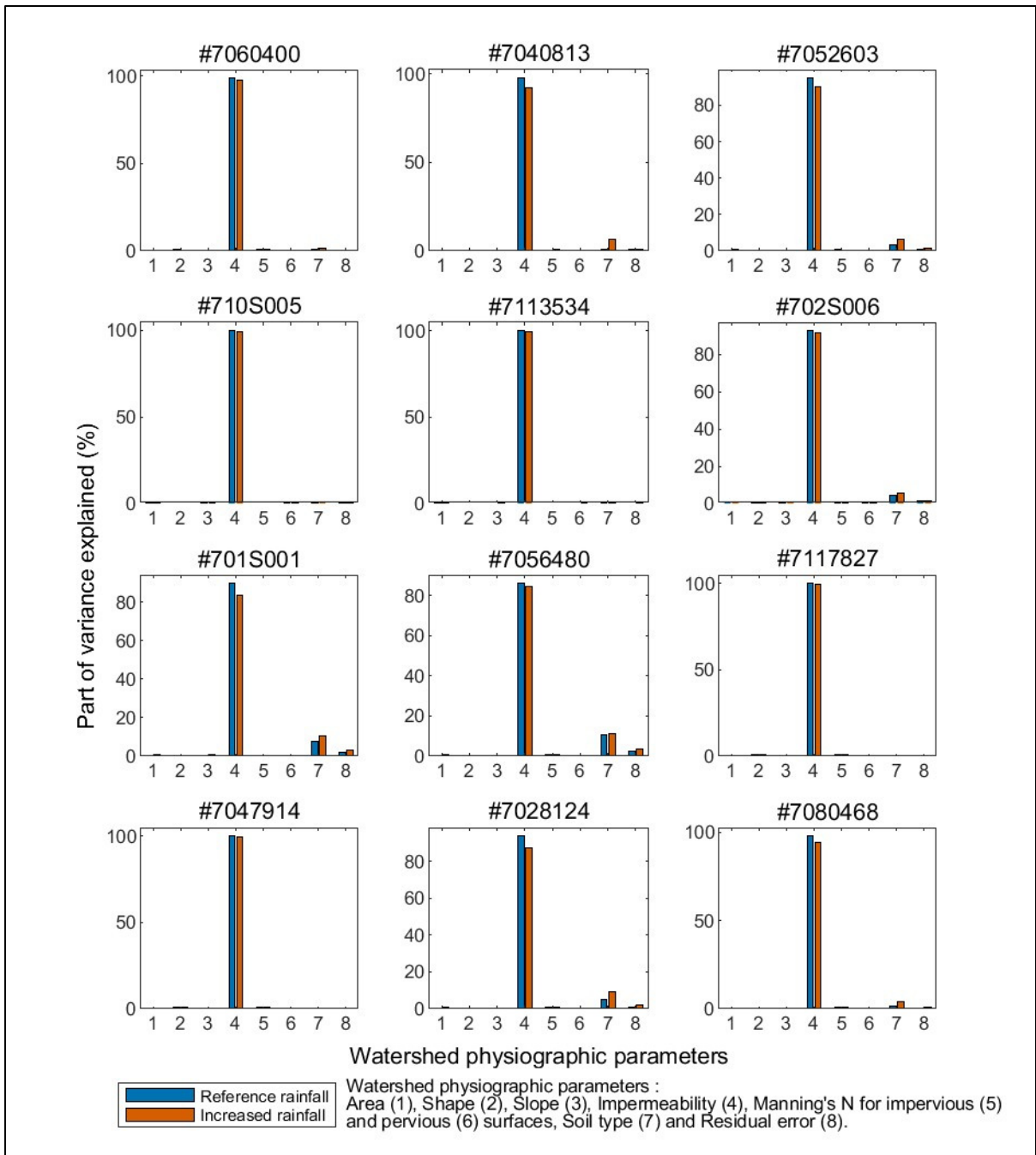


Figure 2.7 Results of the ANOVA evaluating the sensitivity of runoff volume with (blue) and without (orange) rainfall scaling due to climate change to watershed physiographic characteristics across different meteorological stations (identified with their station number on each subplot)

A Kruskal-Wallis test showed that there were significant differences between the mean results attributed to the area, impermeability, and slope parameters compared to the results obtained with the other parameters, whether considering the impact of climate change or not as shown below.

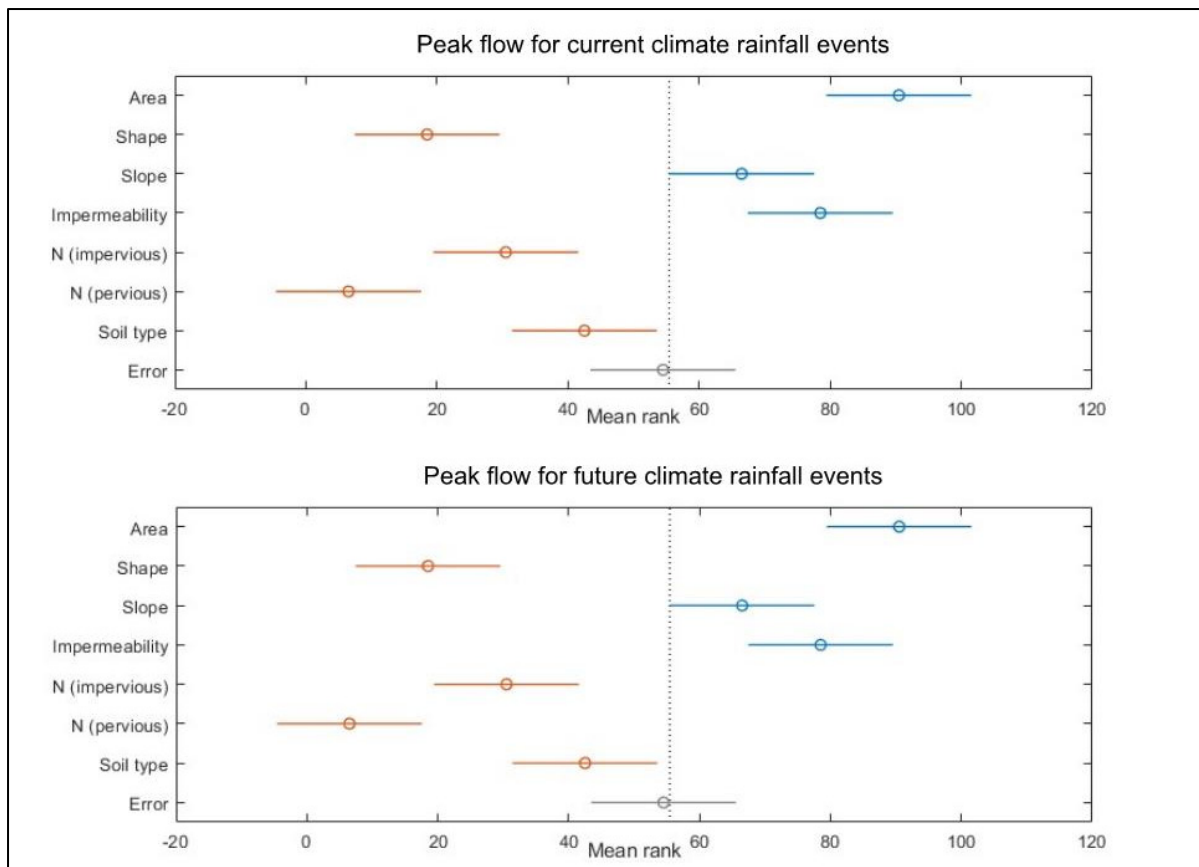


Figure 2.8 Results of the Kruskal-Wallis test on peak flow for current and future climate rainfall events

The hydrographs of an average watershed, with and without considering climate change, during a rainfall event with the IDF curves of Montreal, a frequency of 10 years and a duration of 6 hours, are illustrated in figure 2.9. In turn, the parameters of area, impermeability, and slope were varied between the minimum, average, and maximum values identified in tableau 2.2.

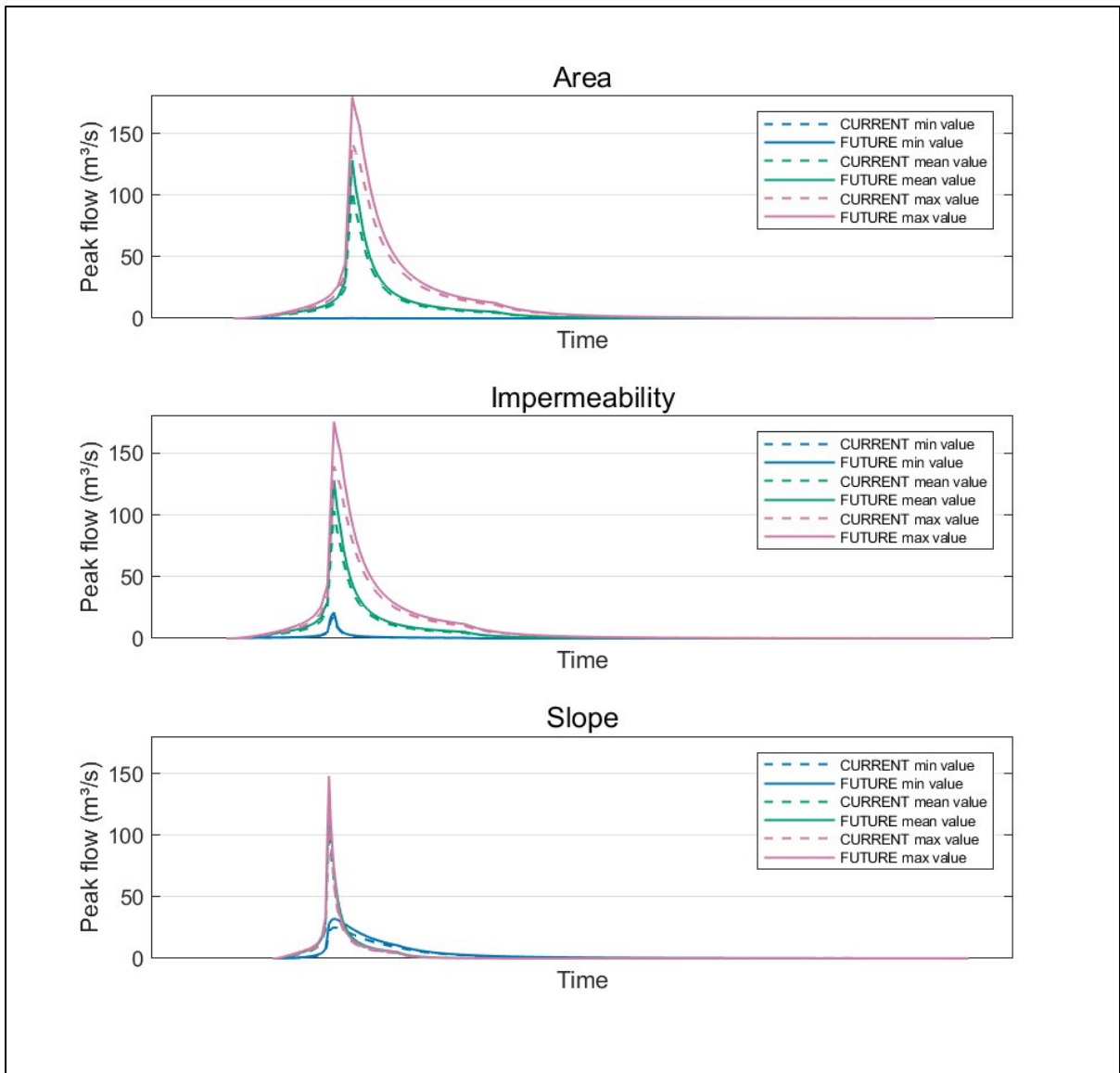


Figure 2.9 Hydrographs of the minimum, mean, and maximum values of watershed input parameters with the greatest impact on peak flow, with and without majoration to consider the influence of climate change for the Montreal station #702S006 with a 10-yr rainfall return period and 6h duration

In all cases, the peak flow intensity varies considerably when the parameters change. In the hydrographs where the area and impermeability vary, the peak flows increase as the parameters values are increased. In the case of hydrographs where the slope varies, the shape of the hydrograph is additionally altered, showing a shorter time-to-peak and earlier recession curve as the slope is increased.

Regarding runoff volume, impermeability stands out, accounting for an average of 98.7% of the variance in historical rainfall and 97.6% for rainfall increased to accommodate the impact of climate change. In contrast, the combined explanation from other physiographic parameters averages only 1.1% for historical rainfalls and 2.2% for future climate rainfalls, with residual errors at a mere 0.1% and 0.2%, respectively.

2.5 Discussion

The analysis of rainfall and watershed parameters has highlighted the relationships that exist between these parameters and peak flow and runoff volume. The present discussion aims to better understand the nature of those relationships.

2.5.1 Relationship between projected increase in rainfall and peak flow

Upon analyzing rainfall parameters, it becomes evident that the increase in peak flow in response to climate change surpasses the 18% rainfall increase factor. The median increase in its majoration is 24.7%, with an interquartile range between 20.8% and 27.0% of peak flow. This greater increase in peak flow compared to the scaling factor is explained by analyzing the rainfall-runoff transformation process of the hydrological model.

The watershed receives rainfall, part of which is infiltrated, while the rest runs off to the watershed outlet. Although rainfall is increased to account for climate changes, the soil's infiltration capacity remains the same in the current or future climate. As a result, the flow is increased by a larger fraction of the rainfall. This increase in rainfall consequently leads to a greater accumulation of water at the same moment at the watershed outlet. However, it is important to note that the relationship between the increase in peak flow and the increase in rainfall is complex, varying with the intensity, duration, or frequency of the rainfall.

Peak flow varies primarily based on rainfall intensity. In this study, rainfall intensity is represented by the station, which varies according to the historical rainfall it has recorded in its region. The analysis of the results shows that stations south of the 51st parallel generate higher median peak flows than the northern ones. The study of the IDF curves for these stations confirms that they have higher intensities than those to the north.

When rainfall intensity is low, it may entirely infiltrate without reaching the watershed outlet. When it is more intense, the part of the rainfall not infiltrated corresponds to the peak of the rainfall. The more intense the rainfall, the larger the part not infiltrated, consequently increasing the generated runoff. Figure 2.10 illustrates this phenomenon.

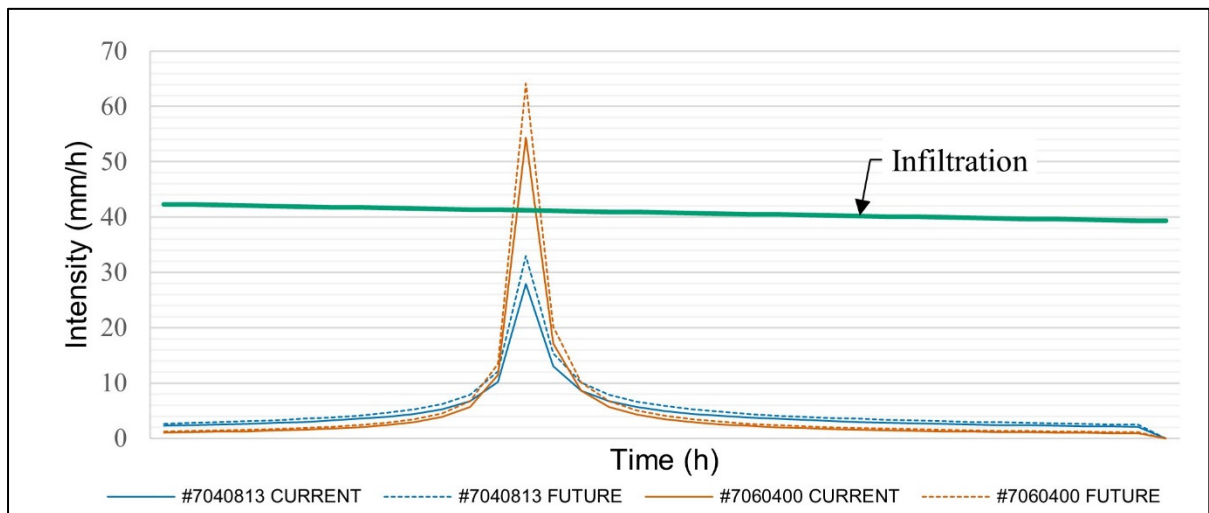


Figure 2.10 Rainfalls and infiltration in actual and future climate for stations #7040813 and #7060400, for a rainfall with a 2-yr frequency and a duration of 6h, and infiltration from soil class A.

Secondly, peak flow varies according to the frequency of rainfall. The higher the return period of the rainfall event (i.e. the rarer it is), the greater its intensity. It is in this manner that peak flow responds to increased rainfall. The results of the analysis indeed show that the median variation in peak flow increases with frequency.

Finally, peak flow varies according to the duration of rainfall. The shorter the duration of rainfall, the greater its intensity, and the same applies to peak flow. The median variation in peak flow thus decreases with an increase in the duration of rainfall.

It is thus possible to conclude that peak flow increases with the increase in rainfall. However, this increase is not direct, as an 18% increase in rainfall leads to a runoff increase exceeding this value. It also varies according to the return period and duration. Therefore, a higher peak flow can be expected for a station located in southern Quebec with a long return period and a short duration. A literature review conducted by Martel et al. (2021) also demonstrated that long return period and/or short duration extreme rainfall will be the most impacted by climate change, which could lead to an even greater impact on peak flow in a future climate.

2.5.2 Relationship between projected increase in rainfall and runoff volume

Regarding the median variation in runoff volume, it remains relatively consistent across stations, frequency, and duration, corresponding approximately to the rainfall increase factor of 18.0%. The median increase in its majoration is 18.0%, with an interquartile range between 18.0% and 18.3% of runoff flow, all stations combined. However, the dispersion of results varies according to the station, duration, and frequency.

The dispersion of data varies primarily according to the station. Stations south of the 51st parallel have a larger interquartile range than those north of it. An 18% increase in rainfall could therefore result in significantly higher volumes than this factor for regions where rainfall is more abundant, as shown in figure 2.10.

Three processes contribute to generating the water volume at the outlet: rainfall, infiltration, and runoff. Rainfall will bring 18% more water into the system, but the other processes may not necessarily follow this increase. Stations with lower historical rainfall may infiltrate a greater proportion of rain before reaching their maximum infiltration capacity, unlike stations with historically intense rainfall. The portion of rainfall that is not infiltrated will add to the portion of rainfall contributing to the additional water volume at the outlet. The percentage increase in runoff volume can thus reach ratios higher than the increase factor.

The same principle applies according to the return periods. Shorter return periods are associated with less intense rainfall, while longer return periods correspond to more intense rainfall. Since the soil infiltration capacity remains constant regardless of the return period, more frequent rains can infiltrate a larger amount of water than less frequent events. This results in greater variability in runoff volume in the presence of longer return periods.

Regarding the duration, it is true that short-duration storms result in higher rainfall intensity. However, the longer the duration of rainfall, the longer the soil can infiltrate a large proportion of the rain, influencing the runoff volume at the outlet and leading to greater variability in longer-duration rainfall events.

2.5.3 Most important watershed characteristics for drainage infrastructure design

The results of the ANOVA show that the key watershed parameters to consider in determining peak flow are impermeability, area, and, to a lesser extent, the slope of watersheds. The relative importance of area and impermeability tends to decrease slightly with climate changes, making room for other parameters such as slope or soil type.

These results align with the expected outcomes. The larger the area, the more runoff there will be; the greater the impermeability, the less infiltration, and the steeper the slope, the faster all this runoff will reach the outlet, thus influencing peak flow.

Regarding runoff volume, the most important parameter is impermeability as it determines the percentage of rainfall that can or cannot infiltrate. Some regions in southern Quebec show an increased importance of soil types on runoff volume. As discussed earlier, infiltration plays a key role in the process of determining the runoff volume at the outlet of a watershed. The greater the intensity of the rain, as is the case in southern Quebec, the more significant the variability in infiltration and runoff, influencing the importance of the soil type.

2.5.4 Limitations

This study has presented certain limitations that could be explored in future research. Firstly, it is confined to rainfall data from twelve meteorological stations located in Quebec. Extending this analysis to include data from additional stations in Quebec, Canada, or even globally, could offer a more comprehensive perspective.

Concerning the creation of rainfall time series, only the temporal distribution of the Chicago storm was utilized. A future study could assess the impact of different temporal distributions on the results.

The experimentation was constrained to using the constant percentage increase method with an increase factor of 18%. To obtain a more precise depiction of the projected impact of climate change, it would be relevant to compare multiple methods associated with various climate change scenarios and evaluate their consequences.

It is important to note that the results should not be extrapolated beyond the study's limitations, the parameters of the tested watersheds are bounded by minimum and maximum values corresponding to small urban watersheds.

Additionally, the studied watersheds did not have drainage infrastructure networks, elements that could significantly impact peak flow and runoff volume. This consideration should be factored into any interpretation or application of the results.

2.6 Conclusion and recommendations

The drainage infrastructures in Canada currently faces vulnerabilities, particularly in the context of challenges posed by climate change. These vulnerabilities have significant implications for the daily lives of citizens, necessitating substantial annual investments for the maintenance and improvement of these infrastructures.

This study introduces a new methodology for analyzing urban runoff in the context of climate change, addressing inherent challenges in hydrological modeling within real watersheds.

This project has provided a more precise measurement of the relationship between rainfall and runoff. In the case of peak flow, it tends to exceed the increase in rainfall. Regarding volume, it corresponds to the rainfall increase factor. However, statistically significant variability has been observed in these results, especially for IDF curves in southern Quebec with high return periods and long durations.

The study has also underscored the importance of area, impermeability, and slope in determining peak flow, as well as impermeability and soil type in determining runoff volume. While modifying the area or slope of a watershed is rarely feasible, planning the development of urban watersheds could participate to minimize impermeability and promote infiltration. This research has demonstrated that these measures could be implemented to reduce peak flow and runoff volume.

This project has established this new method for assessing a significant number of urban watersheds in the context of climate change. Future studies could utilize this method to expand on the conclusions it can provide.

CHAPITRE 3

DISCUSSION

La méthode proposée a permis de générer 3 499 200 résultats de simulations SWMM à l'aide de 720 séries temporelles de pluies et de 4 860 bassins versants différents. Ces résultats fournissent une base robuste permettant d'évaluer, au moyen d'analyses statistiques approfondies, l'impact des changements climatiques sur le ruissellement à la sortie du modèle hydrologique, ainsi que les caractéristiques physiographiques des bassins versants qui l'influencent.

Une analyse statistique descriptive a d'abord été effectuée pour examiner la relation entre les pluies à l'entrée du modèle hydrologique et le ruissellement produit à sa sortie. Ensuite, une analyse de sensibilité ANOVA a été entreprise pour approfondir la compréhension de l'influence des caractéristiques spécifiques des bassins versants sur le ruissellement, dans le contexte des changements climatiques. Les deux aspects évalués dans ces analyses sont le débit de pointe et le volume de ruissellement.

Ce chapitre débutera par un résumé des résultats obtenus dans le cadre de ces analyses. Une section sera ensuite consacrée aux enseignements tirés de ces résultats et les méthodes d'atténuation envisageables pour faire face aux impacts des changements climatiques à venir. Nous aborderons finalement les limites de l'étude.

3.1 Analyse de l'influence des paramètres des pluies

Une analyse statistique descriptive a premièrement été réalisée afin de mieux comprendre la relation entre les pluies et le ruissellement dans les bassins versants urbains. Comme exposé dans la section 1.1, les trois principales caractéristiques de la pluie, à savoir l'intensité, la durée et la fréquence, ont été prises en considération dans cette analyse. Le débit de pointe et le volume de ruissellement ont ainsi été évalués en fonction de ces trois paramètres.

La figure 3.1 illustre que la médiane de la variation du débit de pointe dépasse le facteur de majoration de 18%, avec une valeur toutes stations confondues de 24,7%. En revanche, la médiane de la variation du volume de ruissellement lui est équivalente, avec une valeur médiane toutes stations confondues de 18%.

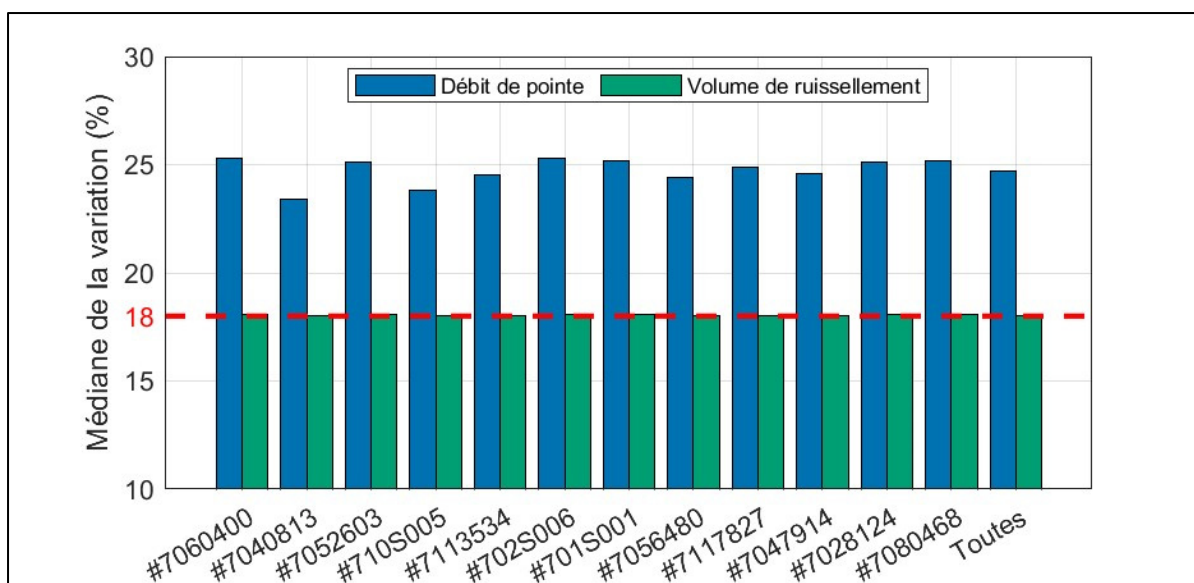


Figure 3.1 Médiane de la variation du débit de pointe et du volume de ruissellement entre les pluies en climat actuel et futur

Les stations localisées dans le sud du Québec enregistrent des pluies plus intenses par rapport à celles du nord. Cette disparité a pour effet d'accentuer la variation du débit de pointe entre ces régions. En dépit de l'ajustement des pluies pour prendre en compte l'impact des changements climatiques, la capacité d'infiltration du sol demeure constante, que ce soit dans le climat actuel ou futur. Ainsi, une proportion plus importante de la pluie s'écoule jusqu'à l'exutoire du bassin versant en contexte climatique futur.

Bien que les médianes de la variation du volume de ruissellement se révèlent similaires d'une station à l'autre, la figure 2.2 indique une plus grande variabilité des résultats pour les stations où les pluies sont plus intenses, notamment celles situées dans la partie sud du Québec.

Ce phénomène s'explique lui aussi en raison de la capacité d'infiltration du sol qui reste la même en climat actuel et futur. Les pluies plus intenses du sud du Québec qui réussissaient à s'infiltrer en climat actuel pourraient dépasser la capacité d'infiltration du sol dans un climat futur, entraînant des variations au-delà du facteur de majoration de 18%.

Le débit de pointe et le volume de ruissellement varient également en fonction de la période de retour. Les périodes de retour plus courtes sont associées à des pluies de faible intensité, tandis que les périodes de retour plus longues correspondent à des pluies de plus grande intensité. Comme la capacité d'infiltration du sol ne change pas en fonction de la période de retour, les mêmes phénomènes sont observés pour les débits de pointe et les volumes de ruissellement, que ce soit en fonction de la région ou de la période de retour. La médiane de la variation du débit de pointe augmente avec la période de retour et la dispersion des résultats du volume de ruissellement est plus grande avec des périodes de retour plus longues, comme illustré à la figure 2.4.

En ce qui concerne la durée de la pluie, les résultats, illustrés à la figure 2.5, présentent des différences. Pour le débit de pointe, la logique reste la même en fonction de la durée qu'en fonction de la région ou de la période de retour. Plus la durée de la pluie est longue, moins son intensité est grande, et moins la variation de son débit de pointe sera importante. En revanche, pour le volume de ruissellement, sa valeur médiane reste constante pour toutes les durées. Cependant, la dispersion des résultats augmente avec la durée de la pluie. Ce phénomène est également lié à la capacité d'infiltration du sol. Certaines pluies qui étaient infiltrées en grande partie en climat actuel peuvent se retrouver à ruisseler dans une plus grande proportion étant donné que la capacité d'infiltration du sol sera atteinte. Plus la pluie sera longue, plus les résultats varieront, car une plus grande quantité de pluie pourra ou non s'ajouter au volume de ruissellement. Ainsi, on peut observer le lien entre la variation des pluies, majorées pour prendre en compte les changements climatiques, et l'augmentation du débit de pointe et du volume de ruissellement.

En général, le débit de pointe de ruissellement dépassera toujours le facteur de majoration. Plus l'intensité de la pluie est élevée, que ce soit en fonction de la station, de la période de retour, ou de la durée de la pluie, plus le débit de ruissellement sera important. La variation médiane du volume de ruissellement restera équivalente au facteur de majoration de 18%, quelle que soit la station, la période de retour, ou la durée. Cependant, des variations des résultats plus significatives pourraient survenir avec une intensité de pluie élevée en fonction de la station ou de la période de retour, ou avec une durée de pluie plus longue.

3.2 Analyse de l'influence des paramètres des bassins versants

L'analyse de sensibilité ANOVA a été conduite pour identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur le débit de pointe et le volume de ruissellement. Les résultats, présentés à la figure 2.6 et à la figure 2.7, révèlent que l'aire, l'imperméabilité et la pente sont les trois paramètres ayant le plus d'impact sur le débit de pointe, tandis que l'imperméabilité se distingue comme le paramètre le plus influent sur le volume de ruissellement.

Comme discuté précédemment, la capacité d'infiltration du sol exerce une influence significative sur la variabilité du volume de ruissellement, surtout dans les régions où l'intensité des précipitations est plus élevée. Ce phénomène se reflète également dans les résultats de l'ANOVA, indiquant que, pour ces régions, l'importance du type de sol est plus marquée (voir figure 3.2). Cette importance est destinée à augmenter davantage en climat futur par rapport au climat actuel.

Qu'il s'agisse du débit de pointe ou du volume de ruissellement, l'imperméabilité émerge comme un facteur clé dans l'évaluation du ruissellement à l'exutoire du bassin versant.

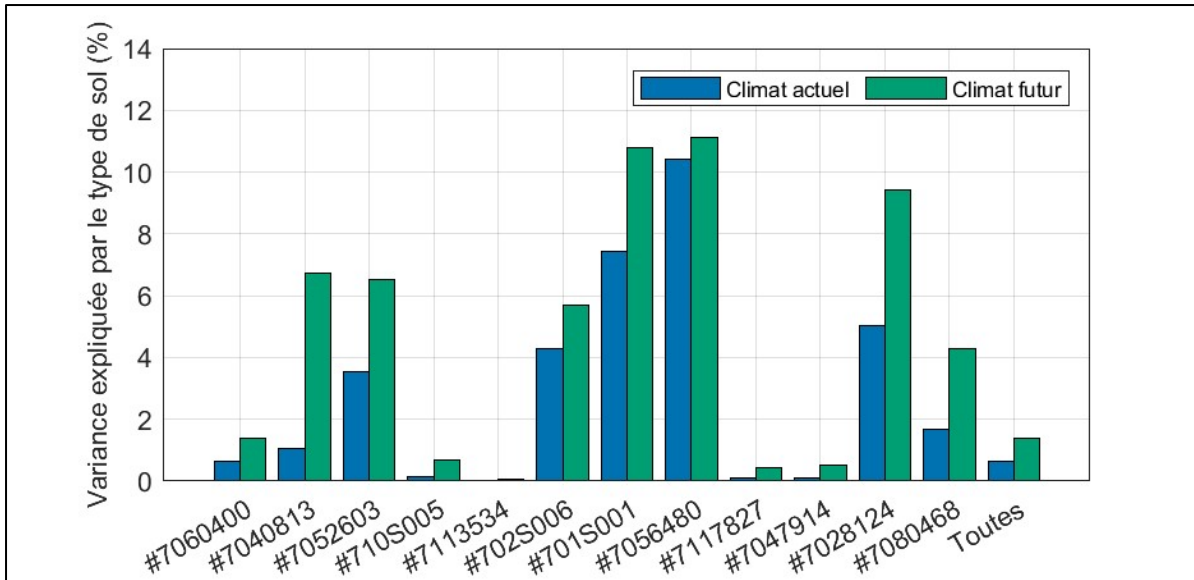


Figure 3.2 Portion de la variance du volume de ruissellement expliquée par le paramètre du type de sol en climat actuel et en climat futur

3.3 Résilience face aux changements climatiques

Les conclusions précédentes soulignent que les changements climatiques induiront des débits de ruissellement plus importants que l'augmentation projetée des précipitations. De plus, l'augmentation du volume de ruissellement pourrait également surpasser celle des précipitations à venir, en fonction du type de pluie et de la capacité d'infiltration du sol. Ces observations offrent des pistes pour mieux adapter les infrastructures de drainage urbaines aux augmentations de pluie prévues en raison des changements climatiques.

Les paramètres les plus significatifs en ce qui concerne le débit de ruissellement sont l'imperméabilité, l'aire et la pente du bassin versant. En ce qui concerne le volume de ruissellement, l'imperméabilité demeure le paramètre le plus crucial, et pour certains bassins versants, le type de sol joue également un rôle prépondérant. Cela souligne l'importance, lors de la modélisation d'un bassin versant, d'évaluer minutieusement ces paramètres, car ils influenceront de manière substantielle les résultats du modèle.

Il peut être judicieux de prendre en considération ces informations lors de la planification du territoire. Il est peu probable d'être en mesure de modifier l'aire ou la pente d'un bassin versant lors du développement d'un nouveau territoire. En revanche, il est possible de favoriser l'implantation de surfaces perméables pour une meilleure infiltration, afin de réduire l'impact des changements climatiques sur le débit de pointe et le volume de ruissellement.

En complément des mesures liées à la planification du développement du territoire, des aménagements de gestion des eaux pluviales de type PGO pourraient être envisagés pour retenir l'eau et diminuer le débit de pointe, ou encore pour favoriser l'infiltration et réduire le volume de ruissellement.

3.4 Limites de l'étude

Il est important de prendre en compte certaines limites lors de l'interprétation des résultats de cette analyse, tant au niveau des données pluviométriques, des changements climatiques que du modèle hydrologique.

En ce qui concerne les données pluviométriques, seulement 12 stations ont été examinées à l'échelle du Québec. Une évaluation plus étendue, couvrant l'ensemble du territoire québécois, serait nécessaire pour obtenir une représentation plus complète du ruissellement dans la province.

Un autre aspect lié aux données pluviométriques susceptible d'influencer les résultats est la distribution temporelle. Seule la distribution de la pluie de Chicago a été prise en compte dans cette étude. Il serait judicieux de tester d'autres distributions temporelles afin de quantifier plus précisément l'impact du choix de la distribution sur les résultats.

Concernant les changements climatiques, seule la méthode de majoration à pourcentage constant de 18% a été évaluée. Les résultats pourraient varier avec d'autres méthodes, il serait donc intéressant d'explorer le ruissellement avec différentes approches d'adaptation des courbes IDF en climat futur. De plus, l'évaluation des différences du ruissellement entre différents scénarios de changements climatiques serait pertinente.

Le choix du modèle hydrologique et du modèle d'infiltration pourrait également influencer les résultats. Il est donc recommandé d'évaluer d'autres modèles hydrologiques et d'infiltration afin de mieux saisir l'impact des différences entre ces modèles.

Enfin, les paramètres des bassins versants testés correspondent à ceux présentés dans le tableau 2.2 et représentent des bassins versants urbains. Il est important de noter que les conclusions de cette étude ne s'appliquent qu'aux bassins versants dont les caractéristiques se situent à l'intérieur des bornes de ces paramètres.

CONCLUSION

La vulnérabilité actuelle des infrastructures de drainage au Canada, accentuée par les défis supplémentaires imposés par les changements climatiques, compromet gravement leur fonctionnalité, engendrant des répercussions directes sur la vie quotidienne des citoyens. Des investissements considérables sont nécessaires chaque année pour maintenir ces infrastructures, soulignant l'impératif d'une conception résiliente pour assurer leur durabilité et renforcer la résilience urbaine.

Ce projet introduit une nouvelle méthodologie d'analyse du ruissellement urbain dans le contexte des changements climatiques, en se basant sur un nombre significatif de bassins versants. Cette approche permet de surmonter les défis posés par la modélisation hydrologique des bassins versants réels. Dans l'ensemble, cette méthode rigoureuse offre une base solide pour des analyses approfondies et des prises de décision éclairées dans le domaine de la modélisation hydrologique face aux défis des changements climatiques.

Les données générées par ce projet éclairent les décisions des concepteurs lors de la conception d'infrastructures de drainage, en mettant l'accent sur les différents paramètres des pluies et des bassins versants, en particulier dans le contexte des changements climatiques. Ce projet met également en lumière l'importance de l'imperméabilité des sols et du rôle de l'infiltration dans le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant urbain. Il souligne qu'il est important de développer dès maintenant des solutions visant à réduire l'imperméabilité et à favoriser la capacité d'infiltration des sols pour atténuer l'impact des changements climatiques sur les infrastructures de drainage.

Ces conclusions contribuent à une compréhension améliorée des mécanismes hydrologiques sous-jacents, facilitant ainsi la prise de décision éclairée dans le contexte des changements climatiques et de la gestion des bassins versants.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*, 50(10), 7541-7562. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- Alamdari, N., Claggett, P., Sample, D. J., Easton, Z. M., & Nayeb Yazdi, M. (2022). Evaluating the joint effects of climate and land use change on runoff and pollutant loading in a rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 330(1), 129953. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129953>
- Alamdari, N., Sample, D. J., Ross, A. C., & Easton, Z. M. (2020). Evaluating the Impact of Climate Change on Water Quality and Quantity in an Urban Watershed Using an Ensemble Approach. *Estuaries and Coasts*, 43(1), 56-72. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00649-4>
- Alamdari, N., Sample, D. J., Steinberg, P., Ross, A. C., & Easton, Z. M. (2017). Assessing the Effects of Climate Change on Water Quantity and Quality in an Urban Watershed Using a Calibrated Stormwater Model. *Water*, 9(7), 464. <https://doi.org/10.3390/w9070464>
- American Society of Civil Engineers (ASCE), & Water Environment Federation (WEF). (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. New York, N.Y. : American Society of Civil Engineers. (doi : 10.1061/9780872628557). Repéré à <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780872628557>
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R. G., Krinner, G., Marotzke, J., ... Zickfeld, K. (2021). Technical Summary. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou, Éds) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Aryal, A., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2019). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1), 193-209. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2359-3>
- Association canadienne de normalisation (CSA). (2019). *Élaboration, interprétation et utilisation de l'information relative à l'intensité, à la durée et à la fréquence (IDF) des chutes de pluie : guide à l'intention des spécialistes canadiens en matière de ressources en eau* (Rapport No. CSA PLUS 4013:F19). Toronto, ON : Canadian Standards Association.

- Bandyopadnyay, M. (1972). Synthetic Storm Pattern and Run-off for Gauhati, India. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(5), 845-857. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003307>
- Bartles, M., Brauer, T., Ho, D., Fleming, M., Karlovits, G., Pak, J., ... Willis, J. (2022). *Hydrologic Modeling System : HEC-HMS User's Manual* (U.S. Army Corps of Engineers). Davis, CA : (s.n.).
- Begum, R. A., Lempert, R. J., Elham, A., Benjaminsen, T. A., Bernauer, T., Cramer, W., ... Wester, P. (2022). Point of Departure and Key Concepts. Dans H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, ... B. Rama (Éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 121-196). Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press. Repéré à <https://doi.org/10.1017/9781009325844.003>
- Bellouin, N. (2015). Aerosols : Role in Climate Change. Dans G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Éds), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (pp. 76-85). Amsterdam : (s.n.). Repéré à <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00054-2>
- Bosshard, T., Carambia, M., Goergen, K., Kotlarski, S., Krahe, P., Zappa, M., & Schär, C. (2013). Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Water Resources Research*, 49(3), 1523-1536. <https://doi.org/10.1029/2011WR011533>
- Bronstert, A., Niehoff, D., & Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modeling capabilities. *Hydrological Processes*, 16(2), 509-529. <https://doi.org/10.1002/hyp.326>
- Bucci, S. (2021). *Étude et implémentation de techniques d'analyse de sensibilité dans les modèles de tarification Non-Vie : Application à la tarification à l'adresse*. École nationale de la statistique et de l'administration Économique (ENSAE), Le Chatelier, France. Repéré à https://foundation.scor.com/sites/default/files/2022-01/Silvia_Bucci_Memoire_ia-light.pdf
- Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (BRIC). (2019). *Suivi de l'état des infrastructures publiques essentielles du Canada : Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes de 2019*. Canada : The Canadian Infrastructure Report Card. Repéré à <http://www.canadianinfrastructure.ca/downloads/bulletin-rendement-infrastructures-canadiennes-2019.pdf>
- Cai, W., Liu, J., Zhu, X., Zhao, X., & Zhang, X. (2022). Estimating the Role of Climate Internal Variability and Sources of Uncertainties in Hydrological Climate-Impact Projections. *Sustainability*, 14(19), 12201. <https://doi.org/10.3390/su141912201>

- Canadian Infrastructure Report Card (CIRC). (2019). *The Canadian Infrastructure Report Card*. Canada : The Canadian Infrastructure Report Card. Repéré à <http://canadianinfrastructure.ca/en/index.html>
- Canadian Standards Association (CSA). (2019). *Development, interpretation and use of rainfall intensity-duration-frequency (IDF) information: Guideline for Canadian water resources practitioners* (Rapport No. CSA PLUS 4013:19). Toronto, ON : Canadian Standards Association. Repéré à <https://www.csagroup.org/store/product/CSA%20PLUS%204013:19/>
- Cronshey, R., & United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban hydrology for small watersheds* (Rapport No. 210- VI- TR-55, Second Edition). Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., ... Zolina, O. (2021). Water Cycle Changes. Dans V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Éds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1055-1210). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- Enting, I. G. (2018). Metrics for Greenhouse Gas Equivalence. Dans D. A. Dellasala & M. I. Goldstein (Éds), *Encyclopedia of the Anthropocene* (Vol. 1, pp. 467-471). Oxford : Elsevier. Repéré à <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09789-5>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2021). Ensembles de données climatiques en génie. Repéré à https://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html
- Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A., & Bauder, A. (2012). Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. *Water Resources Research*, 48(2), W02521. <https://doi.org/10.1029/2011WR010733>
- Fisher, R. A. (1920). A mathematical Examination of the Methods of determining the Accuracy of Observation by the Mean Error, and by the Mean Square Error. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 80(8), 758-770. <https://doi.org/10.1093/mnras/80.8.758>
- Gao, C., Booij, M. J., & Xu, Y.-P. (2020). Assessment of extreme flows and uncertainty under climate change: disentangling the uncertainty contribution of representative concentration pathways, global climate models and internal climate variability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6), 3251-3269. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3251-2020>

- Gouvernement du Canada. (2023). *Budget 2023 : Un plan canadien une classe moyenne forte, une économie abordable, un avenir prospère* (Rapport No. F1- 23/3F- PDF). Canada : Gouvernement du Canada. Repéré à <https://www.budget.canada.ca/2023/home-accueil-fr.html>
- Gouvernement du Québec. *Q-2, r. 9.01 - Code de conception d'un système de gestion des eaux pluviales admissible à une déclaration de conformité* (2023). Repéré à <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/rc/Q-2,%20R.%209.01.pdf>
- Government of Canada. (2023). *Budget 2023 : A Made-in-Canada Plan: Strong Middle Class, Affordable Economy, Healthy Future* (Rapport No. F1- 23/3E- PDF). Canada : Government of Canada. Repéré à <https://www.budget.canada.ca/2023/report-rapport/toc-tdm-en.html>
- Government of Québec. (2023). 1981-2010 Climate Normals : Québec's climate. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm>
- Hogg, W. D. (1980). Time distribution of short duration rainfall : Proceedings (pp. 53-63). Communication présentée au Canadian Hydrology Symposium, Downsview, Ontario : Atmospheric Environment Service.
- Hogg, W. D. (1982). Distribution of rainfall with time : design considerations, Compte-rendus. Communication présentée au A.G.U. Chapman conference on rainfall rates, Urbana, Illinois : American Geophysical Union.
- Hogg, W. D., Carr, D. A., & Routledge, B. (1985). *Rainfall intensity-duration frequency values for Canadian locations* (Rapport No. CLI-1-85). Downsview, Ontario : Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Repéré à https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/en57-23/En57-23-1-85.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland : IPCC. Repéré à https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- Keifer, C. J., & Chu, H. H. (1957). Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(4), 1-25. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000104>
- Kind, J. M. (2014). Economically efficient flood protection standards for the Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), 103-117. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12026>
- Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., & Weingartner, R. (2013). The importance of glacier and forest change in hydrological climate-impact studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 619-635. <https://doi.org/10.5194/hess-17-619-2013>

- Lawrence, D. (2020). Uncertainty introduced by flood frequency analysis in projections for changes in flood magnitudes under a future climate in Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100675>
- Li, Y., & Liu, J. (2023). Green roofs in the humid subtropics: The role of environmental and design factors on stormwater retention and peak reduction. *Science of The Total Environment*, 858(1), 159710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159710>
- Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., & Vaïttinada, P. (2021). *Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques : Rapport final* (Rapport No. CC06.2). Québec : Ministère des transports du Québec.
- Mailhot, A., Rivard, G., Duchesne, S., & Villeneuve, J.-P. (2007). *Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec*. (Rapport No. R-874). Québec : INRS, Centre Eau, Terre et Environnement. Repéré à <https://espace.inrs.ca/id/eprint/2400>
- Mailhot, A., Talbot, G., & Panthou, G. (2014). *Mise à jour de certains paramètres du Manuel de conception des ponceaux et des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) : PHASE I* (Rapport No. R1505). Québec : INRS-Eau, Terre et Environnement. Repéré à <https://espace.inrs.ca/id/eprint/2419>
- Markus, M., Wuebbles, D. J., Liang, X.-J., Hayhoe, K., & Kristovich, D. A. R. (2012). Diagnostic analysis of future climate scenarios applied to urban flooding in the Chicago metropolitan area. *Climatic Change*, 111(3), 879-902. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0172-z>
- Martel, J.-L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., & Arsenault, R. (2021). Climate change and rainfall Intensity–Duration–Frequency curves : overview of science and guidelines for adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10), 1-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122)
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., ... van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109, 213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Meresa, H., Murphy, C., Fealy, R., & Golian, S. (2021). Uncertainties and their interaction in flood hazard assessment with climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(9), 5237-5257. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5237-2021>
- Merisalu, J., Sundell, J., & Rosén, L. (2021). A Framework for Risk-Based Cost–Benefit Analysis for Decision Support on Hydrogeological Risks in Underground Construction. *Geosciences*, 11(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020082>

- Millionshchikova, T. (2019). Projections of Selenga river runoff in the XXI century and uncertainty estimates. Dans *Proceedings of IAHS* (Vol. 381, pp. 107-112). <https://doi.org/10.5194/piahs-381-107-2019>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2023). *Exigences relatives à la gestion des eaux pluviales (sites non à risque)*. Québec : Gouvernement du Québec. Repéré à https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/fiches/Section02_legal_01_exigences.pdf
- Ministère de l'Environnement de l'Ontario. (1987). *Urban drainage design guidelines manual*. Toronto : Ontario Ministries of Natural Resources, Environment, Municipal Affairs and Transportation & Communications.
- Mitsova, D. (2014). Coupling Land Use Change Modeling with Climate Projections to Estimate Seasonal Variability in Runoff from an Urbanizing Catchment Near Cincinnati, Ohio. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(4), 1256-1277. <https://doi.org/10.3390/ijgi3041256>
- Mobilia, M., D'Ambrosio, R., Claverie, R., & Longobardi, A. (2021). Substrate Soil Moisture Impact on Green Roof Performance for an Experimental Site in Tomblaine, France. Dans O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, C. Garau, I. Blečić, D. Taniar, ... C. M. Torre (Éds), *ICCSA 2021 : Computational Science and Its Applications* (pp. 563-570). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86960-1_39
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X. L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., ... Andutta, F. (2019). Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9, 711-718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B., ... Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9, 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Nash, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association of Hydrological Sciences*, 45, 114-121.
- Nguyen, V.-T.-V. (2013). Climate Change Impacts on Design Storms and Urban Runoff Characteristics. Dans *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future* (pp. 1121-1130). Cincinnati, Ohio : American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412947.108>

- Packman, J. C., & Kidd, C. H. R. (1980). A logical approach to the design storm concept. *Water Resources Research*, 16(6), 994-1000. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p00994>
- Pichler, M. (2022). swmm-api: API for reading, manipulating and running SWMM-Projects with python. Zenodo. Repéré à <https://zenodo.org/records/7054804>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rivard, G. (2005). *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain : concepts et applications* (2e éd.). Québec : Alias communication design Incorporated.
- Rivard, G. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales : Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. Québec : Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2020783>
- Rossman, L. A., & Huber, W. C. (2015). *Storm Water Management Model reference manual : Volume I - Hydrology* (Vol. EPA/600/R-15/162A). Cincinnati, OH : National Risk Management Laboratory Office of Research and Development. Repéré à <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Rossman, L. A., & Simon, M. A. (2022). *Storm Water Management Model : user's manual version 5.2* (Center for Environmental Solutions and Emergency Response, Office of Research and Development, Vol. EPA/600/R-22/030). Cincinnati, OH : United States Environmental Protection Agency.
- Saint-Venant, A.-J.-C. B. de. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 73, 148-157, 237-240.
- Senatore, A., Fuoco, D., Maiolo, M., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2022). Evaluating the uncertainty of climate model structure and bias correction on the hydrological impact of projected climate change in a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101120. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101120>
- Shi, L., Feng, P., Wang, B., Liu, D. L., Zhang, H., Liu, J., & Yu, Q. (2022). Assessing future runoff changes with different potential evapotranspiration inputs based on multi-model ensemble of CMIP5 projections. *Journal of Hydrology*, 612(A), 128042. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128042>

- Thakali, R., Kalra, A., Ahmad, S., & Qaiser, K. (2018). Management of an Urban Stormwater System Using Projected Future Scenarios of Climate Models: A Watershed-Based Modeling Approach. *Open Water*, 5(2), 1-17.
- The MathWorks, inc. (1994). Matlab. Repéré à <https://www.mathworks.com/>
- Wang, Q., Huang, J., Chang, N., & Yu, Z. (2023). Regional heterogeneity and driving factors of road runoff pollution from urban areas in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(6), 3041-3054. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01398-3>.
- Watt, W. E., Chow, K. C. A., Hogg, W. D., & Lathem, K. W. (1986). A 1-h urban design storm for Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13(3), 293-300. <https://doi.org/10.1139/l86-041>
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., ... Roberts, N. M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522-555. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- Westra, Seth, Alexander, L., & Zwiers, F. (2013). Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate*, 26, 7834. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Wu, J. Y., Thompson, J. R., Kolka, R. K., Franz, K. J., & Stewart, T. W. (2013). Using the Storm Water Management Model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 4743-4758. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4743-2013>
- Yin, D., Evans, B., Wang, Q., Chen, Z., Jia, H., Chen, A. S., ... Leng, L. (2020). Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. *Science of The Total Environment*, 720, 137630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137630>
- Yip, S., Ferro, C. A. T., Stephenson, D. B., & Hawkins, E. (2011). A Simple, Coherent Framework for Partitioning Uncertainty in Climate Predictions. *Journal of Climate*, 24(17), 4634-4643. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4085.1>
- Yuan, Q., Thorarinsdottir, T. L., Beldring, S., Wong, W. K., & Xu, C.-Y. (2023). Assessing uncertainty in hydrological projections arising from local-scale internal variability of climate. *Journal of Hydrology*, 620(A), 129415. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129415>
- Yunlong, S., Zhang, J., Zhu, J., Li, W., Chang, A., & Yi, T. (2017). Spatial and Temporal Variations of Water Quality and Trophic Status in Xili Reservoir: a Subtropics Drinking Water Reservoir of Southeast China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 100, 012183. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/100/1/012183>

- Zahmatkesh, Z., Karamouz, M., Goharian, E., & Burian, S. (2015). Analysis of the Effects of Climate Change on Urban Storm Water Runoff Using Statistically Downscaled Precipitation Data and a Change Factor Approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001064)
- Zahmatkesh, Z., Karamouz, M., Goharian, E., Burian, S. J., & Tavakol-Davani, H. (2014). Climate Change Impacts on Urban Runoff in a New York City Watershed. Dans *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders* (pp. 938-951). Portland, OR : Environmental and Water Resources Institute of ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784413548.096>