

ÉVALUATION DE MESURES D'ADAPTATION AUX INONDATIONS AVEC PCSWMM ET PROMETHEE POUR UN TRÈS PETIT BASSIN VERSANT

par

Audrey COULOMBE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 6 OCTOBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Audrey Coulombe, 2021



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 :

Mme. Annie Poulin, directrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

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

M. Tony Wong, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Michel Baraër, 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 26 AOÛT 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mes directeurs de recherche, Annie Poulin, Mathias Glaus et Jean-Luc Martel pour leur soutien à la réalisation de ce projet et le partage de leur expertise.

J'aimerais remercier Michel Baraër et Sébastien Ménard pour leur contribution à l'installation de deux stations limnimétriques, aux jaugeages et tous leurs précieux conseils techniques.

J'aimerais remercier Geneviève Audet pour son apport au projet par son appréciation des impacts environnementaux liés aux mesures d'adaptation, mais surtout pour son rôle de coordonnatrice entre les différentes parties prenantes d'un projet plus global dans lequel celui du mémoire s'insère.

J'aimerais remercier Steve Girard pour son partage de la connaissance du territoire et pour son implication.

J'aimerais aussi remercier mes camarades étudiants du laboratoire HC3 pour les discussions improvisées et leur soutien tant scientifique que moral. Patrice, Magali, Andréa, Jonathan et Guillaume : Merci ! J'aimerais aussi remercier Charles et Kristina avec qui de bons moments ont été partagés à l'ABDÉTS !

Enfin, merci à Frédéric pour tout, tout simplement. Et à ma famille qui me soutient de près à quelques 800 km de distance.

Évaluation de mesures d'adaptation aux inondations avec PCSWMM et PROMETHEE pour un très petit bassin versant

Audrey COULOMBE

RÉSUMÉ

Les inondations sont des préoccupations majeures, car elles constituent un danger pour les habitants des zones riveraines. Les petits bassins versants ne sont pas épargnés par cette problématique et les communautés y habitant n'ont souvent pas les ressources pour y faire face. L'objectif de cette étude est donc de développer une méthodologie pour évaluer différentes mesures d'adaptation pour une municipalité en tête d'un petit bassin versant non jaugé et sujet aux inondations. Pour y arriver, un modèle hydrologique et hydraulique très détaillé et adapté au territoire a été mis en place à l'aide du logiciel PCSWMM. Ce modèle a été calibré et validé avec des événements sélectionnés à partir de mesures du niveau d'eau sur une année. Le modèle est ensuite utilisé pour tester différentes mesures d'adaptation dans un contexte de changements climatiques afin de mieux évaluer leur résilience en climat futur. Les résultats du modèle montrent que l'abaissement du ponceau Boyer et le reprofilage aval de la rivière permettent de diminuer le niveau de l'eau dans la section villageoise de Saint-Isidore puisque ceux-ci provoquent une retenue permanente de l'eau. Ensuite, une analyse multicritère appartenant à la famille des méthodes de surclassement, PROMETHEE, prenant en compte des critères socio-économiques, environnementaux et techniques permet d'hierarchiser les mesures d'adaptation en fonction des préférences des décideurs du territoire et, ainsi appuyer la réflexion associée au processus de prise de décision. Ce processus permet d'orienter la municipalité vers des mesures répondants aux préoccupations de ses décideurs et résilientes aux changements climatiques. En effet, l'analyse multicritère indique que la déconnexion des gouttières et le bassin de rétention permettent de répondre aux critères et préférences. En bref, cette étude a permis d'identifier les données à colliger pour mener une étude sur les crues d'un très petit bassin versant non jaugé ainsi qu'une méthode d'analyse multicritère permettant d'hierarchiser des mesures d'adaptation aux inondations. D'autres municipalités et praticiens pourront se baser sur cette méthodologie pour identifier des mesures résilientes aux changements climatiques contre les inondations.

Mots-clefs : Inondation, modélisation hydrologique, modélisation hydraulique, changement climatique, analyse multicritère, PCSWMM, PROMETHEE

Assessment of adaptation measures to floods with PCSWMM and PROMETHEE for a very small watershed

Audrey COULOMBE

ABSTRACT

Floods are of major concerns as they constitute a hazard for inhabitants of riparian area. Small watersheds are not spared by this problematic and often the communities living there do not have the resources to address it. Therefore, the aim of this study is to develop a methodology to evaluate different adaptation measures for a municipality at the head of an ungauged small watershed subject to floods. To do so, a very detailed hydrologic and a hydraulic model that suits the territory was designed using the PCSWMM software. This model was calibrated and validated using selected events from a one-year monitoring of water level. The model was then used to test the adaptation measures in a climate change context to better assess their resilience in a future climate. The results of the model show that the lowering of the Boyer culvert and the downstream reprofiling of the river make it possible to reduce the water level in the village section of Saint-Isidore since this cause a permanent retention of water. With all these measures, a multi-criteria decision analysis (MCDA) with the PROMETHEE method considering socio-economic, environmental and technic criteria was performed. The MCDA approach aims to prioritize the measures according to the preferences of the onsite decision makers and support the thinking involved with the decision-making process. This process allowed to guide the municipality towards measures both resilient to climate change and adapted to the decision makers preferences. Indeed, the multicriteria analysis indicates that the disconnection of the gutters and the retention basin make it possible to meet the criteria and preferences. This study allowed to pinpoint data needed to conduct a flood study in a small and ungauged watershed. In addition, it allowed to develop a robust method to include the preferences of decision makers with the use of a MCDA with measures prioritization.

Keywords: Floods, hydrologic modelling, hydraulic modelling, climate change, multicriteria decision analysis, PCSWMM, PROMETHEE

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Caractérisation des inondations	3
1.2 Préoccupations liées aux inondations en milieux urbains et agricoles au Québec	4
1.2.1 Milieu urbain.....	5
1.2.2 Milieu agricole	7
1.3 Adaptation aux inondations	8
1.3.1 Définition du concept d'adaptation relié aux inondations	8
1.3.2 Exemples de mesures techniques d'adaptation.....	10
1.4 Modélisation des inondations	14
1.4.1 Hydrologie	14
1.4.1.1 Modèles hydrologiques.....	14
1.4.1.2 Dimensions temporelle et spatiale, et représentation des processus hydrologiques	15
1.4.1.3 Bassin versants jaugés et non-jaugés	18
1.4.1.4 Calibration et validation d'un modèle hydrologique	18
1.4.1.5 Collecte de données et instrumentation d'un bassin versant (température, précipitation et débit).....	19
1.4.2 Modélisation hydraulique des inondations	20
1.4.2.1 Hydraulique fluviale et urbaine	21
1.4.2.2 Collecte de données	21
1.4.2.3 Stratégies de calage d'un modèle hydraulique.....	22
1.4.3 Analyse fréquentielle	22
1.4.4 Impacts des changements climatiques : modélisation du climat et post-traitement des données de sortie des modèles de climat.....	22
1.4.5 Représentation visuelle des inondations	25
1.5 Méthode multicritère d'aide à la décision.....	26
1.5.1 Caractéristiques d'un problème multicritère.....	26
1.5.2 Méthodes multicritères en adaptation aux inondations.....	27
1.6 Objectifs de recherche.....	32
CHAPITRE 2 ÉTUDE DE CAS PROPOSÉE.....	33
2.1 Mise en contexte	33
2.2 Territoire à l'étude	33
2.2.1 Développement du territoire en regard de l'eau, d'hier à aujourd'hui	36
2.2.2 Secteur agricole.....	37
2.2.3 Secteur résidentiel.....	37
2.3 Problématique et préoccupations	39
2.4 Vers une démarche d'adaptation.....	42

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	45
3.1 Principales étapes de la démarche.....	45
3.2 Modélisation hydrologique et hydraulique	46
3.2.1 Collecte de données	47
3.2.2 Instrumentation du territoire à l'étude	47
3.2.3 Délimitation du bassin versant et de ses sous bassins.....	50
3.2.4 Levée de terrain.....	54
3.2.5 Données météorologiques en climats présent et futur	54
3.2.6 Occupation du sol	58
3.2.7 Pédologie.....	59
3.2.8 Réseaux de drainage mineur et majeur	59
3.2.8.1 Réseau de drainage majeur – rivière Saint-Régis	59
3.2.8.2 Réseau de drainage – fossés agricoles	61
3.2.8.3 Réseau de drainage mineur – conduites pluviales	61
3.2.8.4 Réseau de drainage majeur – rues.....	62
3.2.9 Bassin de rétention.....	62
3.2.10 Réseau de drainage agricole.....	62
3.2.11 Écoulement souterrain de l'eau.....	64
3.2.12 Jaugeage au fluorimètre et au vélocimètre.....	65
3.2.13 Calibration et validation du modèle hydrologique et hydraulique.....	65
3.2.14 Scénarios climatiques.....	69
3.3 Aide à la prise de décision	70
3.3.1 Mesures techniques d'adaptation proposées.....	71
3.3.2 Choix de la méthode d'aide à la décision	73
3.3.3 Sélection des critères.....	74
3.3.4 Pondération des critères	77
3.3.5 Attribution de valeurs aux critères.....	79
3.3.6 Seuils de préférence et d'indifférence.....	79
3.3.7 Flux positifs, flux négatifs, flux nets et flux globaux	80
3.3.8 Classement des mesures d'adaptation.....	80
CHAPITRE 4 RÉSULTATS	81
4.1 Calibration du modèle hydrologique et hydraulique PCSWMM	81
4.2 Simulation des mesures d'adaptation avec PCSWMM en climat présent et futur	87
4.3 Mesure minimale proposée et combinaisons de mesures	94
4.4 Hiérarchisation des mesures d'adaptation	98
4.4.1 Matrice de décision.....	98
4.4.2 Résultats de hiérarchisation pour les scénarios de pondération.....	100
4.4.3 Analyse de sensibilité pour le choix des précipitations synthétiques	104
CHAPITRE 5 DISCUSSION	107
5.1 Modélisation hydrologique et hydraulique	107
5.1.1 Choix du modèle et résolutions temporelle et spatiale	107
5.1.2 Collecte de données limnimétriques	108
5.1.3 Techniques de jaugeage	108

5.1.4	Calibration du modèle.....	110
5.1.5	Données terrain inconnues pouvant avoir une influence sur l'hydrologie.....	110
5.2	Changements climatiques	112
5.2.1	Pourcentage unique.....	112
5.2.2	Pourcentages variables.....	112
5.3	Choix des mesures d'adaptation	114
5.4	Outil d'aide à la décision	115
5.4.1	Choix des critères.....	116
5.4.2	Scénarios de pondération des critères	116
5.4.3	Attribution de valeurs aux critères.....	117
5.4.4	Continuité de la démarche en adaptation.....	117
5.5	Recommandations.....	118
5.5.1	Prévision des changements climatiques.....	118
5.5.2	Atelier participatif et implication des parties prenantes	118
5.5.3	Recommandations sur la méthodologie développée pour un autre projet similaire	119
5.5.4	Recommandations proposées pour Saint-Isidore.....	120
CONCLUSION.....		121
ANNEXE I	DONNÉES À RECUEILLIR POUR LE MODÈLE PCSWMM ET LEURS SOURCES.....	123
ANNEXE II	LEVÉE DE TERRAIN	125
ANNEXE III	OCCUPATION DU SOL	129
ANNEXE IV	PÉDOLOGIE	131
ANNEXE V	RÉSEAUX DE DRAINAGE MAJEUR ET MINEUR	135
ANNEXE VI	RÉSEAU DE DRAINAGE AGRICOLE.....	139
ANNEXE VII	ÉQUATION DE HOOGHOUTD	141
ANNEXE VIII	ÉQUATION DE DUPUIT-FORCHHEIMER.....	145
ANNEXE IX	JAUGEAGE.....	149
ANNEXE X	CALCUL DES VALEURS DE LA MATRICE DE PERFORMANCE .	153
ANNEXE XI	ASSESSMENT OF ADAPTATION MESURES TO FLOODS WITH PCSWMM AND A MULTICRITERIA ANALYSIS FOR A VERY SMALL WATERSHED	171
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		191

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Méthode d'analyse multicritère employée en fonction d'une application reliée aux inondations28
Tableau 1.2	Exemple de critères utilisés dans le contexte de l'adaptation aux inondations29
Tableau 3.1	Jeux de données en climat présent et futur (température et précipitation) pour le bassin versant à l'étude56
Tableau 3.2	Mesures techniques d'adaptation retenues71
Tableau 3.3	Liste des critères et de leur signification.....75
Tableau 3.4	Pondérations des critères.....78
Tableau 4.1	Indicateurs de performance pour la calibration aux stations #1 et #2 du 14 octobre 2019 au 25 octobre 2019.....83
Tableau 4.2	Indicateurs de performance pour la validation aux stations #1 et #2 du 25 octobre 2019 au 4 novembre 2019.....84
Tableau 4.3	Indicateurs de performance pour la validation aux station #1 et #2 du 2 au 9 août 201986
Tableau 4.4	Hauteur maximale atteinte pour le statu quo et les mesures d'adaptation au droit du tronçon 50 m pour la pluie synthétique Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 2 ans90
Tableau 4.5	Hauteur maximale atteinte pour le statu quo et les mesures d'adaptation au droit du tronçon 50 m pour la pluie synthétique Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 25 ans90
Tableau 4.6	Débit maximum pour chaque mesure en climat présent et futur pour la pluie synthétique Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence de 2 ans ...92
Tableau 4.7	Débit maximum pour chaque mesure en climats présent et futur pour la pluie synthétique Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence de 25 ans94
Tableau 4.8	Matrice de décision (tableau de performances) pour l'étude99
Tableau 4.9	Flux net, entrant et sortant et classement complet PROMETHEE incluant les critères socio-économiques.....100

Tableau 4.10	Flux net, entrant et sortant et classement complet PROMETHEE en excluant les critères socio-économiques	102
Tableau 5.1	Majoration (%) entre le climat actuel (1980-1999) et le climat futur (2080-2099) du modèle ClimEx pour les précipitations du bassin versant à l'étude pour différentes durées de précipitations et différentes périodes de retour.....	113
Tableau-A I-1	Données à recueillir pour le modèle PCSWMM	123
Tableau-A III-1	Pourcentage d'imperméabilité du sol en fonction du type d'occupation du sol.....	130
Tableau-A III-2	Coefficient de Manning associé au ruissellement de surface	130
Tableau-A III-3	Stockage dans les dépressions en fonction du type de surface	130
Tableau-A IV-1	Association entre le type de sol décrit dans la carte pédologique et la classe de sol correspondante d'après l'écriture du nom du sol pour l'utilisation de Green-Ampt comme processus mathématique d'infiltration de l'eau dans le sol.....	132
Tableau-A IV-2	Paramètres du modèle d'infiltration Green-Ampt.....	133
Tableau-A V-1	Coefficient de Manning attribué aux rives et au canal de la rivière Saint-Régis.....	135
Tableau-A V-2	Coefficient de Manning attribué aux rives et au canal des fossés agricoles	135
Tableau-A V-3	Coefficient de Manning (n) associé aux matériaux des conduites pluviales présentes à Saint-Isidore.....	135
Tableau-A V-4	Courbe de tarage du débit en fonction de la charge pour un puisard alimentant un regard pluvial	137
Tableau-A VII-1	Paramètres d'écoulement souterrain selon l'équation de Hooghoudt en fonction des types de sols rencontrés à Saint-Isidore	142
Tableau-A VII-2	Paramètres d'écoulement souterrain entrés dans le logiciel PCSWMM pour représenter l'équation d'écoulement souterrain de Hooghoudt en fonction des différents types de sol à Saint-Isidore	143
Tableau-A VIII-1	Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=25m.....	146

Tableau-A VII-2	Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=37,5m.....	147
Tableau-A VIII-3	Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=57,5m.....	147
Tableau-A X-1	Valeur du critère Coût de l'investissement (Socio-économique).....	153
Tableau-A X-2	Valeur du critère Coût d'opération et d'entretien (Socio-économique)....	155
Tableau-A X-3	Valeur du critère Coût de réfection (Socio-économique).....	156
Tableau-A X-4	Valeur du critère Complexité administrative (Socio-économique)	158
Tableau-A X-5	Valeur du critère Facilité de mise en œuvre (Technique).....	159
Tableau-A X-6	Valeur du critère Facilité à maintenir (Technique).....	160
Tableau-A X-7	Valeur du critère Facilité à renouveler (Technique)	161
Tableau-A X-8	Valeur du critère Mesure éprouvée (Technique)	162
Tableau-A X-9	Valeur du critère Potentiel d'infiltration (Environnemental).....	163
Tableau-A X-10	Valeur du critère Potentiel d'érosion (Environnemental).....	164
Tableau-A X-11	Valeur du critère Qualité des habitats (Environnemental).....	165
Tableau-A X-12	Valeur du critère Qualité de l'eau (Environnemental)	166
Tableau-A X-13	Matrice de performance	167
Tableau-A XI-1	Description and units of the selected criteria.....	179
Tableau-A XI-2	Performance indicators for both validation events	182
Tableau-A XI-3	The sub-criteria and their properties for the multicriteria analysis. The units of q and p are the same as their respective sub-criterion's unit	186

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Limite du lit mineur (lit normal) et de la plaine inondable d'un cours d'eau Tiré de Gouvernement du Canada (2010a)3
Figure 1.2	Différentes stratégies d'adaptation, « faire face », incrémentielle et transformative9
Figure 1.3	Digue cédant à l'eau à Sainte-Marthe-sur-le-Lac engendrant une inondation11
Figure 1.4	Exemple de bassin de rétention sec (gauche : Collection personnelle) et humide (droite : tiré de Ville de Saint-Jérôme (2009)).....11
Figure 1.5	Exemples d'infrastructures vertes (Toit vert et jardin de pluie).....12
Figure 1.6	Hydrogramme de ruissellement avant urbanisation, après urbanisation et avec bassin de rétention13
Figure 1.7	Cycle de l'eau15
Figure 1.8	Comparaison entre des données journalières et horaires de débit et de précipitation pour une crue16
Figure 1.9	Post-traitement de simulation climatique par perturbation24
Figure 1.10	Zones de faible courant et de grand courant25
Figure 2.1	Territoire de Saint-Isidore au sein de la MRC Roussillon et de la CMM.....34
Figure 2.2	Les trois bassins versants recoupant le territoire de la ville de Saint-Isidore et leur réseau hydrographique.....35
Figure 2.3	Évolution du tracé de la rivière Saint-Régis de 1930 à 2008. L'encadré en blanc pointillé montre le secteur à l'étude dans de mémoire36
Figure 2.4	Réseaux d'égout unitaire, pseudo-séparatif et séparatif38
Figure 2.5	Vue en plan du réseau d'égout séparatif (orange) et pseudo-séparatif (rouge) de Saint-Isidore. Les réseaux où l'information n'est pas disponible sont présentés en rose (Girard, 2019b).....38

Figure 2.6	Emplacement des portions de la rivière Saint-Régis concernées par les inondations printanières (1) et estivales (2) sur le territoire de Saint-Isidore et des photos montrées à la figure 2.7.....	40
Figure 2.7	Photos de la rivière Saint-Régis à divers moments de l'année a) Tronçon "embâcle" en été (27 juin 2020) b) Tronçon "embâcle" avant le déglacage (10 janvier 2020) c) Tronçon "embâcle" après le déglacage (13 mars 2020) d) Tronçon parc Sainte-Anne en dégel et pluie hivernale (11 janvier 2020) e) Idem à d) f) Tronçon agricole en amont du noyau villageois (11 septembre 2020)	41
Figure 3.1	Schéma de la méthodologie du présent projet	45
Figure 3.2	Les deux stations limnimétriques a) et b) de la rivière Saint-Régis à Saint-Isidore et vue en plan c)	48
Figure 3.3	a) Station #2 cassée, b) station temporaire (Station #2.1) et c) vue en plan de la translation entre les deux stations.....	49
Figure 3.4	Limites du bassin versant à l'étude obtenu par délimitation avec ArcGIS par rapport au territoire de la municipalité de Saint-Isidore et du découpage des bassins versants par le MELCC.....	51
Figure 3.5	Bassin versant alimentant la station #1 (mauve) et bassin versant complet dont l'exutoire est la station #2 (orange et mauve) et réseau hydrographique permanent et intermittent.....	52
Figure 3.6	Localisation des stations météorologiques (Sainte-Clotilde et Bec Sucre) et des points de grilles utilisés provenant des jeux de données climatiques (ERA5-Land et ClimEx).....	55
Figure 3.7	Occupation du sol à Saint-Isidore selon le plan d'urbanisme	58
Figure 3.8	Comparaison de la végétation a) en amont et b) en aval du ponceau Boyer.....	60
Figure 3.9	Schéma de l'écoulement souterrain en présence de drains agricoles selon Hooghoudt	63
Figure 3.10	Représentation des paramètres de l'équation d'écoulement souterrain de Dupuit-Forchheimer	65
Figure 3.11	Précipitations du 12 octobre 2019 au 25 octobre 2019 pour la calibration du modèle PCSWMM.....	66

Figure 3.12	Précipitations du 12 octobre 2019 au 4 novembre 2019 pour la validation du modèle PCSWMM.....	67
Figure 3.13	Précipitations du 30 juillet 2020 au 8 août 2020 pour la validation du modèle PCSWMM.....	67
Figure 3.14	Hydrogramme des pluies Chicago de récurrence 2 ans et 25 ans en climat actuel et majoré de 18 % à la station Sainte-Clotilde	69
Figure 3.15	Hydrogramme des pluies NRCS de récurrence 2 ans et 25 ans en climat actuel et majoré de 18 % à la station Sainte-Clotilde	70
Figure 3.16	Emplacement des mesures d'adaptation potentielle sur le territoire de Saint-Isidore.....	72
Figure 4.1	Calibration aux stations #1 et #2 du 14 octobre 2019 au 25 octobre 2019.....	82
Figure 4.2	Validation aux stations #1 et #2 du 25 octobre 2019 au 4 novembre 2019.....	84
Figure 4.3	Validation aux stations #1 et #2.1 du 2 août 2020 au 9 août 2020	85
Figure 4.4	Hauteur de l'eau pour chaque mesure d'adaptation seule pour la pluie synthétique Chicago en climat présent d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans suivant une pluie de 25 mm pour une section en amont du ponceau Boyer	88
Figure 4.5	Élévation du niveau de l'eau maximal atteint dans le village pour une pluie Chicago de durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo en climats présent et futur et les mesures d'adaptation en climat futur.....	89
Figure 4.6	Hydrogramme des débits à l'exutoire de la rivière Saint-Régis, pour la portion à l'étude, pour le statu quo et sept mesures d'adaptation en climats présent et futur pour une pluie de type Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 2 ans.....	91
Figure 4.7	Hydrogramme des débits à l'exutoire de la rivière Saint-Régis, pour la portion à l'étude, pour le statu quo et sept mesures d'adaptation en climats présent et futur pour une pluie de type Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 25 ans.....	93
Figure 4.8	Hauteur de l'eau au tronçon C43 (50 m) en climats présent et futur pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo, la mesure minimale, les combinaisons simples et la meilleure combinaison (en noir)	96

Figure 4.9	Débit à l'exutoire en climat présent et futur pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo, la mesure minimale, les combinaisons simples et la meilleure combinaison (en noir).....	97
Figure 4.10	Résultat du surclassement sous forme de losange pour quatre scénarios de pondération différents pour la pluie Chicago 3 h et de récurrence 25 ans	101
Figure 4.11	Résultat du surclassement sous forme de losange pour trois scénarios de pondération différents (sans socio-économique) pour la pluie Chicago 3 h de récurrence 25 ans	103
Figure 4.12	Résultat du surclassement sous forme de diamant pour chaque pluie synthétique en climat futur (majoration de 18 %) et une pondération égale pour chacun des critères	104
Figure 5.1	Écoulement en surface en amont du début de la rivière Saint-Régis.....	111
Figure-A II-1	Points du relevé d'arpentage (stations limnimétriques, station météorologique Bec Sucre, dessus des regards pluviaux, radiers des ponceaux, sections transversales de la rivière)	126
Figure-A II-2	Conditions d'arpentage a) Section de la rivière en amont du village b) Petite glace en amont du village c) Accumulation de neige dans la rivière Saint-Régis et glace en aval du village d) Accumulation importante de neige dans la rivière Saint-Régis en a.....	127
Figure-A II-3	a) Vue en plan de la section problématique et b) section problématique durant l'été	128
Figure-A III-1	Affectation du sol à Saint-Isidore selon le plan d'urbanisme (2011).....	129
Figure-A IV-1	Pédologie du bassin versant de la rivière Saint-Régis. Les différents codes de sols rencontrés sont détaillés au Tableau-A IV-1	131
Figure-A V-1	Coupe transversale d'une rue composant le réseau majeur modélisée dans PCSWMM	136
Figure-A VI-1	Parcelles (mauve) dont les plans de drainage agricole sont disponibles sur Info-Sol	139
Figure-A VII-1	Schéma de l'écoulement souterrain en présence de drains agricoles selon Hooghoudt	141
Figure-A VIII-1	Représentation des paramètres de l'équation d'écoulement souterrain de Dupuit-Forchheimer	145

Figure-A IX-1	Problématiques rencontrées pour le jaugeage au fluorimètre de la rivière Saint-Régis a) Perte de traceur par les plantes aquatiques b) Turbidité de l'eau	150
Figure-A XI-1	Localization of the study site	173
Figure-A XI-2	Localization of potential adaptation measures within the territory of Saint-Isidore	177
Figure-A XI-3	Validation at Station 1 (left) and Station 2 (right) from October 25 to November 4, 2019.....	181
Figure-A XI-4	Cross section (X-section) and longitudinal profile of maximum water levels for each adaptation measure alone for 3-hour 25-year return period Chicago synthetic storm following a 25 mm rainfall event.....	183
Figure-A XI-5	Hydrographs of the flow at the outlet of the Saint-Régis River (Station 2) for the portion under study, for the baseline (LR + C), the four individual adaptation measures combined with the LR + C baseline, and the best combination for peak flow reduction for a 3-hour Chicago storm with a 25-year return period under the future climate.....	184
Figure-A XI-6	Results from the multi-criteria analysis	186

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analytic Hierarchy Process
BDGA	Base de données géographiques et administratives
CEHQ	Centre d'expertise hydrique
CHI	Computational Hydraulic Int
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
COVABAR	Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ELECTRE	Élimination et choix traduisant la réalité
EPA	Environmental Protection Agency
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNSS	Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites
IDF	Intensité - durée – fréquence
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
LAU	Loi sur l'aménagement et l'urbanisme
LiDAR	Light Detection and Ranging
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques
MNT	Modèle numérique de terrain
MRC	Municipalité régionale de comté
MRCC5	Modèle régional canadien du climat version 5
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

NRCS	Natural Resources Conservation Service
NSE	Nash Sutcliffe Efficiency
OBV SCABRIC	Société de conservation et d'aménagement de la rivière Châteauguay
PAMC	Procédure d'agrégation multicritère
PEHD	Polyéthylène haute densité
PGO	Pratiques de gestion optimale
PPRLPI	Politique de protections des rives, du littoral et des plaines inondables
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PVC	Polychlorure de vinyle
RCP	Representative Concentration Pathway
ROBVQ	Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
SAW	Simple Additive Weighting Methods
SOPFEU	Société de protection des forêts contre le feu
SWMM	Storm Water Management Model
TBA	Tuyau en béton armé
TOPSIS	Technic for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TQC	Tel que construit ¹

¹ Le terme « Tel que construit » est maintenant proscrit par l'Ordre des ingénieurs du Québec. (Ordre des ingénieurs du Québec, 2020)

INTRODUCTION

Au printemps, les rivières du Québec méridional peuvent devenir des enjeux de sécurité publique en raison de leur niveau d'eau élevé. En ruisselant à proximité des milieux anthropiques, elles menacent de submerger ce qui se trouve en plaine inondable. L'été arrivé, les précipitations abondantes engendrées par les cellules orageuses ou les tempêtes tropicales peuvent aussi causer leur lot d'inconvénients. Ainsi, un éventail d'événements météorologiques est susceptible de causer des inondations (Gouvernement du Canada, 2013a).

En considérant que l'aménagement du territoire québécois s'est grandement réalisé à proximité des cours d'eau, les inondations peuvent avoir des conséquences importantes sur les populations et sur le milieu bâti comme ce fut le cas de plusieurs événements marquants d'inondation qui ont eu lieu depuis la dernière décennie et même avant. Que l'on pense aux événements reliés à la rivière Richelieu en 2011 ou bien à ceux ayant eu lieu en 2017 et 2019 notamment le long des rivières des Outaouais, des Mille Îles et du fleuve Saint-Laurent, elles n'auront laissé personne indifférent. Les inondations occasionnent des préjudices autant sur le plan matériel que sur le plan psychologique (Mersy, Maisonneuve, Limoges, Labbé, & La Presse Canadienne, 2011).

En regard de ces circonstances, il importe de garantir la résilience de nos milieux de vie en accord avec les inondations (Thomas & Da Cunha, 2017). Dans cette mesure, l'adaptation peut prendre l'aspect d'une digue contrant la montée des eaux de même que l'aspect d'une plaine inondable accueillant l'eau dans ses méandres. Le choix optimal d'une mesure ou d'un ensemble de mesures se révèle complexe. De surcroît, il est anticipé que les changements climatiques augmentent l'intensité et la fréquence des événements de précipitation extrême (J.-L. Martel, Mailhot, & Brissette, 2020). Ainsi, le choix d'une ou de mesure(s) résiliente(s) en climat futur s'impose.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de l'évaluation de mesures d'adaptation. D'une part, des études hydrologiques et hydrauliques permettent d'apprécier l'adéquation des

mesures d'adaptation au contexte à l'étude. Plusieurs mesures d'adaptation peuvent être efficaces pour réduire les inondations, souvent c'est le critère économique qui détermine le choix d'une mesure. Il est préférable qu'une analyse multicritère permette d'évaluer les différentes mesures en regard des critères pertinents et soigneusement choisis afin d'évaluer la performance en regard d'aspects socio-économiques, techniques et environnementaux par exemple. D'autre part, une analyse multicritère permet d'inclure les préférences des acteurs du territoire concerné par rapport aux critères en vue de supporter le processus de prise de décision éclairé (de Brito & Evers, 2016; Ishizaka & Nemery, 2013; Yan, Rousse, & Glaus, 2019).

Pour cette recherche, une étude de cas est proposée pour tester l'approche énoncée dans le précédent paragraphe. La problématique d'inondation est étudiée pour la municipalité de Saint-Isidore-de-Laprairie, principalement agricole, dont la portion du cours d'eau en faisant partie a été redressée. La municipalité est présentée plus en détail au chapitre 2.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre traite des différents aspects reliés aux inondations, des préoccupations générées au sein de la population et des outils techniques pour l'étude des inondations. C'est dans chapitre que les objectifs de la recherche sont énoncés. Le deuxième chapitre présente l'étude de cas, la municipalité de Saint-Isidore-de-Laprairie, les problématiques d'inondations, les préoccupations de la population et la démarche d'adaptation entreprise. Le troisième chapitre présente la méthodologie de cette recherche. La méthodologie est scindée en deux volets : la modélisation hydrologique et hydraulique puis l'analyse multicritère. Le quatrième chapitre présente les résultats. En premier lieu, les performances des mesures d'adaptation en regard des préoccupations de la population sont présentées. En deuxième lieu, des profils de préférences simulés et la performance des mesures d'adaptation pour les critères choisis permettent d'obtenir un surclassement des mesures d'adaptation. Finalement, le cinquième chapitre discute des choix effectués dans le cadre de cette recherche, des incertitudes et propose des recommandations pour les recherches futures.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Tout d'abord, il s'agit de comprendre le phénomène d'inondation ainsi que ses causes. Les inondations entraînant d'importants dégâts, il est ensuite question de discuter des enjeux et des préoccupations face à ce type d'aléa. Pour mieux les étudier, le domaine de l'hydrologie se veut une approche permettant notamment la modélisation des processus reliés au cycle de l'eau. Il est ensuite possible d'atténuer l'impact des inondations à l'aide de mesures potentielles hiérarchisées grâce à des méthodes d'aide à la décision. Finalement, ce chapitre aborde la question de recherche et les objectifs.

1.1 Caractérisation des inondations

Les inondations se produisent : « [...] lorsque le volume d'eau d'une rivière ou d'un cours d'eau dépasse la capacité de son lit. » (Gouvernement du Canada, 2013b). Cette eau se répand donc à la plaine inondable tel qu'illustré à la figure 1.1.

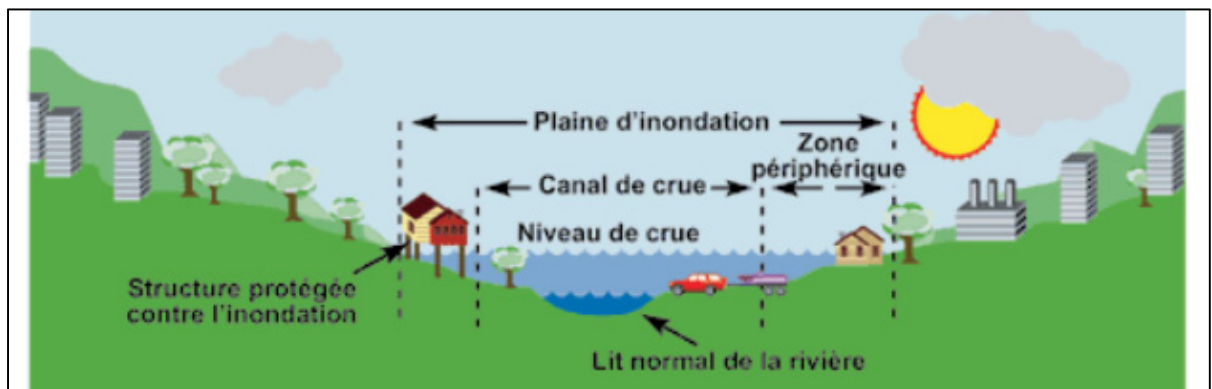


Figure 1.1 Limite du lit mineur (lit normal) et de la plaine inondable d'un cours d'eau
Tiré de Gouvernement du Canada (2010a)

Le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2021) identifie trois principaux types d'inondations :

- l'inondation en eau libre où il y a augmentation de la quantité d'eau dans la rivière;
- l'inondation par embâcle qui se produit lorsqu'un amoncellement de glace ou de débris empêche l'eau de circuler dans une rivière provoquant un refoulement et une montée du niveau de l'eau en amont de l'embâcle;
- l'inondation par submersion rencontrée en milieu côtier.

Ces inondations peuvent se produire selon différents contextes hydrométéorologiques et le gouvernement du Canada en décrit les quelques types présents en sol national. Une inondation peut se produire à toutes les saisons, mais la plus fréquente au Canada survient au printemps (Gouvernement du Canada, 2013a). L'eau accumulée sous forme de neige durant la saison froide se met à fondre lorsque les températures augmentent au-dessus du point de congélation ce qui génère une augmentation du volume d'eau qui ruisselle jusque dans les cours d'eau récepteurs. Aussi, une pluie intense peut occasionner une rapide montée des eaux selon les caractéristiques et la réponse hydrologique du bassin versant (Beven, 2020). En saison hivernale, des embâcles et débâcles peuvent également être à l'origine d'inondations (D'Astous & Paquet, 2004; Morse & Turcotte, 2018). Les inondations se produisent lorsque le niveau d'eau atteint la plaine d'inondation dû à un apport d'eau supérieur à la normale ou à la présence d'embâcle ou de débâcle, entraînant des effets potentiels sur les infrastructures civiles, industrielles et agricoles ainsi que des impacts sur les activités qui s'y rapportent.

1.2 Préoccupations reliées aux inondations en milieux urbains et agricoles au Québec

Historiquement, le Québec s'est bâti à proximité des cours d'eau et déjà des difficultés étaient constatées quant à la hausse du niveau de l'eau et ses conséquences sur les milieux de vie humains comme ce fut le cas en décembre 1642 à Ville-Marie (Côté, 2006). Actuellement, les inondations sont toujours l'objet de préoccupations. En effet, en 2006 au Québec, 80 % des municipalités riveraines étaient touchées par les inondations et les coûts engendrés étaient estimés entre 10 et 15 millions de dollars (Bélanger, Gosselin, & Poitras, 2006). Dans cette

mesure, les inondations représentent une préoccupation du point de vue des milieux anthropiques en regard de leur capacité à assurer la sécurité des citoyens et à maintenir la production de biens et services. Les inondations se produisant dans les grands bassins versants étant généralement plus médiatisées (de par l'ampleur des impacts et conséquences), il n'en reste pas moins que les inondations ont aussi des effets sur les communautés des petits bassins versants², comme celui étudié dans le cadre de ce mémoire et présenté au chapitre 2.

1.2.1 Milieu urbain

Les inondations de 1974, un année charnière, ont provoqué l'évacuation de 7 000 personnes au Québec près de plusieurs cours d'eau incluant la rivière Gatineau, la rivière des Outaouais, la rivière Richelieu, le fleuve Saint-Laurent, la rivière Châteauguay, la rivière Saint-Maurice et la rivière Chaudière. Les dégâts ont été estimés à 60 millions de dollars et les dédommagements distribués à 22 millions de dollars (Gouvernement du Canada, 2010b). En réaction à cet événement, cinq ans plus tard, la Loi sur l'aménagement et l'urbanisme (LAU) a été entérinée par le gouvernement du Québec (Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2018). Elle vise notamment à protéger les milieux riverains de toutes constructions afin d'éviter des catastrophes en milieux urbains (Croteau, 2019). Malgré cette solution, les inondations se succèdent encore aujourd'hui.

En ce qui concerne les événements de précipitations extrêmes, elles ont aussi engendré des inondations en 1987 à Montréal et en 1996 au Saguenay par exemple. Pour le premier événement, les rues se transformèrent en rivières, des canalisations explosèrent, le métro fut inondé tout comme 50 000 sous-sols dont celui d'Hydro-Québec qui n'a plus été en mesure de fournir de l'électricité à 350 000 foyers. Malheureusement, cette crue aura fait deux victimes et les dommages monétaires furent évalués à un demi-milliard de dollars de 2017 (Maisonnette, 2017). Lors des inondations du Saguenay, 50 villes et villages furent inondés,

² D'autres exemples de communautés impactées par les inondations sont nommés au sein du rapport final « Projet 551013 : Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées. » (Mayer-Jouanjan & Bleau, 2018)

15 825 personnes évacuées, 10 personnes décédées et l'événement engendra des coûts d'un milliard de dollars en dommages. C'était l'état d'urgence, des routes cédèrent, il y eut plusieurs glissements de terrain et des habitants attendirent d'être évacués par les secours (Chayer, 2016). Plus récemment, des inondations sont également survenues en 2011, 2017 et 2019. En 2011, la rivière Richelieu déborda de son lit et impacta 27 municipalités, 1651 personnes furent évacuées, 2375 maisons furent endommagées et les dégâts s'élevèrent à 72 millions de dollars. Malgré la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (ci-après PPRLPI) ("Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables," 2018) qui interdit la reconstruction d'une habitation détruite dans une zone de récurrence 0-20 ans, un décret du gouvernement du Québec permit la reconstruction des habitations sous certaines restrictions (Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu, 2020). Par la suite, en 2017, 293 municipalités furent inondées dont 5400 habitations et la crue força l'évacuation d'au moins 4 000 personnes. En 2019, c'est 240 municipalités qui furent touchées et plus de 10 000 personnes furent évacuées. Les inondations de 2017 et 2019 accumulèrent un montant en dommages de près d'un milliard de dollars (Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2020).

Outre le cadre bâti, les inondations représentent aussi un risque pour la santé publique. Les impacts liés à la santé publique surviennent pendant l'inondation, mais aussi après. En effet, le niveau de l'eau peut occasionner des noyades, mais aussi des électrocutions et des maladies gastro-intestinales, cutanées et respiratoires (Tairou, Bustinza, Gosselin, & Bélanger, 2011). Des intoxications au monoxyde de carbone à cause de l'utilisation de génératrice dans un endroit mal ventilé ou lors du nettoyage post-inondation constituent aussi un risque pour la santé des individus (Daley, Shireley, & Gilmore, 2001; Public Health England, 2014). Aussi, face à ces événements, certains groupes de la population sont plus à risque. En effet, les personnes de moins de 25 ans et plus de 60 ans sont plus à risque de décéder selon deux études, une états-unienne (Ashley & Ashley, 2008) et une australienne (Coates, 1999). Cela se traduit notamment par l'incapacité à quitter la zone inondée ou par la prise de risque indu (Tairou et al., 2011). Par exemple, les personnes âgées de plus de 65 ans dépendent souvent d'autres personnes pour être évacuées. De plus, les personnes de ce groupe présentant des difficultés

cognitives ou de mobilité sont plus à risque de décéder, de se blesser ou encore de subir des problèmes de santé à la suite d'une telle catastrophe (Généreux, Maltais, & Gachon, 2020). En outre, l'enquête nationale sur les impacts sociosanitaires des inondations 2019 montre l'importance des impacts sur la santé mentale associée aux inondations. Selon cette même étude, 44 % des sinistrés ont des symptômes de stress post-traumatique, 21 % présentent un trouble anxieux et 20 % un trouble de l'humeur, et ce, même plusieurs mois après l'inondation (Généreux et al., 2020). Des préoccupations demeurent comme les coûts associés à la rénovation des habitations et également ceux pour couvrir les pertes matérielles tout en cherchant une nouvelle résidence pour certains d'entre eux (Mersy et al., 2011). L'accompagnement des sinistrés dans leurs démarches demeure essentiel pour leur bien-être physique et émotionnel (Fortin, Martel, & Trahan, 2012).

1.2.2 Milieu agricole

En milieu agricole, les effets des inondations se caractérisent généralement par des pertes monétaires pour les agriculteurs. En 2011, 500 fermes près du Richelieu ont été inondées; 6 000 hectares de terre cultivable n'ont étéensemencés comme prévu et des troupeaux ont dû être évacués (Mersy et al., 2011). Les indemnités versées par la Financière agricole étaient de 1 376 528 \$ (Mercier, 2019). En 2019, les parcelles agricoles de la grande plaine inondable du lac Saint-Pierre ont été inondées durant un mois et demi. Cela a occasionné un retard dans la plantation des semis ainsi qu'un manque d'oxygène dans le sol ce qui a entraîné la disparition des vers de terre et l'asphyxie des racines des plantes (Mercier, 2019). Certains agriculteurs ont même dû abandonner l'idée de semer leurs champs (Montembeault, 2017). Cette même année, les indemnisations ont totalisé 918 700 \$ (Mercier, 2019). En marge de l'inondation directe des terres agricoles, le redressement des cours d'eau a eu pour effet de déplacer et d'accroître la problématique d'inondation sur les secteurs en aval en augmentant la vitesse de parcours de l'eau (Comité scientifique en soutien à l'élaboration du plan d'action gouvernemental en aménagement du territoire relatif aux inondations, 2019). Face à ces inondations et aux préoccupations qu'elles engendrent, des mesures sont envisageables afin d'en mitiger leurs effets.

1.3 Adaptation aux inondations

Selon Thomas et Bleau (2017) : « La capacité d'adaptation est la faculté des populations ou des systèmes naturels de diminuer les impacts négatifs potentiels d'un événement donné ou d'en augmenter les impacts bénéfiques, en prenant des mesures appropriées. » Il sera donc question d'explorer quelques exemples d'adaptation aux inondations dans cette section.

1.3.1 Définition du concept d'adaptation relié aux inondations

L'adaptation réfère aux mesures mises en place afin de réduire la vulnérabilité d'une communauté en regard des impacts attribuables aux inondations (Lemmen et al., 2004; Ouranos, 2018). Deux approches sont envisageables pour réduire les impacts des inondations dont les méthodes dites de protection contre les inondations (robustesse) et les méthodes de gestion du risque des inondations (résilience) (Tempels & Hartmann, 2014). La première approche réfère aux mesures de protection traditionnelles telles les barrages et les digues qui influencent le risque d'inondation. La deuxième approche renvoie quant à elle au concept de flexibilité (résilience) par la gestion du risque des inondations en considérant le risque d'inondation et l'aménagement du territoire comme un système dynamique. Les méthodes mises en place dans le cadre de la deuxième approche sont moins claires et nécessitent la participation de plusieurs acteurs dans une approche dite systémique (Loucks, Stedinger, Davis, & Stakhiv, 2008). En effet, il ne s'agit plus de circonscrire seulement le système hydrique relié à l'aléa, mais d'y inclure aussi la dimension de gestion intégrée et d'aménagement du territoire (Ouranos, 2018; Tempels & Hartmann, 2014). Selon Fisher (2015) et Laganier (2013), la résilience se décline en plusieurs définitions. La résilience inclurait la capacité de rebondir suite à une inondation (résilience postactive) (Dahm, 2014) et la capacité de s'adapter ou de se transformer en réponse à une inondation non familière, imprévue et extrême (résilience proactive) (de Bruijne, Boin, & van Eeten, 2010). En ingénierie, le concept de résilience est plutôt lié au concept de période de retour présenté à la section 1.4.3 (Folke, 2006). En ce sens, tel que l'illustre la figure 1.2, les mesures peuvent viser à « faire face » aux inondations, à augmenter le niveau de protection ou à transformer

l'approche pour appréhender les effets potentiels des inondations (European Environment Agency, 2016).

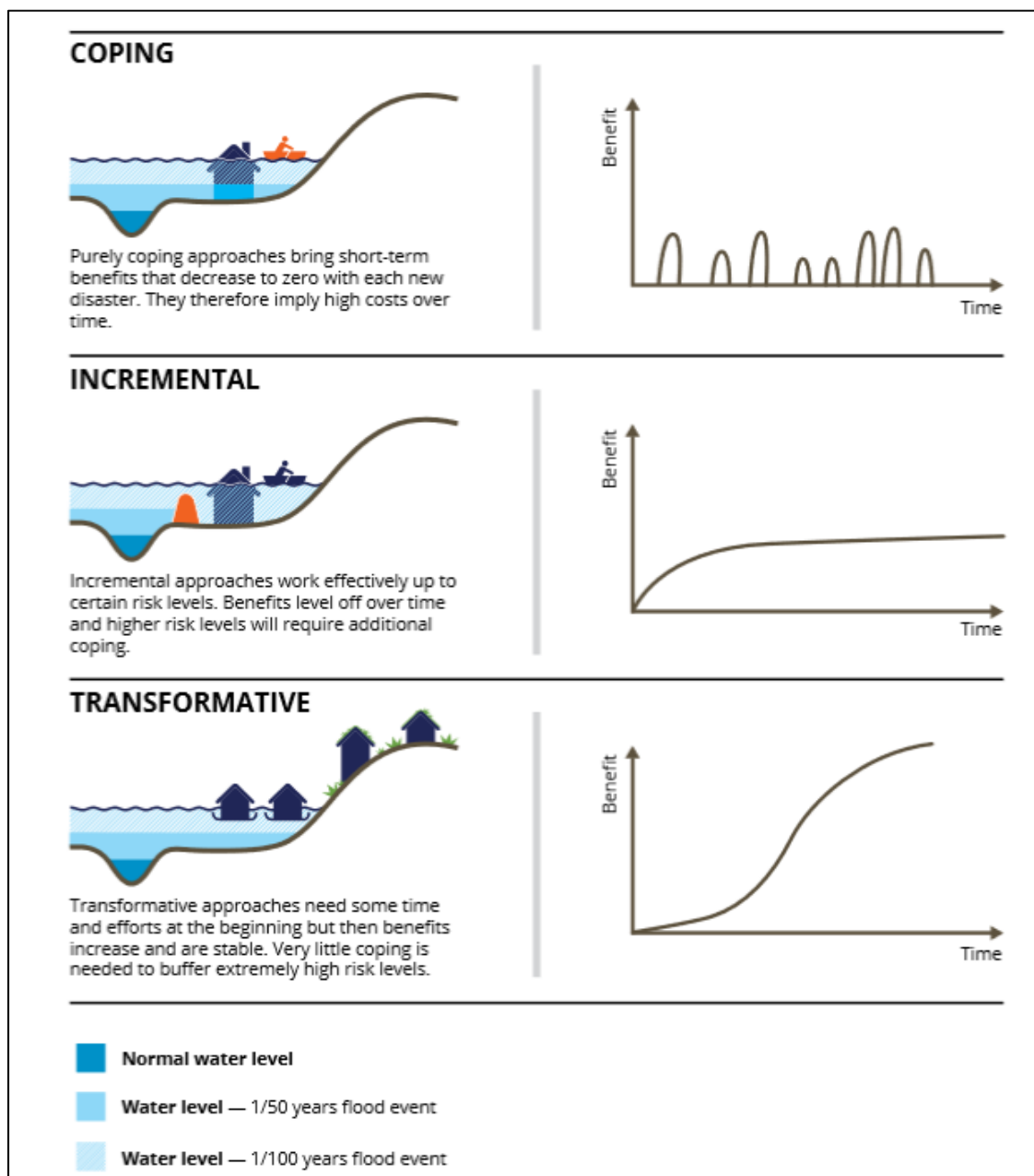


Figure 1.2 Différentes stratégies d'adaptation, « faire face », incrémentielle et transformative
Tiré de European Environment Agency (2016)

Tel qu'illustré à la figure 1.2, les retombées diffèrent en fonction du type d'approche. Une approche visant à faire face (*coping*) est moins bénéfique à long terme comparativement à une approche transformative, et ce, pour plusieurs périodes de retour. Tel que l'illustration le suggère et en lien avec le concept de résilience de même que soulevé par Daouda, Akkari, et Bryant (2017), pour une période de retour élevée, une approche de co-construction entre plusieurs acteurs serait plus avantageuse à long terme.

1.3.2 Exemples de mesures techniques d'adaptation

Plusieurs exemples de mesures techniques existent et elles se présentent sous différentes formes. La mesure peut être de nature architecturale, donc à l'échelle du bâtiment et urbanistique, ou encore à l'échelle d'un quartier ou d'une ville par exemple.

Pour Architecture sans frontières Québec (2020) (ASFQ), l'adaptation aux inondations par l'architecture des bâtiments s'avère un incontournable au Québec. La façon actuelle de concevoir les bâtiments pourrait être revue afin d'améliorer leur résilience face aux inondations. De plus, le débat pour la permission de la reconstruction ou non des bâtiments touchés lors d'inondation et en zone inondable pourrait laisser place à l'inclusion de mesures architecturales innovantes. Enfin, ASFQ propose de « bâtir autrement et d'apprendre à mieux vivre avec l'eau » pour initier un « virage bleu ».

À l'échelle d'un quartier ou d'une ville, les mesures les plus connues sont les digues et les bassins de rétention. Les digues visent à contenir l'eau pour l'empêcher d'inonder un secteur vulnérable. Cependant, cette mesure n'est pas infaillible comme l'a montré la rupture de la digue qui protégeait Sainte-Marthe-sur-le-Lac où 6 000 personnes ont dû être évacuées lors des crues de 2019 (Champagne, 2020; Paiement, 2017). Pour ce qui est des bassins de rétention ou bassin d'orage, l'objectif est d'intercepter l'eau de ruissellement, l'accumuler et la restituer au milieu récepteur plus lentement afin d'éviter sa surcharge permettant dès lors de réduire les problématiques d'érosion des berges et les risques d'inondations des terres en aval (Brière, 2012; Mahaut, 2017). Comme mesures prometteuses, les infrastructures vertes acquièrent une

popularité grandissante auprès des villes pour améliorer la gestion des eaux pluviales (Mahaut, 2017). Les infrastructures vertes prennent différents aspects (toits verts, noues, cellules de biorétention, jardins de pluie par exemple (Ecology Ottawa, 2020)) et leur but est le contrôle à la source des précipitations. Les figure 1.3, figure 1.4 et 1.5 illustrent trois types de mesures d'adaptation (digue, bassin de rétention et infrastructures vertes) et la figure 1.6 montre l'impact sur le ruissellement des bassins de rétention.

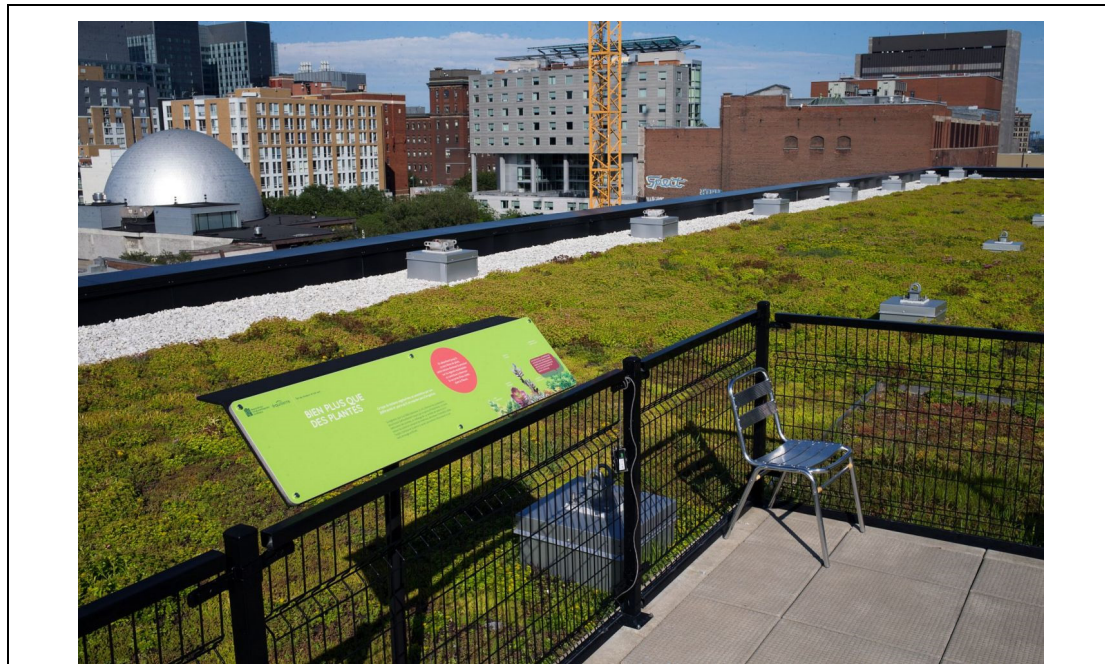


Figure 1.3 Digue cédant à l'eau à Sainte-Marthe-sur-le-Lac engendrant une inondation

Tiré de TVA Nouvelles (2019)



Figure 1.4 Exemple de bassin de rétention sec (gauche : collection personnelle) et humide (droite : Tiré de Ville de Saint-Jérôme (2009))



Toit vert de la Maison du développement durable à Montréal (de Carufel, 2017)



Jardin de pluie (Tiré de Ville de Gatineau, 2020)

Figure 1.5 Exemples d'infrastructures vertes (Toit vert et jardin de pluie)

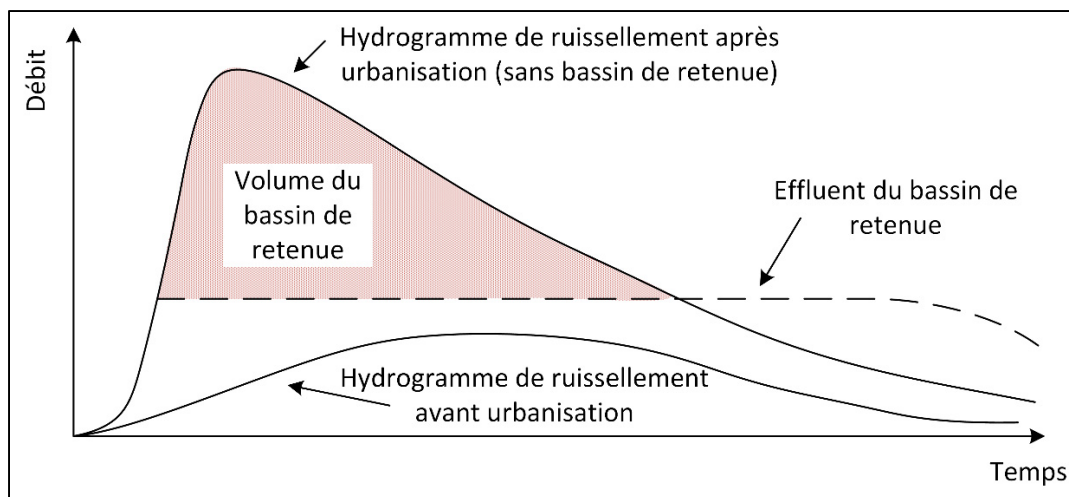


Figure 1.6 Hydrogramme de ruissellement avant urbanisation, après urbanisation et avec bassin de rétention
Adapté de Brière (2012)

Dépendamment des caractéristiques du site à l'étude, il existe plusieurs autres mesures pour s'adapter aux inondations. En voici une liste non exhaustive (Bouchard & Lucas Jacob, 2017; Institut national de santé publique, 2020a) :

- estacades fixes ou flottantes;
- seuils;
- digues;
- barrage pour la glace;
- barrages pour le contrôle des crues déclenchant la débâcle;
- aménagement de l'hydraulicité du cours d'eau;
- aménagement du territoire (zonage);
- retrait des rejets des gouttières du réseau d'égout pluvial;
- matériaux perméables et poreux pour les routes, trottoirs et les stationnements;
- aménagement d'une zone inondable;
- baril de pluie;
- canal de dérivation d'un cours d'eau.

Une combinaison de mesures peut également être envisagée. Afin de faire un choix pour implanter une ou des mesures d'adaptation, l'approche par modélisation permet d'une part, d'évaluer les conséquences sur le territoire d'événements hydroclimatiques et d'autre part l'effet des mesures d'adaptation.

1.4 Modélisation des inondations

La modélisation permet de recréer des événements observés à l'aide d'un modèle hydrologique en calibrant ses paramètres internes pour l'adapter au territoire à l'étude et ainsi prévoir les épisodes d'inondations ou même tester des scénarios hypothétiques visant à atténuer ou prévenir les inondations.

1.4.1 Hydrologie

Le domaine d'étude principal s'intéressant aux inondations dans le cadre de cette recherche est l'hydrologie. « L'hydrologie est la science qui étudie principalement le cycle de l'eau dans la nature, en ce qui a trait à sa distribution géographique et temporelle dans l'atmosphère, en surface (lacs et rivières) et dans le sol et le sous-sol. (Anctil, Rousselle, & Lauzon, 2012) » Cette science s'intéresse aux processus reliés au cycle de l'eau au sein d'une unité appelée bassin versant. Ce dernier délimite spatialement les conditions frontières de l'étude; « L'eau retenue dans ce domaine géographique contribue au débit à cet exutoire. (Anctil et al., 2012) » La figure 1.7 présente les processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant.

1.4.1.1 Modèles hydrologiques

Les processus hydrologiques peuvent être représentés au sein de modèles. Un modèle communément utilisé en hydrologie est sans doute le modèle pluie-débit qui se décline de plusieurs façons. En général, les précipitations (liquides et solides) et températures sont les données en entrée du modèle et le débit, le volume d'eau par unité de temps, est la donnée en sortie du modèle. Entre les deux, des équations mathématiques représentent de manière plus ou moins simplifiée les processus hydrologiques (Cunge, 2003; Moradkhani & Sorooshian, 2008). La valeur du débit peut ici indiquer s'il y a présence ou non d'inondation par rapport à des seuils connus pour un emplacement précis comme le fait le site web Vigilance (Institut national de santé publique, 2020b). Comme mentionné précédemment, plusieurs modèles hydrologiques existent et leurs différences résident entre autres dans leurs dimensions temporelle et spatiale, et dans leur représentation des processus hydrologiques.

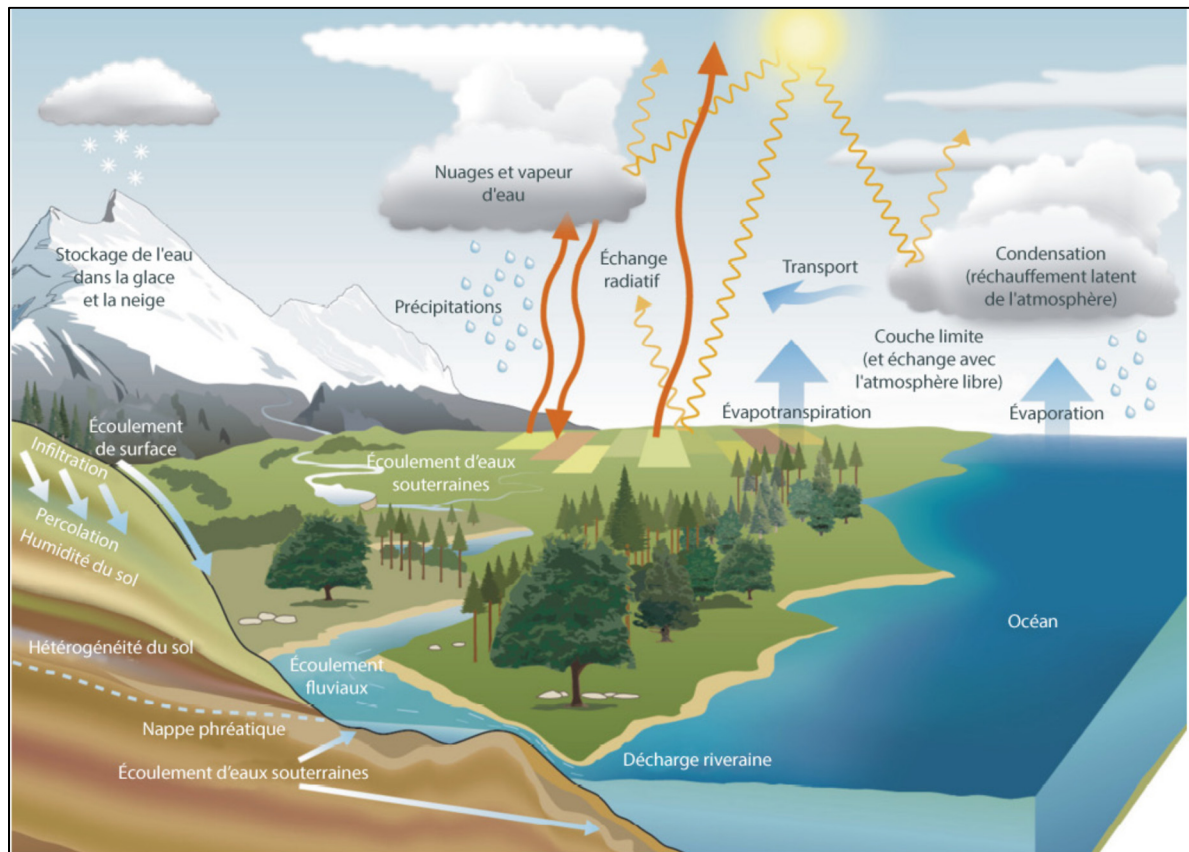


Figure 1.7 Cycle de l'eau
Tiré de MET Office (2012)

1.4.1.2 Dimensions temporelle et spatiale, et représentation des processus hydrologiques

Pour la dimension temporelle, il s'agit du choix de pas de temps pour la modélisation. Différentes considérations peuvent influencer le choix du pas de temps. La disponibilité des données sur une base journalière favorise l'emploi d'un modèle journalier par exemple. Toutefois, certaines fonctions permettent de désagréger les données journalières en données horaires permettant l'emploi d'un modèle au pas de temps horaire (Bennett, Robertson, Ward, Hapuarachchi, & Wang, 2016). Pour un petit bassin versant réactif, de quelques km² seulement, dont le débit monte et redescend rapidement, il devient pertinent de procéder avec une modélisation sous-journalière en utilisant des données acquises à un pas de temps horaire

pour mieux représenter les variations du débit au cours d'une même journée (Mathevet, 2005). La figure 1.8 illustre la différence entre la modélisation à un pas de temps journalier et un pas de temps horaire pour un bassin versant de 2 km². La répartition de la crue sur un pas de temps horaire, dans cet exemple, permet de constater que le débit de pointe est d'environ deux fois supérieur à ce qui aurait été modélisé au pas de temps journalier. Il en est de même pour la pluie qui se montre plus intense sur un plus court laps de temps. Le pas de temps pour la capture des données est important pour en déceler les variations à fine échelle temporelle.

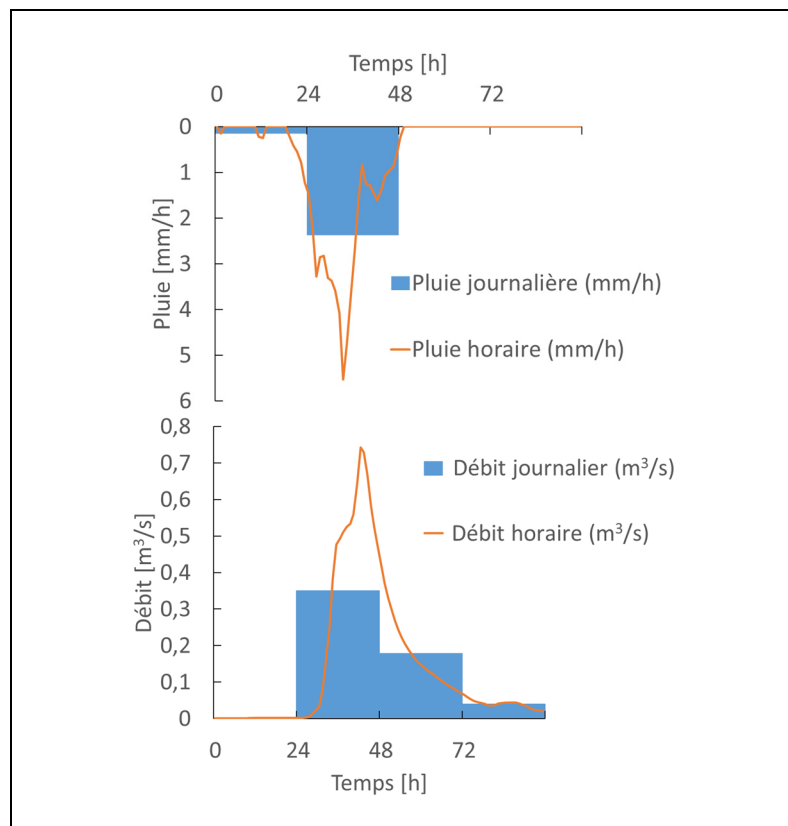


Figure 1.8 Comparaison entre des données journalières et horaires de débit et de précipitation pour une crue

Adapté de Mathevet (2005)

La dimension spatiale est représentée par le degré de spatialisation de l'information des modèles, qui vont de globaux (homogènes) à distribués (hétérogènes). Le modèle global

considère le bassin versant comme une unique entité spatialement homogène. Ses caractéristiques sont uniformes en tout point de même que ses données en entrée comme les précipitations et la température par exemple. Pour le modèle distribué, les caractéristiques changeantes au sein du bassin versant sont prises en compte en discrétisant spatialement le modèle par sous-bassins versants où à l'aide d'un maillage. Ainsi, il est possible de moduler les processus hydrologiques en fonction des différentes caractéristiques du territoire. En théorie, les modèles distribués ont l'avantage de mieux représenter le bassin versant grâce à la spatialisation des processus hydrologiques et des événements météorologiques. Toutefois, lorsque l'intérêt se porte spécifiquement sur le débit à l'exutoire du bassin versant, les modèles distribués ne montrent pas nécessairement d'avantages aux modèles globaux. Le principal avantage des modèles distribués réside dans leur capacité à fournir de l'information en plusieurs points du bassin versant (Jean-Luc Martel, Brissette, & Poulin, 2020).

La modélisation hydrologique peut être empirique, conceptuelle ou à base physique (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Pour les modèles empiriques, des régressions sont employées pour lier les intrants du modèle avec le débit. Le désavantage de cette représentation est que le transfert d'une régression d'un bassin versant à un autre ne peut être garanti. Pour les modèles conceptuels, le cheminement de l'eau est typiquement représenté à l'aide d'interactions entre différents réservoirs³ dont l'ensemble permet de convertir les précipitations en débit à l'exutoire. Quant aux modèles à base physique, des équations représentant la physique des processus sont utilisées. De façon générale, les modèles empiriques et conceptuels ont des paramètres devant être ajustés lors de la calibration tandis que les équations à base physique ont des paramètres pouvant être associés à des caractéristiques du terrain.

En bref, le choix des discrétisations temporelle et spatiale ainsi que le choix de la nature de la représentation des processus hydrologiques dépend du besoin exprimé, des données disponibles et de la capacité de calcul à disposition. Enfin, toutes ces dimensions permettent

³ Ces réservoirs peuvent représenter l'accumulation d'équivalent en eau dans le couvert de neige, la hauteur d'eau dans la zone vadose, ou encore dans la nappe phréatique, par exemple.

au modèle d'accomplir sa principale fonction, soit de fournir de l'information à propos du cycle de l'eau pour le bassin versant à l'étude.

1.4.1.3 Bassin versants jaugés et non-jaugés

Comme la fonction principale d'un modèle hydrologique est de fournir un débit, il importe que celui-ci représente la réalité observée. En lien avec cette caractéristique, deux types de bassins versants sont distingués : le bassin versant jaugé et celui non-jaugé. Le bassin versant jaugé possède une station de mesure à son exutoire permettant de connaître le débit en ce point contrairement au bassin versant non-jaugé pour lequel cette information est inconnue. Dans ce cas, l'installation d'une station de mesure permet de combler ce manque d'information.

1.4.1.4 Calibration et validation d'un modèle hydrologique

Un modèle hydrologique possédant des paramètres peut nécessiter d'être calibré (Cunge, 2003). L'objectif de la calibration est d'obtenir un débit simulé à partir d'un modèle hydrologique dont les paramètres permettent de se rapprocher le plus possible du débit observé. Pour ce faire, des algorithmes de calage et des fonctions objectifs permettent d'optimiser l'adéquation entre ces deux débits en faisant varier des paramètres, de manière automatisée. Le calage peut également être effectué manuellement, par essais-erreurs. Dans tous les cas, il s'agit d'une résolution de problème inversée où les paramètres à l'intérieur du modèle qui permettent d'obtenir le débit observé à l'exutoire du bassin versant sont recherchés (Moradkhani & Sorooshian, 2008). Un modèle calibré peut ensuite servir à tester des scénarios d'adaptation aux inondations par exemple.

La validation du modèle s'effectue sur une autre période temporelle que celle où le modèle a été calibré pour vérifier la robustesse du choix des paramètres. Pour une validation satisfaisante, le modèle hydrologique est prêt à être utilisé pour d'autres études. Au contraire, une validation insatisfaisante entraîne une révision du processus de calibration ou du choix du modèle.

1.4.1.5 Collecte de données et instrumentation d'un bassin versant (température, précipitation et débit)

Les données météorologiques permettent d'alimenter le modèle hydrologique et les données hydrométriques de calibrer les paramètres du modèle. Pour les données de température et de précipitation, plusieurs sources de données sont disponibles. Les premières sources de données à consulter proviennent des réseaux de stations météorologiques d'Environnement et changements climatiques Canada ainsi que les données du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (Gouvernement du Canada, 2020; Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020). Leur principal avantage est que les données sont vérifiées et traitées tout en ayant une couverture temporelle couvrant plusieurs années. Il existe aussi un réseau coopératif au Québec composé de plusieurs partenaires dont les deux organismes gouvernementaux nommés précédemment, ainsi que le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Rio Tinto, la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) et le Réseau pommier du Québec pour n'en nommer que quelques-uns (Lepage & Bourgeois, 2011). Ces données météorologiques peuvent être disponibles de façon journalière ou à chaque heure. Toutefois, le nombre de stations fournissant des données au pas de temps horaire est restreint. Aussi, le réseau étant peu dense à certains endroits, il est difficile d'inclure les précipitations convectives, comme les orages estivaux, au sein de la modélisation. La proximité de la station ou des stations par rapport au bassin versant modélisé est donc primordiale.

Dans le cas où aucune station ne peut combler ce besoin, des jeux de données sur grille peuvent constituer une alternative. Il s'agit d'un jeu de données interpolées sur une grille régulière à partir de données existantes de stations météorologiques appartenant à un territoire. Pour en connaître davantage à ce sujet, consulter Bajamngni Gbambie, Poulin, Boucher, et Arsenault (2017) ainsi que Essou, Sabarly, Lucas-Picher, Brissette, et Poulin (2016). Une autre possibilité est l'utilisation de données issues de réanalyses climatiques. Ces dernières sont générées à l'aide de modèles météorologiques, suivant le même principe que les prévisions météorologiques, mais de manière rétrospective. Différents types d'observations atmosphériques (et parfois terrestres comme la précipitation) sont assimilées afin d'assurer une

la meilleure représentation possible des conditions atmosphériques au début de chaque horizon de « prévision » (Dee et al., 2011).

Pour obtenir des données de débit d'un cours d'eau, un peu plus de 230 stations sont disponibles à travers le Québec (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2019b). Principalement, ce sont des stations limnimétriques dont les hauteurs d'eau sont converties en débit à l'aide de courbes de tarage. Pour construire cette courbe de tarage, deux mesures sont nécessaires : la hauteur de l'eau et son débit. La mesure du niveau de l'eau peut être effectuée, en continu, au moyen de codeurs à flotteurs, de capteurs à ultra-sons, de capteurs radar ou de capteurs de pression (Baraër, 2017). Des mesures ponctuelles du débit, communément appelées jaugeages, sont ensuite effectuées sur le terrain. Ainsi, en effectuant des mesures du débit pour plusieurs niveaux d'eau, il est possible de traduire une large gamme de conditions, idéalement depuis les étiages jusqu'aux crues. Plusieurs techniques de jaugeage comme l'exploration par le champ de vitesse et les méthodes chimiques permettent d'obtenir le débit (Baraër, 2017). La technique par exploration du champ de vitesse consiste à mesurer la vitesse à plusieurs points d'une section transversale du cours d'eau. L'intégration de ces vitesses à la section moyenne qu'elles occupent permet de calculer le débit. Dans les méthodes chimiques, l'utilisation de traceurs comme la rhodamine et la fluoresceine est courante. Un fluorimètre est nécessaire pour capter les variations des concentrations de traceurs dans l'eau et c'est par le principe de conservation de masse que le débit est déduit (Baraër, 2017). Peu importe les sources de données considérées, il convient de retenir que l'information qui sera utilisée comporte un certain niveau d'erreur et d'incertitude (Trewin, 2015).

1.4.2 Modélisation hydraulique des inondations

Utilisée en complément aux études hydrologiques, la modélisation hydraulique permet de caractériser, en plus du débit, les hauteurs d'eau et les vitesses dans un cours d'eau ou au sein d'une conduite fermée (drainage urbain). Ainsi, différents scénarios d'inondations peuvent être simulés afin d'en connaître l'étendue spatiale. Des scénarios d'aménagements de mesures

d'adaptation peuvent aussi être modélisés et testés pour en simuler les impacts sur l'écoulement de l'eau au sein du bassin versant à l'étude (CIVILTECH, 2017).

1.4.2.1 Hydraulique fluviale et urbaine

L'hydraulique fluviale se réfère à la caractérisation des écoulements dans un cours d'eau à surface libre naturel ou artificiel. L'hydraulique urbaine se réfère aux réseaux de drainage majeur constitué des rues, et au réseau mineur constitué des conduites d'égout pluvial (Brière, 2012; Graf & Altinakar, 2008).

1.4.2.2 Collecte de données

Plusieurs données sont nécessaires afin d'utiliser un modèle hydraulique. Pour la modélisation fluviale, les sections transversales de la rivière sont nécessaires afin de modéliser l'écoulement de l'eau dans le cours d'eau. Ceci peut être obtenu par levé de terrain, par un échosondeur ou bien par un relevé LiDAR bathymétrique. Selon Samuels (1990), le choix des sections à caractériser se fait :

- aux limites amont et aval du modèle;
- à chaque structure (ponts et ponceaux par exemple);
- aux changements dans la géométrie du cours d'eau;
- à toutes les stations de mesure du niveau de l'eau et aux endroits clefs identifiés pour l'étude.

Pour modéliser le drainage urbain, des plans des réseaux d'égouts pluviaux sont nécessaires. Les plans informent sur l'emplacement des regards pluviaux, des puisards pluviaux et des conduites, de leur élévation et de leurs diamètres ainsi que des matériaux les constituant. Ainsi, le réseau peut être modélisé.

1.4.2.3 Stratégies de calage d'un modèle hydraulique

Comme pour le modèle hydrologique, des données de mesure du débit ou du niveau de l'eau sont nécessaires afin de calibrer le modèle hydraulique. Principalement, c'est par le calage des coefficients de Manning que l'on arrive à calibrer le modèle. Pour ce faire, une première itération consiste à attribuer un coefficient de Manning pour le canal et un pour les berges. Par la suite, les coefficients de Manning sont modifiés pour permettre à la simulation hydraulique de tendre vers ce qui est observé tout en respectant des valeurs du coefficient de Manning réalistes (Aronica, Hankin, & Beven, 1998; Di Baldassarre, Schumann, Bates, Freer, & Beven, 2010).

1.4.3 Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est couramment employée en hydrologie et en conception des ouvrages d'art. Elle permet d'associer un événement de pluie ou de débit à une période de retour. Par exemple, un événement pluvieux ayant une période de retour de 100 ans signifie que sa probabilité d'occurrence annuelle est de 1 %, en moyenne. Donc, cet événement se produirait 1 fois aux cent ans (en moyenne). En général, les données utilisées pour l'analyse fréquentielle (précipitations, débits, p. ex.) sont ajustées à une loi statistique. Ainsi, plus la série temporelle des données utilisées pour les calculs est longue, moins l'incertitude est grande pour les événements rarissimes (Meylan & Musy, 1999).

1.4.4 Impacts des changements climatiques : modélisation du climat et post-traitement des données de sortie des modèles de climat

Les modèles climatiques globaux permettent de modéliser le climat à l'échelle planétaire en prenant en compte les interactions et les rétroactions entre l'atmosphère, les océans, les eaux douces, la cryosphère, les terres et la biosphère. Ces modèles ont été développés pour simuler le climat présent et le climat futur, influencé par les émissions de gaz à effet de serre (Direction de l'expertise hydrique, 2018; Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012). Les scénarios de changements climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

nommés « profils représentatifs d'évolution de concentration » (*representative concentration pathway* RCP), permettent d'évaluer quatre scénarios hypothétiques de forçage radiatif qui engendrent des changements climatiques. De ces quatre scénarios, le RCP2.6 simule une baisse du forçage radiatif, le RCP4.5 simule une stabilisation du forçage radiatif et les RCP6 et RCP8.5 simulent une hausse du forçage radiatif (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). L'intérêt en hydrologie d'utiliser ces modèles est de pouvoir anticiper les impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau.

Cependant, la résolution spatiale des modèles climatiques globaux est trop grossière pour une étude à l'échelle d'un petit bassin versant. C'est pourquoi, les modèles climatiques régionaux, représentant le climat à plus fine résolution, sont plus appropriés. Alimentés par les modèles climatiques globaux à leurs frontières latérales, ils reproduisent le climat pour une étendue spatiale d'aire limitée et leurs variables à plus fine résolution spatio-temporelle peuvent être utilisées pour des études hydrologiques (Martynov et al., 2013). Néanmoins, des techniques de post-traitement doivent quand même être utilisées pour que les données climatiques conviennent au modèle hydrologique. En effet, les modèles climatiques présentent des biais (température trop chaude ou trop froide, précipitations trop abondantes ou trop rares) pouvant influencer le cycle de l'eau (Chen, Brissette, Chaumont, & Braun, 2013).

À cet effet, un post-traitement par perturbation, aussi connue sous le nom de méthode des deltas, permet de corriger ces biais (Diaz-Nieto & Wilby, 2005). La méthode par perturbation compare la série simulée en période de référence avec la série simulée en période future pour en extraire des facteurs de perturbation ou deltas. En général, ces perturbations ou deltas sont calculés à des périodes mensuelles, car ils varient tout au long de l'année. Une fois ces facteurs de perturbation obtenus, ils sont appliqués à la série observée en période de référence pour en obtenir la série dite observée en période future. La schématisation de cette méthode est illustrée à la figure 1.9 (Direction de l'expertise hydrique, 2018). Les équations 1.1 et 1.2 sont inscrites à la suite de cette figure pour la méthode des deltas. Ces méthodes peuvent servir à corriger, par exemple, la température et les précipitations avant de les utiliser dans un modèle

hydrologique. Pour plus d'information sur les méthodes de post-traitement, l'article de Chen et al. (2013) peut être consulté.

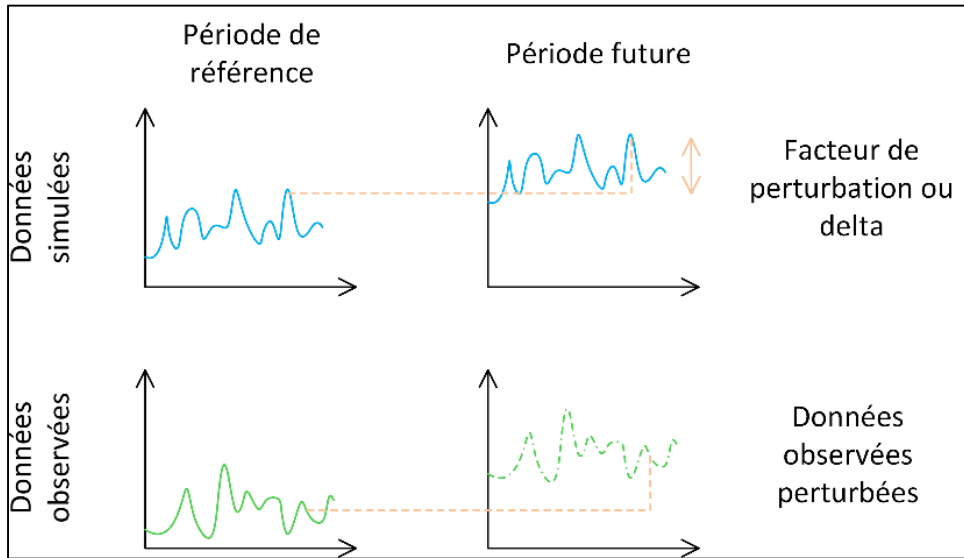


Figure 1.9 Post-traitement de simulation climatique par perturbation
Adapté de Direction de l'expertise hydrique (2018)

$$T_{futur} = T_{observé} + (T_{GCM,futur} - T_{GCM,référence}) \quad (1.1)$$

$$P_{futur} = P_{observé} \times (P_{GCM,futur} / P_{GCM,référence}) \quad (1.2)$$

D'autres méthodes sont aussi utilisées pour tenir compte des changements climatiques. Par exemple, Mailhot, Panthou, et Talbot (2014) émettent des pourcentages d'augmentation des précipitations reliés aux courbes IDF (intensité-durée-fréquence) pour tenir compte des changements climatiques en fonction de la région au Québec. Le MELCC reprend ce même principe dans son Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales en proposant un pourcentage unique d'augmentation pour les précipitations ayant une période de retour de 2 ans et plus (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017). Une faiblesse de la méthode actuellement suggérée par le MELCC a été soulevée par J.-L. Martel et al. (2020) et concerne le pourcentage unique du

MELCC appliqué aux périodes de retour supérieures à 2 ans qui ne reflète pas la variation observée des précipitations en fonction de leur durée et de leur fréquence. En effet, il est attendu que les durées plus courtes et les fréquences plus rares entraînent des augmentations relatives plus importantes.

1.4.5 Représentation visuelle des inondations

Il y a plusieurs façons de représenter les inondations dans la littérature et dans la pratique qui en général sont sous la forme de cartes. Actuellement, c'est la représentation par cote de crue qui est préconisée par le Gouvernement du Québec. Cette dernière est expliquée dans la PPRLPI ("Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables," 2018) qui séquence les inondations en zone de grand courant et en zone de faible courant comme illustré à la figure 1.10. Ces zones sont distinguées par la récurrence des crues :

- la zone de faible courant peut être inondée par une crue de récurrence de 20 ans;
- la zone de grand courant peut être inondée par une crue de récurrence de 100 ans.

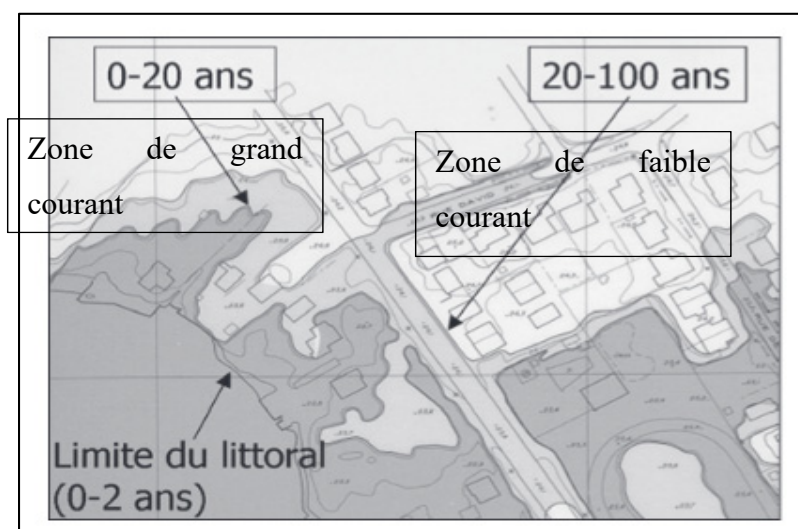


Figure 1.10 Zones de faible courant et de grand courant
Tiré de Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les
changements climatiques (2015)

1.5 Méthode multicritère d'aide à la décision

Les méthodes multicritères d'aide à la décision permettent d'analyser des problèmes complexes à plusieurs dimensions en prenant en compte différents points de vue exprimés par les acteurs du milieu. Il s'agit d'un processus par lequel des mesures sont comparées entre elles par le biais de critères afin de déterminer la ou les mesure(s) le(s) mieux appropriée(s) pour le problème à l'étude et selon les préférences des acteurs (Guitouni, Bélanger, & Martel, 2010). En fonction du type de problème, la méthode multicritère peut être de l'ordre du choix, de tri, de rangement et de la description (Roy, 1985). Pour le problème de choix, la démarche vise à ne choisir qu'une seule mesure ou un groupe de mesures acceptables. Les problèmes de tri visent à regrouper des mesures similaires selon les catégories identifiées pour le problème. Le problème de rangement vise à produire un classement de la meilleure à la moins bonne mesure. Enfin, le problème de description permet de décrire les mesures et leurs conséquences (Ishizaka & Nemery, 2013).

1.5.1 Caractéristiques d'un problème multicritère

Le problème se définit par ses actions, ses critères et leur pondération ainsi que par la méthode d'agrégation choisie.

Le choix des critères est de grande importance pour permettre la comparaison des différentes mesures en considérant les aspects du contexte entourant l'aide à la décision. Perch-Nielsen (2010), stipule qu'il est possible de réduire la subjectivité reliée au choix des critères en appliquant les recommandations suivantes :

- choisir des indicateurs relevant d'un cadre théorique;
- utiliser un proxy⁴ et;
- choisir des indicateurs sur la base d'un ensemble d'indicateurs.

⁴ Il s'agit d'une méthode pour déduire la valeur d'un critère qui ne peut être directement mesuré en utilisant des corrélations par exemple.

Pour cette étude, des indicateurs sont retenus sur la base d'indicateurs rendus disponibles par la littérature. Il s'agit d'un processus itératif où les différents indicateurs sont comparés entre eux pour être soit rejetés ou sélectionnés. Leur pondération peut se faire de plusieurs manières par les acteurs. Une manière efficace est d'effectuer un vote par jetons afin d'identifier le pourcentage d'importance d'un critère selon les acteurs.

Après avoir identifié l'objectif à atteindre, il importe de choisir une méthode d'agrégation permettant de comparer les critères des mesures.

L'agrégation des critères peut être complète, partielle ou locale. L'agrégation complète agit comme un principe d'entonnoir où tous les critères sont réduits à un seul critère tandis que l'agrégation partielle permet de surclasser les actions entre elles en acceptant le principe d'incomparabilité des critères. Un critère performant ne peut effacer une mauvaise performance d'un autre critère (Macharis, Springael, De Brucker, & Verbeke, 2004). Enfin, l'agrégation locale est un processus itératif où le problème progresse jusqu'à ce qu'il y ait convergence pour une mesure spécifique (Guitouni et al., 2010; Ishizaka & Nemery, 2013). Afin de parvenir à l'agrégation des critères, une procédure d'agrégation multicritère (PAMC) est utilisée. Il s'agit ni plus ni moins d'un algorithme mathématique.

1.5.2 Méthodes multicritères en adaptation aux inondations

de Brito et Evers (2016) ont fait une analyse des articles scientifiques ayant pour objet l'analyse multicritère en regard des inondations. Huit types d'applications aux inondations ont été dénombrés dont une qui consiste au classement de mesures de mitigation aux inondations (22 % de toutes les recherches, 41 articles entre 1995 et 2015)⁵.

⁵ L'étude de de Brito et Evers (2016) débute en 1995, mais le premier article publié en lien avec le domaine étudié aurait été publié en 1997. Ce n'est qu'à partir des années 2000 que la démarche d'analyse multicritère a été plus généralement utilisée.

Tableau 1.1 Méthode d'analyse multicritère employée en fonction d'une application reliée
aux inondations
Adapté de de Brito et Evers (2016)

Application	Description de l'application	AHP	TOPSIS	SAW	CP	ELECTRE	MAUT	PROMETHEE	VIKOR	AUTRE
Classement des alternatives pour l'atténuation des inondations	Sélection de la meilleure ou des meilleures alternatives pour mitiger les inondations	14	10	9	9	5	2	3	1	8
L'évaluation des risques (Hazard assessment)	Étude qualitative ou quantitative, spatiale et temporelle de la probabilité d'inondation destructrice	25	3	2	1	1	0	0	0	5
Évaluation de la vulnérabilité	Évaluation de la vulnérabilité des personnes, de leurs biens et de leurs moyens de subsistance lorsqu'inondés	21	3	5	1	1	2	0	0	4
Évaluation des risques (Risk assessment)	Analyse des conséquences des inondations combinées avec une condition de vulnérabilité existante pour des populations, leur propriété, les services et l'environnement	27	10	5	1	1	3	1	2	6
Évaluation de la sensibilité	Probabilité d'occurrence d'une inondation sur la base des conditions terrains (pente, élévation, lithologie)	18	0	4	0	0	0	0	0	0
Capacité d'adaptation	Évaluation de la capacité d'adaptation aux inondations des personnes, organisations et systèmes	8	4	2	0	0	1	0	0	0
La gestion des urgences	Organisation de la réponse (ressources et leurs responsabilités) en cas d'urgence	5	0	1	0	0	0	1	0	0
Contrôle des crues des réservoirs	Choix d'une méthode d'opération du réservoir pendant une période de crue	1	1	0	0	1	0	0	0	5

Les méthodes les plus utilisées pour l'évaluation de mesures de mitigation aux inondations sont AHP (14 articles), TOPSIS (10 articles) et SAW (neuf articles). Les méthodes de surclassement ELECTRE et PROMETHEE sont, respectivement, l'objet de cinq et trois articles. L'utilisation de plusieurs méthodes combinées est aussi possible. Un des intérêts de l'utilisation de la méthode AHP pour la pondération des critères repose sur la méthode de décomposition du problème en plus petites unités.

Il existe une certaine latitude dans le choix de la méthode en regard du type de problème à résoudre. En revanche, quel que soit la méthode sélectionnée, la sélection des critères doit être établie en fonction des caractéristiques des scénarios envisagés permettant de les discriminer en regard du problème à résoudre. Le tableau 1.2 présente quelques critères proposés par la littérature en gestion de l'eau reliée aux inondations.

Tableau 1.2 Exemple de critères utilisés dans le contexte de l'adaptation aux inondations

Références	Famille de critères			Critères
	niveau 1	niveau 2	niveau 3	
Tahmasebi Birgani & Yazdandoost (2018)	Économique			Coût de construction
				Coût d'opération
				Coût d'entretien
				Coût en dommage
				Coût d'achat du terrain
	Social			Qualité de vie
				Espace de récréation
				Beauté du paysage
				Réponse sociale pour différente période de retour
				Capacité de récupération après inondation
				Quantité de pluie maximale qui n'engendre pas de réponse sociale
	Environnemental			Volume de ruissellement
				Charge en polluants
	Technique			Facilité d'implémentation
				Facilité de connexion
				Facilité à renouveler
				Facilité d'entretien
				Durée de vie
				Multi-fonctionnel
				Durée d'inondation

	Planification			Accord avec les politiques
				Accord avec les objectifs de développement durable
				Acceptabilité des résidents
				Développements futurs possibles
				Facilité de formation pour les parties prenantes
Martin & Legret (2005)	Technique et scientifique	Performance du système	Contrôle hydraulique	Période de retour
				Période de temps sec antécédente
				Réponse d'événements superposés
			Contrôle chimique	Rétention de la pollution particulaire
				Rétention de la pollution dissoute
	Opération et maintenance	Fiabilité et durabilité du système	Gestion des risques	Probabilité de dysfonctionnement
		Maintenance et approvisionnement de services	Besoins d'O&M	Besoins et fréquence des maintenances
	Environnement	Impact sur le milieu naturel récepteur	Contrôle de la pollution	Impact sur la qualité des eaux souterraines
				Respect des objectifs de qualité
			Diversité	Indices biologiques
	Social et bénéfices à la communauté	Agrément et esthétique	Inclusion sociale et caractère multi-usage	Niveau d'agrément
		Développement durable	Vie urbaine durable	Contribution aux politiques de développement durable
	Économique	Cycle de vie	Coût d'investissement	Capital et coût d'entretien
		Accessibilité	Coût pour la communauté	Taxes
			Prévision à long terme	Couvertures/garanties
		Coût du terrain	Emprise foncière	Coût du m2
	Réglementaire	Gestion des eaux pluviales urbaines	Réglementations eaux pluviales	Respecte réglementations locales et nationales
			Autres réglementations	Constructions immobilières
		Réglementation et développement	Conformité aux normes	Nombre d'unités de logement
K. Levy (2005)	Économique			Coût pour les secours lors d'inondation
				Coût de réinstallation
				Coût de prévention
				Coût d'inondation
	Environnemental			Dommage futur au long terme
				Accumulation de limon
	Sécurité			Civils
				Secours
	Social			Équité (perte de propriété)
				Évacuation (bouleversement)
				Justice
				Durabilité

Jato-Espino, Rodriguez-Valeri, & Ballester-Muñoz (2014)	Économique	Coût du terrain		Coût de construction
				Coûts d'entretien
				Coût de démolition
		Flexibilité		Quantité de pose minimale
				Sensibilité au climat
		Temps		Longévité
				Efficacité de construction
				Efficacité de démolition
				Ouverture au trafic après la pose
	Environnemental	Consommation		Énergie intrinsèque
		Émissions		Carbone intrinsèque
		Recyclable		Quantité de matériaux requis
				Quantité de matériaux recyclés
	Social	Esthétique		Apparence
				Intégration urbaine
		Confort		Rugosité
				Ilot de chaleur
		Sécurité		Susceptibilité au vandalisme
				Risque pour les travailleurs et les utilisateurs
Azizur Rahman et al. (2015)	Environnement	Protection de la nature		Accord avec les lois fédérales
				Accord avec les lois saxonnes
		Hydrologie		Sédimentation, érosion
				Niveau d'eau
				Propriété des sols, drainage
				Respect du cours d'eau naturel
		Écologie		Continuité écologique
				Circulation de l'air près du sol (microclimat)
				Qualité de l'eau : biologique
				Qualité de l'eau : autres composantes
	Socio-économique	Coût		Coûts d'investissement
				Coût d'opération
				Autres coûts dus aux exigences légales
		Opération et maintenance		Sécurité d'opération
				Sécurité au travail
				Protection des autres immeubles
		Tourisme et récréation		Navigation
				Agriculture
				Tourisme
				Cyclotourisme
				Sports aquatiques
		Commodité sociale		Pêche
				Acceptabilité
				Récupération
				Paysage
				Préservation de l'héritage historique
				Protection contre les inondations

1.6 Objectifs de recherche

En prenant en compte les outils et les connaissances actuellement disponibles en ce qui concerne les inondations, l'objectif est d'élaborer une méthodologie adaptée à une municipalité en tête d'un très petit bassin versant non-jaugé (2 km²) afin d'évaluer des scénarios d'adaptation aux inondations tout en considérant les changements climatiques.

Les objectifs secondaires de recherche sont l'identification:

- d'une méthodologie adéquate et son application pour des études hydrologique et hydraulique en climat présent et futur pour un très petit bassin versant non-jaugé;
- d'une méthode d'analyse multicritère et son application dans le but de comparer des scénarios d'adaptation aux inondations entre eux.

Une étude de cas est réalisée, ce qui permet d'approfondir la réflexion à ces questions en relation avec un cas réel. Bien que les inondations associées tant à la crue printanière qu'aux crues estivales (orages convectifs) affectent le secteur à l'étude (tel qu'exposé au Chapitre 2), les travaux de ce mémoire se concentrent sur le second type de crues. La modélisation des inondations liées à la crue printanière nécessitent qu'un lien soit établi entre le logiciel PCSWMM et un module d'accumulation et fonte de neige, ce qui n'a pas fait partie des travaux réalisés dans ce mémoire, d'autant plus que les observations de débit nécessaires à la calibration du modèle en hiver n'ont pu être colligées de manière fiable, tel qu'expliqué aux Chapitres 3 et 5.

CHAPITRE 2

ÉTUDE DE CAS PROPOSÉE

Ce chapitre présente le territoire à l'étude, les préoccupations des habitants associées à leur problématique d'inondations ainsi que les données actuellement disponibles pour l'étude.

2.1 Mise en contexte

La Municipalité de la Paroisse de Saint-Isidore (ci-après Saint-Isidore) s'est portée volontaire à participer au présent projet visant à classer différentes mesures de mitigation face aux inondations d'origine fluviale occasionnées par le haut niveau d'eau de la rivière Saint-Régis lors de la fonte des neiges et de pluies intenses. En effet, des inondations ont déjà eu lieu et cet aspect sera traité plus en détails à la section 2.4. C'est par l'entremise de la Rés-Alliance, une communauté de pratique visant le partage de connaissances en adaptation aux changements climatiques piloté par le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ), que la ville s'est impliquée. Chapeautée par l'organisme de bassin versant de la Société de conservation et d'aménagement de la rivière Châteauguay (OBV SCABRIC), la présente initiative vise à mieux comprendre les inondations et les mesures pouvant être mises de l'avant tout en intégrant l'aspect des changements climatiques ainsi que l'aide à la décision à l'analyse.

2.2 Territoire à l'étude

Cette municipalité est située dans la municipalité régionale de comté (MRC) de Roussillon faisant partie de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) tel qu'illustré à la figure 2.1.

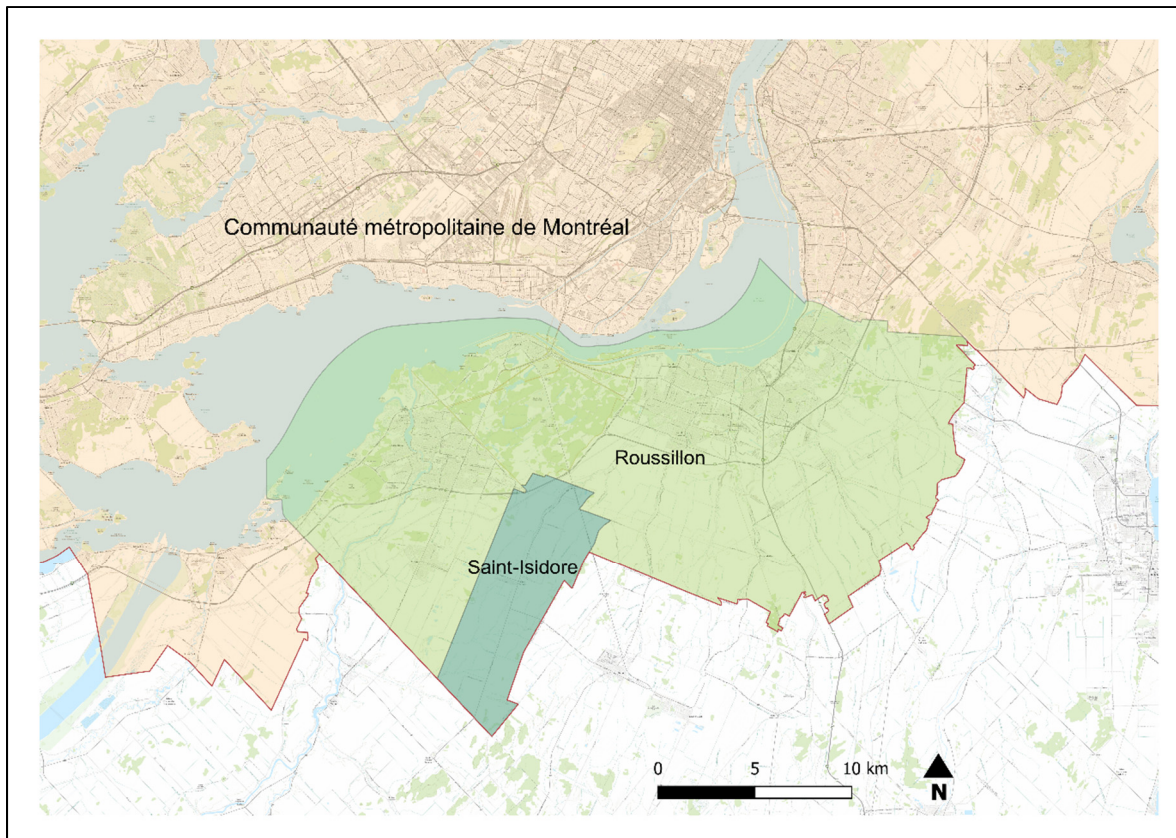


Figure 2.1 Territoire de Saint-Isidore au sein de la MRC Roussillon et de la CMM
Adapté de Données Québec BDGA_1M

La gestion de l'eau au Québec repose sur une approche intégrée à l'échelle du bassin versant (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2019a). Il importe donc de mentionner le positionnement du territoire relativement à l'écoulement des eaux en surface. Selon le découpage des bassins versants par le MELCC, le territoire de Saint-Isidore est partagée entre trois bassins versants. La figure 2.2 montre les lignes de partage des eaux de surface de ces trois bassins versants ainsi que leur réseau hydrographique.

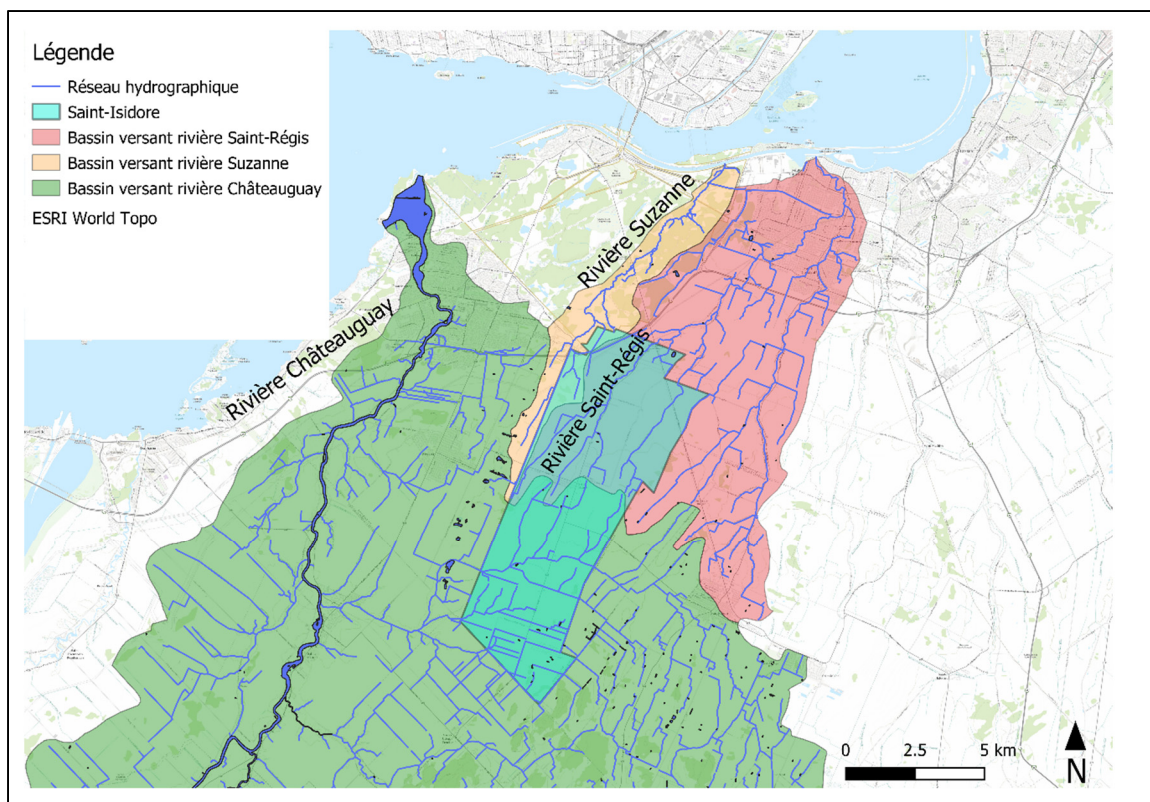


Figure 2.2 Les trois bassins versants recoupant le territoire de la ville de Saint-Isidore et leur réseau hydrographique

Adapté de Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2017)

Selon la carte de la figure 2.2, une partie de l'eau s'écoulant sur le territoire de Saint-Isidore se dirige vers la rivière Saint-Régis, une autre partie s'écoule vers la rivière Châteauguay et, enfin, une partie alimente la rivière Suzanne. Tous ces cours d'eau affluent dans le fleuve Saint-Laurent.

Plus spécifique à l'étude, le cours d'eau principal de la rivière Saint-Régis est d'une longueur de 19,2 km et draine un territoire de 92,7 km². Il débute dans un territoire majoritairement agricole (82 % du territoire) pour terminer son parcours en territoire urbain (15 %) avant de se jeter dans l'écluse de Côte Sainte-Catherine qui mène au fleuve Saint-Laurent. Des boisés occupent 3 % de ce bassin versant et les milieux humides en occupent 1 % (OBV Société de conservation et d'aménagement des bassins versants de la Zone Châteauguay).

2.2.1 Développement du territoire en regard de l'eau, d'hier à aujourd'hui

Le territoire de Saint-Isidore s'est développé autour de la rivière Saint-Régis. En lien avec les activités agricoles omniprésentes avant même les années 1900, plusieurs travaux dans le secteur de la rivière Saint-Régis ont permis de faciliter le drainage de l'eau de surface des champs agricole. En effet, les redressements de rivières avaient pour but d'augmenter les surfaces cultivables, d'allonger la saison des cultures et de faciliter l'entretien des cours d'eau en diminuant leur longueur (Beaulieu, 2016). Un redressement de rivière consiste à réduire le nombre de méandres pour donner un aspect rectiligne au cours d'eau. La figure 2.3 montre l'évolution de la rivière Saint-Régis de 1930 à 2008.

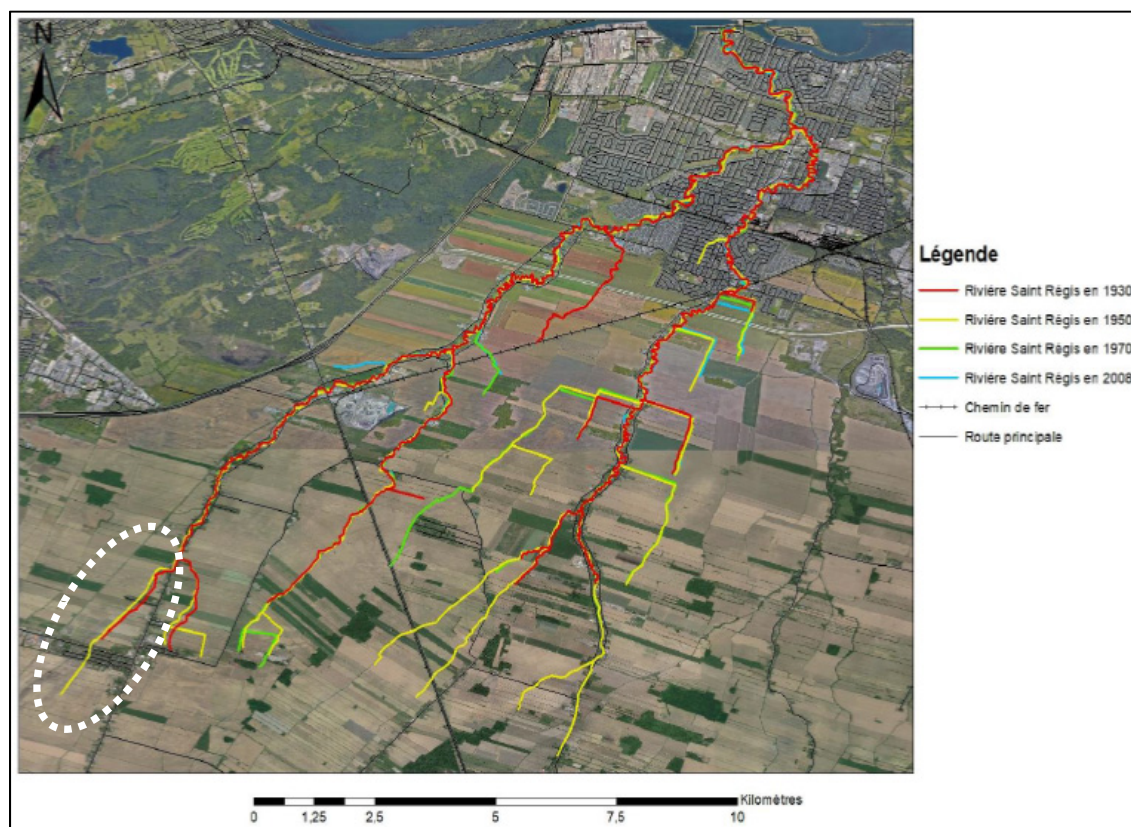


Figure 2.3 Évolution du tracé de la rivière Saint-Régis de 1930 à 2008. L'encadré en blanc pointillé montre le secteur à l'étude dans de mémoire
Tiré de Aubert (2019)

La portion de rivière associée à la problématique d'inondations à Saint-Isidore est encadrée sur la figure 2.3. La rivière a été prolongée entre les années 1930 et 1950 traversant l'actuel centre du village de Saint-Isidore.

2.2.2 Secteur agricole

La majorité du territoire de Saint-Isidore est constitué de terres agricoles. Plusieurs parcelles agricoles orientées perpendiculairement au cours d'eau sont drainées par des tuyaux directement dans la rivière Saint-Régis. Principalement, la fonction du drainage est d'évacuer l'eau des champs plus efficacement au printemps et lors des pluies en plus de contrôler le niveau de la nappe phréatique pour améliorer la productivité en champs (Savoie, 2011). Pour l'année 2019, les principales cultures ont été le maïs-gain, le soya, les produits maraîchers (tels que la laitue, la carotte, la betterave) et le blé selon la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées du Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (La Financière agricole du Québec, 2019).

2.2.3 Secteur résidentiel

Le secteur résidentiel est majoritairement composé de maisons de type unifamilial. Le réseau d'égout de Saint-Isidore est principalement pseudo-séparatif, signifiant que la majorité des branchements de drains de fondations (drains français) et de toiture (gouttières) sont directement raccordés à l'égout sanitaire plutôt qu'à l'égout pluvial. La figure 2.4 montre les différences entre les trois types de réseaux d'égout pluvial (unitaire, pseudo-séparatif, séparatif).

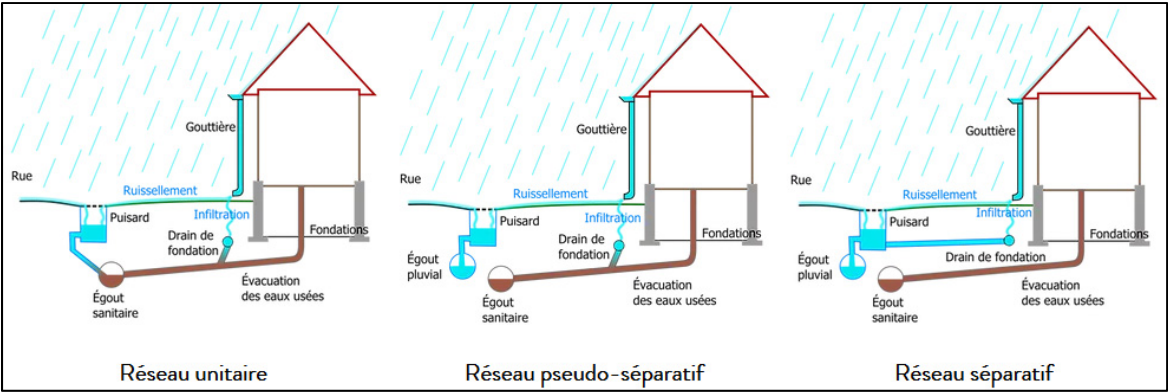


Figure 2.4 Réseaux d'égout unitaire, pseudo-séparatif et séparatif
Tiré de Maskinongé (2020)

Ces types de réseaux sont associés à différentes rues du secteur résidentiel tel qu'illustré à la figure 2.5.

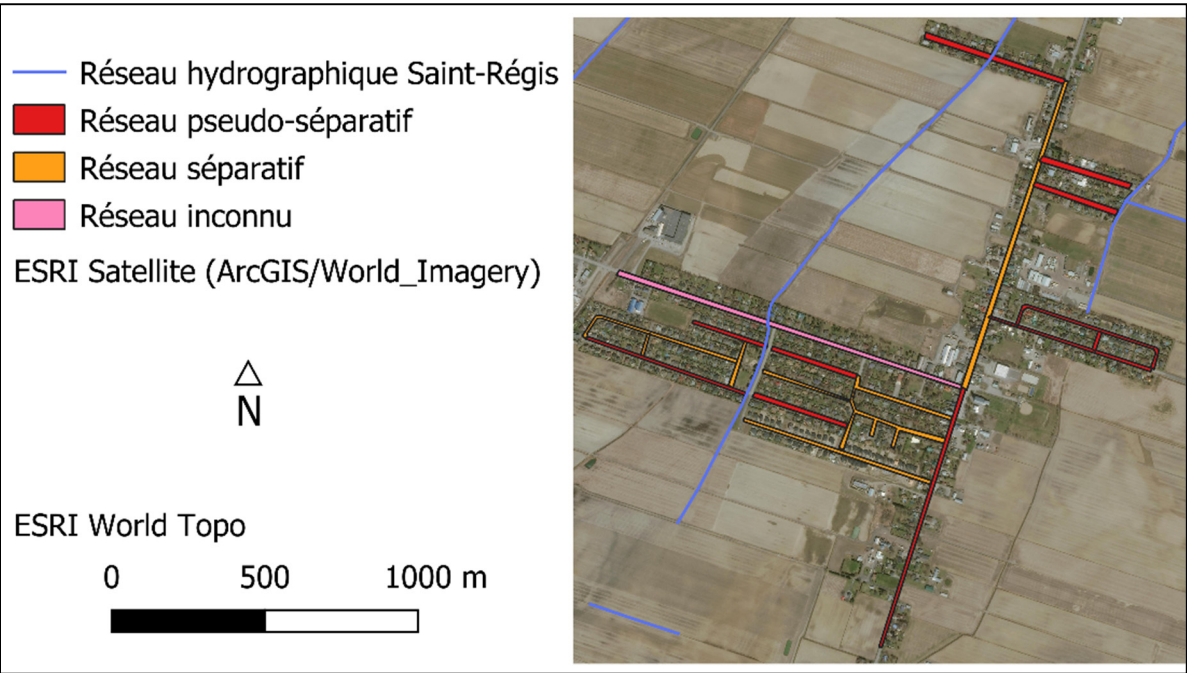


Figure 2.5 Vue en plan du réseau d'égout séparatif (orange) et pseudo-séparatif (rouge) de Saint-Isidore. Les réseaux où l'information n'est pas disponible sont présentés en rose (Girard, 2019b)

Le principe de gestion des eaux pluviales de la ville est de capter l'eau de ruissellement par des puisards (bouches d'égout) reliés à l'égout pluvial et de l'acheminer vers un émissaire, en l'occurrence la rivière Saint-Régis.

2.3 Problématique et préoccupations

La présente étude est motivée par la problématique d'inondation que vivent les résidents et les agriculteurs de la municipalité de Saint-Isidore. Deux situations distinctes engendrant des inondations se manifestent sur le territoire :

- Durant la crue printanière qui se produit quand les températures s'adoucissent entraînant la fonte du couvert de neige;
- Pendant l'été, lors d'orages convectifs engendrant une quantité de pluie causant des inondations et surchargeant du même coup le réseau d'égout pluvial.

Pour la première situation, l'accumulation de neige et de glace dans la rivière Saint-Régis engendre un embâcle empêchant l'eau de ruissellement de s'écouler normalement. Cet embâcle a pour effet de causer un refoulement d'eau en amont pouvant causer des inondations dans le secteur résidentiel. Depuis que cette problématique est connue, un déglacage de la rivière a maintenant lieu systématiquement tous les printemps afin de prévenir la formation d'embâcles et limiter le risque d'inondations lors de la crue printanière.

Pour la deuxième situation, lors d'orages convectifs estivaux intenses, le réseau hydrographique et le réseau d'égout pluvial en amont du ponceau Boyer deviennent complètement surchargés engendrant des inondations locales. Le niveau d'eau étant déjà élevé dans ce tronçon de la rivière, même en période estivale, les orages contribuent à exacerber la réponse de la rivière Saint-Régis.

L'impact de ces inondations se manifeste principalement au sein du noyau villageois de Saint-Isidore et auprès des résidents de la rue Gervais. La figure 2.6 indique les secteurs concernés par chacune des deux problématiques rencontrées à Saint-Isidore.

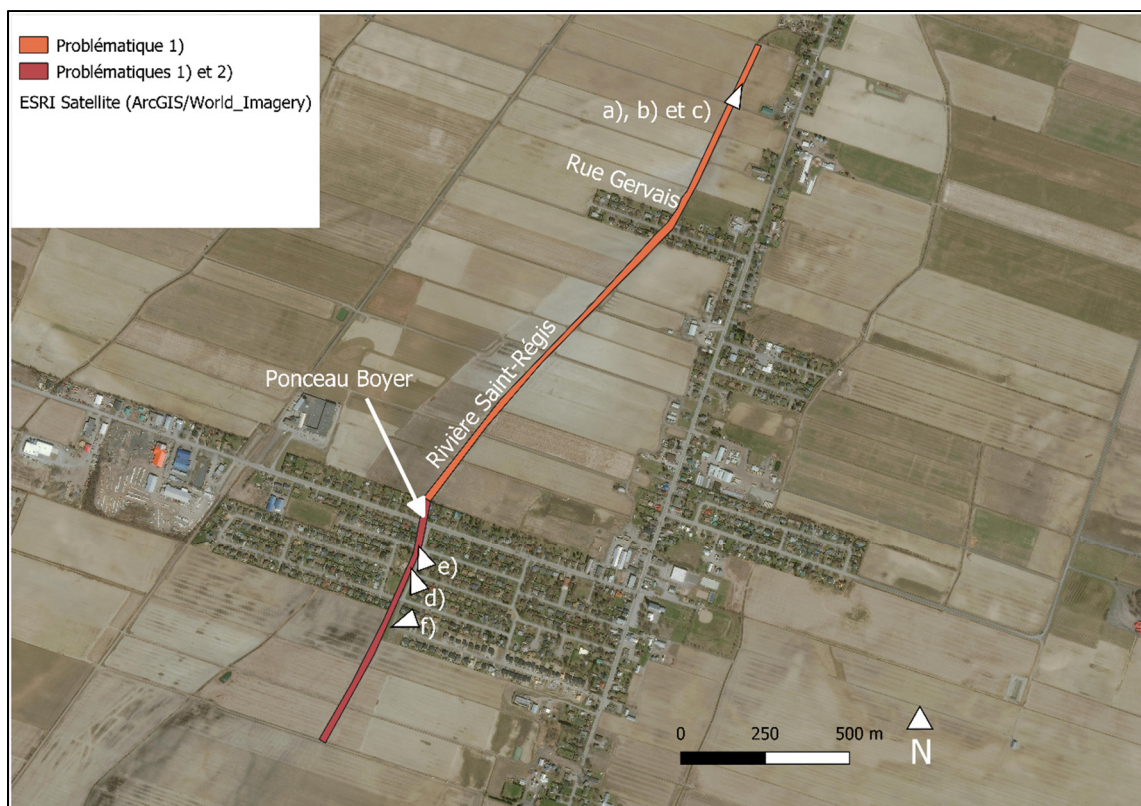


Figure 2.6 Emplacement des portions de la rivière Saint-Régis concernées par les inondations printanières (1) et estivales (2) sur le territoire de Saint-Isidore et des photos montrées à la figure 2.7

En complément, la figure 2.7 illustre plusieurs photos prises de la rivière Saint-Régis à différents moments de l'année.

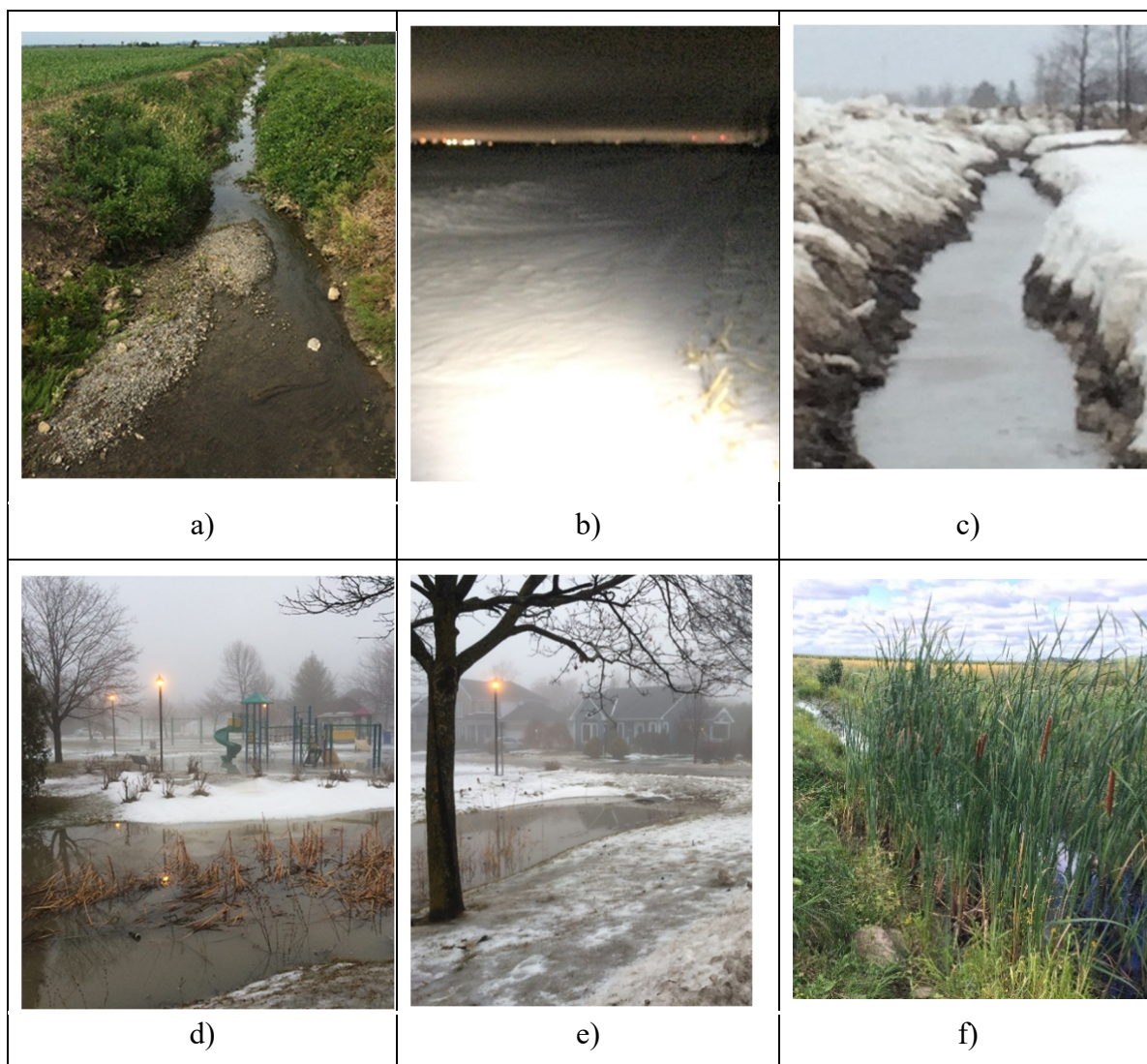


Figure 2.7 Photos de la rivière Saint-Régis à divers moments de l'année a) Tronçon "embâcle" en été (27 juin 2020) b) Tronçon "embâcle" avant le déglacage (10 janvier 2020) c) Tronçon "embâcle" après le déglacage (13 mars 2020) d) Tronçon parc Sainte-Anne en dégel et pluie hivernale (11 janvier 2020) e) Idem à d) f) Tronçon agricole en amont du noyau villageois (11 septembre 2020)

- Photo a) : elle montre la rivière en étiage ainsi que la végétation touffue sur ses berges en été.
- Photo b) : pour le même tronçon qu'à la photo a), elle montre la neige accumulée sur une hauteur de 2,5 mètres dans le canal de la rivière.

- Photo c) : même tronçon que pour les photos a) et b), la photo c) montre la rivière qui a subi le déglacage.
- Photo d) : épisode de pluie sur neige qui accentue la fonte des neiges et les inondations.
- Photo e) : même épisode de pluie sur neige que la photo d) montrant cette fois-ci une structure de drainage (ponceau) presque imperceptible.
- Photo f) : abondance de végétation aux abords de la rivière Saint-Régis contribuant à ralentir le cheminement de l'eau tout en augmentant son niveau. Le niveau d'eau élevé malgré l'absence de pluie peut s'expliquer par une nappe phréatique haute.

En lien avec ces problématiques, diverses préoccupations se manifestent. Tout d'abord, l'augmentation du niveau d'eau occasionné par la fonte du couvert de neige ou des épisodes de pluie provoquant des inondations engendre des préoccupations d'ordre matériel et psychologique chez les résidents.⁶ Pour le secteur agricole, la nécessité d'évacuer l'eau des champs pour favoriser la croissance des racines des plantes et ainsi assurer l'accès aux champs de la machinerie. Ces conditions ne sont potentiellement pas respectées durant les épisodes d'inondations. Enfin, le niveau d'eau élevé en tout temps près du parc Sainte-Anne engendre un enjeu de sécurité pour les enfants qui viennent y jouer. L'herbe haute aux abords du ruisseau accroît ce sentiment d'insécurité dans la mesure où elle dissimule l'eau.

2.4 Vers une démarche d'adaptation

Les origines des problématiques d'inondations sont multiples et plusieurs interventions ont contribué à façonner le territoire de Saint-Isidore d'hier à aujourd'hui. Des modifications sont donc survenues le long des chemins naturels empruntés par l'eau ruisselant sur le territoire. L'identification des préoccupations reliées aux différentes problématiques, des mesures d'adaptation peuvent être envisagées. Il sera donc question d'évaluer ces mesures d'adaptation technique en regard de critères et de différents scénarios climatiques dans la mesure où ces

⁶ Il est reconnu qu'une détresse psychologique puisse survenir lors d'un événement d'inondation (Cianconi, Betrò, & Janiri, 2020).

derniers viendront augmenter l'incidence des inondations lors d'orages convectifs. Ainsi, les différentes mesures d'adaptation pourront être hiérarchisées en fonction de leur réponse aux critères retenus

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre aux objectifs, la démarche prévue intègre deux volets complémentaires à l'étude soit le volet modélisation (hydrologique, hydraulique et changements climatiques) ainsi que le volet d'aide à la décision. Le présent chapitre fait donc état de la méthodologie proposée dans le cadre de ce projet de recherche en regard des deux volets.

3.1 Principales étapes de la démarche

Les deux principaux volets formant la recherche sont composés de plusieurs étapes. La figure 3.1 récapitule les principaux volets de l'étude ainsi que les étapes clés.

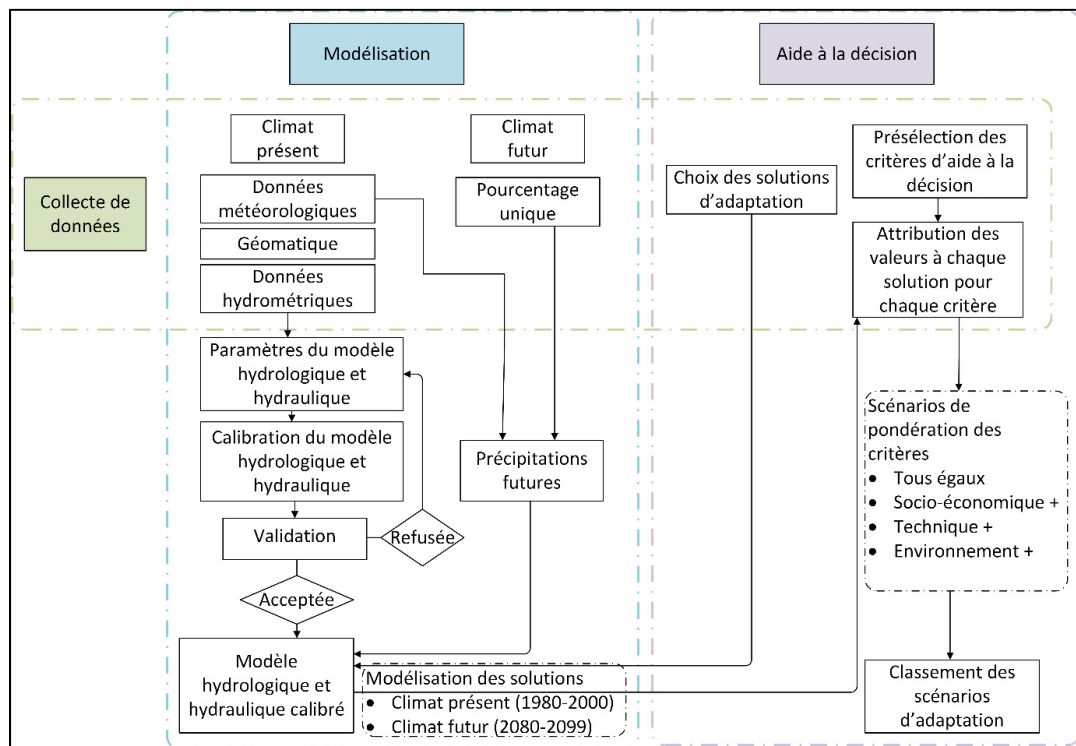


Figure 3.1 Schéma de la méthodologie du présent projet

Le premier volet, modélisation, comprend la collecte de données en climats présent (1980 à 1999) et futur (2080 à 2099), la calibration et la validation du modèle hydrologique et hydraulique, l'inclusion à la modélisation des mesures proposées et enfin la simulation des mesures en climat présent, mais aussi en climat futur. La collecte de données a pour but de recueillir toute l'information nécessaire pour la modélisation. Il s'agit notamment des données géomatiques (topographiques, du réseau pluvial, etc...), météorologiques (température et précipitation en climats présent et futur) et reliées à l'hydrométrie (niveau d'eau, mesures de débits). En climat futur, les données météorologiques issues de scénarios climatiques servent à évaluer l'impact des changements climatiques sur les températures et les précipitations, donc sur la réponse hydrologique simulée du bassin versant. Enfin, les résultats obtenus à l'aide du modèle hydrologique et hydraulique pour les différents scénarios d'adaptation aux inondations servent d'intrants à l'analyse multicritère pour l'aide à la décision.

Le deuxième volet, aide à la décision, vise à aider les différents décideurs à effectuer un choix reposant sur les préférences des différents acteurs du territoire (élu(e)s, organismes, entreprises, citoyens, par exemple) en leur proposant un classement des différentes mesures basés sur des critères (sociaux, économiques, techniques, environnementaux). Pour ce faire, la collecte de données permet de faire un portrait des différentes mesures techniques en adaptation aux inondations et une présélection des critères pertinents au contexte à l'étude. Ensuite, une valeur qualitative ou quantitative est attribuée pour chaque critère en regard des différentes mesures. Enfin, un classement des différents scénarios est obtenu.

3.2 Modélisation hydrologique et hydraulique

La modélisation hydrologique et hydraulique permet de mieux comprendre l'ensemble des processus générant le ruissellement et son cheminement sur le territoire menant aux problématiques d'inondations pour lesquelles une(des) mesure(s) est(sont) à identifier.

Considérant la composante urbaine du territoire à l'étude, le modèle hydraulique doit être en mesure de simuler les processus d'écoulement en conduites (réseau de drainage). De plus,

l'occupation des sols du site à l'étude étant diversifiée et les problématiques d'inondations étant localisées à différents endroits sur le bassin versant, une modélisation semi-distribuée (dont les paramètres varient en fonction du territoire) est nécessaire. Finalement, le bassin versant étant de très petite superficie (2 km^2), il est essentiel que les processus hydrologiques et hydrauliques soient résolus à un pas de temps sous-journalier.

Le modèle hydrologique et hydraulique utilisé permettant de tenir compte de ces différentes caractéristiques est le logiciel PCSWMM développé par *Computational Hydraulic Int.* (CHI) incorporant directement dans son moteur de calcul la dernière version du modèle SWMM (*Storm Water Management Model*) développé par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) des États-Unis. Les sous-sections suivantes présentes les étapes à franchir afin de concevoir le modèle du bassin versant à l'étude.

3.2.1 Collecte de données

La collecte de données a pour but de recueillir l'information servant à alimenter le modèle hydrologique et hydraulique représentant le territoire à l'étude. L'information à recueillir pour le modèle PCSWMM est indiquée à l'annexe I.

3.2.2 Instrumentation du territoire à l'étude

Avant le 12 septembre 2019, des données hydrométriques n'étaient pas disponibles pour le bassin versant à l'étude. Deux stations limnimétriques (Station #1 et Station #2) avec chacune un capteur de pression « totale » (Solinst Levellogger® Edge modèle 3001) ont été installées pour ce projet. Ces capteurs enregistrent la pression de la colonne d'eau ainsi que la pression atmosphérique. Pour obtenir la pression de l'eau seulement (et en déduire le niveau d'eau), un capteur de pression barométrique (Solinst Barologger® Edge modèle 3001) a été installé à la Station #2. Ainsi, la pression atmosphérique peut être retranchée des mesures prises par les capteurs de pression « totale » pour obtenir seulement la pression de l'eau. Une fonction de l'application Levellogger de Solinst permet d'effectuer ce calcul pour en déduire la hauteur de l'eau. Cette hauteur d'eau permet de calibrer le modèle PCSWMM aux endroits où les deux

stations sont installées. La figure 3.2 présente les deux stations limnimétriques installées dans la rivière Saint-Régis.

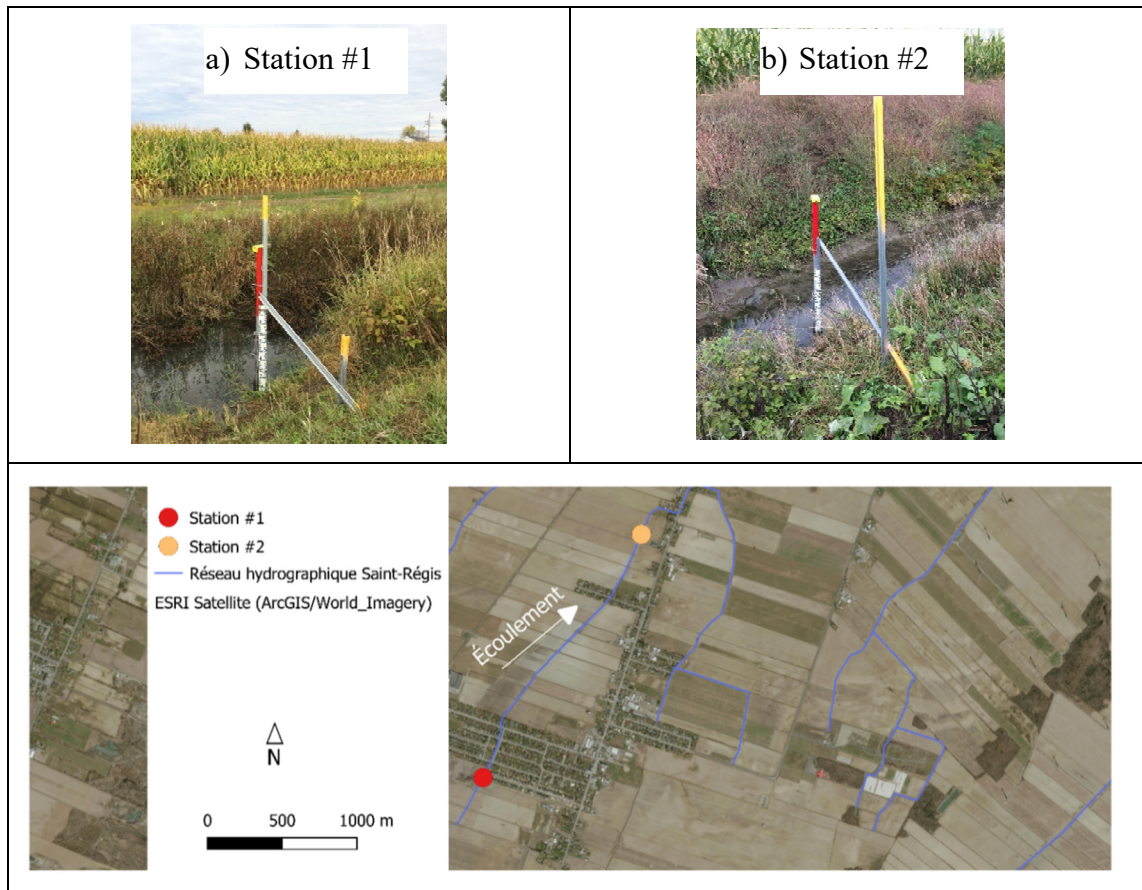


Figure 3.2 Les deux stations limnimétriques a) et b) de la rivière Saint-Régis à Saint-Isidore et vue en plan c)

Il est à noter que le comportement hydraulique de la rivière est différent en amont des deux stations. La station #1 a été installée directement en amont du secteur résidentiel, à un endroit où il semble y avoir une accumulation d'eau importante et problématique. En effet, un traceur a été utilisé afin de déterminer le débit et ce dernier s'est plutôt dispersé de part et d'autre de son point d'injection indiquant un faible courant. La station #2 a été installée plus en aval du village afin d'enregistrer les variations de niveau d'eau à cet endroit. Les stations sont séparées

d'une distance de 2 km et les capteurs enregistrent les données de pression toutes les 15 minutes pour tenir compte de la réactivité du bassin versant.

Malencontreusement, suite au déglacage de la rivière Saint-Régis, la partie de la station #2 contenant le capteur hydrométrique a été arrachée de son emplacement le vendredi 13 mars 2020. Le capteur de pression a été réutilisé dans une nouvelle station plutôt rudimentaire munie d'un tuyau de PVC ancré au sol à l'aide d'un poteau métallique. La station #2.1 a été érigée le 23 mars 2020. La figure 3.3 montre l'emplacement actuel de la station en comparaison avec l'ancien emplacement.

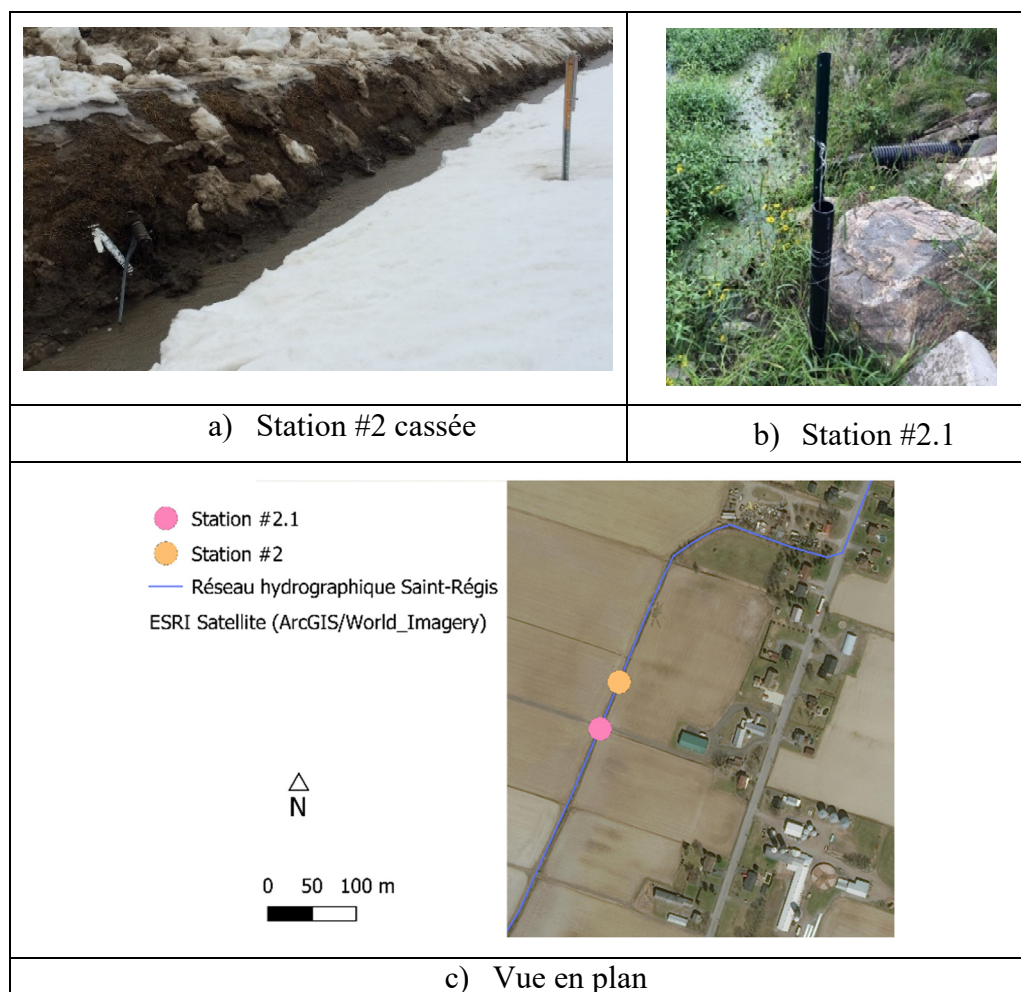


Figure 3.3 a) Station #2 cassée, b) station temporaire (Station #2.1) et c) vue en plan de la translation entre les deux stations

La station a été relocalisée puisqu'il sera plus facile de signaler sa présence en hiver au nouvel endroit en enfonçant des tiges munies de réflecteurs. La distance entre les deux stations est de 60 mètres et un ponceau agricole circulaire de diamètre de cinq pieds les sépare.

3.2.3 Délimitation du bassin versant et de ses sous bassins

La délimitation du bassin versant sert à connaître la superficie qui est drainée vers les stations limnimétriques. À cet effet, un modèle numérique de terrain (MNT) non hydrologiquement logique⁷ a été rendu disponible par la MRC de Roussillon. Le relevé LiDAR nécessaire à sa production a eu lieu le 23 avril 2017, avec une précision planimétrique de +/- 15 cm et une précision altimétrique de +/- 15 cm.

Le traitement du MNT pour le rendre hydrologiquement logique a été réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.2⁸. Durant ces manipulations, les ponceaux sont artificiellement enlevés permettant le tracé complet du réseau hydrographique. La délimitation du bassin versant permet ensuite de circonscrire la recherche d'information pour alimenter en données le modèle hydrologique et hydraulique. La figure 3.4 présente le bassin versant à l'étude par rapport à sa position dans la municipalité de Saint-Isidore et sa répartition comparativement aux bassins versants délimité par le (MELCC) datant de 2017.

⁷ Un MNT non hydrologique logique signifie que le ruissellement en surface n'est pas représentatif de la réalité.

⁸ Des capsules vidéo sont disponibles sur la chaîne YouTube « Hydrologie forestière – Université Laval » par le professeur Sylvain Jutras du département de foresterie de l'Université Laval. (Jutras, 2019a, 2019b, 2019c)

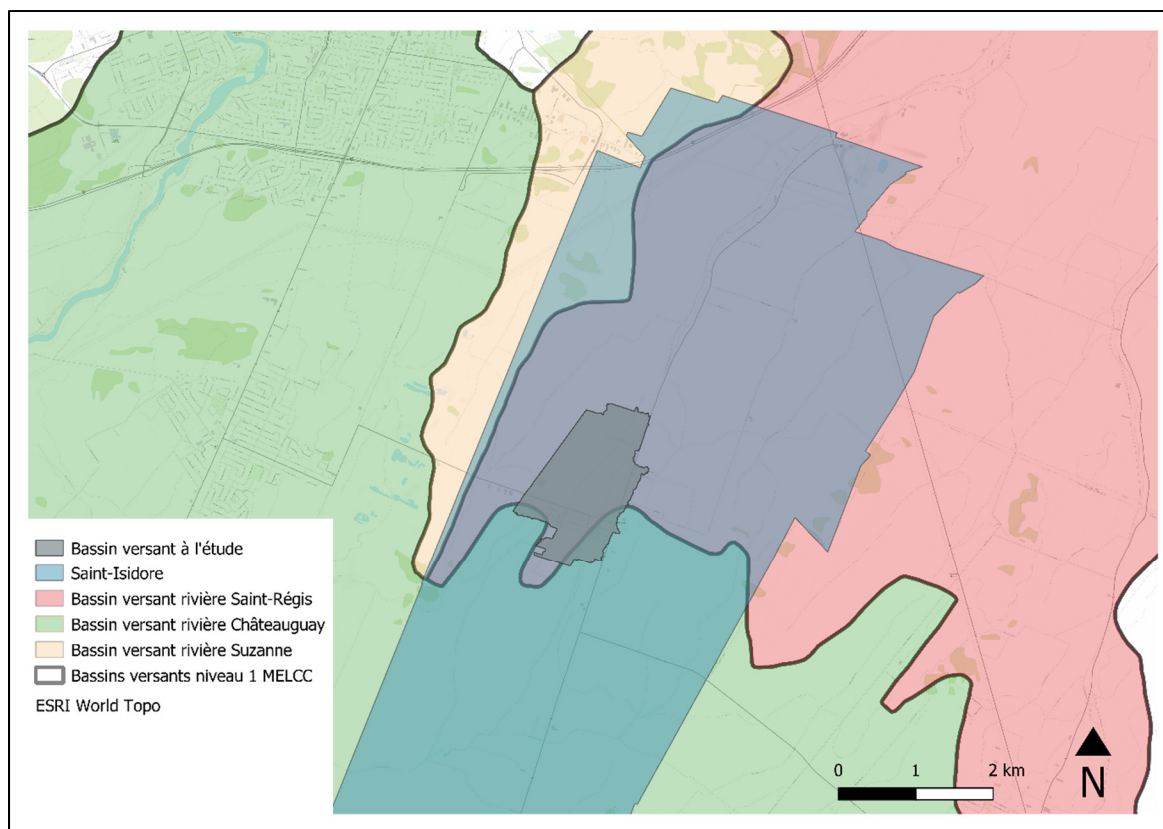


Figure 3.4 Limites du bassin versant à l'étude obtenu par délimitation avec ArcGIS par rapport au territoire de la municipalité de Saint-Isidore et du découpage des bassins versants par le MELCC⁹

Le bassin à l'étude occupe la partie centrale de la ville de Saint-Isidore et se draine dans le bassin versant de la rivière Saint-Régis. Comme le découpage des bassins versants par le MELCC s'effectue à une échelle de 1 :20 000 et celle du bassin versant avec un LiDAR de précision planimétrique et altimétrique de 15 cm, les résultats obtenus avec les données LiDAR sont considérés plus précis. La superposition observée entre le bassin versant à l'étude et bassin versant de la rivière Châteauguay est considérée comme faisant partie du bassin versant de la rivière Saint-Régis. La frontière (trait noir foncé) devrait être révisée. La délimitation du bassin

⁹ Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec (Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017)

versant permet aussi d'évaluer la portion du territoire se drainant vers la station #1 puis vers la station #2 et le réseau hydrographique permanent et intermittent tel qu'illustré à la figure 3.5.

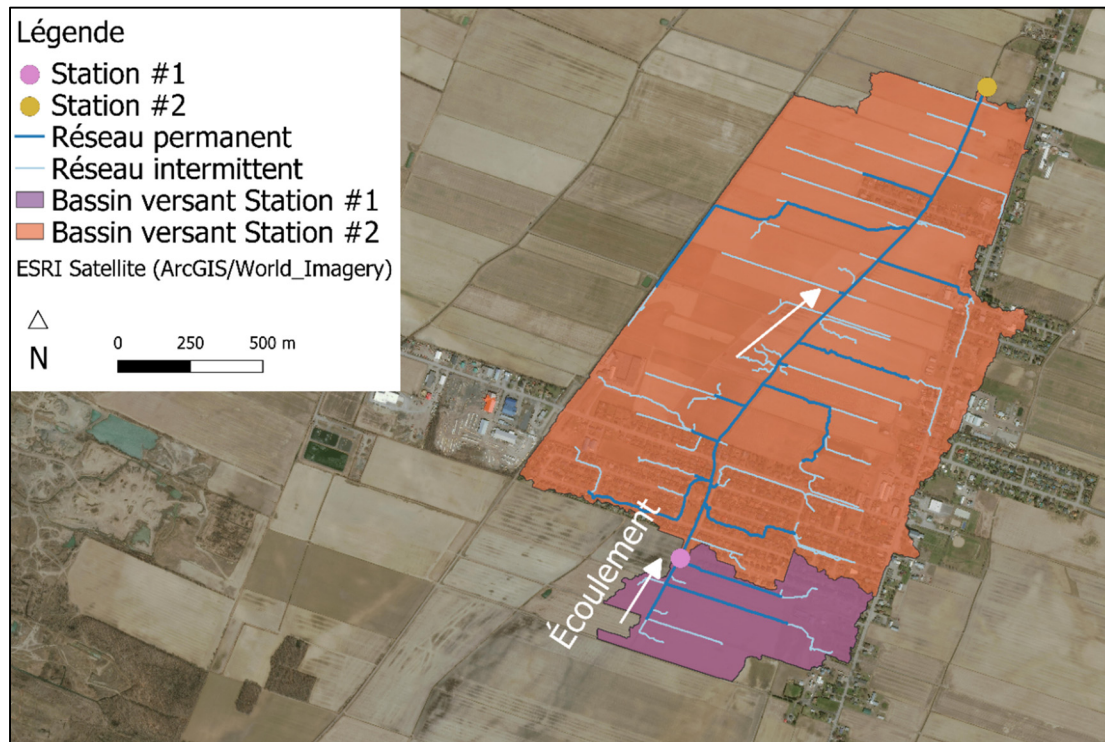


Figure 3.5 Bassin versant alimentant la station #1 (mauve) et bassin versant complet dont l'exutoire est la station #2 (orange et mauve) et réseau hydrographique permanent et intermittent

L'aire de drainage alimentant la station #1 est de $0,26 \text{ km}^2$ et l'aire contribuant à la Station #2 est de $2,08 \text{ km}^2$ (incluant le $0,26 \text{ km}^2$ de la station #1). L'écoulement de l'eau dans la Saint-Régis se fait de la station #1 vers la station #2 (maintenant station #2.1). L'extraction du réseau hydrographique intermittent permet de déterminer l'emplacement des fossés agricoles drainant le territoire. Les fossés considérés sont ceux qui drainent au moins 40 ha pour limiter le temps de calcul. Connectés à la rivière Saint-Régis en aval, les fossés acheminent l'eau de ruissellement des parcelles agricoles principalement. La section 3.2.8 traite de la modélisation des fossés dans PCSWMM.

La délimitation des sous-bassins versants se fait en considérant une surface minimale de 10 ha comme première itération de découpage (donc un fossé agricole drainant 40 ha recevra le ruissellement de quatre sous-bassins de 10 ha).

Il est à noter que pour les secteurs résidentiels, commerciaux et industriels, c'est la découpe cadastrale qui fait office de découpe des sous-bassins. Ceci est pour tenir compte de l'occupation du sol afin d'attribuer les pourcentages d'imperméabilité du sol comme il sera mentionné subséquemment à la section 3.2.6. Pour le secteur agricole, les sous-bassins versants ont été redécoupés afin de prendre en considération les caractéristiques pédologiques (voir section 3.2.7). Enfin, pour la dernière itération de découpage des sous-bassins, les sous-bassins partageant les mêmes caractéristiques ainsi que les mêmes réseaux hydrographiques ont été agrégés manuellement.

Dans PCSWMM, la longueur d'écoulement du ruissellement se calcule directement en fonction de la largeur du sous-bassin et de sa superficie. Le logiciel considère l'aire des parcelles définies par ArcGIS et il considère que les sous-bassins sont rectangulaires. La largeur des sous-bassins est calculée à l'aide de la formule 3.1:

$$Largeur [m] = \frac{\left(Aire [ha] * 10000 \left[m^2/ha \right]^{0,5} \right)}{2} \quad (3.1)$$

Ce faisant, la longueur de l'écoulement est déduite à partir de l'équation 3.2.

$$Longueur d'écoulement [m] = \frac{Aire [ha]}{Largeur [m]} * 10000 \left[m^2/ha \right] \quad (3.2)$$

Cela permet de simuler le ruissellement de l'eau à travers les différents sous-bassins. Enfin, la pente a été calculé pour chaque sous-bassin par un outils de PCSWMM en prenant en compte le MNT.

3.2.4 Levée de terrain

L'activité de levée de terrain au système de positionnement par satellite « Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites » (GNSS) a pour but d'obtenir la position des regards pluviaux, de produire des sections transversales et le profil en long de la rivière Saint-Régis et de recueillir l'ensemble des radiers des ponceaux. Tous les détails sont présentés à l'annexe II.

3.2.5 Données météorologiques en climats présent et futur

Les objectifs de l'étude nécessitant de modéliser à un pas de temps sous-journalier afin de simuler et de comprendre les phénomènes de crue et de décrue de la rivière Saint-Régis, des données météorologiques au pas de temps horaire sont souhaitées. Aussi, ce pas de temps est plus approprié aux bassins versants plus petits et réactifs comme c'est le cas pour l'étude. Les différentes sources de données météorologiques en climats présent et futur disponibles pour le territoire à l'étude sont présentées à la figure 3.6 et décrites au tableau 3.1.

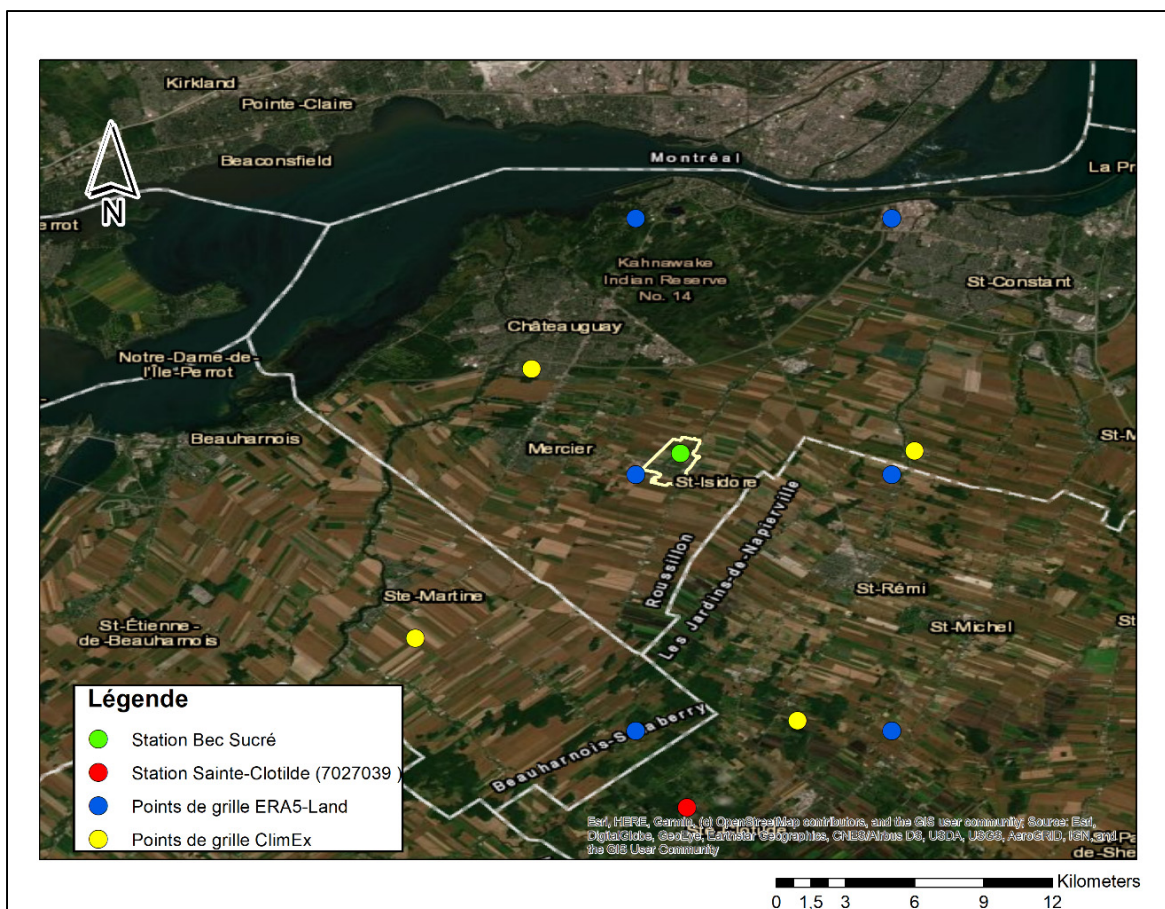


Figure 3.6 Localisation des stations météorologiques (Sainte-Clotilde et Bec Sucre) et des points de grilles utilisés provenant des jeux de données climatiques (ERA5-Land et ClimEx)

Tableau 3.1 Jeux de données en climat présent et futur (température et précipitation) pour le bassin versant à l'étude

		ERA5-Land	Station météorologique Sainte-Clotilde	Station météorologique Bec Sucre	ClimEx
Source de l'information		ECMWF	Environnement et Changement climatique Canada (ECCC)	Agriculteur à Saint-Isidore	<i>The ClimEx Project</i>
Climat		Présent	Présent	Présent	Présent et futur
Représentation spatiale des données		Sur grille	Ponctuel	Ponctuel	Sur grille
Durée de la série		1981 à aujourd'hui	1994 à aujourd'hui	2014 à aujourd'hui (sauf l'hiver)	1950 à 2100
Résolution temporelle	Température	1 h	1 h	1 minute	3 h
	Précipitation	1 h	24 h	1 minute	1 h

Pour les jeux de données possédant des points de grilles, une pondération inverse à la distance pour le centroïde du bassin versant est faite afin d'obtenir une seule valeur pour chaque pas de temps.

Le jeu de données ERA5-Land provient du centre ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*) et est le fruit d'une réanalyse climatique (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2019). Il est disponible du 1^{er} janvier 1950 à 3 mois avant aujourd'hui (la date de fin variant en fonction de la mise-à-jour). Au moment où l'étude a été réalisée, les données étaient disponibles à partir du 1^{er} janvier 1981, d'où la plage temporelle indiquée dans le tableau 3.1. Ayant une discrétisation temporelle aux heures pour la température et les précipitations et une grille carrée de 9 km de côté, il s'agit d'un jeu de données possiblement adéquat pour la modélisation hydrologique sous-journalière.

La station météo Bec Sucré appartient à un agriculteur et est située à l'intérieur du bassin versant à l'étude. Le pas de temps auxquels les données peuvent être obtenues est très flexible, selon le besoin, mais la période annuelle d'acquisition des données ne débute qu'en mai et se termine au mois de novembre environ. Aussi, les données sont disponibles seulement depuis 2014.

La station météo Sainte-Clotilde, opérée par ECCC, collecte des données de température aux heures et de pluie journalière depuis 1994. Voulant modéliser au pas de temps horaire, il ne s'agit pas de la source la plus appropriée pour les observations des précipitations.

Au vu des données disponibles, les données météorologiques issues d'ERA5-Land et Bec Sucré semblent être les plus appropriées pour alimenter le modèle PCSWMM en précipitations. Le jeu de données ClimEx sera utilisé pour prévoir les changements simulés pour l'intensité des précipitations en fonction de la durée de la pluie et de sa période de retour en climat futur. Ce jeu de données est décrit à la section 3.2.14.

3.2.6 Occupation du sol

L’occupation du sol est déterminée à partir du plan d’urbanisme de Saint-Isidore présenté à la figure 3.7.

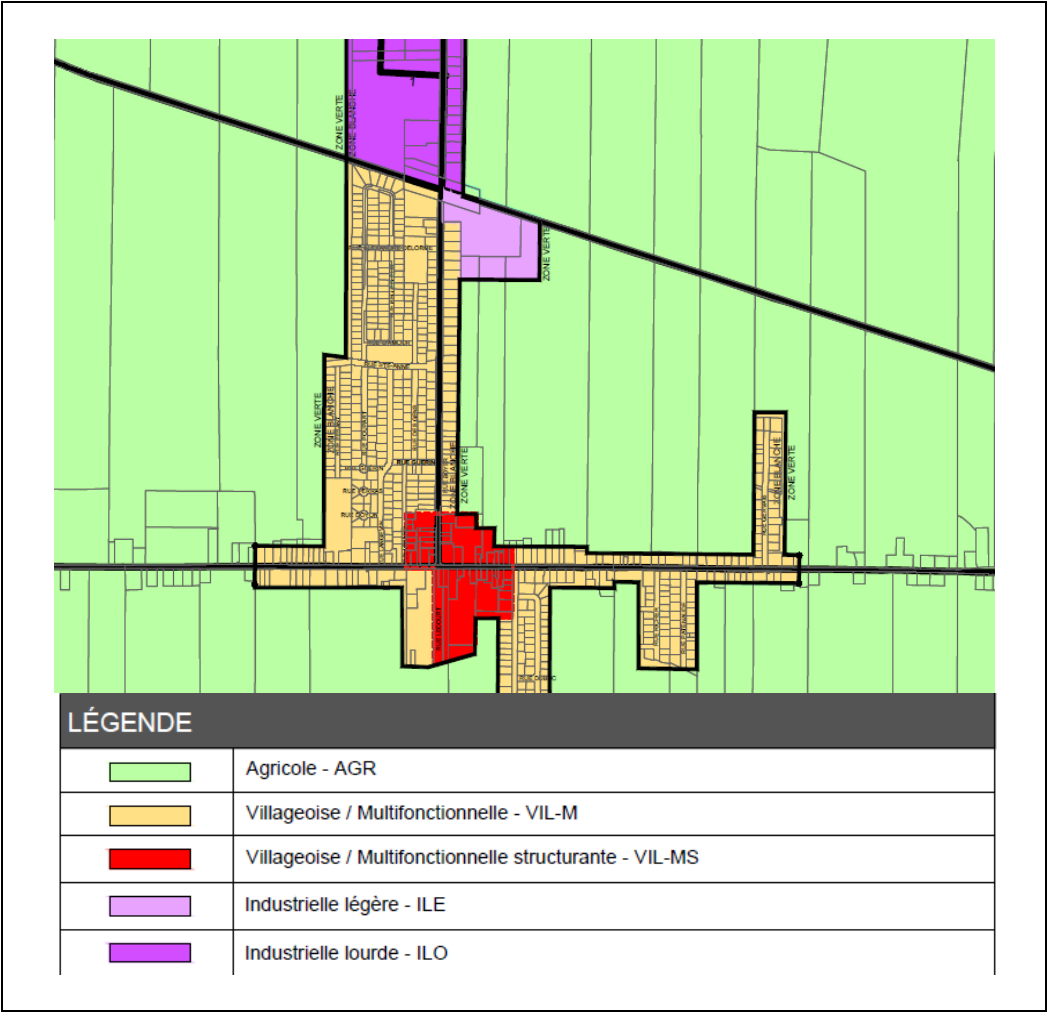


Figure 3.7 Occupation du sol à Saint-Isidore selon le plan d'urbanisme

Il y a présence de secteurs agricoles, villageois (résidentiel et commercial) et industriels. Pour le secteur villageois, les orthophotos et l’outil *Street View* de *Google Maps* permettent de différencier les catégories résidentielles de façon détaillée. L’occupation du sol permet d’accorder un pourcentage d’imperméabilité à la surface du sol, une hauteur de stockage de

l'eau occasionnée par les dépressions du sol ainsi qu'une grandeur au coefficient de rugosité du ruissellement, coefficient de Manning, qui sont tous des paramètres liés à la modélisation dans PCSWMM. Les tableaux donnant le pourcentage d'imperméabilité pour chaque type de sol, la valeur du coefficient de Manning pour chaque revêtement de surface et le stockage dans les dépressions en fonction du type de surface se trouvent à l'annexe III.

3.2.7 Pédologie

La pédologie du territoire est obtenue à partir du feuillet 31H05102, dans la région Montérégie Ouest, produit par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (voir Figure-A IV-1). Aussi, le Tableau-A IV-1 présente sous forme d'un tableau les caractéristiques des sols présents sur le territoire. Le type de sol permet d'estimer les paramètres d'infiltration du modèle hydrologique. Bien que plusieurs fonctions d'infiltration soient disponibles dans le modèle PCSWMM, c'est la fonction d'infiltration Green-Ampt qui est utilisée dans le cadre de cette étude. Ce module est intégré à l'interface PCSWMM et les informations du Tableau-A IV-2 présenté à l'annexe IV, sont entrées dans le modèle pour décrire l'infiltration des sous-bassins.

3.2.8 Réseaux de drainage mineur et majeur

Dans PCSWMM les cours d'eaux sont modélisés en utilisant des « conduites » avec une section transversale de type « irrégulière » générée à partir des relevés topographiques ou du MNT. Chaque tronçon de la rivière St-Régis est délimité à partir des sections prises au GNSS (annexe II) et possède sa propre section transversale.

3.2.8.1 Réseau de drainage majeur – rivière Saint-Régis

Pour la reproduction de la rivière dans PCSWMM, des conduites à profil irrégulier sont utilisées. Chaque tronçon est délimité à partir des sections prises au GNSS et possède un profil irrégulier qui lui est propre.

Ainsi, toute la géométrie de la rivière à l'étude est caractérisée de sa source à son exutoire. Les coefficients de Manning utilisés pour caractériser la rugosité du lit de la rivière diffèrent en fonction de l'emplacement. Par exemple, le tronçon en aval du ponceau Boyer a une végétation généralement moins dense recouvrant les berges qu'en amont de ce ponceau. La figure 3.8 illustre ces différences.

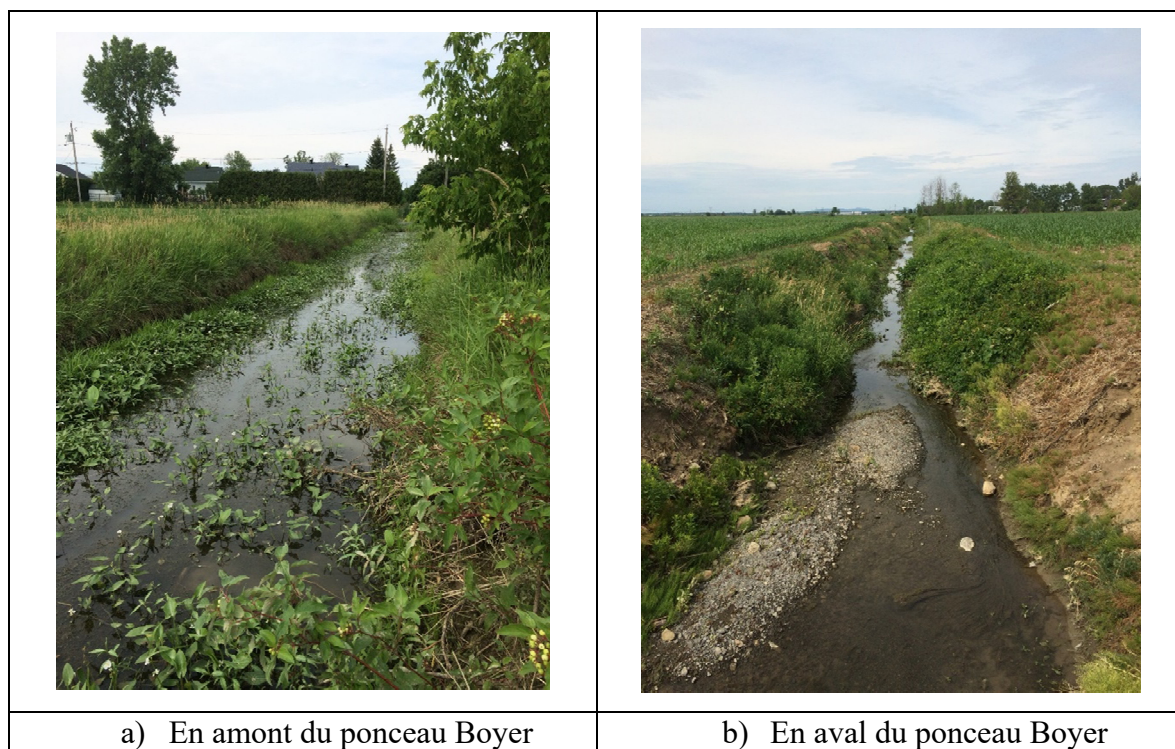


Figure 3.8 Comparaison de la végétation a) en amont et b) en aval du ponceau Boyer

Les Tableau-A V-1 et Tableau-A V-2 montrent les coefficients de rugosité retenus après calibration du modèle en fonction des caractéristiques observées au terrain (canal excavé avec végétation dense en amont du ponceau de la rue Boyer et canal excavé avec peu de végétation en aval).

3.2.8.2 Réseau de drainage – fossés agricoles

Les fossés délimitent les terres agricoles et permettent à l'eau de circuler jusqu'à la rivière Saint-Régis. L'outil PCSWMM Créateur de Section en travers permet de créer des sections transversales aux fossés en se basant sur le modèle numérique de terrain. Une section transversale de 20 mètres de longueur, 10 mètres de part et d'autre de la ligne de centre du fossé environ, a été tracée à tous les 25 mètres. L'espacement entre les points d'élévation d'une même section transversale du fossé est de 0,15 m soit la précision du MNT. La rugosité des berges des canaux est de 0,05 en champs agricole et pour le centre du fossé, la rugosité est de 0,2 puisqu'il s'agit d'un canal linéaire présentant une végétation dense (Chow, 1959).

3.2.8.3 Réseau de drainage mineur – conduites pluviales

Des plans sur papier sont disponibles pour le réseau d'égout pluvial de Saint-Isidore. La mention sur les plans est « tel que construit » et lorsqu'indisponible la mention est « émis pour construction ». Cependant, le réseau pluvial de la rue Boyer n'était pas disponible. Pour les plans disponibles, le réseau de branchement des conduites pluviales, le diamètre des conduites, leur longueur et le matériau les constituant sont extraits. Le matériau des conduites permet de leur associer un coefficient de Manning suivant les valeurs présentées au Tableau-A V-3.

En fonction de l'âge des conduites, une estimation est effectuée pour attribuer à chacune un coefficient de Manning. L'alignement des conduites est considéré couronne à couronne comme c'est le cas dans la conception typique d'un réseau pluvial. Enfin, pour le rang Saint-Régis, un des exutoires du réseau pluvial est un émissaire le reliant à la rivière Saint-Régis. Cet émissaire est de forme trapézoïdale et son coefficient de Manning est estimé à 0,045 puisqu'il s'agit d'un canal excavé en pierre (Bizier, 1982).

Sur papier, le réseau est séparatif, mais les inspections ont révélé qu'une partie des eaux des drains français et des toitures étaient collectées par le réseau sanitaire indiquant une forte composante pseudo-sanitaire.

3.2.8.4 Réseau de drainage majeur – rues

Une modélisation de type double drainage est employée pour le secteur résidentiel. Pour la modéliser, une boîte à outil PCSWMM permet de générer automatiquement le réseau majeur et de le connecter au réseau mineur. La section transversale utilisée pour la rue est une coupe standard observée à Saint-Isidore et mesurée à partir de l'outil règle dans *Google Maps* (voir Figure-A V-1).

Finalement, les puisards servant d'interface entre le réseau majeur et réseau mineur sont modélisés par des sorties contrôlées à partir d'une courbe de tarage typique d'un puisard circulaire permettant de simuler un débit en fonction d'une hauteur d'eau (Rivard, 2005). Pour modéliser le nombre de puisards réel alimentant un même tronçon de conduite, les valeurs de la courbe de tarage sont simplement multipliées par le nombre de puisards. Le nombre de puisards est compté à partir des plans papier de Saint-Isidore et à partir des orthophotos pour la rue Boyer.

3.2.9 Bassin de rétention

Un bassin de rétention est présent au croisement des rues Saint-Anne et Pesant. Ses dimensions et sa connexion au réseau pluvial sont disponibles dans un plan papier du réseau pluvial. La courbe de tarage de l'accumulation d'eau dans ce bassin en est déduite et entrée dans les paramètres de PCSWMM.

3.2.10 Réseau de drainage agricole

Les parcelles agricoles sont toutes munies d'un réseau de drainage pour ce bassin versant. Cependant, les plans ne sont pas disponibles pour toutes les parcelles et ceux disponibles ne sont pas à jour (voir Figure-A VI-1 à l'annexe VI). Le réseau de drainage agricole ne sera pas modélisé tel que construit vu la complexité de la modélisation que cela représente en l'absence de plans à jour. L'option de simuler l'écoulement des drains avec l'équation de Hooghoudt, est préconisée (équation 3.3).

L'équation de Hooghoudt permet de calculer, en considérant un régime permanent, l'écoulement de l'eau dans les drains agricoles.

$$Q_{gw} = \frac{16k}{L^2} \left[(H_{gw} - H^*)^2 - D_e(b_0) + D_e(H_{gw}) \right] \quad (3.3)$$

Où Q_{gw} = Débit souterrain

k = Conductivité hydraulique saturée latérale du sol

L = L'espace entre les drains

H_{gw} = La hauteur de la nappe (variable)

H^* = Surface elevation – Dd

D_e = Profondeur équivalente à la couche imperméable

B_0 = Profondeur de la couche imperméable à partir des drains (aquifer bottom)

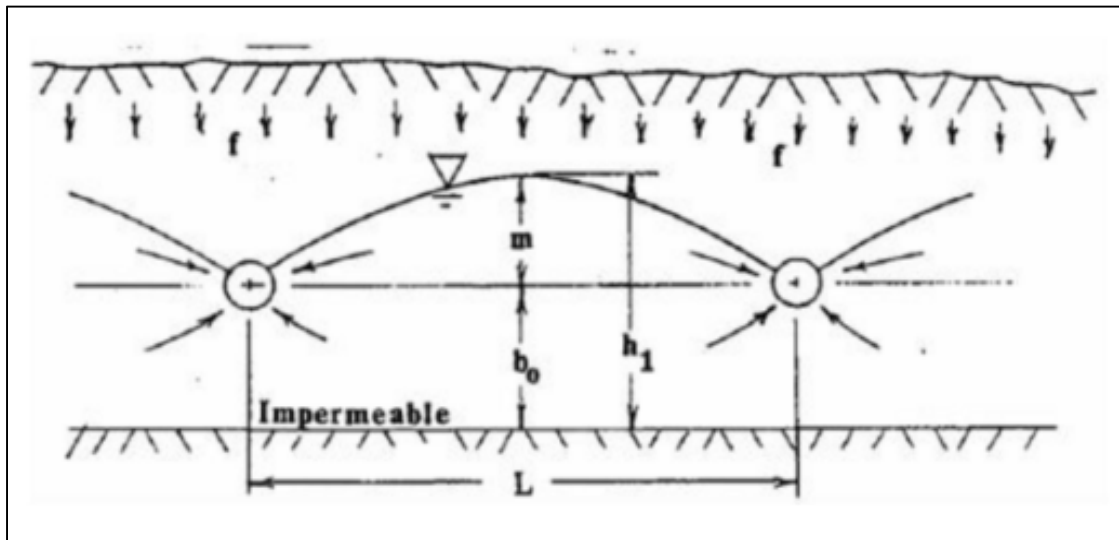


Figure 3.9 Schéma de l'écoulement souterrain en présence de drains agricoles selon Hooghoudt

Tiré de CHI (2020)

Il est possible de tenir compte de l'écoulement dans le sol en lien avec le réseau de drainage agricole et la nappe phréatique avec la fonction écoulement souterrain de PCSWMM et l'équation de Hooghoudt. Considérant que le niveau de la nappe phréatique est

particulièrement haut à St-Isidore, ces options sont d'autant plus importantes pour la modélisation du débit dans le cours d'eau (Girard, 2019a). Le détail du calcul et de l'utilisation de cette formule est expliqué à l'annexe VII.

3.2.11 Écoulement souterrain de l'eau

Pour les secteurs non agricoles, la formule de Dupuit-Forchheimer est utilisée. Elle permet la modélisation de l'écoulement de l'eau vers le milieu récepteur, en l'occurrence la rivière Saint-Régis (Voir l'annexe VIII).

L'équation de Dupuit-Forchheimer permet de calculer l'écoulement souterrain vers un cours d'eau récepteur (équation 3.4).

$$Q_{gw} = \frac{4k}{L^2} \left[(H_{gw} - H^*)^2 - H_{gw}(H_{sw}) \right] \quad (3.4)$$

Où Q_{gw} = débit

K = Conductivité hydraulique saturée latérale du sol

L = Approximativement $\frac{1}{2}$ de la longueur de l'écoulement du sous-bassin (Huber & Dickinson, 1992)

H_{gw} = Hauteur de la nappe = variable

H^* = Flow elevation = 0

H_{sw} = SWDepth = variable

Les différents paramètres de l'équation sont illustrés à la figure 3.10. Le détail du calcul et de l'utilisation de cette formule est expliqué à l'annexe VII.

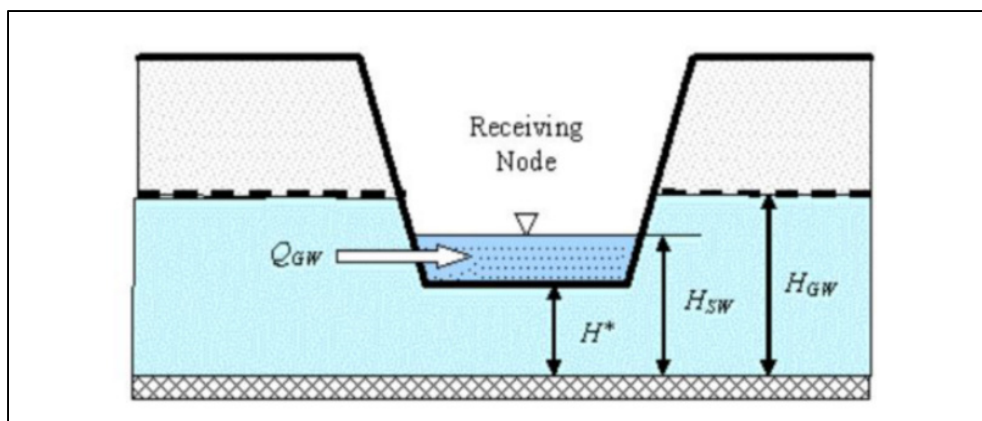


Figure 3.10 Représentation des paramètres de l'équation d'écoulement souterrain de Dupuit-Forchheimer

Tiré de CHI (2020)

3.2.12 Jaugeage au fluorimètre et au vélocimètre

Afin de convertir les niveaux d'eau en débit, le recours au jaugeage afin d'établir la courbe de tarage est requis. Deux types de jaugeage sont identifiés en fonction des conditions au terrain soit le jaugeage dit chimique et le jaugeage par exploration du champ de vitesse. Toutes les informations pertinentes à ces prises de données se trouvent à l'annexe IX. Une discussion des techniques de jaugeage est faite à la section 5.1.3.

3.2.13 Calibration et validation du modèle hydrologique et hydraulique

En lien avec l'étude de Reynolds, Halldin, Seibert, Xu, et Grabs (2020), quelques événements pluvieux sont sélectionnés pour calibrer et valider le modèle hydrologique et hydraulique. Les événements choisis se sont produits lors de l'année de prise de mesure du niveau de l'eau soit entre 12 septembre 2019 et le 11 septembre 2020. Leur choix s'est orienté vers une diversité dans l'intensité et la durée du ou des événements pluvieux. En effet, des pluies consécutives ayant eu lieu entre le 12 octobre 2019 et le 24 octobre 2019 ont été sélectionnées pour calibrer le modèle. Tel que mentionné à la section 3.2.5, les données météorologiques sont issues de la station Bec Sucre. La figure 3.9 présente les événements de pluie considérés pour la calibration.

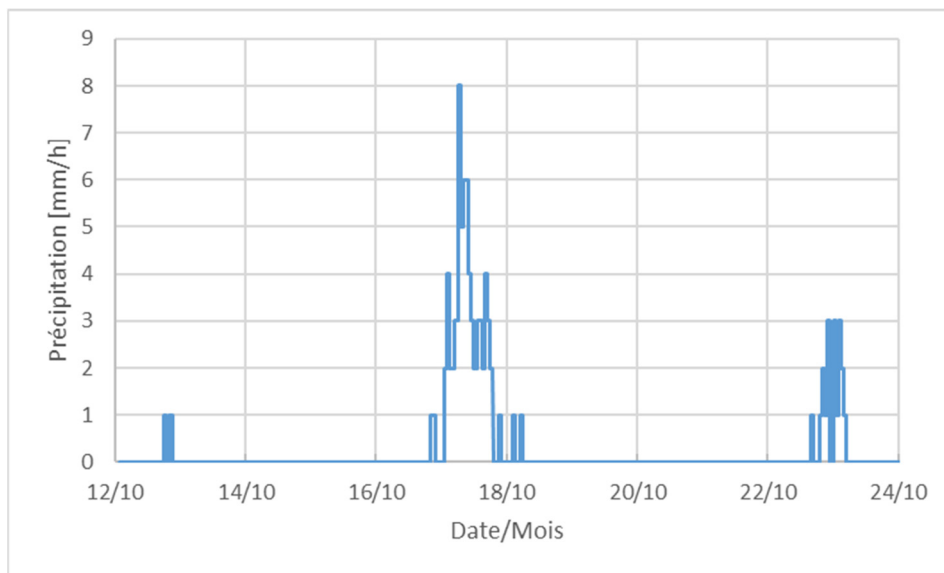


Figure 3.11 Précipitations du 12 octobre 2019 au 25 octobre 2019 pour la calibration du modèle PCSWMM

La simulation est effectuée en continu du 12 octobre 2019 minuit au 25 octobre 2019 23 h et les métriques de performance sont calculés entre le 14 octobre 2019 et le 24 octobre 2019. Pour la validation, deux séries d'événements sont considérés soit du 26 octobre 2019 au 4 novembre 2019 et du 2 août 2020 au 8 août 2020. Les figure 3.10 et figure 3.11 présentent les événements utilisés pour les simulations.

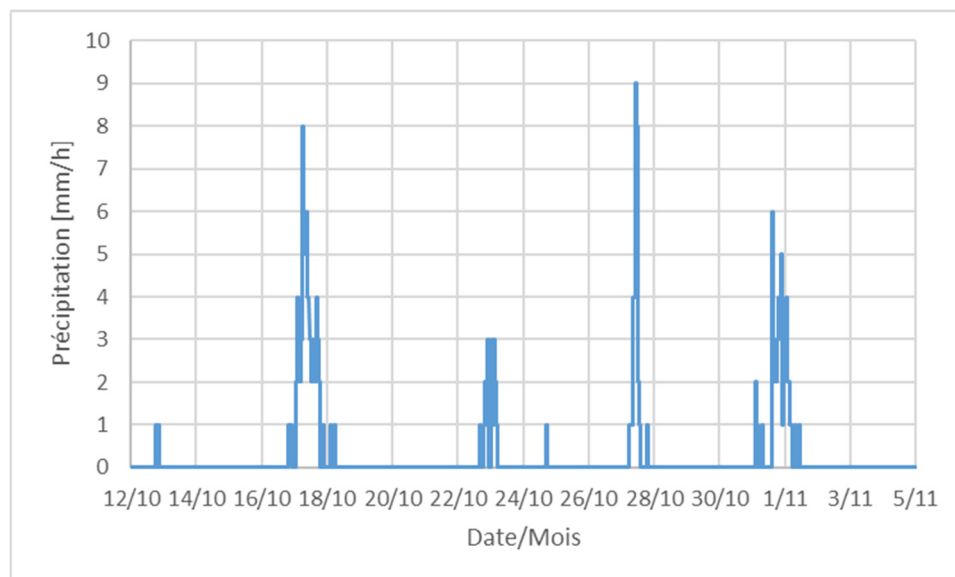


Figure 3.12 Précipitations du 12 octobre 2019 au 4 novembre 2019 pour la validation du modèle PCSWMM

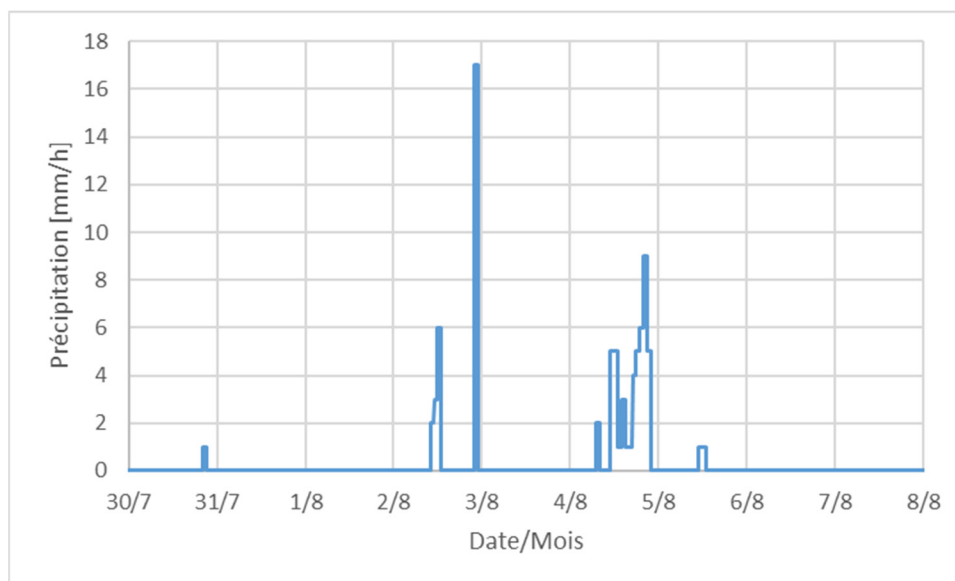


Figure 3.13 Précipitations du 30 juillet 2020 au 8 août 2020 pour la validation du modèle PCSWMM

Ces deux sélections d'événements permettent de valider le modèle PCSWMM en 2019 et en 2020 pour des événements pluvieux en saison estivale. Les métriques de performance sont calculées pour les périodes du 26 octobre 2019 au 4 novembre 2019 et du 2 août 2020 au 8 août 2020.

D'après D. N. Moriasi et al. (2007) et Daniel N. Moriasi, W. Gitau, Pai, et Daggupati (2015), plusieurs indicateurs permettent d'évaluer conjointement la performance d'un modèle hydrologique :

- le coefficient Nash-Sutcliffe (NSE);
- le coefficient de détermination (R^2);
- l'erreur quadratique moyenne (RMSE);
- le ratio entre le RMSE et la déviation standard des observations (RSR);
- le biais en pourcentage (PBIAS);
- l'évaluation qualitative du graphique.

De plus, pour des simulations à événement simple, D. N. Moriasi et al. (2007) recommande d'évaluer la performance du modèle en considérant :

- la différence entre le débit maximal simulé et observé;
- la différence de temps pour l'atteinte du débit maximal entre les données simulées et observées;
- le volume total généré par l'événement;
- l'aspect global de la courbe de récession.

Ces lignes directrices ont été établies pour le débit de modèles journaliers, mensuels et annuels. Malgré le fait que dans le cadre de cette recherche il s'agit plutôt de modélisation sous-journalière, les barèmes de performance associé aux indicateurs ont été utilisés tels quels.

3.2.14 Scénarios climatiques

Les pluies synthétiques de Chicago d'une durée de 3 heures et NRCS¹⁰ type II d'une durée de 24 heures sont utilisées en climat présent à partir des courbes IDF d'ECCC provenant de la station Sainte-Clotilde et en climat futur en incluant la perturbation occasionnée par les changements climatiques. La perturbation utilisée est de type pourcentage unique évalué à 18 % tel qu'énoncé dans le Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017). Les figure 3.12 et 3.13 montrent les hydrogrammes utilisés pour la simulation des mesures d'adaptation en climat présent et futur.

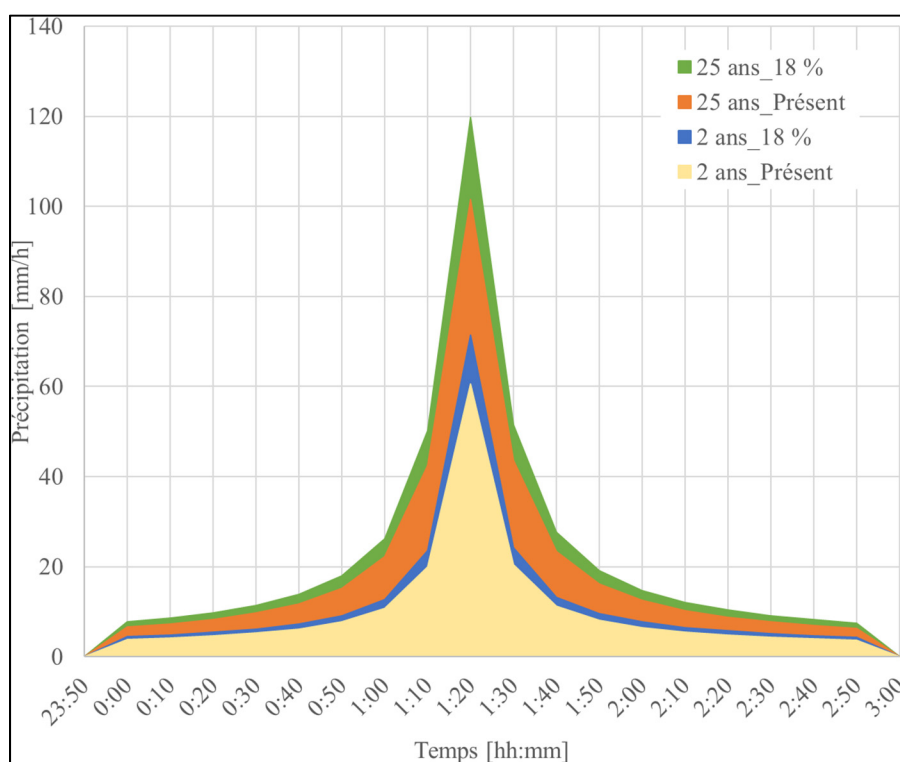


Figure 3.14 Hydrogramme des pluies Chicago de récurrence 2 ans et 25 ans en climat actuel et majoré de 18 % à la station Sainte-Clotilde

¹⁰ Natural Resources Conservation Service

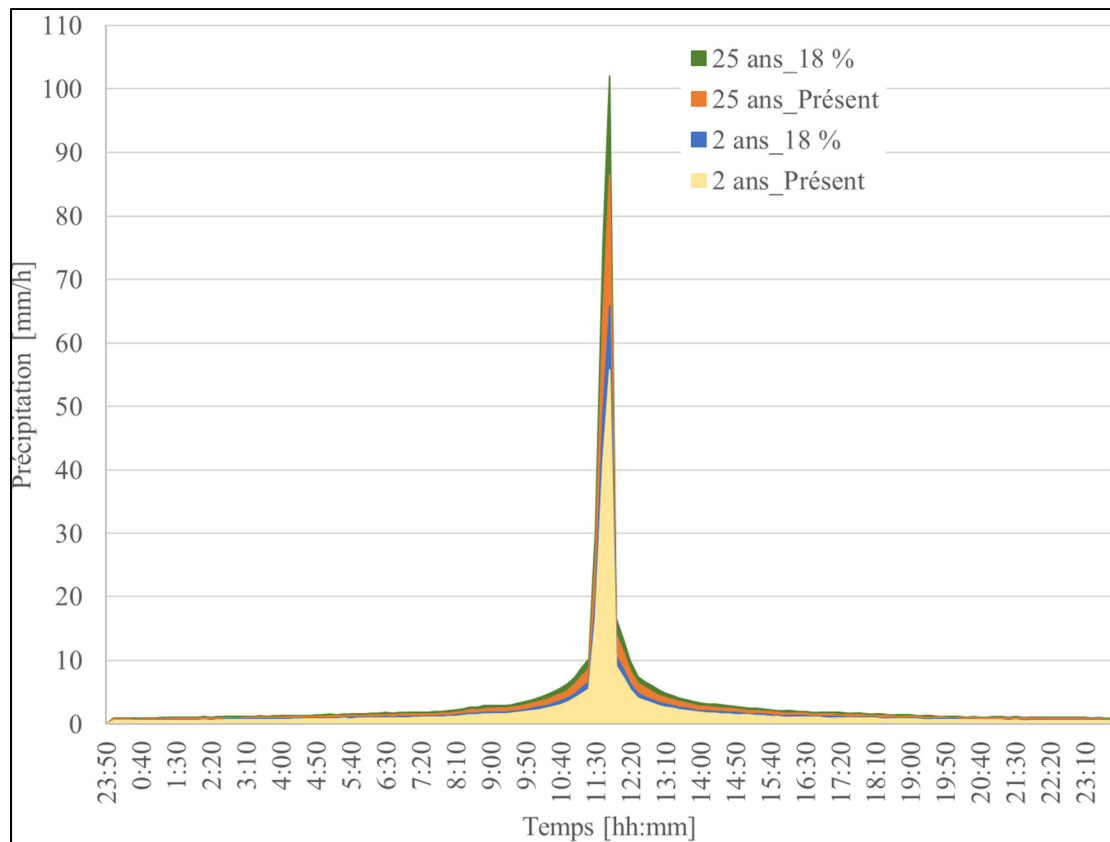


Figure 3.15 Hydrogramme des pluies NRCS de récurrence 2 ans et 25 ans en climat actuel et majoré de 18 % à la station Sainte-Clotilde

3.3 Aide à la prise de décision

Le processus d'analyse multicritère requiert l'identification et la pondération des critères permettant de comparer les scénarios entre eux. Le choix des critères et de leur unité repose sur la littérature ainsi que les spécificités des scénarios techniques proposés. L'attribution de la valeur de chaque scénario pour chaque critère retenu est basée d'une part sur les résultats du volet de modélisation et, d'autre part, sur les connaissances issues de la littérature ou de jugements d'experts. Le processus d'aide à la décision s'appuie sur la méthode PROMÉTHÉE afin de proposer un classement des scénarios.

3.3.1 Mesures techniques d'adaptation proposées

Sur la base des échanges avec les décideurs de la ville de Saint-Isidore, plusieurs mesures ont été retenues pour être soumises à l'étude d'adaptation aux inondations. Le tableau 3.2 présente les scénarios retenus.

Tableau 3.2 Mesures techniques d'adaptation retenues

Nom de la mesure	Description
Statu quo	Aucun changement n'est apporté au territoire.
Bassin de rétention	Aménagement d'un bassin de rétention sec dans le parc Sainte-Anne.
Reprofilage amont de la rivière	Reprofilage de la rivière Saint-Régis de sa source jusqu'à 300 mètres en aval du ponceau Boyer
Reprofilage aval de la rivière	Reprofilage juste avant le ponceau Boyer et jusqu'à l'exutoire du bassin versant à l'étude.
Abaissement du ponceau Boyer	Abaissement du ponceau Boyer et reprofilage de ses abords.
Redirection vers la Branche 14	Redirection de l'eau s'écoulant en amont du lot 2 867 180 vers la branche 14 comme c'était le cas anciennement.
Déconnexion des gouttières	Déconnexion des gouttières du réseau d'égout pluvial.

Les mesures listées sont modélisées à l'aide du logiciel PCSWMM pour être appréciées quantitativement par rapport aux critères établis à la section 3.3.3 (Débit à l'exutoire et hauteur de l'eau). Les paragraphes suivants fournissent les explications concernant la modélisation des mesures à l'aide de PCSWMM. La figure 3.14 présente l'emplacement des mesures au sein du territoire.

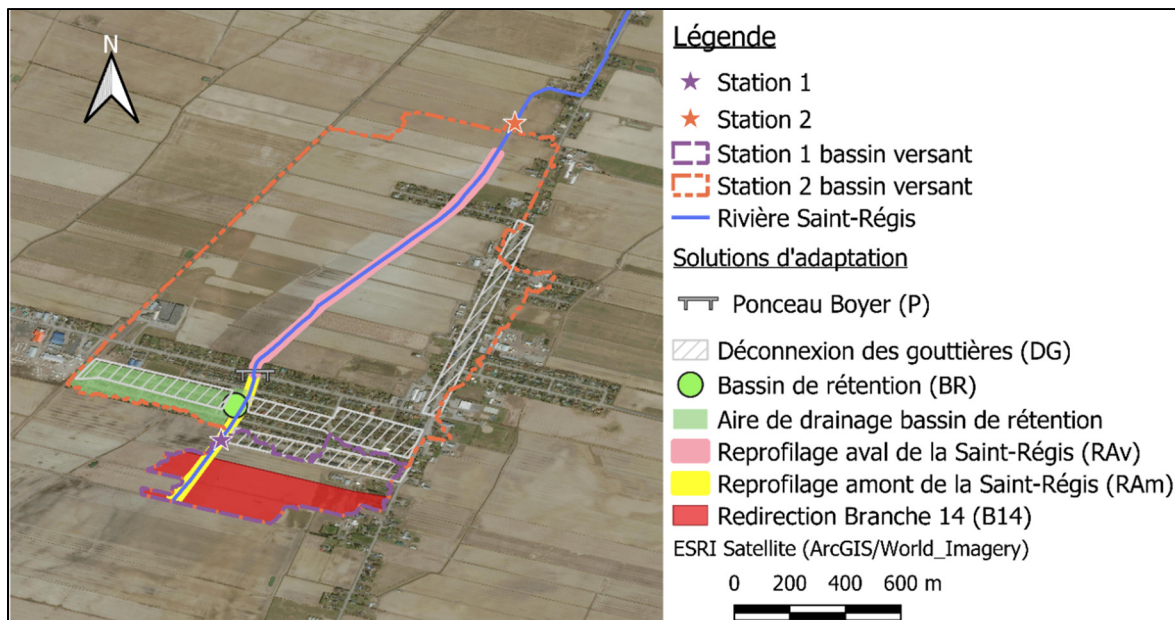


Figure 3.16 Emplacement des mesures d'adaptation potentielle sur le territoire de Saint-Isidore

Statu quo

Pour le statu quo, aucune modification n'est apportée au modèle représentant le bassin versant actuel.

Bassin de rétention

Pour le scénario comprenant un bassin de rétention, une entité de stockage est ajoutée à l'emplacement du parc Sainte-Anne. Ce bassin de rétention est dimensionné selon les critères de conception énoncés dans le Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017). Le bassin de rétention possède un volume de stockage égal à 6 290 m³ et est alimenté en eau de ruissellement par une surface de 8,8 ha. Les conduites pluviales des rues Bellefleur, D'Amour et Poupart (secteur Sud-Ouest du village) sont détournées vers le bassin de rétention. Ce bassin se vide directement dans le cours d'eau récepteur Saint-Régis par deux régulateurs de débit et un déversoir possédant chacun une vanne anti-retour. L'objectif du

bassin de rétention est de retenir l'eau de ruissellement avant de lentement la restituer au cours d'eau récepteur pour réduire le débit dans le cours d'eau.

Reprofilage amont de la rivière

Pour le scénario de reprofilage amont, la rivière est reprofilée de sa source jusqu'à 300 m en aval du ponceau Boyer. Ce dernier est aussi abaissé pour que son radier corresponde à la pente de la rivière. Une pente moyenne est calculée entre le point haut (source) et le point bas (exutoire) pour être assignée à chaque tronçon. Les élévations de tous les tronçons et des jonctions sont donc modifiés pour respecter cette pente moyenne.

Reprofilage aval de la rivière

Le reprofilage aval s'effectue de 200 mètres en amont du ponceau Boyer jusqu'à l'exutoire du bassin versant à l'étude. Le ponceau Boyer est aussi abaissé.

Abaissement du ponceau Boyer

Pour le scénario de l'abaissement du ponceau Boyer, les portions de la rivière se trouvant 75 mètres en amont du ponceau et 135 mètres en aval du ponceau sont reprofilées en appliquant la même méthode que pour le reprofilage complet de la rivière. Donc, seule une portion de la rivière autour du ponceau et ce dernier subissent l'intervention. L'élévation du radier du ponceau est diminuée pour correspondre au lit de la rivière.

Redirection vers la Branche 14

La tête du bassin versant est « déconnectée » du reste de la rivière et se jette dans le fossé qui relie la rivière Saint-Régis à la Branche 14 comme cela était le cas avant que la tête du bassin versant soit modifiée.

3.3.2 Choix de la méthode d'aide à la décision

La méthode d'analyse multicritère par surclassement PROMETHEE est choisie pour évaluer les mesures d'adaptation en regard d'une diversité de critères arborant différentes échelles de

mesure. En effet, cette méthode permet l'incomparabilité des critères, ce qui permet de comparer les mesures deux-à-deux pour chacun des critères.

3.3.3 Sélection des critères

Afin de fournir une piste de réflexion aux acteurs du territoire en regard du choix des critères, une sélection est effectuée à partir de la littérature. Il est important de tenir compte du secteur à l'étude et de la facilité avec laquelle il est possible de s'approprier les critères pour des nouveaux initiés.

Le choix des critères s'est fait en considérant les recommandations de Perch-Nielsen (2010) qui stipule qu'il est possible de réduire la subjectivité liée au choix des critères en appliquant les recommandations suivantes : (1) choisir des indicateurs relevant d'un cadre théorique, (2) utiliser un proxy et (3) choisir des indicateurs sur la base d'un ensemble d'indicateurs. Pour cette étude, les critères sont retenus sur la base de la revue de la littérature (voir section 1.5.2) par des échanges avec des acteurs responsables de la gestion des eaux du bassin versant. Il s'agit d'un processus itératif où les différents critères sont comparés entre eux pour être soit rejeté ou sélectionné en fonction de l'atteinte de l'objectif de minimisation des inondations et d'adaptation au changement climatique et pour permettre de différencier les mesures entre elles. Les critères sont divisés en trois catégories cohérentes selon le respect de trois conditions. La première condition exige que la liste des critères soit exhaustive. Tous les critères pertinents à l'étude sont pris en compte. La deuxième condition requiert la cohérence dans le rôle d'un critère à son échelle locale et lorsqu'il est immergé au sein de sa famille. Enfin, la troisième condition implique la non-redondance des critères, alors les critères superflus sont écartés (Roy & Bouyssou, 1993). La sélection des critères est affichée au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Liste des critères et de leur signification

Contexte	Critères	Description du critère	Unité
Socio-Économique	Complexité administrative	Mesure requiert la mobilisation de ressources de la municipalité pour réaliser la mesure.	Échelle qualitative 1 à 5 ¹¹
	Coût de l'investissement	Coût requis pour concevoir et construire la mesure.	Quantitatif \$
	Coût d'opération et d'entretien	Coût requis pour l'opération de la mesure et son entretien de routine.	Quantitatif \$
	Coût de réfection	Coût nécessaire à prévoir pour remettre aux normes ou pour renouveler la mesure.	Quantitatif \$
Technique	Facilité de mise en œuvre	Facilité avec laquelle une mesure peut-être mise en œuvre.	Qualitatif 1 à 5
	Facilité de maintenance	Simplicité avec laquelle il est possible de maintenir le bon fonctionnement de la mesure.	Qualitatif 1 à 5
	Facilité à renouveler	Facilité pour remettre à niveau la mesure.	Qualitatif 1 à 5
	Débit d'eau à l'exutoire	Le débit d'eau maximal à l'exutoire lors de précipitations	Quantitatif m ³ /s
	Hauteur de l'eau	Hauteur de l'eau au parc Sainte-Anne 24 heures après une crue.	Quantitatif m
	Mesure éprouvée	Mesure utilisée couramment, occasionnellement ou innovante.	Qualitatif 1 à 5
Environnement	Potentiel d'infiltration	Potentiel d'infiltration de l'eau vers la nappe phréatique	Qualitatif 1 à 5
	Potentiel d'érosion	Favorise la réduction d'apports en sédiments vers l'aval.	Qualitatif 1 à 5
	Qualité des habitats	Évolution de la qualité des écosystèmes pour la faune et la flore en lien avec la mesure proposée.	Qualitatif 1 à 5
	Qualité de l'eau	La mesure minimise l'apport de contaminants vers le cours d'eau.	Qualitatif 1 à 5

Ensuite, il importe de noter les critères en fonction de données quantitatives ou à l'aide d'échelle de notation qualitative allant de 1 à 5 par exemple.

¹¹Une note de 1 est considérée comme étant la meilleure note et une note de 5 comme la moins bonne.

La famille socio-économique regroupe les critères de mobilisation des effectifs municipaux et les critères en lien avec les différents coûts de la mesure. Pour la mobilisation des effectifs municipaux, toutes les tâches nécessaires accomplies par ces derniers pour mener à bien l'implantation de la mesure sont considérées. Il peut s'agir de demande d'autorisation seulement à la MRC ou pour différents ministères et pallier de gouvernement. Les critères de coût prennent en compte l'investissement initial, les coûts d'opération et d'entretien puis les coûts de réfection. L'investissement initial prend en charge les coûts reliés à la conception et la construction de la mesure jusqu'à sa livraison. Ce critère est exprimé en unité monétaire. Pour le coût d'opération et d'entretien, il représente l'investissement requis pour le fonctionnement de la mesure, mais aussi pour son inspection. Enfin, le critère de coût de réfection représente le montant à économiser par année pour mettre à jour l'infrastructure devenue désuète ou hors norme. L'inflation n'est pas prise en compte dans cette recherche.

La famille technique prend en compte les critères associés à la mesure en elle-même et de ses impacts sur l'hydraulicité du cours d'eau. La facilité de mise en œuvre désigne la facilité avec laquelle la mesure peut être installée, mise en place et connectée au(x) réseau(x) existant(s). La facilité à maintenir réfère à la façon dont on doit s'occuper de la mesure pour assurer en assurer un fonctionnement adéquat. La facilité à renouveler intervient lorsque la mesure doit être mis aux normes ou doit être rafraichie. Pour les trois critères précédents, lorsqu'il y a combinaison de mesures, les notes sont additionnées. Le potentiel d'érosion mesure l'impact de la mesure quant à son potentiel à réduire ou augmenter l'érosion du cours d'eau. Ce paramètre évalue la quantité d'eau par unité de temps qui passe par l'exutoire du bassin versant à l'étude. Une hausse du débit peut être problématique pour les secteurs en aval. La hauteur de l'eau vis-à-vis le parc Sainte-Anne est aussi une préoccupation. Ce critère permet de distinguer l'impact des mesures vis-à-vis la hauteur de l'eau en centimètre pendant une crue. Enfin, il s'agit d'évaluer si la mesure est couramment utilisée ou non en sol québécois. Pour ce critère, les notes sont aussi additionnées lorsqu'il y a combinaison de mesures.

Finalement, la famille environnement regroupe des critères de nature biophysiques et écologiques (Audet, Beaudoin-Lebeuf, Charbonneau, & Pothier, 2020a). Pour ces critères, il

importe de prendre en compte l'échelle des impacts, la réversibilité des impacts, la temporalité des impacts et le dérangement des fonctions écologiques. Pour plus de détails, se référer au document cité. Le potentiel d'infiltration évalue la capacité d'une mesure à permettre l'infiltration vers la nappe phréatique servant de source d'eau potable pour la municipalité. Le potentiel d'érosion vise à réduire le transport de sédiments vers l'aval ce qui représente une problématique réelle en aval du bassin versant. La qualité de l'eau est un critère qui évalue la capacité d'un critère à minimiser l'apport de contaminants vers le cours d'eau. Enfin, la qualité des habitats fauniques regroupe autant les habitats terrestres et aquatiques et la mesure est évalué en regard de leur amélioration ou non.

3.3.4 Pondération des critères

La pondération des critères consiste à accorder une plus ou moins grande importance de chaque critère permettant d'exprimer les préférences des acteurs impliqués par les mesures.

La robustesse du classement des mesures sera testée en faisant varier les pondérations pour différents scénarios. Un scénario dit « de base » permet de comparer les mesures alors que les catégories de critères reçoivent une pondération équitable. Ensuite, chaque catégorie recevra une pondération plus favorable que les autres, tour à tour, pour voir l'impact de la pondération sur le classement des mesures d'adaptation. Comme différentes subventions peuvent permettre d'avantager une mesure par rapport à une autre n'en bénéficiant pas, l'attrait intrinsèque pour une mesure en regard des catégories technique et environnementale sera aussi testé. Le tableau 3.4 présente les scénarios de pondérations à l'étude.

Tableau 3.4 Pondérations des critères

Critères	Scénarios des pondérations						
	avec critères socio-économiques				sans critères socio-économiques		
	De base	Socio.-É.	Tech.	Env.	De base	Tech.	Env.
Complexité administrative	8,33	18,75	3,13	3,13	-	-	-
Coût de l'investissement	8,33	18,75	3,13	3,13	-	-	-
Coût d'opération et d'entretien	8,33	18,75	3,13	3,13	-	-	-
Coût de réfection	8,33	18,75	3,13	3,13	-	-	-
Facilité de mise en œuvre	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Facilité à maintenir	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Facilité à renouveler	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Débit à l'exutoire	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Hauteur de l'eau	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Mesure éprouvée	5,56	2,08	12,5	2,08	8,33	12,5	4,17
Potentiel d'infiltration	8,33	3,13	3,13	18,75	12,5	6,25	18,75
Potentiel d'érosion	8,33	3,13	3,13	18,75	12,5	6,25	18,75
Qualité de l'eau	8,33	3,13	3,13	18,75	12,5	6,25	18,75
Qualité des habitats fauniques	8,33	3,13	3,13	18,75	12,5	6,25	18,75
Total	100	100	100	100	100	100	100

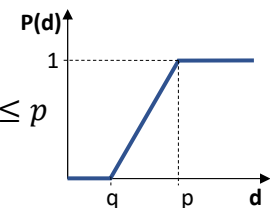
D'après le tableau 3.4 les catégories se partagent 100 % de la pondération totale pour chacun des scénarios. Lorsque l'une des trois catégories de critères est avantagée, elle détient 75 % de la pondération totale répartis équitablement entre chaque critère de la famille. Les autres familles se partagent également le 25 % restant. Cette façon de faire permet de tester la robustesse et la stabilité du classement lorsque la pondération des familles et des critères se trouvent modifiée.

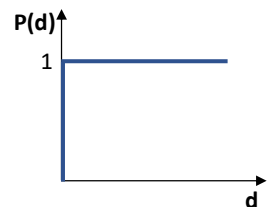
3.3.5 Attribution de valeurs aux critères

Les valeurs attribuées aux critères pour chaque scénario évalué dépendent de la littérature, du jugement d'experts et des résultats issus du modèle PCSWMM. Les valeurs peuvent être de nature quantitatives ou qualitatives. Ces valeurs attribuées aux critères permettent de classer les scénarios entre eux en fonction de seuils de préférences et d'indifférences.

3.3.6 Seuils de préférence et d'indifférence

La méthode PROMETHEE requiert des seuils de préférence et d'indifférence pour chacun des critères $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. Ces seuils, choisis pour chaque critère, permettent de définir si la différence $d_c(a_i, a_j)$ entre les valeurs accordées aux mesures $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ en regard d'un critère $d_i(a_i, a_j) = c_i(a_i) - c_i(a_j)$ sont indifférentes ou préférées. Cette préférence prend une valeur entre 0 et 1 et se calcule à partir d'une fonction de préférence. La valeur 0 signifie l'absence de préférence, donc une indifférence entre deux mesures comparées pour un même critère et 1 une préférence forte pour une mesure par rapport à une autre en regard d'un même critère. Un outil de *Visual PROMETHEE* permet d'établir des seuils d'indifférence et de préférence à partir des valeurs entrées dans la matrice de décision. Deux fonctions de préférence sont utilisées :

$$\text{Linéaire } P(a_i, a_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } |d_c(a_i, a_j)| \leq q \\ \frac{|d_c(a_i, a_j) - q|}{p - q} & \text{if } q < |d_c(a_i, a_j)| \leq p \\ 1 & \text{if } |d_c(a_i, a_j)| > p \end{cases} \quad (3.5)$$


$$\text{Usuelle } P(a_i, a_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } d_c(a_i, a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{if } d_c(a_i, a_j) > 0 \end{cases} \quad (3.6)$$


3.3.7 Flux positifs, flux négatifs, flux nets et flux globaux

Ces flux sont obtenus à partir des préférences. Un flux positif $[0,1]$ représente une préférence pour une mesure par rapport à toutes les autres mesures et un flux négatif $[0,1]$ une préférence pour les autres mesures par rapport à la mesure considérée. Le flux net $[-1,1]$ d'une mesure est obtenu par la soustraction de son flux négatif à son flux positif. Le classement des mesures entre elles se fait en considérant la pondération qui a été accordée pour chacune d'elles par les scénarios de pondération (ou par les acteurs lors d'un atelier participatif).

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{c=1}^n P_c(a_i, a_j)w_c \quad \text{and} \quad \pi(a_j, a_i) = \sum_{c=1}^n P_c(a_j, a_i)w_c \quad (3.7)$$

Lorsque la pondération est incluse dans le calcul des flux positifs, flux négatifs et flux nets il en résulte les flux globaux positifs, flux globaux négatifs et flux globaux nets.

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a_i, x) \quad \text{and} \quad \Phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a_i) \quad (3.8)$$

Dans cette équation, n représente le nombre de mesures considérées. Il est ainsi possible d'obtenir le flux net de chaque mesure à partir du flux sortant et entrant.

$$\pi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i) \quad (3.9)$$

3.3.8 Classement des mesures d'adaptation

Le résultat de la démarche est l'obtention de plusieurs surclassements pour chaque pluie synthétique et les scénarios de pondérations. Cela vise à aider à départager les mesures sur la base des critères et d'ouvrir la discussion sur les points forts et les points faibles de chacune.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour les volets modélisation (hydrologique, hydraulique et changements climatiques) et aide à la décision. Tout d'abord, la calibration et la validation du modèle PCSWMM sont présentées. Puis, les mesures d'adaptation sont simulées en climats actuel et futur pour déterminer leurs avantages, leurs inconvénients et les possibles synergies entre elles. Enfin, les données obtenues par modélisation avec PCSWMM ainsi que d'autres données issues de la pratique et de jugements d'experts alimentent une analyse multicritère afin d'obtenir un classement des mesures d'adaptation.

4.1 Calibration du modèle hydrologique et hydraulique PCSWMM

L'objectif du modèle PCSWMM est de reproduire la dynamique hydrique du bassin versant de Saint-Isidore. Ce modèle a été calibré et validé sur des événements pluvieux en saisons estivale et automnale compris entre le 12 septembre 2019 et le 11 septembre 2020.

Dû à un bris d'équipement, les données sur la hauteur d'eau à la station #2¹² n'ont pu être enregistrées entre le 9 mars 2020 et le 23 mars 2020, ce qui empêche la modélisation de la fonte du couvert de neige puisque c'est lors de cette période qu'a eu lieu la crue printanière. Donc, seuls les événements pluvieux survenus en été et à l'automne ont été considérés pour la calibration du modèle. En raison de la courte série temporelle et du peu d'événements pluvieux significatifs enregistrés, la calibration a été réalisée principalement pour des pluies s'étant déroulées entre le 16 octobre 2020 et le 25 octobre 2020. Pour mesurer la performance de la simulation en regard des données observées, les indicateurs de performance utilisés sont ceux proposés par D. N. Moriasi et al. (2007) et Daniel N. Moriasi et al. (2015) tels que décrits à la

¹² Voir la Figure 3.2 pour connaître son emplacement sur le territoire de Saint-Isidore.

section 3.2.13. La figure 4.1 montre les hauteurs d'eau observées et simulées aux stations #1 et #2 ainsi que les précipitations mesurées à la station Bec Sucré, en calage et en validation.

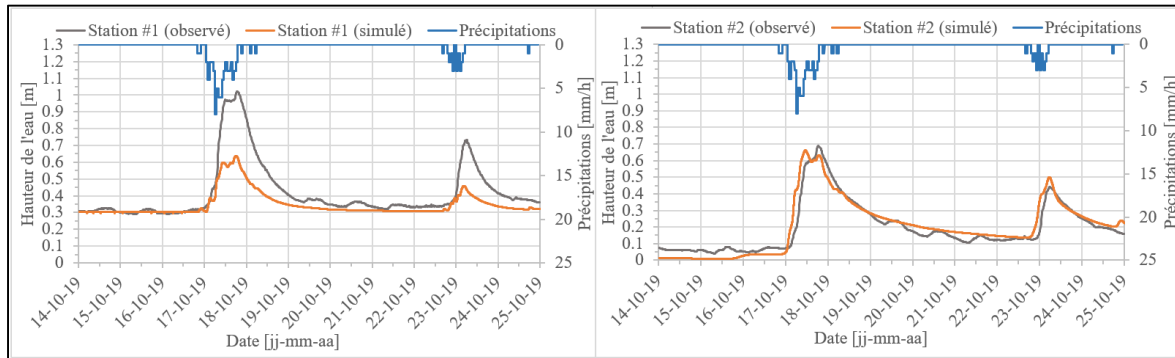


Figure 4.1 Calibration aux stations #1 et #2 du 14 octobre 2019 au 25 octobre 2019

En regard de l'aspect qualitatif du graphique tracé, la hauteur d'eau maximale simulée n'atteint pas celle observée pour les deux événements pluvieux (figure 4.1). Le premier sommet, entre le 17 et le 18 octobre 2019, montre une différence de 0,38 m et le deuxième sommet, entre le 23 et le 24 octobre 2019, une différence de 0,28 m. Comme il s'agit d'une étude sur les inondations, cela est problématique, car le modèle sous-estime la hauteur de l'eau à la station Sainte-Anne pour la calibration. Enfin, la hauteur correspondant au débit de base simulé représente bien les observations. Il est difficile d'évaluer la récession compte tenu de la faible performance du modèle pour épouser la courbe de la crue. Pour évaluer objectivement les graphiques, le tableau 4.1 présente les valeurs des indicateurs de performance. En général, ces indicateurs sont utilisés sur de longues périodes de données, il s'agit donc, ici, d'avoir une idée de la performance du modèle tel qu'abordé à la section 3.2.13.

Tableau 4.1 Indicateurs de performance pour la calibration aux stations #1 et #2 du 14 octobre 2019 au 25 octobre 2019

Station	NSE	R ²	PBIAS
#1	0,48 < 0,5	0,96 > 0,6	17 % > ±15 %
	Non satisfaisant	Satisfaisant	Non satisfaisant
#2	0,89 > 0,6	0,91 > 0,6	-2,79 % < ±15 %
	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant

D'après le tableau 4.1, la performance de la simulation en calibration à la station #1 est jugée peu satisfaisante d'après le R², mais non satisfaisante pour le NSE et le PBIAS. L'objectif étant de simuler les inondations, donc les crues, le modèle se révèle globalement peu adéquat à la station #1.

Qualitativement, la courbe simulée pour la station #2 (Figure 4.1) reproduit bien la courbe des données observées. Le premier sommet atteint entre le 17 et le 18 octobre 2019, montre une différence de 0,05 m entre les données observées et simulées et un décalage de 7h30 entre les maximums. Le début de la montée de la crue simulée devance de 2 h le début de la crue observée. Pour le deuxième sommet, entre le 23 et le 24 octobre 2019, la différence est de 0,06 m pour la hauteur maximale de la crue. Comme la première crue, la montée de la deuxième crue simulée devance celle observée de 4 h. La hauteur du débit de base est plus faible en moyenne de 0,05 m pour la hauteur simulée par rapport à la hauteur observée avant le premier sommet. Enfin, pour la récession, les profils sont plutôt similaires. Par contre, la hauteur simulée tend à être un peu plus élevée que la hauteur observée. Les indicateurs de performance permettent de comparer les courbes simulée et observée de façon objective.

D'après le tableau 4.1, la performance de la simulation en calibration est jugée satisfaisante pour tous les indicateurs de performance à la station #2.

Pour la validation du modèle, deux périodes temporelles distinctes sont choisies, une en 2019 et une en 2020. Il s'agit du 25 octobre 2019 au 4 novembre 2019 et du 2 août 2020 au 9 août

2020. Il s’agit d’événements où le niveau maximum a été atteint par le capteur de pression lors de ces années. La figure 4.2 présentent les graphiques obtenus pour les simulations et les observations.

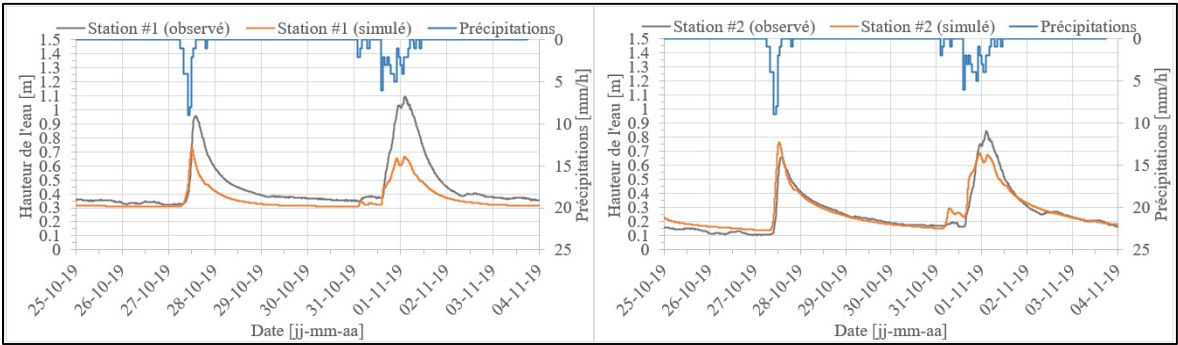


Figure 4.2 Validation aux stations #1 et #2 du 25 octobre 2019 au 4 novembre 2019

Pour la validation à la station #1 (figure 4.2), la montée de la crue pour le premier sommet est similaire pour les hauteurs observée et simulée. Cependant, il y a une différence de 0,22 m entre les sommets. La forme de la courbe de la récession des hauteurs simulées semble suivre celle observée. La deuxième crue est moins bien représentée par la forme que prend la courbe des hauteurs simulées. La hauteur maximale montre une différence de 0,43 m entre les deux courbes. Le tableau 4.2 montre les indicateurs de performance.

Tableau 4.2 Indicateurs de performance pour la validation aux stations #1 et #2 du 25 octobre 2019 au 4 novembre 2019

Station	NSE	R2	PBIAS
#1	0,455 < 0,6	0,902 > 0,6	19 % > ±15 %
	Non satisfaisant	Satisfaisant	Non satisfaisant
#2	0,895 > 0,6	0,902 > 0,6	-2,53 % < ±15 %
	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant

Le NSE et le PBIAS sont non satisfaisants contrairement au R².

À la station #2 (Figure 4.2), la courbe simulée suit la courbe observée autant lors la montée que de la descente de la crue. La différence est de 0,1 m entre les sommets observé et simulé pour la première crue et de 0,16 m pour la deuxième crue. Le tableau 4.2 présente les indicateurs de performance pour la validation à la station #2 en automne. La simulation à la station #2 est satisfaisante en regard des indicateurs. La figure 4.3 montre les hauteurs simulées et observées pour la validation sur les événements d'été.

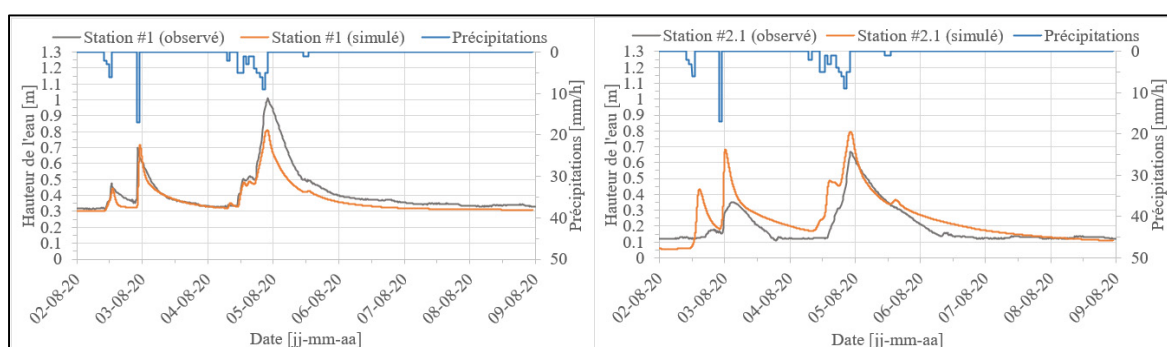


Figure 4.3 Validation aux stations #1 et #2.1 du 2 août 2020 au 9 août 2020

À la station #1, les hauteurs simulées pour les deux premiers pics de crue survenus le 2 août sont semblables aux hauteurs observées. En revanche, pour le troisième pic de crue survenu un peu avant le 5 août, il y a une différence de 0,2 m. Les hauteurs simulées lors du débit de base sont similaires à celles observées. Le tableau 4.3 présente les indicateurs de performance.

Tableau 4.3 Indicateurs de performance pour la validation aux station #1 et #2 du 2 au 9 août 2020

Station	NSE	R2	PBIAS
#1	$0,751 > 0,6$	$0,912 > 0,6$	$10 \% < \pm 15 \%$
	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant
#2	$0,424 < 0,6$	$0,734 > 0,6$	$-24,7 \% > \pm 15 \%$
	Non satisfaisant	Satisfaisant	Non satisfaisant

Pour la deuxième validation, les indicateurs de performance montrent que le modèle performe bien à la station #1. La station #2 ayant été arrachée de son emplacement, c'est la station #2.1 qui prend le relai.

Les deux premiers sommets survenus les 2 et 3 août sont plus proéminents pour les hauteurs simulées que pour les hauteurs observées. Les différences sont de 0,29 m pour le premier sommet et de 0,35 m pour le deuxième sommet. Le troisième sommet, 5 août, est mieux représenté par le modèle et affiche une différence de 0,13 m entre le maximum simulé et observé. La montée simulée du troisième sommet devance de 5 h celle observée et la récession est bien modélisée. Les indicateurs de performance sont indiqués au tableau 4.3.

Seul le R^2 est satisfaisant. La piètre performance pourrait s'expliquer par des mesures erronées de l'appareil de mesure limnimétrique qui aurait pu être endommagé lors de l'accident survenu en mars 2019. L'observation des données brutes a montré que la pression totale enregistrée par le capteur limnimétrique à la station #2.1 pouvait être inférieure à la pression barométrique enregistrée par le capteur de pression atmosphérique. Cela n'a pas été observé pour le capteur limnimétrique de la station #1 suggérant un potentiel bris du capteur de la station #2.1 suite à l'incident.

Pour synthétiser les résultats de la calibration et des validations, le modèle ne réussit pas à bien simuler les hauteurs d'eau à la station #1. En effet, une différence jusqu'à 40 cm peut être constatée pour les événements testés. Des pistes de réflexion sont proposées à la section 5.1.

Pour ce qui est de la station #2, les simulations sont satisfaisantes. Enfin, la station #2.1 ne présente pas une validation satisfaisante probablement dû au fait que l'appareil de mesure est abimé. L'impact d'un tel accident pour une courte période de prise de données est discuté à la section 5.1.2.

4.2 Simulation des mesures d'adaptation avec PCSWMM en climats présent et futur

Tel qu'annoncé à la section 3.2.14, les mesures d'adaptation sont testées dans le modèle PCSWMM en climat actuel et en climat futur, avec une augmentation des précipitations horaires de 18 % (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017), pour une pluie synthétique de type Chicago. Ce après quoi il est possible de juger de la pertinence d'une mesure en regard de sa capacité à répondre aux préoccupations exprimées ; le volume d'eau de la rivière Saint-Régis, dans la portion villageoise de Saint-Isidore, doit pouvoir s'écouler et le débit d'eau à l'exutoire du bassin versant étudié doit diminuer pour contribuer à atténuer la problématique d'érosion. La figure 4.4 présente les résultats obtenus à la fin de l'événement de précipitation en climat présent pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h de récurrence de 25 ans.

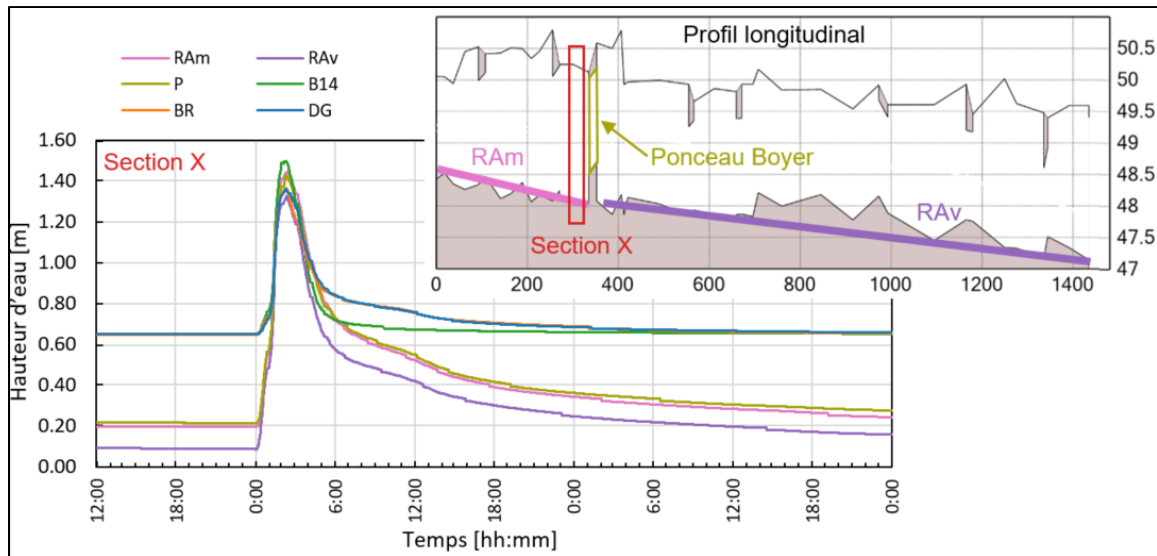


Figure 4.4 Hauteur de l'eau pour chaque mesure d'adaptation seule pour la pluie synthétique Chicago en climat présent d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans suivant une pluie de 25 mm pour une section en amont du ponceau Boyer

Comme illustré à la figure 4.4, le reprofilage aval offre un meilleur écoulement de l'eau en permettant à la section en aval du ponceau Boyer de s'écouler. Elle est suivie du reprofilage amont et de l'abaissement du ponceau Boyer avec une différence de 10 cm. Le bassin de rétention, la Branche 14 et la déconnexion des gouttières ne permettent pas la récession de l'eau suite à l'événement de pluie. Pour conclure cette section, il est possible de remédier à la retenue d'eau et l'effet de refoulement en amont du ponceau Boyer en reprofilant la rivière en aval et/ou en amont du ponceau Boyer et en abaissant ce ponceau (RAv, RAm, P et RC).

Pour évaluer la pertinence d'une mesure de mitigation des inondations à long terme, il est utile de comparer les mesures en climat futur avec le statu quo en climat présent. Ainsi, il est possible de constater l'efficacité d'une mesure d'adaptation à maintenir ou réduire le niveau d'eau maximal atteint lors d'une pluie par rapport à ce qui se produit actuellement. La figure 4.5 montre les niveaux d'eau maximum atteints lors de la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans en climat présent pour le statu quo seulement et en climat futur pour les sept mesures d'adaptation individuelles. La distance 0 correspond à l'intersection de la rue

Poupart avec la rivière Saint-Régis et la distance 275 à une distance de 35 mètres en aval du ponton Boyer.

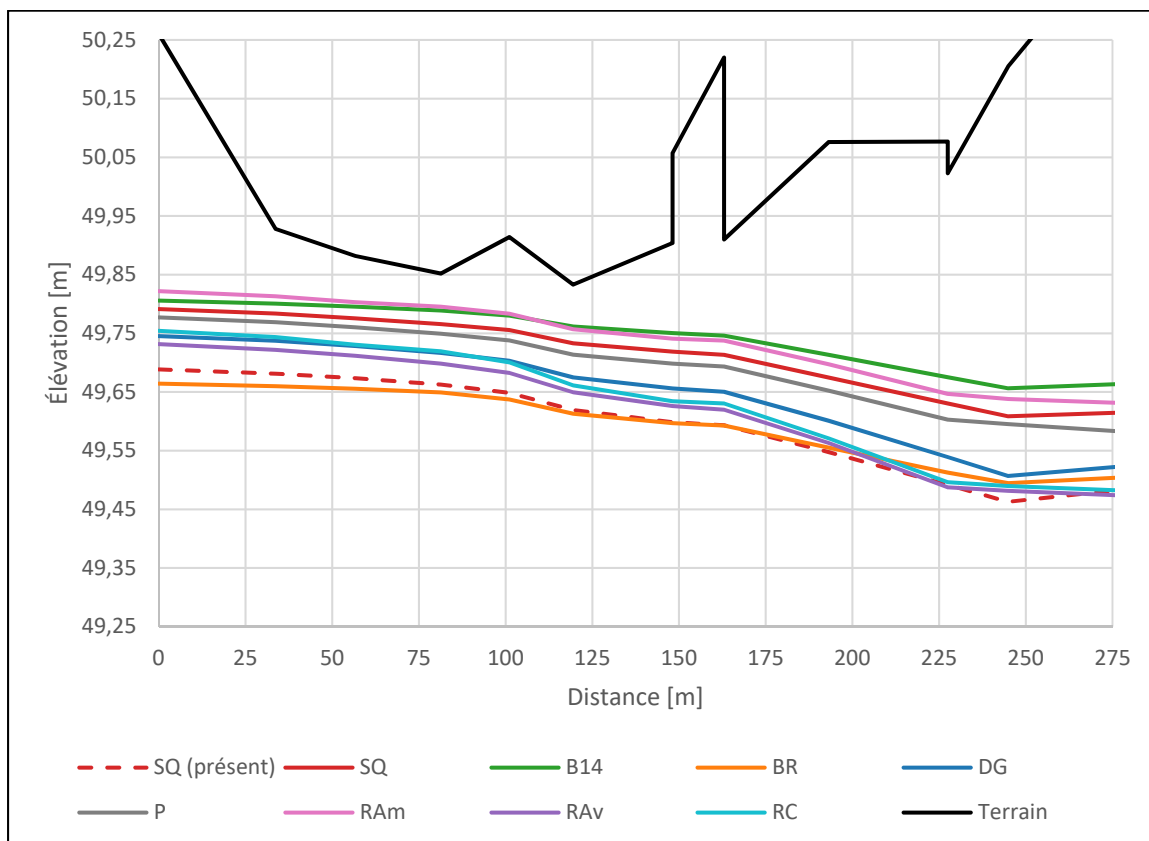


Figure 4.5 Élévation du niveau de l'eau maximal atteint dans le village pour une pluie Chicago de durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo en climats présent et futur et les mesures d'adaptation en climat futur

À la lumière de ce graphique, seule la mesure du bassin de rétention permet une diminution de l'élévation maximale de l'eau en climat futur par rapport au statu quo actuellement. Le reprofilage aval, le reprofilage complet et la déconnexion des gouttières sont les mesures performant le mieux en 2^e place. Enfin, l'abaissement seul du ponton, le reprofilage amont et la redirection vers la Branche 14 performant le moins bien. Malgré l'apport en eau réduit pour la Branche 14, c'est cette mesure qui performe le moins bien probablement parce que la longueur du cours d'eau s'en trouve écourtée ce qui diminue le volume de stockage en eau. Pour noter le critère hauteur de l'eau des mesures d'adaptation, le tronçon correspondant à la

distance 50 m est choisi. Il s'agit du tronçon au cœur du noyau villageois. Les tableaux Tableau 4.4 et 4.5 montrent les maximums atteints pour chaque pluie au tronçon 50 m où H_p signifie hauteur de l'eau en climat présent et H_f hauteur de l'eau en climat futur. La hauteur de l'eau correspond au niveau de l'eau moins l'élévation du fond de la rivière et est calculée automatiquement par PCSWMM.

Tableau 4.4 Hauteur maximale atteinte pour le statu quo et les mesures d'adaptation au droit du tronçon 50 m pour la pluie synthétique Chicago en climats présent et futur de durée de 3 h et de récurrence de 2 ans

	B14	BR	DG	P	RAm	RAv	RC	SQ
H_p [m]	1,183	1,022	1,009	1,080	0,981	1,061	0,952	1,116
H_f [m]	1,288	1,112	1,115	1,178	1,079	1,152	1,043	1,211

Tableau 4.5 Hauteur maximale atteinte pour le statu quo et les mesures d'adaptation au droit du tronçon 50 m pour la pluie synthétique Chicago en climats présent et futur de durée de 3 h et de récurrence de 25 ans

	B14	BR	DG	P	RAm	RAv	RC	SQ
H_p [m]	1,554	1,410	1,441	1,499	1,397	1,459	1,326	1,520
H_f [m]	1,641	1,501	1,576	1,607	1,498	1,559	1,427	1,623

En comparaison avec le statu quo, en climat présent, lors des pluies de récurrence de 2 ans testés, seule la Branche 14 performe moins bien. Lorsque la récurrence de 25 ans est considérée, le reprofilage amont aussi performe moins bien que le statu quo. La déconnexion des gouttières qui représentait la meilleure mesure pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 2 ans laisse sa place au bassin de rétention pour la pluie Chicago 3 h de récurrence 25 ans. Certes, les différences entre les hauteurs maximales sont inférieures à 25 cm entre la meilleure mesure et la moins bonne. Aussi, les hauteurs d'eau atteintes par les mesures d'adaptation en climat futur sont toutes plus hautes que le statu quo en climat présent sauf pour le bassin de rétention. La déconnexion des gouttières se montre efficace pour réduire la hauteur d'eau. Enfin, le débit à l'exutoire en climat futur pour les mesures d'adaptation est

systématiquement plus élevé que pour le statu quo en climat présent. Une hausse du débit serait donc à prévoir sur le long terme. Les mesures performant le mieux pour réduire le débit sont celles qui permettent la rétention et la restitution lente de l'eau, donc le bassin de rétention ou le retrait d'un volume d'eau comme la déconnexion des gouttières, ce qui n'est cependant pas le cas pour la redirection vers la Branche 14.

La deuxième préoccupation soulevée étant le débit à l'exutoire, la figure 4.6 présente l'hydrogramme des débits à l'exutoire défini par l'étude pour le statu quo et les sept mesures d'adaptation en climat présent et futur pour une pluie synthétique Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 2 ans. Cette figure est accompagnée du tableau 4.6 où sont inscrits les débits maximums pour chaque mesure en climats présent et futur. Le symbole Q_p représente le débit en climat présent alors que Q_f indique le débit en climat futur.

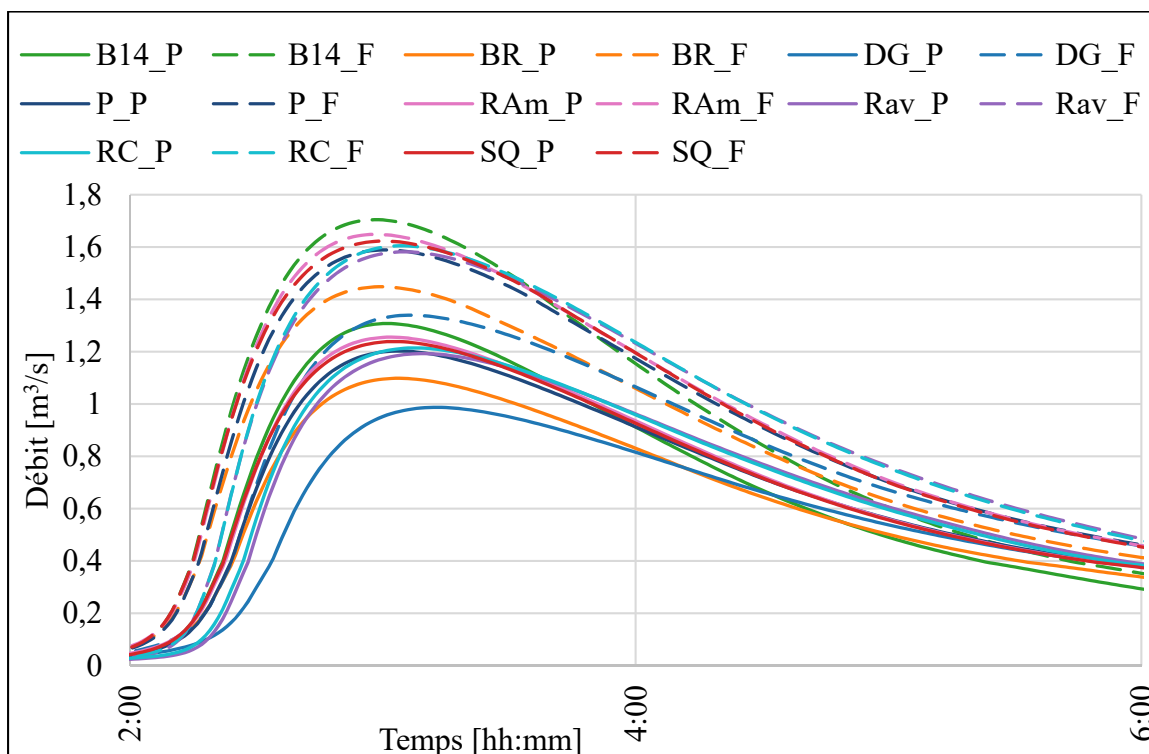


Figure 4.6 Hydrogramme des débits à l'exutoire de la rivière Saint-Régis, pour la portion à l'étude, pour le statu quo et sept mesures d'adaptation en climats présent et futur pour une pluie de type Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 2 ans

Tableau 4.6 Débit maximum pour chaque mesure en climats présent et futur pour la pluie synthétique Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence de 2 ans

	B14	BR	DG	P	RAm	RAv	RC	SQ
Q_P [m ³ /s]	1,31	1,10	0,99	1,20	1,26	1,19	1,21	1,24
Q_F [m ³ /s]	1,70	1,45	1,34	1,59	1,65	1,58	1,60	1,62

Tel qu'illustré à la figure 4.6, les mesures B14 et RAm contribuent à augmenter le débit maximal comparativement au Statu quo autant en climat présent que futur. Au contraire, les mesures RC, P, RAv, BR et DG diminuent le débit maximal. Aucune des mesures testées en climat futur ne permet d'être en deçà du débit maximal simulé en climat présent. Cela signifie qu'avec les mesures actuellement testées, il est possible d'anticiper une hausse du débit maximum en climat futur. Comme les résultats diffèrent selon les pluies synthétiques, la figure 4.7 présente donc les hydrogrammes à l'exutoire en climats présent et futur et le tableau 4.7 présente les débits maximums à l'exutoire pour la pluie de type Chicago de durée 3 h et de récurrence 25 ans.

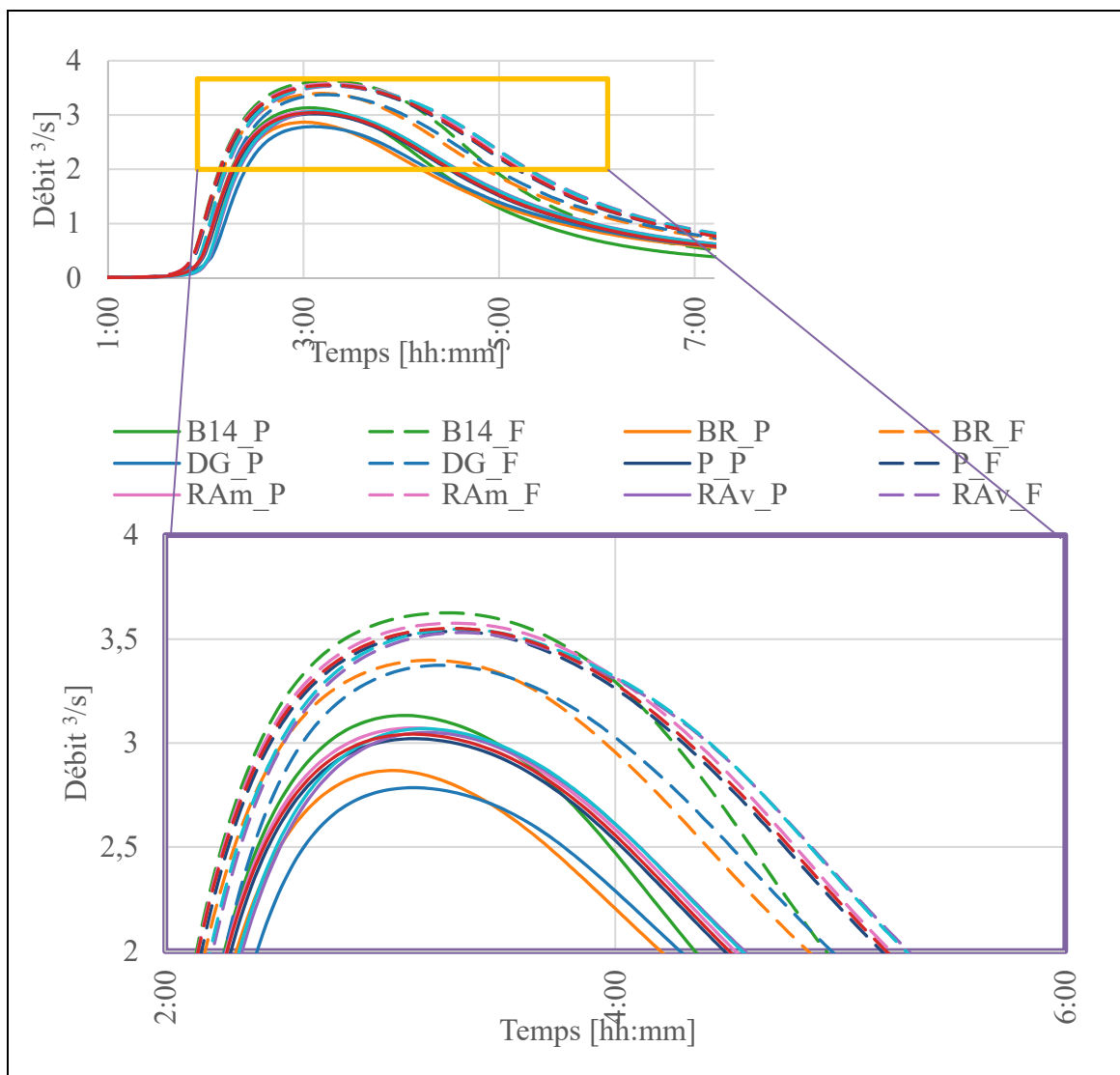


Figure 4.7 Hydrogramme des débits à l'exutoire de la rivière Saint-Régis, pour la portion à l'étude, pour le statu quo et sept mesures d'adaptation en climats présent et futur pour une pluie de type Chicago de durée de 3 h et de récurrence de 25 ans

Tableau 4.7 Débit maximum pour chaque mesure en climats présent et futur pour la pluie synthétique Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence de 25 ans

	B14	BR	DG	P	RAm	RAv	RC	SQ
Q_P [m ³ /s]	3,13	2,87	2,79	3,02	3,07	3,05	3,07	3,04
Q_F [m ³ /s]	3,63	3,40	3,37	3,54	3,58	3,53	3,55	3,55

Pour la pluie synthétique Chicago de récurrence de 25 ans et de durée de 3 h, les mesures DG, BR sont celles qui permettent de réduire le débit maximal autant en climat présent que futur. RAv, RAm, RC et P sont similaires au Statu quo. Enfin, c'est la B14 qui donne le plus grand débit.

Ces résultats indiquent que la situation actuelle considérée comme étant problématique risque de s'aggraver à long terme, et que les mesures individuelles risquent d'être insuffisantes pour assurer une résilience face aux changements climatiques. Par conséquent, une combinaison d'une ou plusieurs mesures potentielles serait l'approche à favoriser.

4.3 Mesure minimale proposée et combinaisons de mesures

Pour les fins de l'étude, il est considéré nécessaire d'abaisser le ponceau Boyer et de reprofiler la Saint-Régis en aval, scénario RAv, pour améliorer les conditions actuelles vis-à-vis les inondations. En effet, la mesure RAv s'agirait d'une intervention minimale pour éviter d'exacerber la réponse du cours d'eau Saint-Régis lors d'événements pluvieux au sein de la portion villageoise. Par contre, cela ne constitue pas une mesure optimale puisque le débit d'eau est augmenté à l'exutoire comme montré aux figures et tableaux précédents. Afin de poursuivre l'exercice de résilience aux inondations, les combinaisons suivantes, incluant chacune la mesure dite minimale (RAv), sont considérées pour la suite de l'étude :

- RAv;
- RAm;
- B14;
- BR;
- DG;
- DG + RAm;

- DG + B14;
- DG + BR;
- DG + RAm + BR;
- DG + RAm + B14;
- DG + B14 + BR;
- DG + RAm + BR + B14;
- BR + RAm;
- BR + B14;
- BR + RAm + B14;
- B14 + RAm.

Pour la suite, la mesure RAm ne considère que le reprofilage en amont du ponceau Boyer sans considérer l'abaissement de ce dernier pour évaluer les différents critères. En effet, le coût d'investissement, par exemple, sera déjà pris en compte par la mesure minimale. Ces combinaisons de mesures sont modélisées à l'aide de PCSWMM et des simulations sont effectuées avec les mêmes pluies synthétiques utilisées précédemment. Les caractéristiques évaluées sont la hauteur d'eau maximale au tronçon 50 m en climat futur et le débit de l'eau maximal à l'exutoire aussi en climat futur. Les figures Figure 4.8 et Figure 4.9 montrent les hauteurs d'eau maximales atteintes pour les mesures et le débit d'eau à l'exutoire. Il s'agit de la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence de 25 ans, car elle engendre les hauteurs d'eau et les débits d'eau les plus importants dans le cas de cette étude.

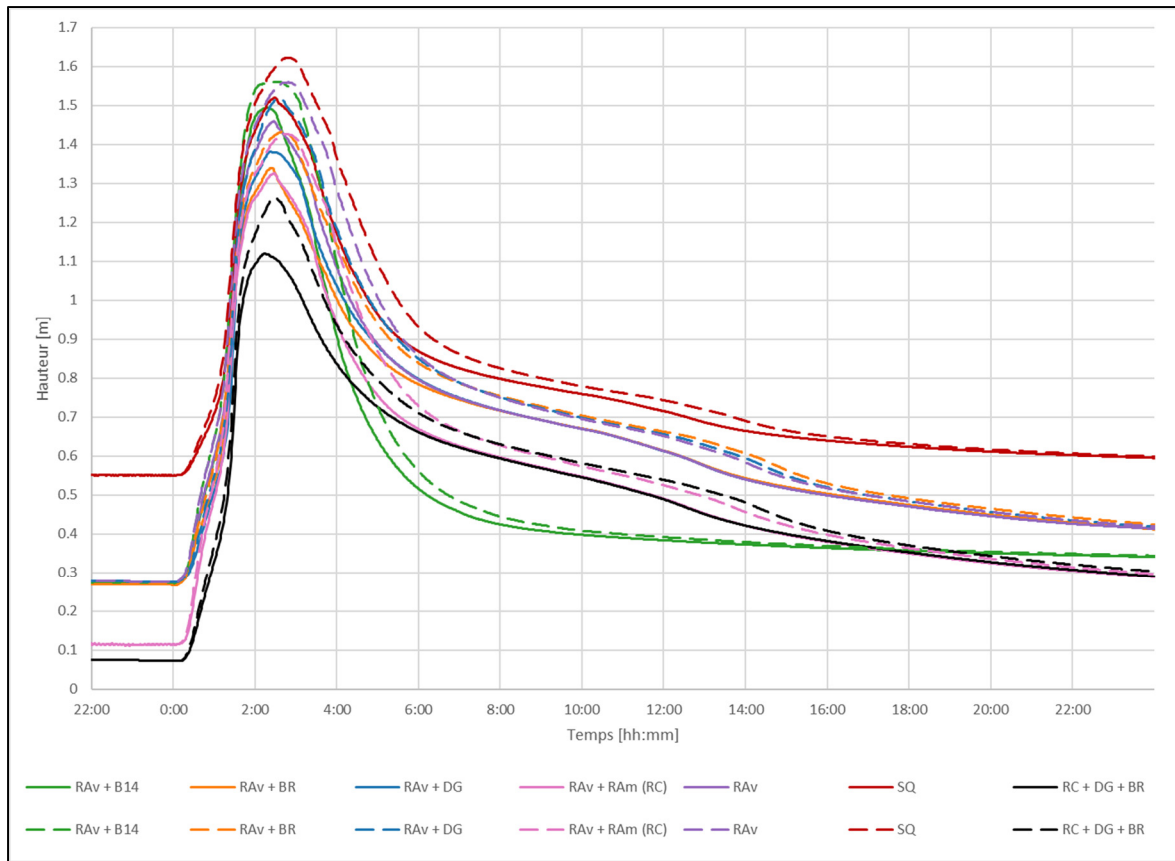


Figure 4.8 Hauteur de l'eau au tronçon C43 (50 m) en climats présent et futur pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo, la mesure minimale, les combinaisons simples et la meilleure combinaison (en noir)

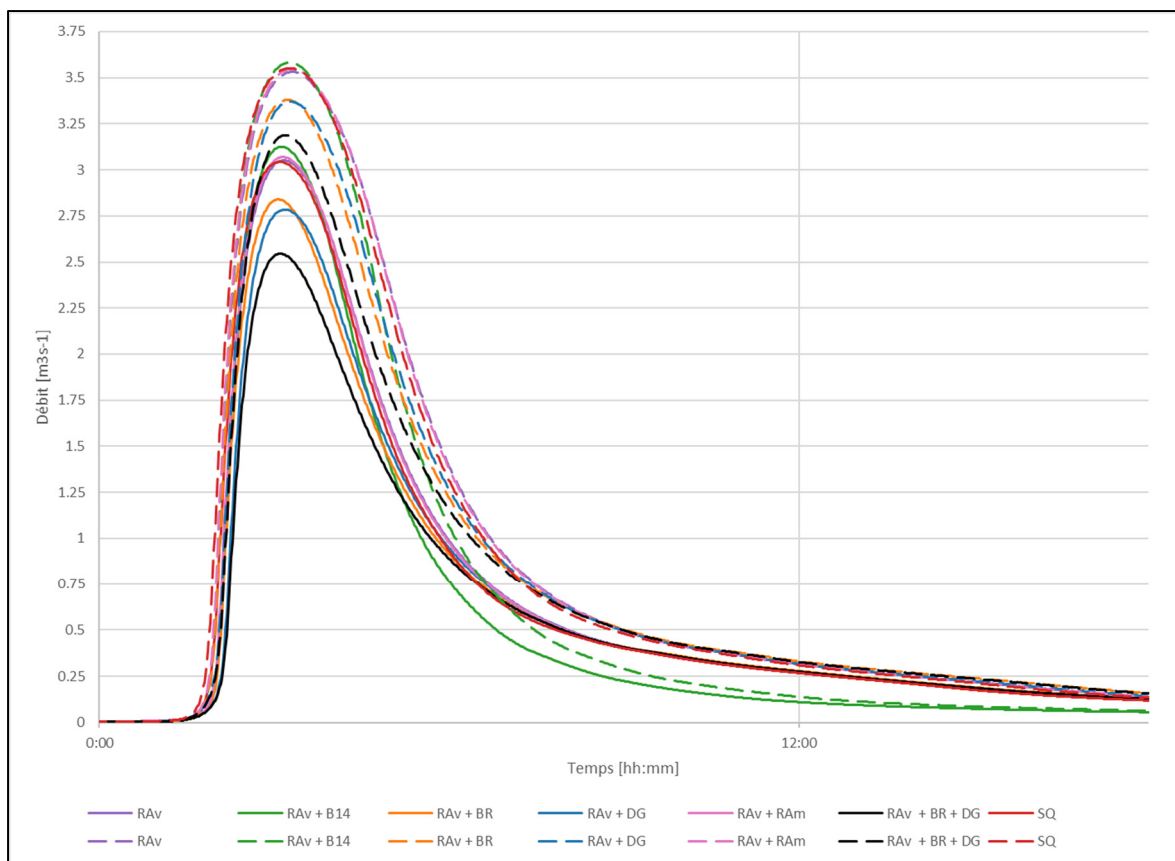


Figure 4.9 Débit à l'exutoire en climats présent et futur pour la pluie Chicago d'une durée de 3 h et de récurrence 25 ans pour le statu quo, la mesure minimale, les combinaisons simples et la meilleure combinaison (en noir)

Ces figures permettent d'illustrer les différentes combinaisons de mesure en comparaison avec le statu quo, la mesure minimale et la meilleure mesure selon ces deux critères de performance. Pour la hauteur d'eau (figure 4.8), la meilleure mesure (reprofilage complet, déconnexion des gouttières et bassin de rétention), le reprofilage complet et le bassin de rétention en climat futur permettent d'améliorer la situation en rapport avec le statu quo en climat présent. Il est donc possible d'être résilient face aux inondations avec ces combinaisons de mesure. Pour le débit (figure 4.9), même la meilleure combinaison de mesure ne parvient pas à maintenir le débit de pointe simulé en climat présent pour le statu quo. D'autres pistes de mesures devront donc être évaluées.

4.4 Hiérarchisation des mesures d'adaptation

Il est question dans cette section d'évaluer quelles pourraient être la ou les mesures additionnelles à ajouter de concert avec la mesure d'adaptation minimale. En effet, le processus d'aide à la prise de décision permet d'orienter un classement en fonction de critères, de préférences accordées à ces critères ainsi qu'aux valeurs accordées à ces critères, et ce, pour chaque combinaison de mesures. Par ailleurs, la démarche permet une réflexion quant aux différentes forces et faiblesses des mesures pour alimenter le dialogue auprès des acteurs de l'étude.

4.4.1 Matrice de décision

La matrice de décision présente les valeurs accordées à chaque critère pour chacun des 15 scénarios de mesures d'adaptation. L'annexe X présente le détail des calculs des performances et les sources d'information utilisées.

L'ensemble des valeurs pour les critères économiques sont en dollars de 2020. Pour les critères maintenances et réfections, les coûts sont calculés pour la durée de vie de l'ouvrage (estimée à 80 ans). Les critères de complexité administrative, techniques (sauf hauteur de l'eau et débit à l'exutoire) et environnementaux sont évalués par jugement d'experts impliqués dans le projet.

Tableau 4.8 Matrice de décision (tableau de performances) pour l'étude

Mesures/ Critères	Unités	RAm	B14	BR	DG	DG + RAm	DG + B14	DG + BR	DG + RAm + BR	DG + RAm + B14	DG + B14 + BR	DG + RAm + BR + B14	BR + RAm	BR + B14	BR + RAm + B14	B14 + RAm
Coût de l'investissement ¹	\$	\$ 45 000	\$ 15 000	\$ 177 00	\$ 3 590	\$ 48 600	\$ 18 600	\$ 181 000	\$ 226 000	\$ 63 600	\$ 196 000	\$ 241 000	\$ 223 000	\$ 193 000	\$ 238 000	\$ 60 000
Coût d'opération et d'entretien ¹	\$/an	\$ -	\$ -	\$ 4 000	\$50	\$50	\$50	\$ 4 000	\$ 4 000	\$50	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ 4 000	\$ -
Coût de réfection ¹	\$/an	\$ 32 000	\$ 2 680	\$ 4 490	\$ -	\$ 12 100	\$ 2 680	\$ 4 480	\$ 16 600	\$ 14 800	\$ 7 200	\$ 19 300	\$ 16 600	\$ 7 160	\$ 19 272	\$ 14 787
Complexité administrative ¹	1 à 12	4	5	3	2	6	7	5	9	11	10	14	7	8	12	9
Facilité de mise en œuvre ²	1 à 11	4	4	2	1	5	5	3	7	9	7	11	6	6	10	8
Facilité à maintenir ²	1 à 8	2	2	4	1	3	3	5	7	5	7	9	6	6	8	4
Facilité à renouveler ²	1 à 8	2	2	4	1	3	3	5	7	5	7	9	6	6	8	4
Mesure éprouvée ²	1 à 8	3	4	1	1	4	5	2	5	8	6	9	4	5	8	7
Hauteur d'eau ²	m	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Débit d'eau à l'exutoire ²	m ³ /s	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Potentiel d'infiltration ³	-4 à 4	1	2	-2	-2	-1	0	-4	-3	1	-2	-1	-1	0	1	3
Potentiel d'érosion ³	-4 à 4	2	2	-2	-2	0	0	-4	-2	2	-2	0	0	0	2	4
Qualité des habitats ³	-4 à 1	1	0	-2	-2	-1	-2	-4	-3	-1	-4	-3	-1	-2	-1	1
Qualité de l'eau ³	-4 à 4	1	2	-2	-2	-1	0	-4	-3	1	-2	-1	-1	0	1	3

¹Socio-économique²Technique³Environnement

*La hauteur d'eau et le débit à l'exutoire sont issus des tableaux 4.4 et 4.5 et tableau 4.6 et tableau 4.7

4.4.2 Résultats de hiérarchisation pour les scénarios de pondération

Les résultats sont présentés d'abord pour les scénarios de base, socio-économique, environnemental et technique puis pour ces mêmes scénarios en excluant les critères socio-économiques pour évaluer la qualité intrinsèque des mesures d'adaptation. Le tableau 4.9 et la figure 4.10 montrent la hiérarchisation des quatre scénarios incluant les critères socio-économiques.

Tableau 4.9 Flux net, entrant et sortant et classement complet PROMETHEE incluant les critères socio-économiques

De Base					Socioéconomique				
Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$	Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$
1	DG	0,5877	0,6707	0,0830	1	DG	0,6408	0,6720	0,0312
2	DG + BR	0,4419	0,6053	0,1633	2	B14	0,3178	0,5044	0,1866
3	BR	0,3233	0,5089	0,1856	3	DG + B14	0,3078	0,4861	0,1784
4	DG + RAm	0,1728	0,4267	0,2539	4	RAm	0,2510	0,4353	0,1843
5	DG + B14	0,1405	0,4375	0,2970	5	DG + RAm	0,2377	0,4187	0,1811
6	DG + RAm + BR	0,0703	0,4188	0,3485	6	BR	0,1998	0,4009	0,2011
7	DG + B14 + BR	0,0359	0,3749	0,3389	7	DG + BR	0,1843	0,4037	0,2194
8	RAm	0,0189	0,3704	0,3515	8	B14 + RAm	-0,1079	0,2639	0,3718
9	B14	-0,0199	0,3879	0,4079	9	DG + RAm + B14	-0,1320	0,2410	0,3729
10	BR + RAm	-0,1170	0,2905	0,4075	10	BR + B14	-0,1693	0,2092	0,3785
11	BR + B14	-0,1426	0,2721	0,4147	11	DG + B14 + BR	-0,1731	0,2143	0,3874
12	DG + RAm + B14	-0,2879	0,2057	0,4937	12	DG + RAm + BR	-0,2436	0,2018	0,4454
13	DG + RAm + BR + B14	-0,2959	0,2356	0,5315	13	BR + RAm	-0,2438	0,1871	0,4309
14	B14 + RAm	-0,3855	0,1943	0,5799	14	DG + RAm + BR + B14	-0,5009	0,0884	0,5893
15	BR + RAm + B14	-0,5423	0,0976	0,6399	15	BR + RAm + B14	-0,5687	0,0477	0,6164
Technique					Environnement				
Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$	Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$
1	DG	0,5893	0,6757	0,0864	1	DG + BR	0,7795	0,8408	0,0612
2	DG + BR	0,3622	0,5714	0,2092	2	DG	0,5329	0,6645	0,1316
3	BR	0,3363	0,5219	0,1856	3	DG + RAm + BR	0,4951	0,6815	0,1865
4	DG + RAm	0,2268	0,4556	0,2288	4	DG + B14 + BR	0,4376	0,6205	0,1829
5	RAm	0,2222	0,4810	0,2589	5	BR	0,4337	0,6037	0,1700
6	B14	0,1094	0,4580	0,3486	6	DG + RAm	0,0536	0,4055	0,3519
7	DG + B14	0,0946	0,4169	0,3223	7	DG + RAm + BR + B14	0,0341	0,4231	0,3890
8	DG + RAm + BR	-0,0403	0,3731	0,4134	8	DG + B14	0,0193	0,4096	0,3903
9	BR + RAm	-0,0522	0,3300	0,3822	9	BR + RAm	-0,0551	0,3544	0,4095
10	DG + B14 + BR	-0,1562	0,2900	0,4462	10	BR + B14	-0,0870	0,3476	0,4345
11	BR + B14	-0,1716	0,2595	0,4311	11	RAm	-0,4171	0,1947	0,6117
12	DG + RAm + B14	-0,2891	0,2098	0,4989	12	DG + RAm + B14	-0,4427	0,1664	0,6092
13	B14 + RAm	-0,2906	0,2460	0,5367	13	B14	-0,4873	0,2013	0,6886
14	DG + RAm + BR + B14	-0,4206	0,1953	0,6160	14	BR + RAm + B14	-0,5382	0,1258	0,6641
15	BR + RAm + B14	-0,5202	0,1190	0,6392	15	B14 + RAm	-0,7584	0,0729	0,8313

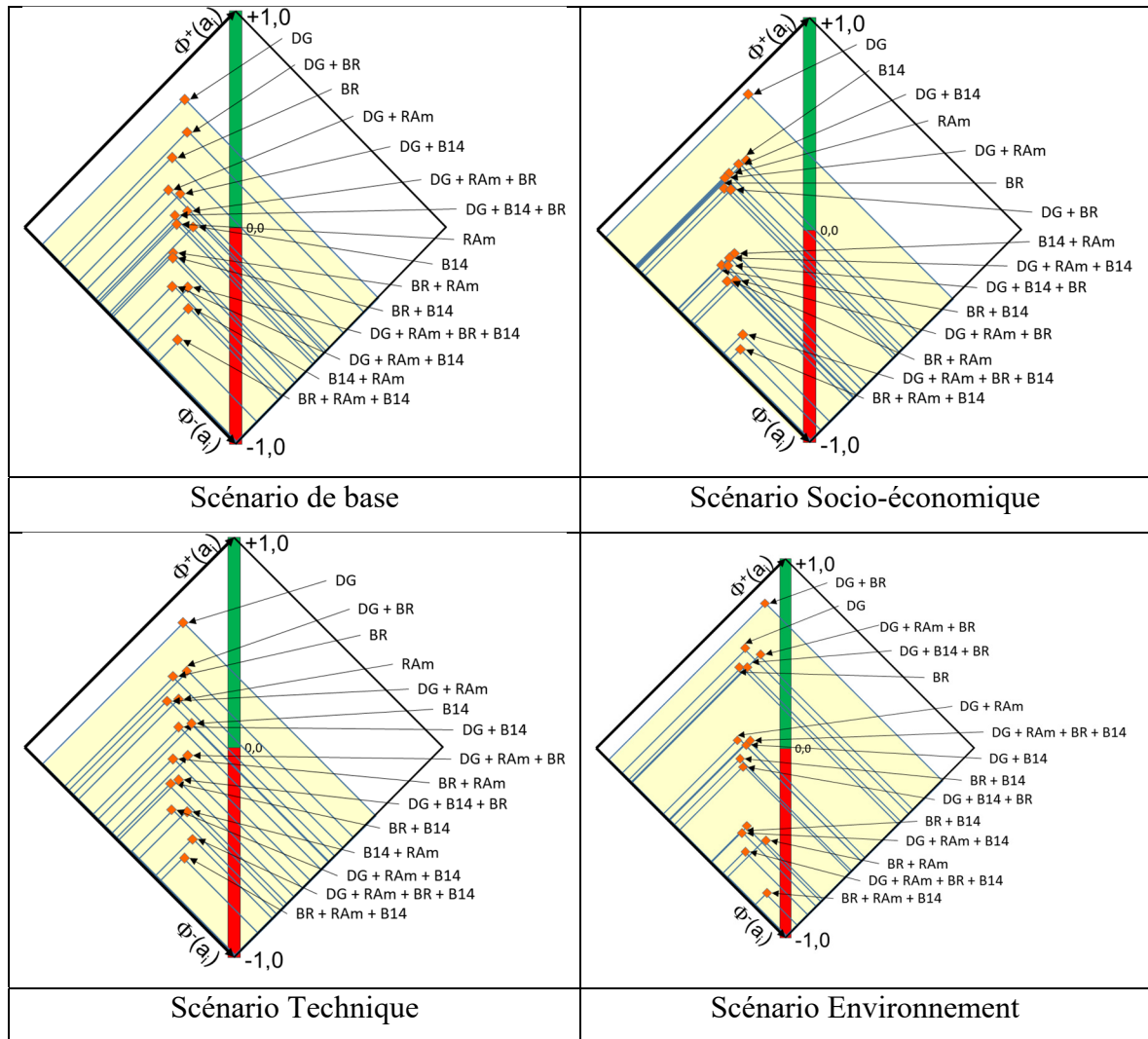


Figure 4.10 Résultat du surclassement sous forme de losange pour quatre scénarios de pondération différents pour la pluie Chicago 3 h et de récurrence 25 ans

Les losanges montrent les relations de surclassement et le tableau, les flux net, entrant et sortant des actions ainsi que le classement complet. Pour tous les scénarios, c'est la déconnexion des gouttières seule qui performe le mieux. Sa combinaison avec le bassin de rétention suit sauf pour le scénario socio-économique où elle se trouve en milieu de peloton. En général, les mesures « seules » se trouvent dans la première moitié des classements sauf pour les mesures reprofilage amont et Branche 14 au sein du scénario environnement, probablement pour leur

faible performance à ces critères. La mesure la moins préférée est la combinaison du bassin de rétention, de la Branche 14 et du reprofilage amont pour tous les scénarios.

Pour le scénario socio-économique, les mesures « seules » se trouvent en peloton de tête avec ces mêmes mesures associées à la déconnexion des gouttières, la mesure la moins couteuse. Pour les deux autres pelotons, il n'y a pas de tendance claire associée aux coûts. Pour le scénario environnement, la tendance observée est que les mesures de déconnexion des gouttières et du bassin de rétention sont les préférées. Les mesures se retrouvant au bas du classement sont celles du reprofilage amont et de la Branche 14 sauf si elles sont associées avec la déconnexion des gouttières et le bassin de rétention ce qui compense leur performance environnementale. Pour continuer l'analyse de sensibilité, il est intéressant de comparer les mesures en omettant les critères socio-économiques afin de vérifier la valeur intrinsèque des mesures.

Tableau 4.10 Flux net, entrant et sortant et classement complet PROMETHEE en excluant les critères socio-économiques

De Base									
Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$					
1	DG + BR	0,6483	0,7667	0,1184					
2	DG	0,5451	0,6697	0,1246					
3	BR	0,4221	0,5953	0,1732					
4	DG + RAm + BR	0,3217	0,5925	0,2708					
5	DG + B14 + BR	0,2036	0,5035	0,2999					
6	DG + RAm	0,1207	0,4329	0,3122					
7	DG + B14	0,0067	0,3987	0,3919					
8	BR + RAm	-0,0156	0,3733	0,3889					
9	BR + B14	-0,1212	0,3224	0,4437					
10	DG + RAm + BR + B14	-0,1316	0,3535	0,4851					
11	RAm	-0,1673	0,3183	0,4856					
12	B14	-0,2905	0,2946	0,5851					
13	DG + RAm + B14	-0,4128	0,1775	0,5903					
14	BR + RAm + B14	-0,5213	0,1374	0,6587					
15	B14 + RAm	-0,6080	0,1385	0,7465					
Technique					Environnement				
Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$	Rang	Action	Φ	$\Phi+$	$\Phi-$
1	DG	0,5677	0,6742	0,1065	1	DG	0,5677	0,6742	0,1065
2	DG + BR	0,4813	0,6589	0,1776	2	DG + BR	0,4813	0,6589	0,1776
3	BR	0,3831	0,5625	0,1794	3	BR	0,3831	0,5625	0,1794
4	DG + RAm	0,1900	0,4530	0,2630	4	DG + RAm	0,1900	0,4530	0,2630
5	DG + RAm + BR	0,1075	0,4691	0,3616	5	DG + RAm + BR	0,1075	0,4691	0,3616
6	RAm	0,0885	0,4329	0,3444	6	RAm	0,0885	0,4329	0,3444
7	DG + B14	0,0369	0,4016	0,3647	7	DG + B14	0,0369	0,4016	0,3647
8	BR + RAm	-0,0145	0,3634	0,3779	8	BR + RAm	-0,0145	0,3634	0,3779
9	DG + B14 + BR	-0,0340	0,3713	0,4053	9	DG + B14 + BR	-0,0340	0,3713	0,4053
10	B14	-0,0517	0,3973	0,4490	10	B14	-0,0517	0,3973	0,4490
11	BR + B14	-0,1551	0,2872	0,4423	11	BR + B14	-0,1551	0,2872	0,4423
12	DG + RAm + BR + B14	-0,3136	0,2623	0,5759	12	DG + RAm + BR + B14	-0,3136	0,2623	0,5759
13	DG + RAm + B14	-0,3513	0,1948	0,5461	13	DG + RAm + B14	-0,3513	0,1948	0,5461
14	B14 + RAm	-0,4208	0,2078	0,6286	14	B14 + RAm	-0,4208	0,2078	0,6286
15	BR + RAm + B14	-0,5141	0,1347	0,6487	15	BR + RAm + B14	-0,5141	0,1347	0,6487

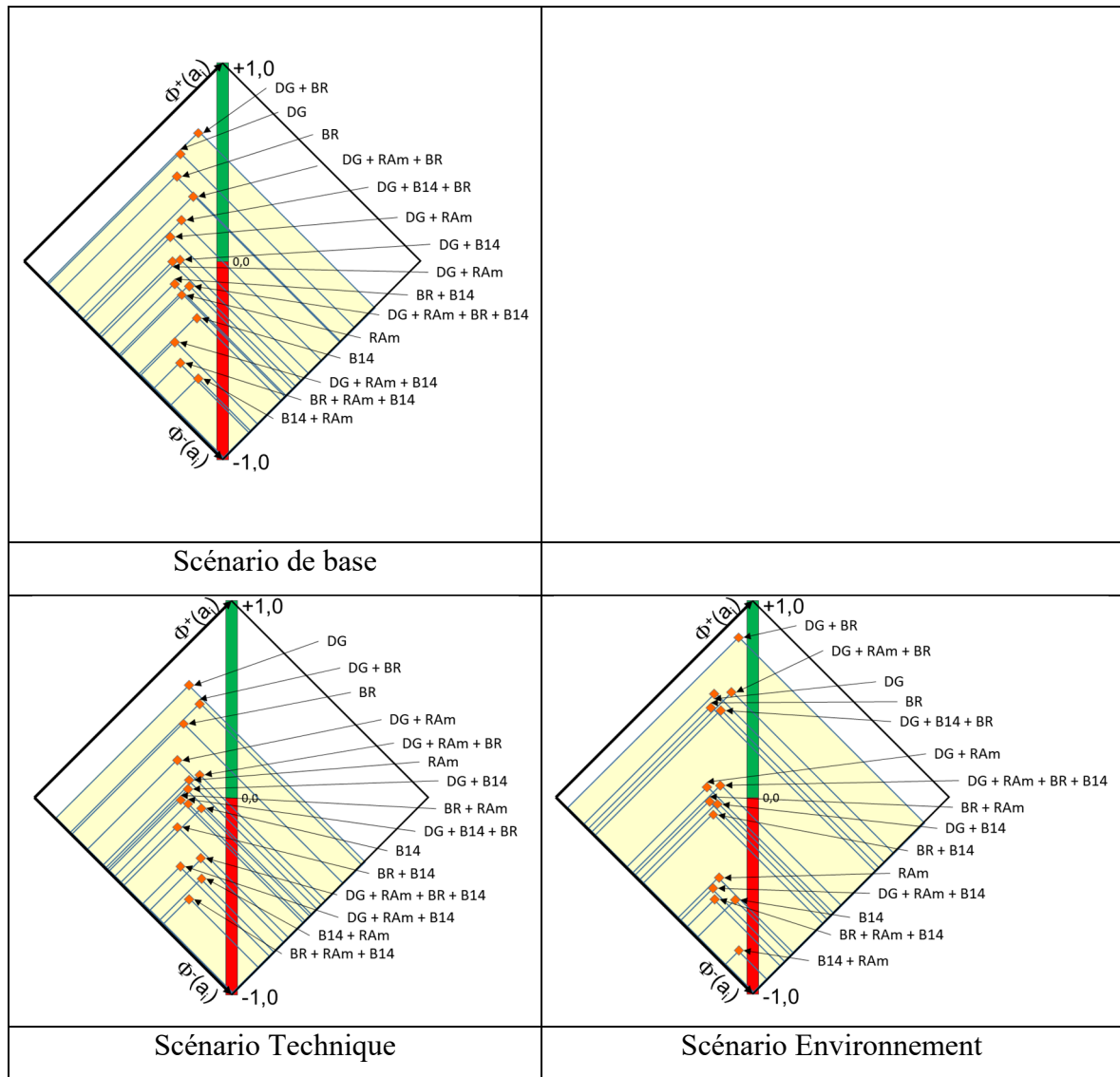


Figure 4.11 Résultat du surclassement sous forme de losange pour trois scénarios de pondération différents (sans socio-économique) pour la pluie Chicago 3 h de récurrence 25 ans

Même en omettant les critères socio-économiques, la déconnexion des gouttières, mesure avantagée par ces critères, performe le mieux pour les trois scénarios. Le bassin de rétention, mesure « seule » la plus couteuse, améliore son classement. Parmi les moins préférées sont la Branche 14 et le reprofilage amont excepté lorsqu'elles sont combinées avec la déconnexion des gouttières et/ou le bassin de rétention.

Finalement, le classement des mesures est sensible aux pondérations accordées pour chacune des familles (regroupement) de critères. Par contre, il est possible d'en déduire que la déconnexion des gouttières est la mesure qui est préférée car elle possède les meilleures performances pour une grande proportion de critères. Aussi, il est possible de remarquer que lorsque les critères socio-économiques sont omis, le bassin de rétention se classe mieux. Les mesures de la Branche 14 et du reprofilage amont, dont le classement est meilleur lorsqu'on considère leurs faibles coûts, perdent des points lorsque leur valeur intrinsèque est mise de l'avant. Cette analyse multicritère permet de révéler les forces et les faiblesses des mesures en regard de leur performance aux critères et de la préférence accordée à ces derniers. Cette analyse permet donc de jeter un regard plus objectif sur les différentes mesures offertes. Elle permet de bonifier les discussions en regard de ce choix en permettant d'améliorer la performance des mesures préférées en regard de critères où elles performant moins bien par exemple. Ultimement, l'outil sert de boussole aux décideurs à l'étape préliminaire d'un projet.

4.4.3 Analyse de sensibilité pour le choix des précipitations synthétiques

La sensibilité est évaluée pour les pluies Chicago, pour le scénario de pondération de base. La figure 4.12 présente les résultats sous forme de diamant.

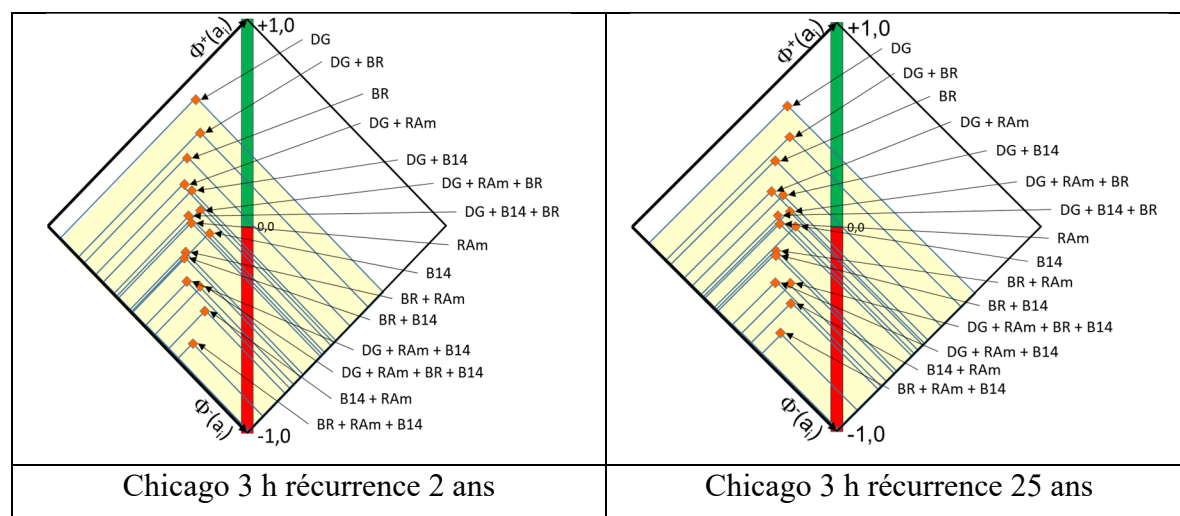


Figure 4.12 Résultat du surclassement sous forme de diamant pour chaque pluie synthétique en climat futur (majoration de 18 %) et une pondération égale pour chacun des critères

L'ordre des mesures demeure le même pour chaque pluie, donc le classement serait indépendant de la pluie choisie. En effet, la pluie influence les critères « hauteur d'eau » et « débit à l'exutoire ». D'après les losanges, le classement n'est pas sensible à ces modifications.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Ce chapitre a pour objectif de discuter de la démarche et des résultats obtenus. Les sujets abordés sont en lien avec la modélisation hydrologique et hydraulique, le choix des mesures d'adaptation et le processus de l'analyse multicritère. Enfin, la dernière sous-section énonce les recommandations.

5.1 Modélisation hydrologique et hydraulique

Pour ce projet, plusieurs incertitudes sont reliées à la modélisation hydrologique et hydraulique, tant en ce qui concerne le modèle lui-même que les données qui sont utilisées pour l'alimenter.

5.1.1 Choix du modèle et résolutions temporelle et spatiale

Plusieurs modèles sont disponibles en modélisation hydrologique et hydraulique. Il est possible de modéliser à très petite résolution spatiale comme c'est le cas dans cette étude ou à une échelle plus globale. La fine échelle a été préconisée avec l'utilisation d'un modèle distribué puisque les différentes solutions (p. ex. le dragage de la rivière, l'ajout d'un bassin de rétention ou même le débranchement des gouttières) devaient être testées et que le niveau d'eau devait être calculable sur plusieurs tronçons au sein du village afin de vérifier l'hypothèse de retenue d'eau permanente dans la section du village. Ces aspects n'auraient pas pu être testés avec un modèle global comme GR4J ou HMETs (J. Martel, Demeester, Brissette, Poulin, & Arsenault, 2017). Par ailleurs, le bassin à l'étude étant de très petite superficie, la résolution temporelle horaire a été retenue pour les simulations. Il y avait donc un gain à modéliser à cette échelle spatio-temporelle fine pour répondre aux objectifs de cette étude, ou d'une étude similaire. Pour d'autres petits bassins versants, la méthode proposée dans cette recherche peut être aussi valable qu'une méthode plus classique avec un modèle global ; tout dépend des objectifs de

l'étude. Il est donc important de bien identifier les besoins et le but de l'étude pour bien identifier la démarche à emprunter et les outils de modélisation appropriés.

5.1.2 Collecte de données limnimétriques

Pour les stations limnimétriques, la période de collecte de donnée d'une durée d'un an est considérée courte. En effet, un an de lecture permet de collecter un échantillon limité d'événements de crue et une seule crue printanière. C'est-à-dire que les conditions concomitantes générant les inondations peuvent ne pas se produire durant l'étude.

De plus, le bris d'un instrument de mesure peut se révéler problématique pour une étude d'une telle durée comme ce fut le cas avec la station #2. Aucune donnée n'a pu être récupérée durant la crue survenue au printemps 2020. Il n'a donc pas pu être possible de tester le modèle PCSWMM pour l'événement lié à la fonte du couvert de neige. La courte période de collecte de données contraint le modèle à ne pouvoir être vérifié que pour la gamme des conditions hydrométéorologiques observées et pour lesquelles les données limnimétriques sont disponibles.

L'utilisation d'un modèle distribué avec une échelle spatiale fine devient d'autant plus pertinente, puisque ce dernier permet de tenir compte d'une plus grande quantité d'information physique, réduisant les efforts de calibrations nécessaires.

5.1.3 Techniques de jaugeage

En lien avec la modélisation hydrologique, la majorité des modèles fournissent un débit à l'exutoire d'un bassin versant ou d'un sous-bassin. Il devient donc essentiel d'avoir accès à une courbe de tarage afin d'établir la relation entre les niveaux d'eau mesurés et les débits, ce qui permet par la suite de travailler avec une série temporelle de débits dits « observés ». Advenant que seulement des mesures de niveaux d'eau soient disponibles pour la calibration, un modèle comme PCSWMM permet d'utiliser cette information avec sa composante hydraulique.

Pour cette étude, ce sont les hauteurs d'eau qui ont été utilisées par manque de données pour construire les courbes de tarage. En effet, peu de jaugeages au fluorimètre ont pu être réalisés et l'usage du vélocimètre requiert deux personnes par mesure de sécurité.

Pour le jaugeage au fluorimètre, il est idéalement utilisé dans un cours d'eau limpide. Dans le cas de Saint-Isidore, les particules en suspension rendaient les lectures du traceur bruitées au point où aucune correction ne pouvait être effectuée sur les données mesurées. Aussi, le courant étant très faible à la station #1, le jaugeage au traceur ne se révélait pas être une méthode optimale vu le temps de parcours entre le point d'injection et le fluorimètre. De plus, pour les jaugeages à la station #1, le traceur se déplaçait parfois vers l'amont de la rivière ou se dispersait dans toutes les directions plutôt que de se déplacer vers l'aval de la rivière suggérant un très faible débit voire une eau stagnante. Ce phénomène a pu être observé au sein même du modèle PCSWMM. Ces lacunes ont tenté d'être comblées en employant le jaugeage au vélocimètre.

Le jaugeage au vélocimètre est une méthode efficace vu les caractéristiques du cours d'eau à l'étude. En effet, l'appareil peut enregistrer de faibles vitesses permettant d'évaluer le débit même à la station #1 de même qu'être utilisé dans une eau où il y a des matières en suspension. Par contre, il requiert deux personnes lorsque les débits sont plus élevés, ce qui rend la tâche plus difficile en temps de distanciation physique obligatoire à cause de la COVID-19. Aussi, le niveau d'eau pouvant atteindre plus d'un mètre de hauteur à la station #2, le jaugeage au vélocimètre, où une personne prend les mesures dans le cours d'eau, se révèle potentiellement dangereux et requiert l'utilisation d'une chaloupe ou d'une méthode alternative.

Comme il est impossible d'être sur le terrain en tout temps, une caméra pourrait être installée près d'une station limnimétrique pour prendre des photos quelques fois par jour par exemple. D'une part, cela pourrait permettre de mieux prévoir les opportunités de jaugeage. D'autre part, les périodes où de la glace se forme dans le cours d'eau, impactant les lectures limnimétriques,

pourraient être différenciées des périodes de crue importante. Cet aspect est à prendre en compte dans la tenue d'une étude hydrologique et hydraulique en période hivernale.

5.1.4 Calibration du modèle

Les paramètres ayant été manipulés pour le calage sont principalement les paramètres de hauteur initiale de la nappe phréatique du module d'écoulement souterrain et la longueur de l'écoulement des sous-bassins. L'outil SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration) de PCSWMM a été utilisé afin de moduler ces deux paramètres. Une calibration manuelle s'en est suivie pour plus de précision.

Bien que la calibration ait permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour la station #2 (située à l'exutoire du bassin versant), aucune manipulation n'a permis d'améliorer la modélisation des hauteurs d'eau à la station #1 (figure 4.1, 4.2, et 4.3). Ceci peut être potentiellement expliqué par la présence du ponceau Boyer et de la diversion historique par la branche 14 qui pourraient influencer les processus de ruissellement et de routage dans cette région en particulier. Bien que cela puisse affecter la capacité du modèle à bien modéliser les niveaux d'eau maximums pouvant être atteints, cela n'empêche pas son utilisation pour comparer différentes mesures d'adaptations. En effet, une mesure permettant de réduire le débit et la hauteur d'eau à la station #1 peut se montrer comme étant une amélioration significative par rapport au statu quo. L'utilisation de la station #2 permet aussi de contourner cette difficulté en évaluant la performance des mesures d'adaptation de façon plus détaillée à l'exutoire du bassin versant à l'étude.

5.1.5 Données du terrain inconnues pouvant avoir une influence sur l'hydrologie

Plusieurs données pouvant influencer l'écoulement de l'eau sur le territoire étaient inconnues lors de la réalisation du projet. Le réseau d'égout pluvial de la rue Boyer en est un. En effet, ce dernier est inconnu et a été estimé tel qu'expliqué à la section 3.2.8. Une mauvaise caractérisation du réseau peut avoir un impact sur l'estimation du stockage de l'eau disponible dans les conduites, le refoulement d'eau dans la rue et chez les résidents.

Un deuxième aspect pouvant avoir un impact sur l'hydrologie du territoire est la délimitation du bassin versant en amont du début « officiel » de la rivière Saint-Régis. En effet, le commencement de la rivière s'effectue à partir d'un tuyau en béton armé dont la superficie s'y drainant n'est pas connue. Aucun plan n'a pu être retrouvé expliquant l'origine de ce tuyau. L'aspect qui préoccupe est l'écoulement souterrain potentiellement effectué par drains agricoles. La figure 5.1 montre la superficie drainée en surface selon le tracé d'écoulement de la plateforme Info-Sol (Info-Sols, 2019).

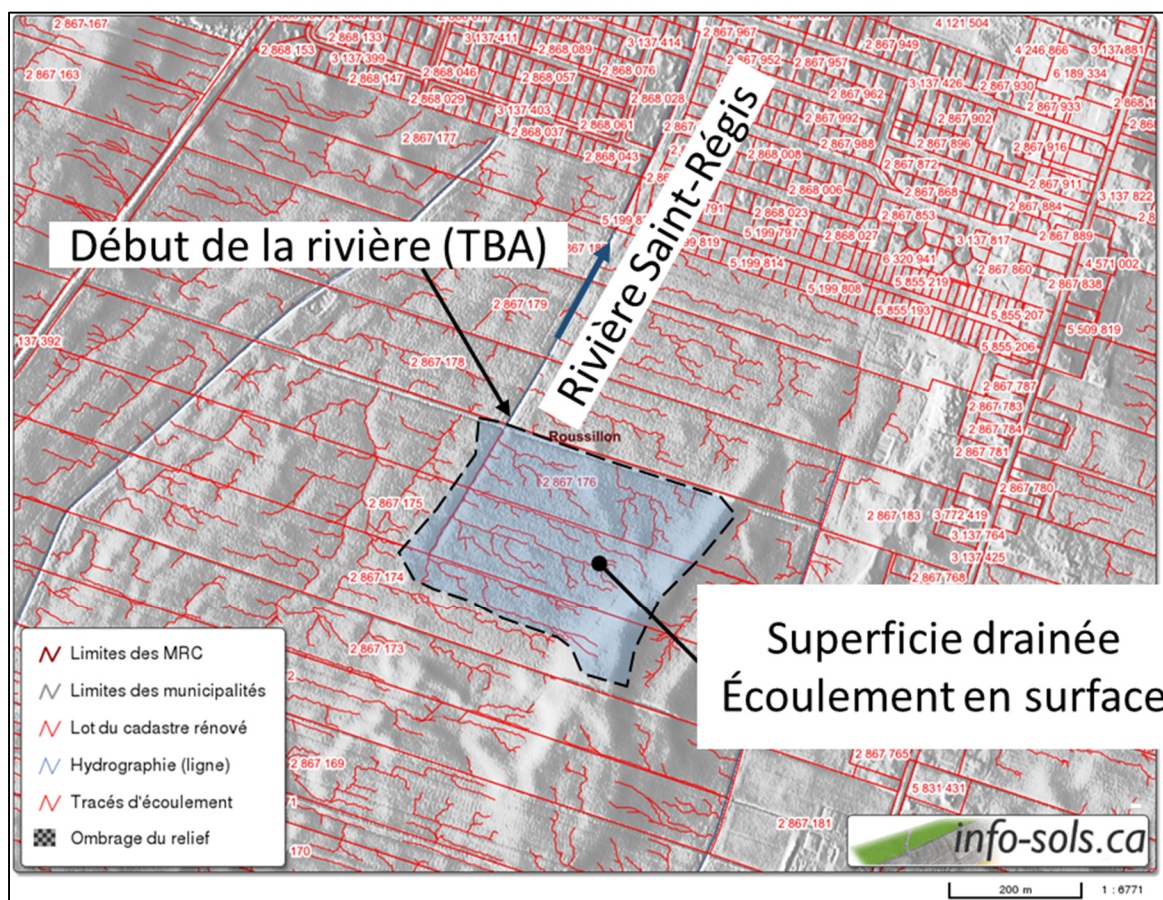


Figure 5.1 Écoulement en surface en amont du début de la rivière Saint-Régis
Tiré de Info-Sols (2019)

Le polygone tracé montre la superficie, $0,1 \text{ km}^2$, qui achemine l'eau en surface vers la rivière Saint-Régis. Par contre, il n'est pas possible de connaître la superficie contribuant au drainage souterrain par manque d'information. Il y a donc une incertitude sur le tracé du bassin versant

dans sa partie amont. Ce fut aussi la partie la plus difficile à modéliser avec PCSWMM tel qu'en témoigne les résultats pour la station #1.

Pour découvrir la configuration de cette conduite et par extension la surface drainée, la terre agricole pourrait être minutieusement excavée par endroits à l'aide d'une pelle mécanique avec l'accord du propriétaire. Une autre avenue possible et non destructrice serait d'introduire une caméra sur chenilles dans la conduite pour y voir à l'intérieur (Murray, 2021).

5.2 Changements climatiques

Les changements climatiques demeurent une préoccupation et la façon de les intégrer à une étude hydrologique est sujette à différentes approches telles que mentionnées à travers la revue de la littérature.

5.2.1 Pourcentage unique

Une façon de prendre en compte les changements climatiques par le biais d'un pourcentage unique insinue que peu importe la période de retour ou la durée d'un événement pluvieux, l'augmentation de l'intensité sera du même ordre de grandeur. Comme c'est le cas pour cette étude, le pourcentage utilisé est de 18 % tel que recommandé par le MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017). Ce choix a été fait afin de se rapprocher davantage de ce qui se fait actuellement dans la pratique et de fournir des résultats qui seront plus pertinents pour la Ville de Saint-Isidore.

5.2.2 Pourcentages variables

L'utilisation d'un pourcentage unique comme celui du MELCC peut se trouver à sous-estimer l'augmentation réelle projetée. En effet, plusieurs études projettent une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes qui seront plus importantes pour les événements de courtes durées (p. ex. 1 h vs 24 h) et pour les événements plus rares (p. ex. 100 ans vs 2 ans) (Cannon & Innocenti, 2019; J.-L. Martel et al., 2020; Westra et al., 2014).

ClimEx est un grand ensemble climatique de 50 membres issus du modèle régional canadien du climat (version 5) MRCC5 d'une résolution spatiale de 11 km pour le scénario d'émission RCP 8.5 piloté à ses frontières par le modèle global CanESM2. Avec l'analyse fréquentielle sur les extrêmes des précipitations, pour la station située à Saint-Isidore, il est possible d'estimer quels pourraient être les changements observés pour l'intensité des pluies en fonction de leur durée et de leur période de retour. Avec les 50 membres et 20 années simulées (2080 à 2099), ce sont 1000 années de données utilisées pour l'analyse fréquentielle.

Le tableau 5.1 montre les perturbations entre le climat futur et le climat actuel extraites pour l'emplacement géographique de Saint-Isidore suivant la méthodologie proposée par J.-L. Martel et al. (2020) avec l'ensemble ClimEx.

Tableau 5.1 Majoration (%) entre le climat actuel (1980-1999) et le climat futur (2080-2099) du modèle ClimEx pour les précipitations du bassin versant à l'étude pour différentes durées de précipitations et différentes périodes de retour

Durée (h)	2-ans (%)	20-ans (%)	100-ans (%)
1	41,1	42,6	42,8
2	36,3	40,9	39,1
3	34,0	41,6	36,0
6	28,8	34,1	36,5
12	25,5	28,7	26,4
24	23,5	24,2	23,1
72	18,9	22,0	30,1
120	18,5	22,0	31,4

Le tableau 5.1 montre que les pourcentages relatifs sont plus importants pour des durées plus courtes et des périodes de retour plus rares tel que souligné dans la littérature (Cannon &

Innocenti, 2019; J.-L. Martel et al., 2020; Westra et al., 2014). Il est donc probable qu'un pourcentage unique comme le 18 % suggéré par le MELCC puisse sous-estimer l'augmentation des événements rares et/ou de courte durée. Cependant, considérant que ces résultats proviennent d'un seul modèle climatique, il en demeure des incertitudes importantes qui ne peuvent pas être évaluées, telles que la structure du modèle climatique et le scénario d'émission de gaz à effet de serre. Ces résultats doivent donc être vus comme étant une réalisation probable du futur, mais à utiliser avec précaution dans un contexte de conception.

5.3 Choix des mesures d'adaptation

Pour la présente étude, des mesures de nature technique et à grande échelle spatiale ont été utilisées. Ces mesures s'intègrent bien à l'aménagement actuel du territoire et permettent de répondre à la problématique de refoulement en amont du ponceau Boyer et de tenir compte de l'impact projeté des changements climatiques sur l'augmentation du débit et de la hauteur d'eau sur le long terme.

Le choix des mesures minimales s'est fait dans un premier temps en fonction de leur capacité à empêcher la rétention en amont du ponceau Boyer. Pour ce faire, il fallait minimalement abaisser le ponceau, reprofiler ses abords et reprofiler les crêtes en aval du ponceau Boyer. Par le passé, une pompe avait été installée pour pomper l'eau juste en amont du ponceau pour la rejeter en aval du ponceau. Cependant, l'eau revenait vers l'amont ce qui rendait la pratique complètement inutile. Avec le relevé d'arpentage fait durant l'étude, il est observé que des dépôts importants de sédiments seraient présents dans le cours d'eau en aval du ponceau. C'est pourquoi le reprofilage est nécessaire au moins en aval du ponceau Boyer. Pour simplifier les opérations reliées à un écrêtage sélectif, il a été proposé de reprofiler minimalement le cours d'eau au complet en aval du ponceau Boyer. Tel qu'illustré à la figure 4.4, le reprofilage et l'abaissement du ponceau Boyer sont essentiels pour éviter l'accumulation d'eau dans le village. C'est à partir de cette mesure que les autres mesures d'adaptation potentielles sont analysées de façon individuelle et combinée.

Évidemment, d'autres mesures d'adaptation dites résilientes sont aussi disponibles et utilisées au sein du territoire québécois. Connues sous la grande famille des pratiques de gestion optimales (PGO), elles se déclinent à plusieurs échelles spatiales. Contrairement aux mesures de l'étude, ces mesures peuvent aussi s'implanter à plus petite échelle pour privilégier le contrôle à la source du ruissellement. Cet aspect se révèle tout particulièrement adapté pour améliorer la performance de la déconnexion des gouttières du réseau pluvial à la ville de Saint-Isidore. En effet, l'eau de ruissellement peut être redirigée dans les plates-bandes des citoyens, dans des barils de pluie, dans des tranchées drainantes, dans des jardins de pluie, par exemple. Les possibilités sont multiples pour le secteur résidentiel (Ministère du Développement durable de l'Environnement & Ministère des Affaires municipales des Régions et de l'Occupation du territoire, 2011).

Pour le cas des terres agricoles, l'approche est différente. Celles-ci génèrent du ruissellement, mais elles engendrent aussi un flux d'eau provenant des drains agricoles. Certains drains fonctionnent par gravité et d'autres avec des pompes. Pour ceux fonctionnant à l'aide de la gravité, l'eau ruisselle naturellement vers le milieu récepteur. Pour ceux fonctionnant à l'aide de pompes, une piste de mesure pour éviter une crue trop importante dans les villes en aval serait peut-être de désactiver les pompes pour une durée de 24 à 48 heures lors d'une pluie importante. Cette mesure devra être testée pour en évaluer son efficacité à réduire la pointe de la crue. Il sera aussi important de vérifier son acceptabilité au sein des agriculteurs et des agricultrices de même que son opérationnalisation.

5.4 Outil d'aide à la décision

Dans une approche de bonne gouvernance, le processus d'aide à la décision repose en partie sur la participation des acteurs du territoire afin de s'assurer que les mesures mises de l'avant répondent aux attentes. Cependant, en raison des restrictions sanitaires en lien avec la COVID 19, il n'a pas été possible de le tester ce qui apporte un lot supplémentaire d'incertitude relié à l'applicabilité des résultats obtenus.

5.4.1 Choix des critères

Le choix des critères a été effectué en fonction des critères issus de la revue de littérature et de propositions faites par l'équipe de recherche. Initialement, il était prévu, lors d'un atelier participatif avec les décideurs et les différentes parties prenantes de la Ville, d'identifier les critères d'intérêt et de leur importance relative (pondération). Ce faisant, ils reflèteraient plus spécifiquement les préoccupations reliées à la problématique d'inondation pour les décideurs actuels. Certains critères auraient donc pu être rejetés et d'autres ajoutés, pouvant ainsi modifier le classement des mesures d'adaptation. À cet effet, des scénarios de pondération ont été introduit afin de représenter des profils différents de préférences chez les décideurs dans le but d'analyser la sensibilité associée aux choix des mesures d'adaptation en relation avec les critères.

5.4.2 Scénarios de pondération des critères

La collecte des préférences des acteurs du territoire quant aux poids des familles aurait permis d'évaluer la sensibilité du classement des mesures d'adaptation par rapport à la couverture du pourcentage de préférence pour ces familles. Pour l'étude, les pondérations ont été accordées pour vérifier la robustesse du classement. En accordant 75 % des points à une famille de critère et le 25 % restant aux autres familles (en alternant les pondérations pour reproduire tous les scénarios de pondération possibles), il est possible de vérifier la sensibilité du modèle aux familles de critères. Tel que montré à la section 4.4.2, les graphiques en diamant suggèrent que le classement des mesures d'adaptation varie en fonction de la famille de critères préférée.

Tout compte fait, plusieurs sources d'incertitudes sont constatées quant à l'impact potentiel de la vision des acteurs au sein du processus d'aide à la décision. De plus, ces mêmes acteurs sont susceptibles de changer au fil du temps suggérant une vision différente à court ou moyen termes. Aussi, il n'est pas connu si les changements climatiques auront une influence sur les perceptions de l'importance accordée aux critères, de même que le choix de ces derniers pour les acteurs municipaux. Il reste pertinent d'inclure dans le processus les acteurs du bassin versant puisque ce sont eux qui sont porteurs de projets et qui représentent les intérêts du

territoire. Une prise de contact à intervalles réguliers pourrait permettre de suivre l'évolution des préférences des acteurs en lien avec leurs préoccupations et les besoins de la communauté. Aussi, la nécessité d'introduire de nouvelles mesures d'adaptation ou de combinaison de ces mesures pourrait s'inscrire dans ce processus évolutif.

5.4.3 Attribution de valeurs aux critères

Pour ce qui est des valeurs accordées aux critères, elles sont basées sur de multiples sources : littérature, travaux passés et jugement d'experts. Lors de l'établissement des valeurs, il s'agit de faire une photographie de l'instant présent auquel les valeurs sont identifiées. Il est possible que pour une raison ou une autre, ces valeurs varient dans le temps, et ce, de façon non proportionnelle entre les différentes mesures proposées. Par exemple, les coûts associés à une mesure d'adaptation ne sont pas constants dans le temps, et l'acceptabilité sociale d'une autre mesure pourrait aussi changer. Il doit donc y avoir un suivi et une évaluation des mesures mise en place pour s'assurer que les projections étaient adéquates auquel cas il ne serait pas nécessaire d'apporter des correctifs.

5.4.4 Continuité de la démarche en adaptation

La méthode PROMETHEE permet le classement des mesures en fonction des préférences et des valeurs, il serait pertinent de poursuivre la réflexion dans un objectif d'amélioration continue. En effet, il serait possible de discuter plus objectivement des impacts de l'implantation d'une mesure vis-à-vis d'une autre en regard des critères et ainsi proposer des améliorations possibles afin de rendre une mesure préférable par exemple. Il s'agit d'un volet supplémentaire, une sorte de rétroaction, par rapport aux résultats obtenus avec l'outil d'aide à la décision. Dans tous les cas, il faut rappeler que les résultats obtenus servent d'étude préliminaire permettant de cibler les mesures potentielles à investiguer plus en détails dans une phase ultérieure. Il est aussi probable que lors d'une évaluation plus approfondie d'une mesure particulière, que de nouvelles informations la rendent plus ou moins attrayante.

5.5 Recommandations

5.5.1 Prévission des changements climatiques

Il est difficile de prédire précisément les effets des changements climatiques sur les événements pluvieux importants à cause des différentes sources d'incertitudes. En effet, la comparaison entre le facteur de majoration de 18 % recommandé par le MELCC et l'analyse des différents pourcentages extraits d'une analyse fréquentielle depuis un modèle climatique (voir tableau 5.1) démontre bien cette difficulté. Nous devons nous questionner sur la variabilité du pourcentage en fonction de 1) la durée de la pluie et 2) sa période de retour. Il serait intéressant d'effectuer une analyse fréquentielle avec d'autres grands ensembles de modèles climatiques et d'autres scénarios d'émissions de gaz à effet de serre afin d'obtenir une meilleure estimation des différentes sources d'incertitudes afin de se comparer au pourcentage établi dans le Manuel de calculs et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales ("Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux de pluviales," 2017). En effet, lorsque le 18 % est utilisé, les mesures sont résilientes en climat futur par rapport au climat actuel. Cela ne serait probablement pas le cas lorsque les pourcentages issus de ClimEx sont utilisés. Une approche multi modèles pourrait permettre d'identifier l'amplitude de l'incertitude associée au changement de l'intensité et/ou de la fréquence des précipitations.

5.5.2 Atelier participatif et implication des parties prenantes

En lien avec le deuxième volet proposé en méthodologie, aide à la décision, il apparaît impératif d'impliquer les acteurs du territoire. Ces derniers sont les plus compétents pour identifier les critères pertinents à l'étude, mais aussi pour juger de l'importance de ces critères. Un atelier participatif où un dialogue s'ouvre entre acteurs et les autres parties impliquées semblent le moyen le plus approprié pour que l'outil d'aide à la décision réponde aux attentes des acteurs. Il est fortement recommandé de tenir un atelier participatif à l'issue de ce mémoire.

5.5.3 Recommandations sur la méthodologie développée pour un autre projet similaire

La méthodologie développée sert d'étude préliminaire à l'évaluation de mesures d'adaptation face aux inondations en tenant compte de préférences incluses dans une analyse multicritère. Elle est appliquée à un petit bassin versant. Le besoin en information pour conduire ce type d'étude peut vite se révéler considérable si aucune donnée n'est disponible pour le territoire. En effet, les données suivantes sont requises :

- données météorologiques à un pas de temps approprié :
 - précipitations;
 - températures (Pour étude à la fonte de la neige par exemple);
 - données météorologiques en climat futur;
- données géomatiques :
 - topographie du territoire pour délimiter le bassin versant;
 - sections transversales du cours d'eau à l'étude;
 - emplacement des regards pluviaux, des puisards et autres infrastructures pluviales (ex : PGO, configuration du réseau pluvial...);
 - pédologie;
 - occupation du sol;
- données hydrométriques :
 - hauteur d'eau à une section du cours d'eau à un pas de temps approprié;
 - jaugeage pour obtenir une courbe de tarage;
- identification et caractérisation des mesures d'adaptation pertinente à analyser;
- sélection de critères pertinents pour l'analyse des mesures d'adaptation;
- établissement des valeurs des critères pour chaque mesure d'adaptation;
- préférences des acteurs en regard des critères.

Nonobstant ces données, il faut aussi compter sur les connaissances des modèles hydrologiques et hydrauliques nécessaires à l'étude et la modélisation des processus sous-jacents

(évapotranspiration, fonte de la neige...) et la capacité à effectuer l'étude (équipement disponible, ressources humaines, formation adéquate, temps).

5.5.4 Recommandations proposées pour Saint-Isidore

À partir de cette étude préliminaire, il est recommandé d'évaluer la possibilité d'abaisser le ponceau Boyer et de reprofiler l'aval de la rivière Saint-Régis afin d'enrayer la problématique du haut niveau d'eau constant dans la portion villageoise de Saint-Isidore. Ensuite, l'analyse multicritère pointe vers la déconnexion des gouttières comme étant une mesure d'adaptation satisfaisant aux aspects socio-économiques, techniques et environnementaux. Pour compléter cette mesure, l'inclusion d'un bassin de rétention ou du reprofilage amont seraient de bonnes mesures d'adaptation. À partir de ces conclusions, il est recommandé de poursuivre cette étude afin d'évaluer ces mesures en phase de conception.

CONCLUSION

En somme, cette recherche a permis d'établir les principales étapes afin d'en arriver à la proposition d'une méthodologie se rapprochant d'une approche systémique. Tout d'abord, l'identification des enjeux et des préoccupations par les acteurs du territoire relié aux inondations permet, d'une part, d'orienter la collecte de données en relation avec les objectifs de l'étude et l'étendue du territoire à couvrir et, d'autre part, d'orienter le choix des pistes de mesures en adaptation. La collecte de données permet de décrire le territoire à l'étude et de modéliser les processus hydrologique et l'hydraulique avec un logiciel comme PCSWMM. Aussi, elle permet d'identifier quelles pourraient être des mesures de mitigation adaptées au territoire identifié. Il s'agit de l'étape principale permettant ensuite de simuler différentes mesures de mitigation des inondations et d'alimenter une analyse multicritère pour orienter la réflexion sur le choix d'une (de) mesure(s) appropriée(s) au territoire.

L'étude s'est effectuée à Saint-Isidore, en Montérégie, et comprend l'analyse de mesures d'adaptation aux inondations pour un bassin versant de 2 km² dont l'effluent est la rivière Saint-Régis. Les mesures ont été testées dans un modèle hydrologique et hydraulique (PCSWMM) en climat futur, en considérant un facteur de 18 % tel que recommandé par le MELCC. Ceci a permis d'évaluer la capacité des différentes mesures à atténuer les effets des inondations en diminuant le niveau de l'eau en amont du ponceau Boyer tout en réduisant le débit à l'exutoire. Ce faisant, il a été possible d'explorer quantitativement la résilience des mesures en fonction de ces deux paramètres. Il s'avère que le reprofilage de la rivière est nécessaire puisque l'accumulation de sédiments à plusieurs endroits en aval ainsi qu'une surélévation problématique du ponceau Boyer causent une retenue permanente d'eau en amont. Lors de la comparaison de toutes les mesures seules, le reprofilage aval s'avérerait être un scénario de base à considérer pour remédier à cette problématique. Comme aucune mesure ne permet d'atteindre la résilience souhaitée, les mesures additionnelles permettant de réduire les inondations ont été soumises à une analyse multicritère PROMETHEE. Dans le cadre de cette dernière, les critères socio-économiques, environnementaux et techniques ont été sélectionnés parmi ceux fournis par la littérature et d'après les enjeux identifiés par les acteurs concernés

du projet. Ainsi, les mesures restantes sont évaluées entre elles. Les classements des mesures en fonction des scénarios de pondération synthétiques ont permis de constater que le classement est robuste et peu sensible aux changements de pondération.

Devant une situation de restrictions sanitaires, l'atelier en présentiel n'a pu être tenu. Ce faisant, les critères n'ont pu être soumis pour discussion ni pondérés en fonction des préférences des acteurs. Pour remédier à cette impossibilité, des scénarios de préférences pour les familles de pondérations ont permis de tester la sensibilité du classement des mesures d'adaptation.

Qui plus est, cette recherche montre l'importance d'une approche où la recherche scientifique s'arrime à la réalité des acteurs locaux.

ANNEXE I

DONNÉES À RECUEILLIR POUR LE MODÈLE PCSWMM ET LEURS SOURCES

Tableau-A I-1 Données à recueillir pour le modèle PCSWMM

Nom de la donnée	Description	Utilité	Où trouver les données
Modèle numérique de terrain (MNT)	Représente la topographie du terrain	• Délimitation du bassin versant et des sous-bassins • Tracer les canaux d'écoulement permanent et intermittent	• MRC de Roussillon • Forêt ouverte du MFFP
Occupation du sol	Zonage des différentes occupations anthropiques du sol	• Attribuer un pourcentage d'imperméabilité au sol • Établir un coefficient de rugosité au sol • Établir la capacité de stockage du sol en eau dans les dépressions	• Plan d'urbanisme de Saint-Isidore • Photos aériennes
Pédologie	Constitution du sol d'un point de vue morphologique, physique et chimique (IRDA)	• Modéliser la fonction d'infiltration de l'eau dans le sol	• Études pédologiques de l'IRDA
Réseau de drainage majeur	Réseau des rues du territoire à l'étude	• Modéliser le ruissellement de surface dans les rues	• Photos aériennes
Réseau de drainage mineur	Réseau d'égout pluvial	• Modéliser le ruissellement dans les conduites d'égout pluviales	• Plans « tel que construit » (TQC) à la municipalité de Saint-Isidore

Réseau de drainage agricole	Réseau de conduites enfouies dans les terres agricoles permettant l'égouttement du sol	• Modéliser l'écoulement de l'eau souterraine pour les parcelles agricoles	• Plans sur info-sol pour les projets subventionnés par le MAPAQ
Données météorologiques	Température et précipitation	• Intrant à la modélisation hydrologique	Climat présent • ERA5-Land • Station ECCC Sainte-Clotilde • Station météo Bec Sucre Climat futur • ClimEx
Hauteur de l'eau	Mesure de la hauteur de l'eau de la rivière	• Calibrer et valider le modèle PCSWMM • Obtenir des débits à l'aide de la courbe de tarage	• Capteur limnimétrique • Capteur barométrique
Jaugeage du débit	Technique servant à obtenir un débit d'eau	• Calibrer et valider le modèle PCSWMM	• Fluorimètre • Vélocimètre
Courbe de tarage	Fonction mathématique qui associe un débit à une hauteur d'eau donnée	• Avoir une relation entre la hauteur de l'eau dans la rivière et son débit	• Hauteur d'eau • Jaugeage

ANNEXE II

LEVÉE DE TERRAIN

En ajout à la levée de terrain, la profondeur des regards pluviaux est mesurée à l'aide d'une règle d'arpentage. Le GNSS, système de positionnement par satellites, se fit sur plusieurs satellites pour connaître sa position dans l'espace terrestre (longitude, latitude et altitude). Le repère géodésique 98KSW63 (inspecté en 2010) est utilisé pour vérifier la qualité des mesures prises par l'appareil. La précision planimétrique de l'appareil est de +/- 5 cm et la précision altimétrique de +/- 15 cm en condition optimale. La planimétrie des points est disponible à la Figure-A II-1.

Les regards pluviaux de la rue Boyer et du rang Saint-Régis n'ont pas été pris au GNSS pour des questions de sécurité. Puisqu'aucun plans TQC n'est disponible pour la rue Boyer, le positionnement des regards et des puisards et leur élévation ont été pris via les orthophotos et par le modèle numérique de terrain respectivement. La profondeur des radiers et le diamètre des conduites ont été déduits par les règles qui régissent la conception d'un réseau pluvial. Pour le rang 209, des plans « émis pour construction » ont été utilisés pour en extraire l'information.



Figure-A II-1 Points du relevé d'arpentage (stations limnimétriques, station météorologique Bec Sucre, dessus des regards pluviaux, radiers des ponceaux, sections transversales de la rivière)

Pour l'arpentage de la rivière, les différentes sections transversales et les ponceaux ont été arpentées les 12 et 13 novembre 2019. Les conditions météorologiques prévalent au terrain, selon la station météo située à Sainte-Clotilde et opérée par Environnement et Changement

climatique Canada (ECCC), indiquait une température entre -15°C et -5°C , des précipitations solides totalisant 25,3 cm du 11 novembre au 12 novembre, avec une hauteur de neige au sol de 16 cm et 15 cm pour les 12 et 13 novembre respectivement. La Figure-A II-2 résume les conditions non-idéales qui prévalaient au terrain.

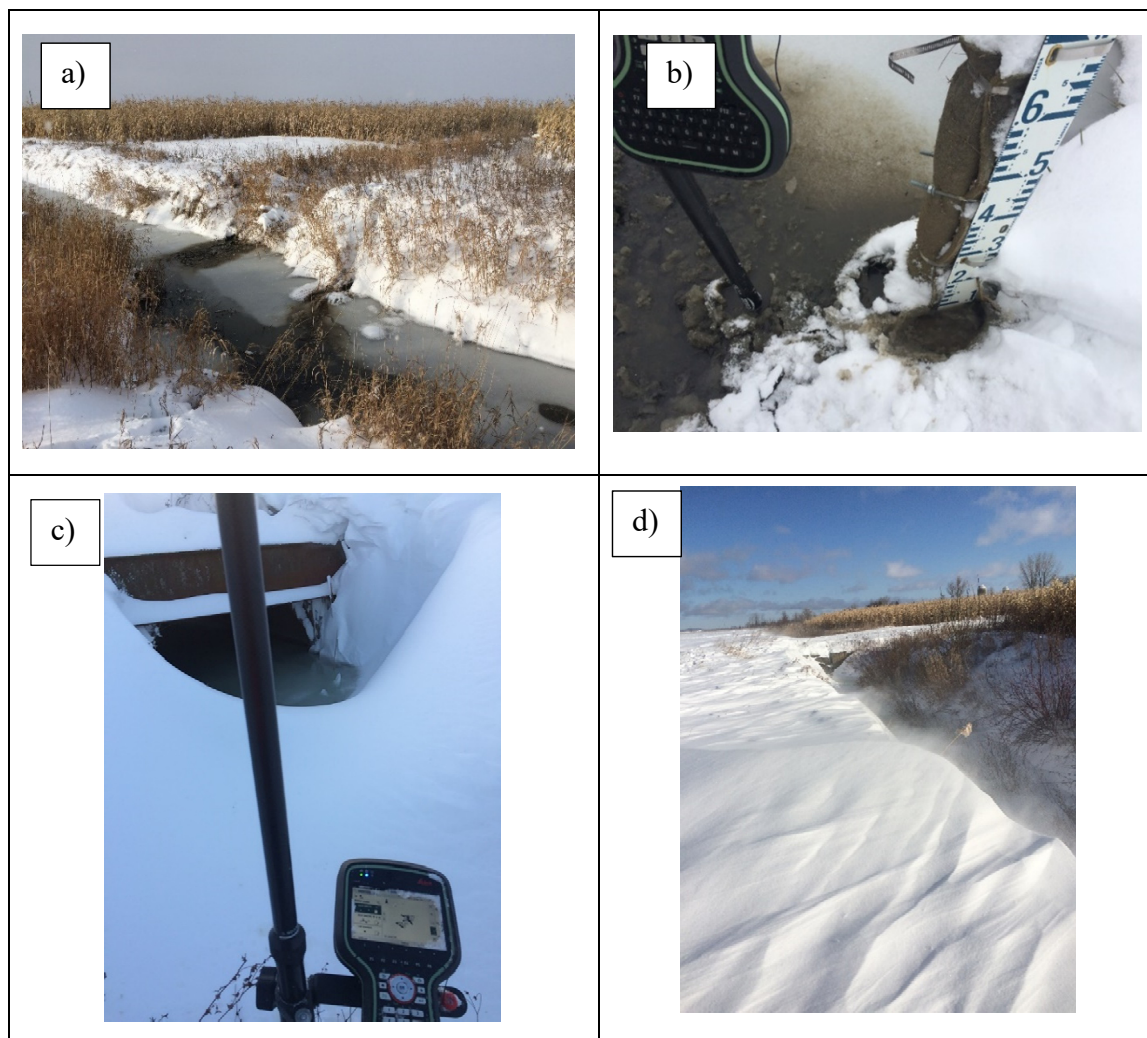


Figure-A II-2 Conditions d'arpentage a) Section de la rivière en amont du village b) Petite glace en amont du village c) Accumulation de neige dans la rivière Saint-Régis et glace en aval du village d) Accumulation importante de neige dans la rivière Saint-Régis en a

Tel qu'illustré sur les photos, certaines portions de la rivière étaient ensevelies de neige rendant l'accès difficile et la précision moins bonne ne sachant pas si le sol était atteint ou s'il s'agissait de glace. De plus, pour quelques sections de la rivière, l'eau était complètement gelée, ce qui aurait nécessité un déglacage pour obtenir le fond. Le choix des sections transversales s'est donc fait de façon à obtenir la meilleure qualité de données possible. Le terrain est plutôt dégagé, condition nécessaire pour l'arpentage au GNSS, avec un tronçon problématique identifié à la Figure-A II-3. La photo a cependant été prise en été, mais un grand nombre d'arbustes, un réseau dense de branches et les maisons attenantes obstruaient l'accès du GNSS aux satellites au moment du relevé.



Figure-A II-3 a) Vue en plan de la section problématique et b) section problématique durant l'été

Cette section plus problématique, n'a pu être arpentée. La précision offerte par la GNSS n'était pas appropriée (± 2 m à 3 m en précision planimétrique) à cause des arbustes et du couvert de branches.

ANNEXE III

OCCUPATION DU SOL

La Figure-A III-1 montre l'affectation du sol à Saint-Isidore. Les tableaux Tableau-A III-1, Tableau-A III-2 et Tableau-A III-3 montre les caractéristiques issues de l'affectation du sol.

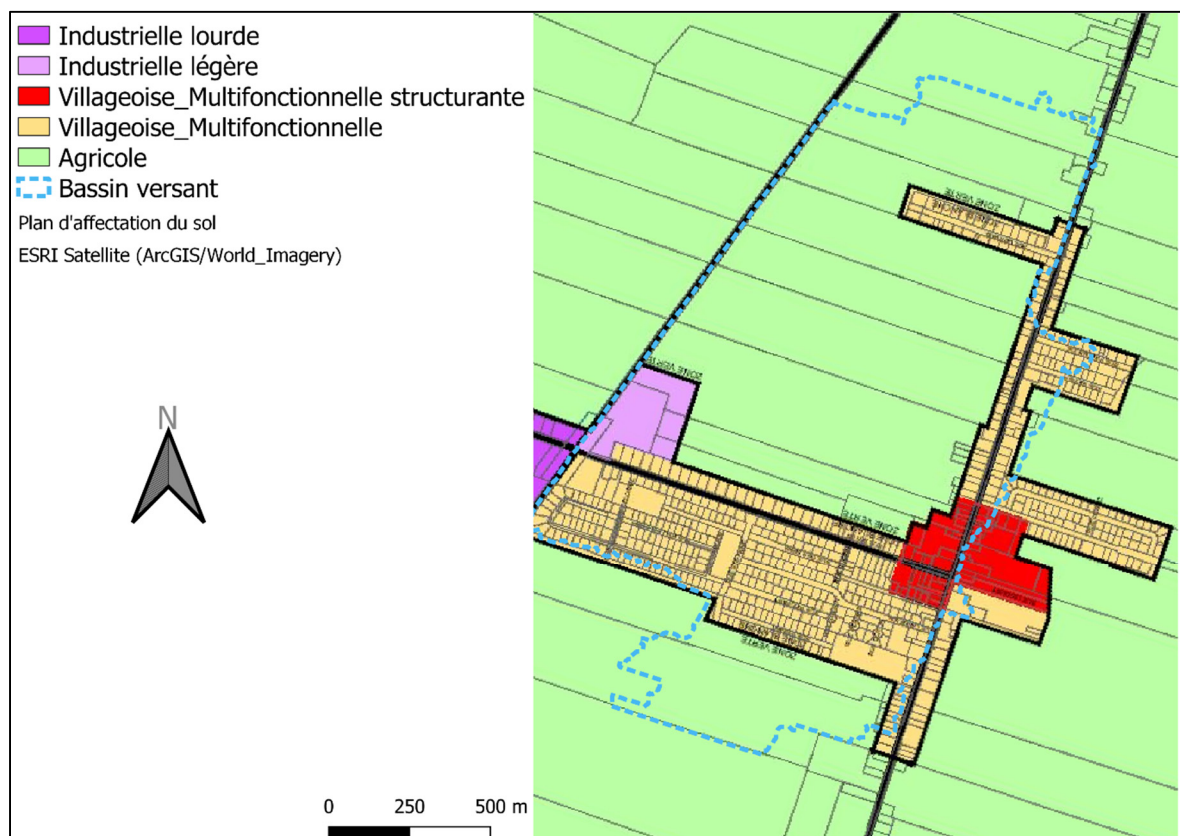


Figure-A III-1 Affectation du sol à Saint-Isidore selon le plan d'urbanisme (2011)

Tableau-A III-1 Pourcentage d'imperméabilité du sol en fonction du type d'occupation du sol

Adapté de Wright et MacLaughlin (1991)
(Chapitre 6-27, Guide de gestion des eaux pluviales)

Occupation du sol		Imperméabilité (%)
Commerciale	Banlieue	70
Résidentielle	Unifamiliale	30
	Jumelés	50
	Lot de 0,2 ha ou plus	25
	Bloc appartements	70
Industrielle	Légère	80
Parc		7
École		50
Rue	Pavée	100
Pelouse		0

Tableau-A III-2 Coefficient de Manning associé au ruissellement de surface

Adapté de McCuen, Johnson et Ragan (1996)

Surface	Coefficient de Manning (n)
Asphalte lisse	0,011
Sol cultivé (moyenne)	0,13
Herbe – court, prairie	0,15
Herbe – chiendent	0,41

Tableau-A III-3 Stockage dans les dépressions en fonction du type de surface

Adapté de *Water Environment Federation* et *American Society of Civil Engineers* (1992)

Surface	Stockage dans les dépressions (mm)
Surface imperméable	1,25 – 2,5
Pelouse	2,5 – 5,0

ANNEXE IV

PÉDOLOGIE

La pédologie informe sur les caractéristiques des sols présents et il est possible d'en estimer des paramètres d'infiltration.

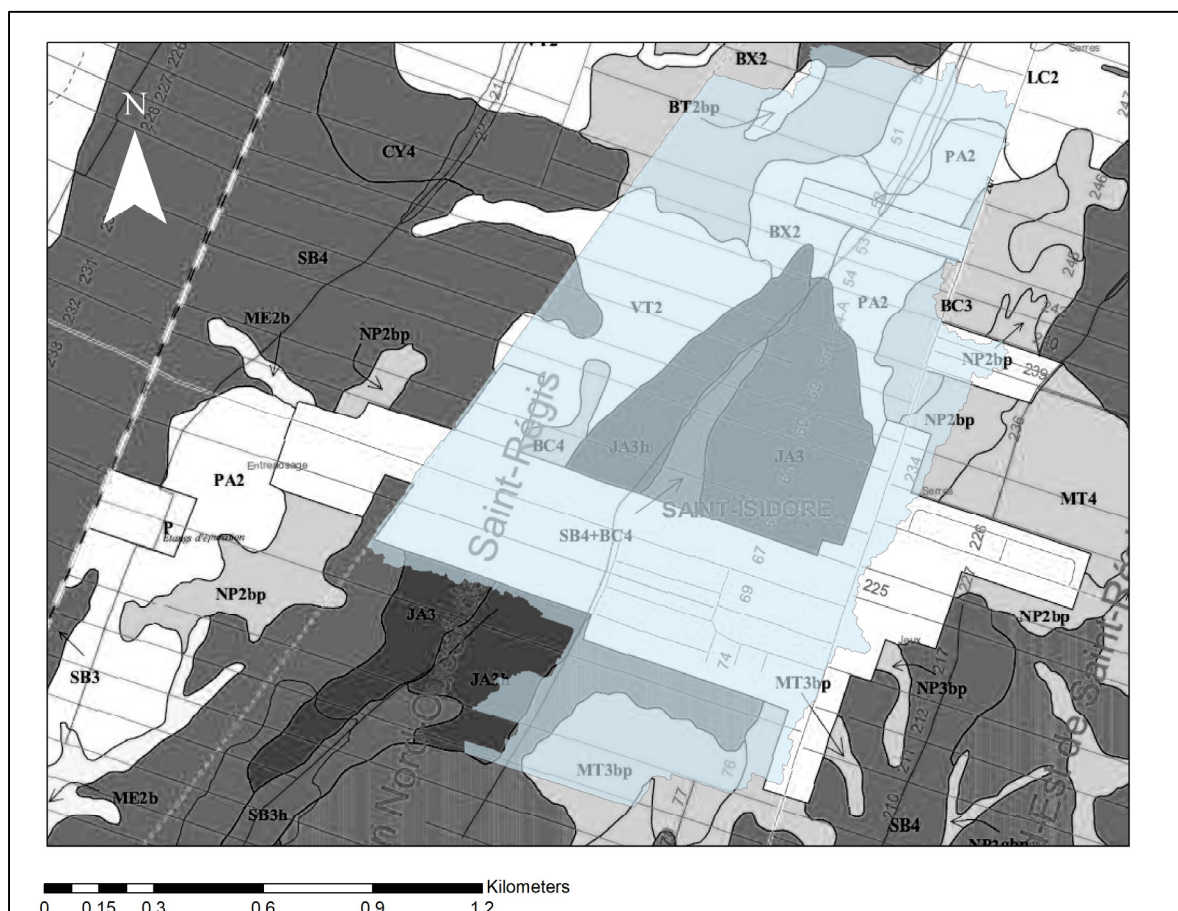


Figure-A IV-1 Pédologie du bassin versant de la rivière Saint-Régis. Les différents codes de sols rencontrés sont détaillés au Tableau-A 5-5

Adapté de Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (2008)

Tableau-A IV-1 Association entre le type de sol décrit dans la carte pédologique et la classe de sol correspondante d'après l'écriture du nom du sol pour l'utilisation de Green-Ampt comme processus mathématique d'infiltration de l'eau dans le sol

Symbologie	Répartition (%)	Type de sol	Nom du sol	Classe de sol
MT3bp	100	Sols issus de dépôts de tills	Saint-Mathieu loam 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux	Loam
MT3bp+ NP3bp	60-40	Sols issus de dépôts de tills	Saint-Mathieu loam 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux/Napierville loam 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux	Loam
SB4+ BC4	60-40	Sols argileux/Sols issus de dépôts de tills	Saint-Blaise loam limono-argileux/Boucherville loam argileux	Silty Clay Loam
JA3H	100	Sols loameux	Saint-Jacques loam limoneux humifère	Silt Loam
JA3	100	Sols loameux	Saint-Jacques loam limoneux	Silt Loam
SB4+ BC3	60-40	Sols argileux/Sols issus de dépôts de tills	Saint-Blaise loam limono-argileux/Boucherville loam	Silty Clay Loam
NP2bp	100	Sols issus de dépôts de tills	Napierville loam sableux 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux	Sandy Loam
NP3bp	100	Sols issus de dépôts de tills	Napierville loam 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux	Loam
SB4	100	Sols argileux	Saint-Blaise loam limono-argileux	Silty Clay Loam
BC3	100	Sols issus de dépôts de tills	Boucherville loam	Loam
BC4	100	Sols issus de dépôts de tills	Boucherville loam argileux	Clay Loam
VT2	100	Sols sableux	Saint-Valentin loam sableux fin	Sandy Loam

BT2bp	100	Sols sableux	Saint-Benoît loam sableux 3-8% de pente légèrement à modérément pierreux	Sandy Loam
BX2	100	Sols sableux	Botreaux loam sableux	Sandy Loam
PA2	100	Sols sableux	Saint-Patrice loam sableux	Sandy Loam
LC2	100	Sols sableux	Lacolle loam sableux fin	Sandy Loam

Tableau-A IV-2 Paramètres du modèle d'infiltration Green-Ampt
Adapté de Rawls, Brakensiek et Miller (1983)

Classe de sol	Conductivité hydraulique (mm/hr)	Tension capillaire (mm)	Déficit initial (fraction)
Clay Loam	1,02	210,06	0,277
Loam	3,30	88,90	0,347
Sandy Loam	10,92	109,98	0,368
Silt Loam	6,60	169,93	0,366
Silty Clay Loam	1,02	270,00	0,261

ANNEXE V

RÉSEAUX DE DRAINAGE MAJEUR ET MINEUR

Cette annexe traite l'information complémentaire utilisée pour la conception du réseau de drainage majeur, mineur et composé des fossés et de la rivière Saint-Régis.

Réseau de drainage majeur – rivière Saint-Régis

Tableau-A V-1 Coefficient de Manning attribué aux rives et au canal de la
rivière Saint-Régis
Adapté de Chow (1959)

	Rugosité des rives	Rugosité du canal
Tronçon en amont du ponceau Boyer	0,04	0,1
Tronçon en aval du ponceau Boyer	0,05	0,03

Réseau de drainage majeur – fossés agricoles

Tableau-A V-2 Coefficient de Manning attribué aux rives et au canal des
fossés agricoles
Adapté de Chow (1959)

	Rugosité des rives	Rugosité du canal
Fossé	0,05	0,2

Réseau de drainage mineur – conduites pluviales

Tableau-A V-3 Coefficient de Manning (n) associé aux matériaux des conduites
pluviales présentes à Saint-Isidore
Adapté de Brière (2012)

Matériau de conduite	Manning
Plastique lisse – PVC PEHD (vieilli)	0,009 (0,013)
Béton lisse – TBA	0,012 – 0,014

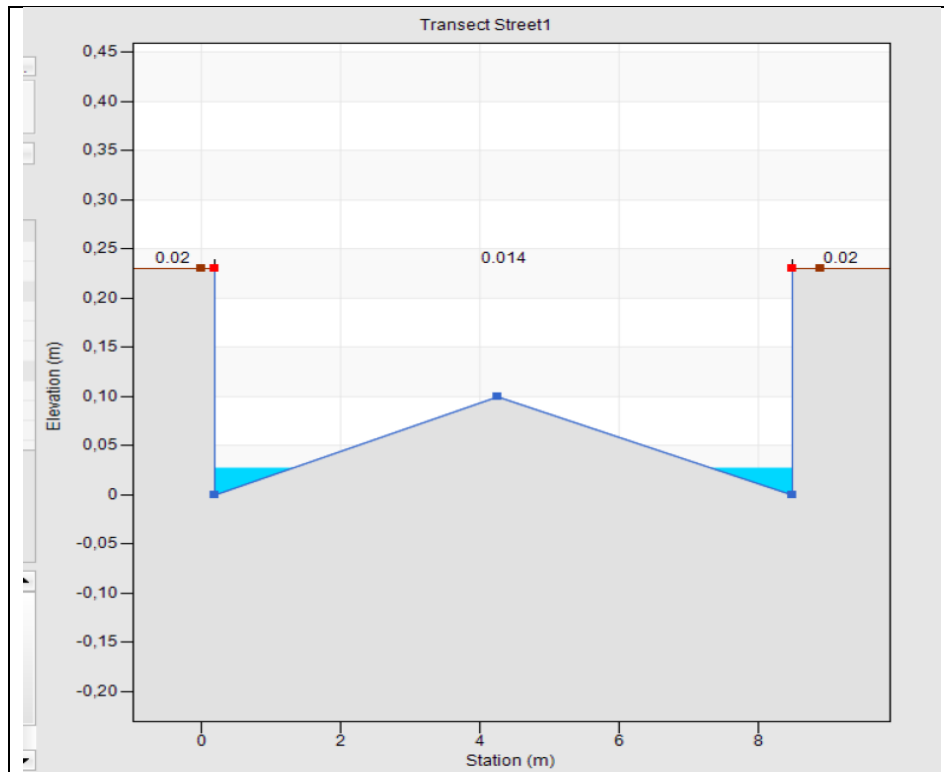
Réseau de drainage majeur - rues

Figure-A V-1 Coupe transversale d'une rue composant le réseau majeur modélisée dans PCSWMM

Tableau-A V-4 Courbe de tarage du
débit en fonction de la charge pour un
puisard alimentant un regard pluvial
Tiré de Rivard (2005)

Charge (m)	Débit (m ³ /s) (Pour un puisard)
0	0
0,01	0,0050
0,02	0,0100
0,03	0,0140
0,04	0,0175
0,05	0,0200
0,06	0,0220
0,07	0,0240
0,08	0,0255
0,09	0,0270
0,10	0,0285
0,11	0,0300
0,12	0,0315
0,13	0,0328
0,14	0,0340
0,15	0,0350

ANNEXE VI

RÉSEAU DE DRAINAGE AGRICOLE



Figure-A VI-1 Parcelles (mauve) dont les plans de drainage agricole sont disponibles sur Info-Sol
Tiré d'Info-sol (2020)

ANNEXE VII

ÉQUATION DE HOOGHOUT

L'équation de Hooghoudt permet de calculer, en considérant un régime permanent, l'écoulement de l'eau dans les drains agricoles.

$$Q_{gw} = \frac{16k}{L^2} \left[(H_{gw} - H^*)^2 - D_e(b_0) + D_e(H_{gw}) \right] \quad (\text{VII.1})$$

Où Q_{gw} = Débit souterrain

k = Conductivité hydraulique saturée latérale du sol

L = L'espacement entre les drains

H_{gw} = La hauteur de la nappe (variable)

H^* = Surface elevation – Dd

D_e = Profondeur équivalente à la couche imperméable

B_0 = Profondeur de la couche imperméable à partir des drains (aquifer bottom)

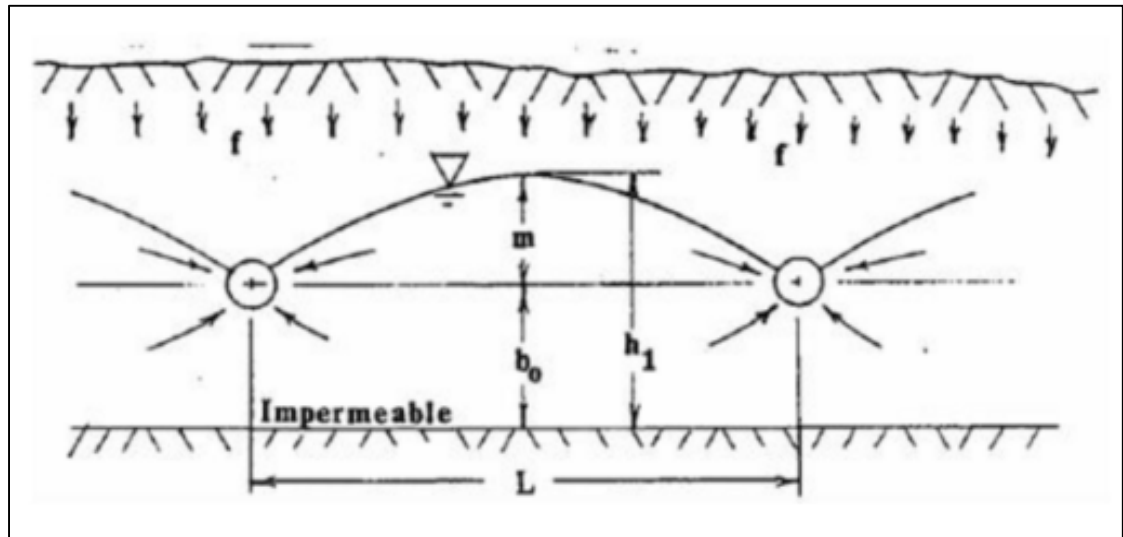


Figure-A VII-1 Schéma de l'écoulement souterrain en présence de drains agricoles selon Hooghoudt
Tiré de CHI (2020)

Pour PCSWMM, les paramètres à entrer qui représenteront l'écoulement souterrain sont A1, B1, A2, B2 et A3.

$$A1 = \frac{16k}{L^2} \quad (\text{VII.2})$$

$$B1 = 2 \quad (\text{VII.3})$$

$$A2 = \frac{16kD_e b_0}{L^2} \quad (\text{VII.4})$$

$$B2 = 0 \quad (\text{VII.5})$$

$$A3 = \frac{16kD_e}{H_{sw}L^2} \quad (\text{VII.6})$$

Où $H_{sw} = b_0$

Les unités pour A1, A2 et A3 sont en $\text{m}^3/\text{s}/\text{ha}/\text{m}^2$. Le Tableau-A 5-11 présente les caractéristiques de chaque type de sol utiles pour le calcul des paramètres.

Tableau-A VII-1 Paramètres d'écoulement souterrain selon l'équation de Hooghoudt en fonction des types de sols rencontrés à Saint-Isidore

	Sandy Loam	Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silt Loam
k (mm/h)	10,92	1,02	3,3	1,02	6,6
L (mètre)	20	20	20	20	20
D_e	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
b_0	39	39	39	39	39
$H_{sw} = b_0$	39	39	39	39	39
D_d	1	1	1	1	1

La valeur de k est obtenue à partir de (Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983), la valeur L est une moyenne approximative des distances observées entre les drains agricoles sur les plans disponibles, De tiré de la table de Hooghoudt (1940), b_0 la profondeur du bas de l'aquifère et D_d la profondeur approximative moyenne entre la surface du sol et le drain agricole d'après les plans disponibles. Quelques plans agricoles sont disponibles sur la plateforme en ligne Info-Sol.

Tableau-A VII-2 Paramètres d'écoulement souterrain entrés dans le logiciel PCSWMM pour représenter l'équation d'écoulement souterrain de Hooghoudt en fonction des différents types de sol à Saint-Isidore

Paramètres	Sandy Loam	Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silt Loam
A1	0,437	0,0408	0,132	0,0408	0,264
B1	2	2	2	2	2
A2	15,2	1,42	4,58	1,42	9,16
B2	0	0	0	0	0
A3	0,00997	0,000931	0,00301	0,000931	0,00602

ANNEXE VIII

ÉQUATION DE DUPUIT-FORCHHEIMER

L'équation de Dupuit-Forchheimer permet de calculer l'écoulement souterrain vers un cours d'eau récepteur.

$$Q_{gw} = \frac{4k}{L^2} \left[(H_{gw} - H^*)^2 - H_{gw}(H_{sw}) \right] \quad (\text{VIII.1})$$

Où Q_{gw} = débit

K = Conductivité hydraulique saturée latérale du sol

L = Approximativement $\frac{1}{2}$ de la longueur de l'écoulement du sous-bassin (Huber & Dickinson, 1992)

H_{gw} = Hauteur de la nappe = variable

H^* = Flow elevation = 0

H_{sw} = SWDepth = variable

Les différents paramètres de l'équation sont illustrés à la Figure-A VIII-1.

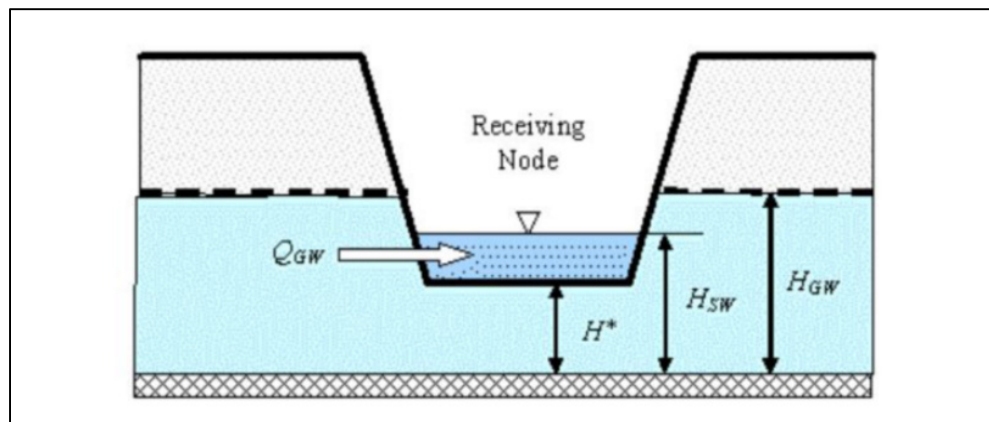


Figure-A VIII-1 Représentation des paramètres de l'équation d'écoulement souterrain de Dupuit-Forchheimer
Tiré de CHI (2020)

Enfin l'équation qu'utilise PCSWMM pour le débit latéral d'eau souterraine est la suivante.

$$Q_{gw} = A1(H_{gw} - H^*)^{B1} - A2(H_{sw} - H^*)^{B2} + A3(H_{gw})(H_{sw}) \quad (\text{VIII.2})$$

$$A1 = \frac{4k}{L^2} \quad (\text{VIII.3})$$

$$B1 = 2 \quad (\text{VIII.4})$$

$$A2 = 0 \quad (\text{VIII.5})$$

$$B2 = 0 \quad (\text{VIII.6})$$

$$A3 = \frac{-4k}{L^2} \quad (\text{VIII.7})$$

Tableau-A VIII-1 Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=25m

L=25 mètres	Paramètres	Sandy Loam	Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silt Loam
	A1	0,0699	0,00653	0,0211	0,00653	0,0422
	B1	2	2	2	2	2
	A2	0	0	0	0	0
	B2	0	0	0	0	0
	A3	-0,0699	-0,00653	-0,0211	-0,00653	-0,0422

Tableau-A VIII-2 Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM
selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=37,5m

L=37,5 mètres	Paramètres	Sandy Loam	Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silt Loam
	A1	0,0311	0,00290	0,00939	0,00290	0,0188
	B1	2	2	2	2	2
	A2	0	0	0	0	0
	B2	0	0	0	0	0
	A3	-0,0311	-0,00290	-0,00939	-0,00290	-0,0188

Tableau-A VIII-3 Paramètres de l'équation Dupuit-Forchheimer entrés dans PCSWMM
selon les sols présents à Saint-Isidore pour L=57,5m

L=57,5 mètres	Paramètres	Sandy Loam	Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silt Loam
	A1	0,0132	0,00123	0,00399	0,00123	0,00798
	B1	2	2	2	2	2
	A2	0	0	0	0	0
	B2	0	0	0	0	0
	A3	-0,0132	-0,00123	-0,00399	-0,00123	-0,00798

ANNEXE IX

JAUGEAGE

Pour le jaugeage chimique, un traceur est utilisé pour estimer le débit au moyen de la conservation de la masse. Un appareil de lecture, en l'occurrence un fluorimètre, doit être utilisé pour mesurer la concentration du traceur à des pas de temps suffisamment petits pour enregistrer les variations de concentration du traceur (E. Dahlke, 2014).

Pour commencer, le débit du cours d'eau doit être estimé afin d'injecter une quantité ni trop grande ni trop petite de traceur. E. Dahlke (2014) propose une quantité d'environ 5 ml à 10 ml de rhodamine WT à 20 % pour un débit d'eau d'un mètre cube par seconde. Le lecteur, fluorimètre submersible C3 de *Turner Design*, est placé dans le cours d'eau, sous l'eau, près de la station limnimétrique. Ensuite, le traceur est injecté en amont de la station à environ 100 mètres de celle-ci pour que le traceur se répartisse uniformément dans le cours d'eau. Une fois les données téléchargées, l'équation de conservation de la masse est utilisée pour en déduire le débit.

$$Q = \frac{V_I C_I}{\int_0^{\infty} (C - C_b) dt} \quad (\text{IX.1})$$

Où Q = débit du cours d'eau

V_I = Volume du traceur injecté dans le cours d'eau

C_I = Concentration du traceur injecté dans le cours d'eau

C = Concentration mesurée de traceur dans le cours d'eau à un temps t

C_b = Concentration « bruit »

t = temps

L'intégral de l'équation IX.1 est estimé par la somme de Riemann.

$$\int_0^{\infty} (C - C_b) dt = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - C_b)(t_{i+1} - t_{i-1})}{2} \quad (\text{IX.2})$$

Où i = pas de temps

n = Nombre de lectures prises par le fluorimètre

t_i = Temps associé à la lecture de C_i

La précision de la mesure peut être influencée par la perte de traceur entre son point d'injection et le fluorimètre, la turbidité de l'eau et le mélange incomplet du traceur dans la section (E. Dahlke, 2014). La Figure-A IX-1 montre les deux aspects problématiques de ce type de jaugeage à la rivière Saint-Régis.

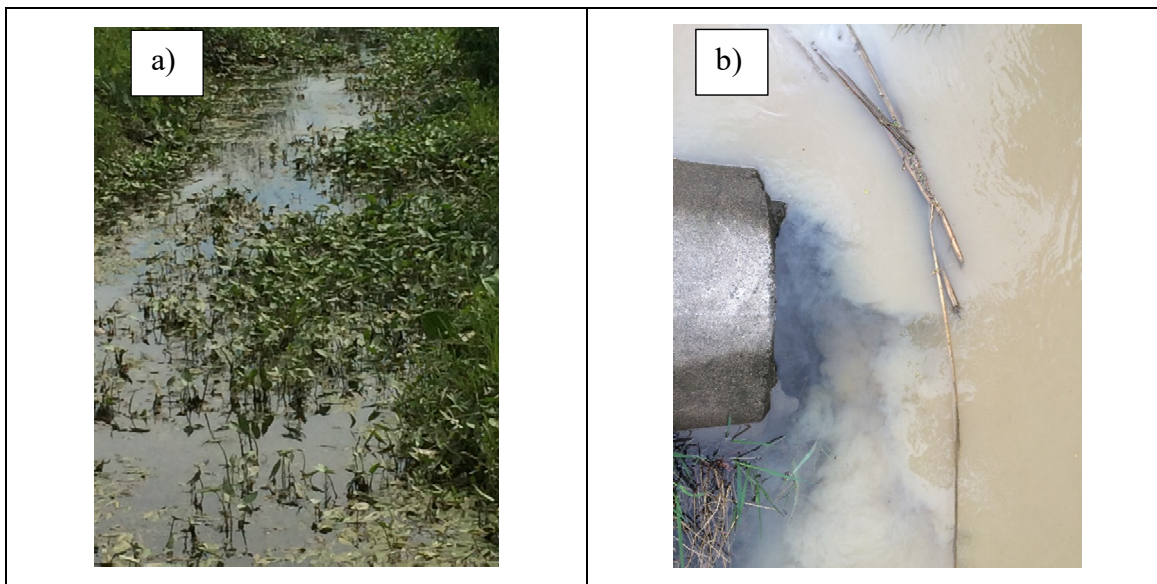


Figure-A IX-1 Problématiques rencontrées pour le jaugeage au fluorimètre de la rivière Saint-Régis a) Perte de traceur par les plantes aquatiques b) Turbidité de l'eau

Pour la problématique des plantes, elle est observée à partir du milieu de l'été jusqu'à l'automne. Pour la turbidité de l'eau, beaucoup de matières en suspension sont observées lors

de pluies. Une autre méthode, l'exploration par champs de vitesse, doit donc être déployée pour quantifier les débits associés aux hautes eaux.

La méthode d'exploration par champ de vitesse s'effectue à l'aide d'un vélocimètre. La vitesse de l'eau est mesurée à plusieurs endroits différents pour une même section et est transformée en débit grâce à la connaissance de l'aire mouillée de la section. La répartition des aires en fonction des points de mesure de vitesse se fait en fonction de la méthode des polygones de Thiessen. L'équation IX.3 présente le concept.

i

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{A_i V_i}{A} \quad (\text{IX.3})$$

Où A_i = l'aire associée à la mesure i

V_i = la vitesse associée à une aire i

A = l'aire mouillée de la section

n = le nombre de lectures de vitesse

Comme cette méthode requiert d'être dans l'eau, deux personnes expérimentées doivent être présentes pour que cela demeure sécuritaire.

ANNEXE X

CALCUL DES VALEURS DE LA MATRICE DE PERFORMANCE

SOCIO-ÉCONOMIQUE : Coût de l'investissement

Tableau-A X-1 Valeur du critère Coût de l'investissement (Socio-économique)

Action	Coût estimé	Source
Statu quo	0 \$	N/A
Reprofilage amont	278 374 \$	Voir calcul 1
Reprofilage aval	318 374 \$	Voir calcul 1
Reprofilage complet	353 374 \$	Voir calcul 1
Branche 14	15 000 \$	Voir calcul 1
Ponceau	233 374 \$	Voir calcul 2
Bassin de rétention	177 619 \$	Voir calcul 3
Déconnexion des gouttières	3 590 \$	Voir calcul 4

Calcul 1 : Reprofilage

Le reprofilage d'un cours d'eau est estimé à 50 \$/ml.

Source : Communication personnelle avec Pierre Laprise (2020)

Reprofilage amont : $900 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} = 45\,000 \text{ $}$

Reprofilage aval : $1\,700 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} = 85\,000 \text{ $}$

Reprofilage complet : $2\,400 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} = 120\,000 \text{ $}$

Branche 14 : $300 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} = 15\,000 \text{ $}$

* Il faut ajouter le coût de reconstruction du ponceau pour les reprofilages amont, aval et complet.

Calcul 2 : Reconstruction du ponceau

Coût pour un ponceau similaire : 170 000 \$ en 2004

Source : Ville de Longueuil (2004)

Inflation estimée à 2 %/an

Coût de reconstruction du ponceau Boyer en 2020 : $170\,000 \$ \times 1,02^{(2020-2004)} = 233\,374 \$$

Calcul 3 : Construction du bassin de rétention sec

Volume du bassin de rétention sec : $6287 \text{ m}^3 \times 35,3 \text{ pi}^3/\text{m}^3 = 222\,023 \text{ pi}^3$

Coût du pi^3 pour un bassin de rétention de $222\,023 \text{ pi}^3$: $0,8 \$/\text{pi}^3$

Source : ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2014)

Coût de construction = $222\,023 \text{ pi}^3 \times 0,8 \$/\text{pi}^3 = 177\,619 \$$

Calcul 4 : Déconnexion des gouttières

Campagne de communication

Accroche porte : 350 \$ pour 2 500 maisons

Source : Boutique imprime (2021)

Sensibilisation (porte à porte) = $4 \text{ h/jour} \times 30 \text{ jours} \times 27 \$/\text{h} = 3\,240 \$$

Sensibilisation faite par l'inspecteur municipal dont le salaire horaire est de 27 \$/h

Source : Neuvo (2021)

Coût = $350 \$ + 3\,240 \$ = 3\,590 \$$

SOCIO-ÉCONOMIQUE : Coût d'opération et d'entretien

Tableau-A X-2 Valeur du critère Coût d'opération et d'entretien (Socio-économique)

Action	Coût estimé	Source
Statu quo	0 \$/an	N/A
Reprofilage amont	0 \$/an	N/A
Reprofilage aval	0 \$/an	N/A
Reprofilage complet	0 \$/an	N/A
Branche 14	0 \$/an	N/A
Ponceau	0 \$/an	N/A
Bassin de rétention	3 996 \$/an	Voir calcul 1
Déconnexion des gouttières	3 780 \$/an	Voir calcul 2

Calcul 1 : Entretien du bassin de rétention sec

Coût annuel entre 1,8 % à 2,7 % du coût de construction du bassin de rétention

Source : ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2014)

Moyenne du pourcentage d'opération = $(1,8 \% + 2,7 \%) / 2 = 2,25 \text{ \%/an}$

Coût d'opération = $2,25 \text{ \%/an} * 177\,619 \$ = 3\,996 \$/\text{an}$

Calcul 2 : Inspection reliée à la déconnexion des gouttières

Coût de l'heure pour l'inspecteur : 27 \$

Coût annuel = $4 \text{ inspections/an} * 35 \text{ h/inspection} * 27 \$ = 3\,780 \$$

SOCIO-ÉCONOMIQUE : Coût de réfection

Tableau-A X-3 Valeur du critère Coût de réfection (Socio-économique)

Action	Coût estimé	Source
Statu quo	0 \$	N/A
Reprofilage amont	968 932 \$	Voir calcul 1
Reprofilage aval	1 608 932 \$	Voir calcul 1
Reprofilage complet	2 168 932 \$	Voir calcul 1
Branche 14	214 000 \$	Voir calcul 1
Ponceau	248 932 \$	Voir calcul 2
Bassin de rétention	358 826 \$	Voir calcul 3
Déconnexion des gouttières	0 \$	N/A

Hypothèse :

La durée de l'analyse se fait de 2020 à 2100, donc sur une période de 80 ans.

Calcul 1 : Reprofilage

Coût du reprofilage : 50 \$/ml

Source : Communication personnelle Pierre Laprise (2020)

Durée de vie du reprofilage : Entre 3 à 7,5 ans (moyenne = 5 ans)

Source : J. Trawle (1981)

Reprofilage amont : $900 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} \times 80 \text{ ans} / 5 \text{ ans} = 720\,000 \text{ $}$

Reprofilage aval : $1\,700 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} \times 80 \text{ ans} / 5 \text{ ans} = 1\,360\,000 \text{ $}$

Reprofilage complet : $2\,400 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} \times 80 \text{ ans} / 5 \text{ ans} = 1\,920\,000 \text{ $}$

Branche 14 : $300 \text{ m} \times 50 \text{ $/ml} \times 80 \text{ ans} / 5 \text{ ans} = 240\,000 \text{ $}$

*** Il faut ajouter le coût de reconstruction du ponceau pour les reprofilages amont, aval et complet.

Calcul 2 : Ponceau

Durée de vie du ponceau = 75 ans

Coût de reconstruction du ponceau Boyer : $233\,374 \$ \times 80 \text{ ans} / 75 \text{ ans} = 248\,932 \$$

Source : Direction des normes et des documents d'ingénierie du ministère des Transports du Québec (2019)

Calcul 3 : Réfection du bassin de rétention

Durée de vie estimée :

Hypothèses : Il y a un prétraitement en amont de l'ouvrage et les hauteurs de la nappe phréatique et du roc sont favorables pour la mise en place de l'ouvrage.

$(6,6 \text{ mm/h} \times 15) \times 0,4 = 39,6 \text{ ans}$

Source : ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2014)

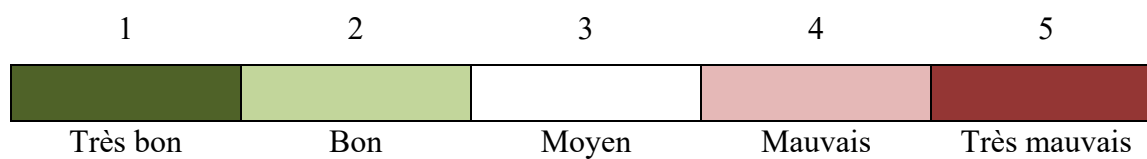
Coût de reconstruction : $177\,619 \$ \times 80 \text{ ans} / 39,6 \text{ ans} = 358\,826 \$$

SOCIO-ÉCONOMIQUE : Complexité administrative

Tableau-A X-4 Valeur du critère Complexité administrative (Socio-économique)

Action	Note	Source
Statu quo	1	Experts
Reprofilage amont	4	Experts
Reprofilage aval	4	Experts
Reprofilage complet	4	Experts
Branche 14	5	Experts
Ponceau	4	Experts
Bassin de rétention	3	Experts
Déconnexion des gouttières	2	Experts

Échelle de notation allant de 1 à 5.

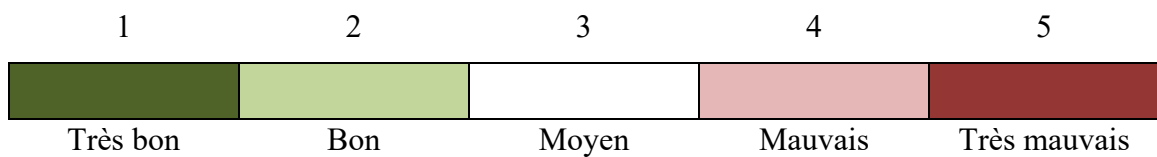


TECHNIQUE : Facilité de mise en œuvre

Tableau-A X-5 Valeur du critère Facilité de mise en œuvre (Technique)

Action	Note	Source
Statu quo	1	Experts
Reprofilage amont	4	Experts
Reprofilage aval	4	Experts
Reprofilage complet	4	Experts
Branche 14	4	Experts
Ponceau	5	Experts
Bassin de rétention	2	Experts
Déconnexion des gouttières	1	Experts

Échelle de notation allant de 1 à 5.

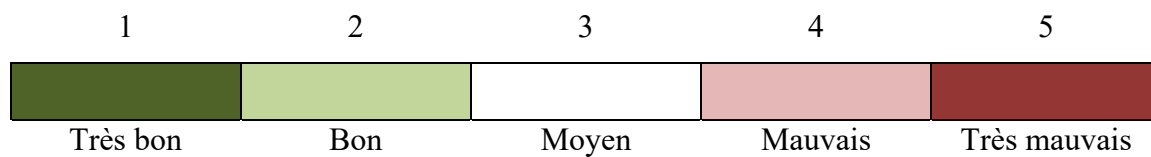


TECHNIQUE : Facilité à maintenir

Tableau-A X-6 Valeur du critère Facilité à maintenir (Technique)

Action	Note	Source
Statu quo	1	Experts
Reprofilage amont	2	Experts
Reprofilage aval	2	Experts
Reprofilage complet	2	Experts
Branche 14	2	Experts
Ponceau	2	Experts
Bassin de rétention	4	Experts
Déconnexion des gouttières	1	Experts

Échelle de notation allant de 1 à 5.

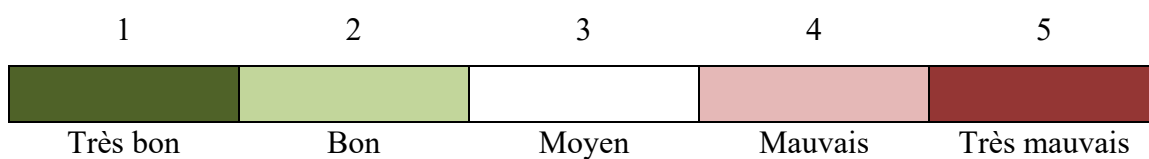


TECHNIQUE : Facilité à renouveler

Tableau-A X-7 Valeur du critère Facilité à renouveler (Technique)

Action	Note	Source
Statu quo	1	Experts
Reprofilage amont	2	Experts
Reprofilage aval	2	Experts
Reprofilage complet	2	Experts
Branche 14	2	Experts
Ponceau	2	Experts
Bassin de rétention	4	Experts
Déconnexion des gouttières	1	Experts

Échelle de notation allant de 1 à 5.

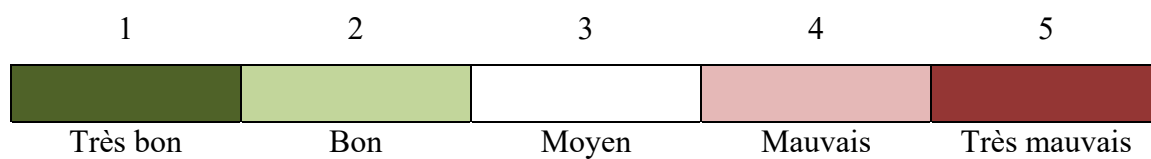


TECHNIQUE : Mesure éprouvée

Tableau-A X-8 Valeur du critère Mesure éprouvée (Technique)

Action	Note	Source
Statu quo	5	Experts
Reprofilage amont	3	Experts
Reprofilage aval	3	Experts
Reprofilage complet	3	Experts
Branche 14	4	Experts
Ponceau	3	Experts
Bassin de rétention	1	Experts
Déconnexion des gouttières	1	Experts

Échelle de notation allant de 1 à 5.

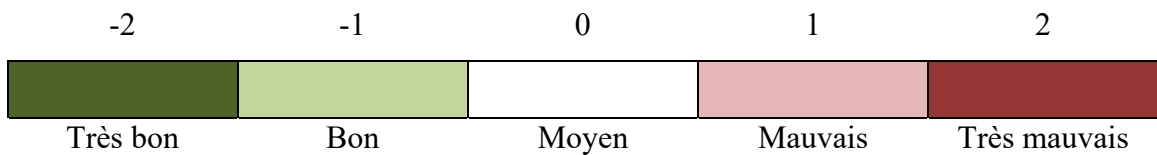


ENVIRONNEMENTAL : Potentiel d'infiltration

Tableau-A X-9 Valeur du critère Potentiel d'infiltration (Environnemental)

Action	Note	Source
Statu quo	0	(Audet, Beaudoin-Lebeuf, Charbonneau, & Pothier, 2020b)
Reprofilage amont	1	Idem
Reprofilage aval	1	Idem
Reprofilage complet	2	Idem
Branche 14	2	Idem
Ponceau	1	Idem
Bassin de rétention	-2	Idem
Déconnexion des gouttières	-2	Idem

Échelle de notation allant de 1 à 5.

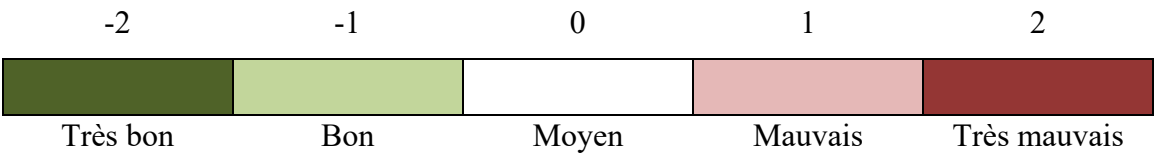


ENVIRONNEMENTAL : Potentiel d'érosion

Tableau-A X-10 Valeur du critère Potentiel d'érosion (Environnemental)

Action	Note	Source
Statu quo	1	(Audet et al., 2020b)
Reprofilage amont	2	Idem
Reprofilage aval	2	Idem
Reprofilage complet	2	Idem
Branche 14	2	Idem
Ponceau	1	Idem
Bassin de rétention	-2	Idem
Déconnexion des gouttières	-2	Idem

Échelle de notation allant de 1 à 5.

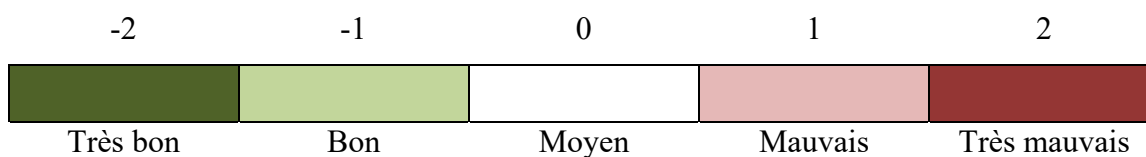


ENVIRONNEMENTAL : Qualité des habitats

Tableau-A X-11 Valeur du critère Qualité des habitats (Environnemental)

Action	Note	Source
Statu quo	0	(Audet et al., 2020b)
Reprofilage amont	1	Idem
Reprofilage aval	1	Idem
Reprofilage complet	2	Idem
Branche 14	0	Idem
Ponceau	0	Idem
Bassin de rétention	-2	Idem
Déconnexion des gouttières	-2	Idem

Échelle de notation allant de 1 à 5.



ENVIRONNEMENTAL : Qualité de l’eau

Tableau-A X-12 Valeur du critère Qualité de l’eau (Environnemental)

Action	Note	Source
Statu quo	0	(Audet et al., 2020b)
Reprofilage amont	1	Idem
Reprofilage aval	1	Idem
Reprofilage complet	2	Idem
Branche 14	2	Idem
Ponceau	0	Idem
Bassin de rétention	-2	Idem
Déconnexion des gouttières	-2	Idem

Échelle de notation allant de 1 à 5.

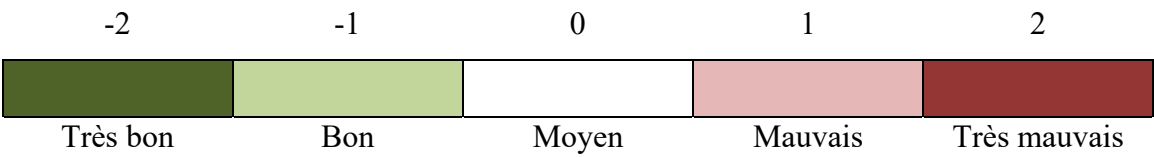


Tableau-A X-13 Matrice de performance

Mesures/Critères	Coût de l'investissement	Coût d'opération et d'entretien	Coût de réfection	Complexité	Facilité de mise en œuvre	Facilité à maintenir	Facilité à renouveler	Mesure éprouvée	Hauteur d'eau	Débit d'eau à l'exutoire	Potentiel d'infiltration	Potentiel d'érosion	Qualité des habitats	Qualité de l'eau
SQ	\$ -	\$ -	\$ -	1	1	1	1	5			0	1	0	0
RAm	\$ 278,374.00	\$ -	\$ 968,932.00	4	4	2	2	3			1	2	1	1
RAv	\$ 318,374.00	\$ -	\$ 1,608,932.00	4	4	2	2	3			1	2	1	1
RC	\$ 353,374.00	\$ -	\$ 2,168,932.00	4	4	2	2	3			2	2	2	2
B14	\$ 15,000.00	\$ -	\$ 214,000.00	5	4	2	2	4			2	2	0	2
P	\$ 233,374.00	\$ -	\$ 248,932.00	4	5	2	2	3			1	1	0	0
BR	\$ 177,619.00	\$ 3,996.00	\$ 358,826.00	3	2	4	4	1			-2	-2	-2	-2
DG	\$ 3,590.00	\$ 3,780.00	\$ -	2	1	1	1	1			-2	-2	-2	-2
DG + RAm	\$ 281,964.00	\$ 3,780.00	\$ 968,932.00	6	5	3	3	4			-1	0	-1	-1
DG + Rav	\$ 321,964.00	\$ 3,780.00	\$ 1,608,932.00	6	5	3	3	4			-1	0	-1	-1
DG + RC	\$ 356,964.00	\$ 3,780.00	\$ 2,168,932.00	6	5	3	3	4			0	0	0	0
DG + B14	\$ 18,590.00	\$ 3,780.00	\$ 214,000.00	7	5	3	3	5			0	0	-2	0
DG + P	\$ 236,964.00	\$ 3,780.00	\$ 248,932.00	6	6	3	3	4			-1	-1	-2	-2
DG + BR	\$ 181,209.00	\$ 7,776.00	\$ 358,826.00	5	3	5	5	2			-4	-4	-4	-4
DG + RAm + BR	\$ 459,583.00	\$ 7,776.00	\$ 1,327,758.00	9	7	7	7	5			-3	-2	-3	-3
DG + RAv + BR	\$ 499,583.00	\$ 7,776.00	\$ 1,967,758.00	9	7	7	7	5			-3	-2	-3	-3
DG + RC + BR	\$ 534,583.00	\$ 7,776.00	\$ 2,527,758.00	9	7	7	7	5			-2	-2	-2	-2
DG + RAm + B14	\$ 296,964.00	\$ 3,780.00	\$ 1,182,932.00	11	9	5	5	8			1	2	-1	1

DG + RAv + B14	\$ 336,964.00	\$ 3,780.00	\$ 1,822,932.00	11	9	5	5	8			1	2	-1	1
DG + RC + B14	\$ 371,964.00	\$ 3,780.00	\$ 2,382,932.00	11	9	5	5	8			2	2	0	2
DG + B14 + BR	\$ 196,209.00	\$ 7,776.00	\$ 572,826.00	10	7	7	7	6			-2	-2	-4	-2
DG + B14 + P	\$ 251,964.00	\$ 3,780.00	\$ 462,932.00	11	10	5	5	8			1	1	-2	0
DG + BR + P	\$ 414,583.00	\$ 7,776.00	\$ 607,758.00	9	8	7	7	5			-3	-3	-4	-4
DG + B14 + BR + P	\$ 429,583.00	\$ 7,776.00	\$ 821,758.00	14	12	9	9	9			-1	-1	-4	-2
DG + RAm + BR + B14	\$ 474,583.00	\$ 7,776.00	\$ 1,541,758.00	14	11	9	9	9			-1	0	-3	-1
DG + RAv + BR + B14	\$ 514,583.00	\$ 7,776.00	\$ 2,181,758.00	14	11	9	9	9			-1	0	-3	-1
DG + RC + BR + B14	\$ 549,583.00	\$ 7,776.00	\$ 2,741,758.00	14	11	9	9	9			0	0	-2	0
BR + RAm	\$ 455,993.00	\$ 3,996.00	\$ 1,327,758.00	7	6	6	6	4			-1	0	-1	-1
BR + RAv	\$ 495,993.00	\$ 3,996.00	\$ 1,967,758.00	7	6	6	6	4			-1	0	-1	-1
BR + RC	\$ 530,993.00	\$ 3,996.00	\$ 2,527,758.00	7	6	6	6	4			0	0	0	0
BR + B14	\$ 192,619.00	\$ 3,996.00	\$ 572,826.00	8	6	6	6	5			0	0	-2	0
BR + B14 + P	\$425,993.00	\$3,996.00	\$821,758.00	12	11	8	8	8			1	1	-2	0
BR + P	\$ 410,993.00	\$ 3,996.00	\$ 607,758.00	7	7	6	6	4			-1	-1	-2	-2
BR + RAm + B14	\$ 470,993.00	\$ 3,996.00	\$ 1,541,758.00	12	10	8	8	8			1	2	-1	1
BR + RAv + B14	\$ 510,993.00	\$ 3,996.00	\$ 2,181,758.00	12	10	8	8	8			1	2	-1	1
BR + RC + B14	\$ 545,993.00	\$ 3,996.00	\$ 2,741,758.00	12	10	8	8	8			2	2	0	2
B14 + RAm	\$ 293,374.00	\$ -	\$ 1,182,932.00	9	8	4	4	7			3	4	1	3

B14 + RAv	\$ 333,374.00	\$ -	\$ 1,822,932.00	9	8	4	4	7			3	4	1	3
B14 + RC	\$ 368,374.00	\$ -	\$ 2,382,932.00	9	8	4	4	7			4	4	2	4

ANNEXE XI

**ASSESSMENT OF ADAPTATION MESURES TO FLOODS WITH PCSWMM AND
A MULTICRITERIA ANALYSIS FOR A VERY SMALL WATERSHED**

Audrey Coulombe ^a, Jean-Luc Martel ^b, Annie Poulin ^c, Mathias Glaus ^d, Geneviève Audet ^e,
Steve Girard ^f

^{a, b, c, d} Département de Génie de la construction, École de technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^e Société de conservation et d'aménagement des bassins versants de la Zone Châteauguay
(OBV SCABRIC), 1 rue du Pont, Sainte-Martine, Québec, Canada J0S 1V0

^f Travaux publics, Municipalité de Saint-Isidore, 671 rang Saint-Régis, Saint-Isidore,
Québec, Canada J0L 2A0

Article soumis pour conférence, février 2021

Abstract: Floods are of major concerns as they constitute a hazard for inhabitants of riparian areas. In Quebec, at least 80 % of riparian municipalities undergo flooding and must find adequate measures to diminish their impacts on both agricultural and urban sectors. Small watersheds are not spared by this problematic and often they do not have the resources to address it. Therefore, the aim of this study is to develop a methodology to evaluate different adaptation measures for a municipality combining agricultural and urban areas in an ungauged small watershed subject to flooding. To do so, a detailed hydrologic and hydraulic model that suits the territory was designed using the PCSWMM software. This model was calibrated and validated using selected events from a one-year monitoring of water levels. The model was then used to test the adaptation measures in a climate change context to better assess their resilience. A multi-criteria decision analysis (MCDA) with the PROMETHEE method considering socio-economic, environmental and technical criteria was then performed. The MCDA approach aims to prioritize the adaptation measures according to the priorities of the onsite decision makers. The MCDA results show that the ranking is not so robust and may be subject to change according to decision makers preferences. However, the disconnection of gutters remained the most preferable option for all criteria. This study allowed to elaborate a

robust methodology and target the needed data to conduct a flood study in a small ungauged watershed to prioritize adaptation measures.

1 INTRODUCTION

In southern Quebec, the spring freshet generates flooding water levels in a large number of rivers (International Joint Commission Canada and United States, 2019; Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2020), affecting around 80 % of riparian municipalities (Bélanger et al., 2006). In summer and fall, heavy rainfall caused by convective or tropical storms can also cause their share of inconvenience (AlQasimi & Mahdi, 2019), in particular over small rural watersheds. These pluvial flooding are also expected to be impacted by climate change through an intensification of extreme rainfall events (Martel et al., 2020). Small cities located in very small ungauged watersheds are particularly ill-equipped to handle this situation.

Therefore, the main objective of this study is to develop and test a methodology to be used by municipalities located in very small ungauged watersheds in order to assess flood adaptation scenarios while considering climate change. A case study was conducted in the Municipality of Saint-Isidore (hereafter Saint-Isidore) located in Quebec, Canada (Figure 1) at the head of the Saint-Régis River watershed. The aim is to apply the developed methodology to classify various potential adaptation measures against flooding of fluvial origin caused mainly by the high water level of the river following summer intense rainfall. This initiative has been spearheaded by the watershed organization of the OBV SCABRIC (Châteauguay River conservation and development society), aiming to better understand flooding and the measures that can be put forward while integrating the aspect of climate change as well as decision support for analysis.

2 STUDY SITE

The majority of the municipality's watershed is made up of agricultural lands (75 %), with the remaining being occupied by residential areas (25 %) (Audet, 2019). Several agricultural plots oriented perpendicular to the stream are drained using tile drainage directly into the Saint-Régis River to evacuate water from fields more efficiently to improve crop productivity. A large portion of the Saint-Isidore sewer network is pseudo-separative, meaning that foundation drains and roof gutters are connected directly to the sanitary sewer rather than the storm sewer. The storm sewer network collects runoff water through sumps and channels it directly into the Saint-Régis River.

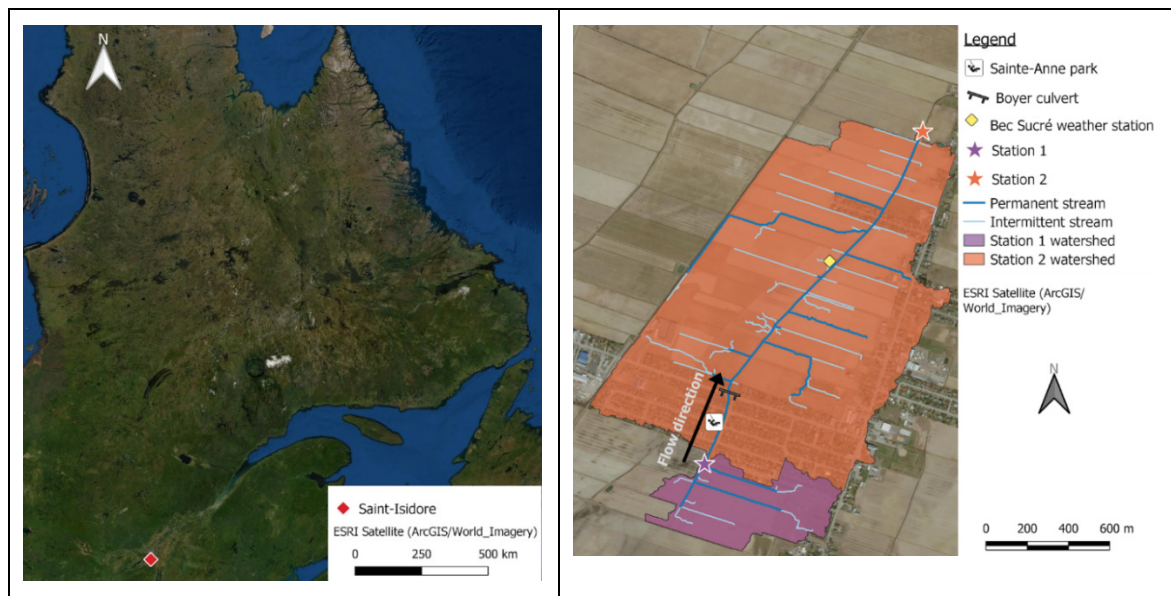


Figure A XI-1 Localization of the study site

The Boyer culvert serves as the outlet of the Saint-Régis River in the municipality's residential area (see Figure 1). During intense summer convective storms, the network upstream of the culvert can become completely overloaded, causing local flooding in the city's area near the stream. These flood events are amplified with the water level remaining high near Sainte-Anne Park due to the culvert's raised elevation preventing proper drainage following rainfall events, also creating a safety issue for children.

3 METHODOLOGY

This section covers the three main steps to the proposed methodology to evaluate and compare various potential adaptation measures against flooding: 1) the data collection, 2) the modelling component (hydrological, hydraulic and climate change) and 3) the decision support component (multi-criteria analysis).

3.1 Data collection

To build a hydrological and hydraulic model over an ungauged watershed, data collection is the first step that must be accomplished. With respect to this case study, two water-level stations (Stations 1 and 2; Figure 1) composed of a pressure sensor were installed early September 2019 allowing the water level to be deduced by using an additional barometric pressure sensor. Unfortunately, following the flood preventive de-icing of the Saint-Régis River, Station 2 sensor was torn apart on March 13, 2020.

A land survey activity made it possible to generate cross sections and the longitudinal profile of the Saint-Régis River and to obtain the position and rim elevations of the storm manholes and culverts. In order to properly represent the storm sewer system, the invert elevation of the majority of the accessible storm manholes was measured and completed using as-built plans or by interpolation if needed.

The delimitation of the watershed is required to determine the surface area which is drained towards the water-level stations. To this end, a digital terrain model (DTM) produced using a LiDAR survey in 2017 with an altimetric and planimetric precision of +/- 15 cm was used. The ArcGIS software was used to process the DTM and to make it hydrologically logical. During these manipulations, the culverts (invisible to the DTM) are artificially burned in the DTM allowing a complete and realistic layout of the hydrographic network. Stations 1 and 2 drainage areas were found to be 0.26 km² and 2.08 km², respectively. The delineation of the watershed

then makes it possible to define the search for additional information to supply data to the hydrological and hydraulic model, such as the site pedology and detailed land use.

3.2 Hydrological and hydraulic modelling

The purpose of this study's hydrological and hydraulic modelling is to better understand all the processes generating runoff and its path over the territory leading to flooding problems for which a measure is to be identified. Considering the rural and urban component of the territory under study, the hydraulic model must be able to simulate both the flow processes for the rural drainage network (tile drainage, ditches and the Saint-Régis river channel) as well as the storm sewer network. In addition, since the land use of the study site is diversified and the flooding issues are located in different places in the watershed, semi-distributed modelling (whose parameters vary depending on the territory) is necessary. Finally, the watershed being of a very small area ($\sim 2 \text{ km}^2$), the hydrological and hydraulic processes must be resolved at a sub-daily time step to avoid missing peak flows.

The hydrological and hydraulic modelling tool used to take these different characteristics into account is the PCSWMM software developed by Computational Hydraulic Int. (CHI) incorporating directly into its calculation engine the latest version of the Storm Water Management Model (SWMM) developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). The following subsections present the steps to be taken in order to build and calibrate the model.

3.2.1 Building of the model and calibration

The PCSWMM model was built using the data collected at Section 3.1. The storm sewer network and the Saint-Régis River channel and banks were modelled using the surveyed data and the as-built plans. The rural drainage ditches were also modelled and extracted from the DTM in ArcGIS. The Green-Ampt infiltration scheme was selected and its parameters were adjusted according to the study site known pedology. Groundwater flow was added to the

model and also parametrized according to the site's pedology. All rugosity values (Manning coefficient), impervious percentages, depths of depression storage, infiltration scheme parameters were initially adjusted based on typical values (Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983; Te Chow, Maidment, & Mays, 2010)

The calibration of the PCSWMM model is conducted by further adjusting parameters such as the rugosity from the sub-watersheds impervious and pervious areas and the Saint-Régis River channel and banks. The sub-watersheds' conceptual lengths and widths and impervious percentages were also modified to improve the hydrograph timing. The calibration and validation results will be discussed in Section 4.1.

3.2.2 Potential adaptation mesures

Various potential adaptation mesures were identified together with Saint-Isidore that could potentially be implemented. These are presented in Figure 2 and can be summarized as follows: Lowering of Boyer culvert (C): this culvert is currently raised above the river bed, creating an accumulation of water upstream within the residential area. Lowering of the culvert would allow for a proper drainage, providing more storage capacity during subsequent rainfall events.

Reprofiling of the Saint-Régis River (DR and UR): the river bed would be reprofiled using an average slope from its source to the outlet (Station 2) to remove the non-uniform accumulation of deposits, providing more conveyance. Downstream (LR) and upstream (UR) reprofiling from the residential area (near the Boyer culvert) are considered as two distinct measures.

Detention pond (DP): construction of a dry detention pond in the Sainte-Anne Park, storing runoff volumes from approximately an 8000 m² drainage area and gradually releasing it in the river. The storm sewer network from the targeted areas would be redirected towards the detention pond.

Branch 14 redirection (B14): historically, a small portion of the Station 1 watershed was diverted towards the municipality. The Branch 14 could be restored to its previous configuration, but would likely require environmental administrative procedures to do so.

Disconnection of gutters (DG): even though a portion of the municipality's sewer network is pseudo-separative, multiple gutters were found to be connected to the storm sewer network. These gutters would be disconnected from the network and redirected towards permeable surfaces or in rain barrels.

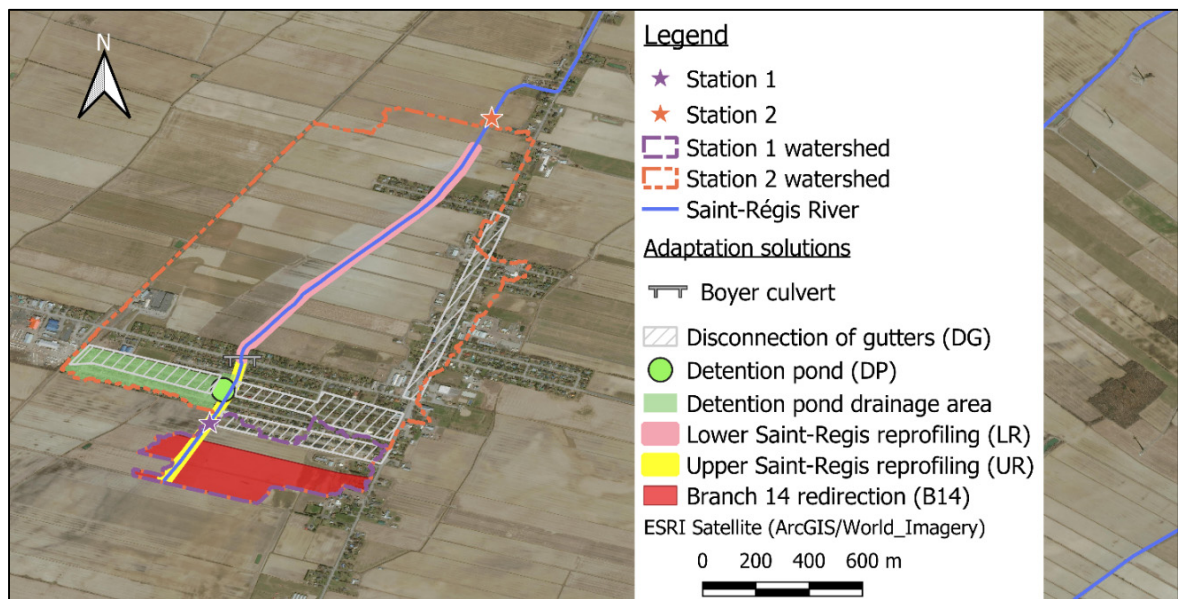


Figure-A XI-2 Localization of potential adaptation measures within the territory of Saint-Isidore

The calibrated PCSWMM model is used to evaluate individual adaptation measures and combinations of those thereof. A 3-hour Chicago synthetic storm with a 25-year return period was selected as the design event under which all scenarios are evaluated and compared. This storm was generated using the intensity-duration-frequency (IDF) curves from Environment and Climate Change Canada's Ste-Clothilde weather station closest to the study site. In order to take the impact of climate change into account, an 18 % correction factor was applied to the storm intensities following the Quebec Ministry of Sustainable Development, Environment

and Fight Against Climate Change recommendations (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017).

3.3 Multi-criteria analysis for decision support

The comparative analysis of the various adaptation measures is based on socioeconomic, technical and environmental criteria, which can be determined using a multi-criteria analysis. This analysis makes it possible to rank the measures and requires the identification as well as the weighting of the criteria considered. The choice of criteria and their units is based on the literature as well as the specificities of the proposed technical measures. The attribution of the value to each adaptation measure for each selected criterion is based on the results of the modelling component and on knowledge from the literature or expert judgments. The decision support process is based on the PROMETHEE method (Mareschal, 2011) for which the method as well as the methodological approach are explained by Yan, Rousse, et Glaus (2019). The study's selection of criteria is shown in Table 1 and are divided into three categories according to the fulfillment of three conditions: 1) the list of criteria relevant to the study must be exhaustive, 2) consistency in the role of a criterion at its local level and when it is immersed in its category, and 3) the non-redundancy of the criteria (Roy & Bouyssou, 1993).

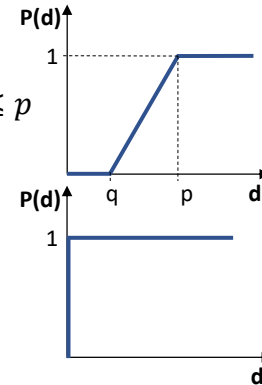
Table-A XI-1 Description and units of the selected criteria

Context	Criteria	Description of the criterion	Units
Socioeconomic	Administrative complexity	Solution requires the mobilization of resources from the municipality to achieve the solution.	\$
	Cost of investment	Cost required to design and build the solution.	\$/year
	Operation and maintenance cost	Cost required for the operation of the solution and its routine maintenance.	\$/year
	Repair cost	Cost to be expected to bring the solution up to standard.	1 to 5
Technical	Ease of implementation	Ease with which a solution can be implemented.	1 to 5
	Ease of maintenance	Simplicity with which it is possible to keep the solution running smoothly.	1 to 5
	Adaptable	Ease of upgrading the solution.	1 to 5
	Water flow	Diminish or maintain the water flow at the watershed's outlet.	m ³ s ⁻¹
	Water level	Peak water height at Sainte-Anne park.	m ³ s ⁻¹
	Proven solution	Solution commonly used occasionnally, or in development.	1 to 5
Environment	Water quality	The solution minimize the contribution of contaminants to waterways.	1 to 5
	Faunic habitat quality	The solution optimize or improve the quality of habitats for aquatic and terrestrial fauna.	1 to 5
	Erosion potential	The solution reduces sediment inputs downstream.	1 to 5
	Infiltration potential	The solution promotes the recharge of the water table.	1 to 5

In the PROMETHEE methods, the adaptation mesures $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ are noted for each criterion $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. Then, the difference $d_c(a_i, a_j)$ is computed for all pairwise comparison of adaptation mesures according to each criterion c : $d_c(a_i, a_j) = c_c(a_i) - c_c(a_j)$. Afterwards, these differences are translated in a preference degree P ranging from 0 to 1 based on a preference function. A score of 1 indicating a strong preference for an adaptation mesure against another for one criterion comparison, and a score of 0 means no preference. In this study, two preference functions are employed:

$$\text{Linear } P(a_i, a_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } |d_c(a_i, a_j)| \leq q \\ \frac{|d_c(a_i, a_j) - q|}{p - q} & \text{if } q < |d_c(a_i, a_j)| \leq p \\ 1 & \text{if } |d_c(a_i, a_j)| > p \end{cases} \quad (XI.1)$$

$$\text{Usual } P(a_i, a_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } d_c(a_i, a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{if } d_c(a_i, a_j) > 0 \end{cases} \quad (XI.2)$$



Then, these preference degrees are paired with the weight's criterion given by the authorities. Due to COVID-19, synthetic weights were defined instead until public consultation can be conducted.

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{c=1}^n P_c(a_i, a_j)w_c \quad \text{and} \quad \pi(a_j, a_i) = \sum_{c=1}^n P_c(a_j, a_i)w_c \quad (\text{IX.3})$$

Thus, the leaving (positive) flow (Φ^+) and the entering (negative) flow (Φ^-) are deducted. The former means how this adaptation measure outranks all the other adaptation measures according to one criterion, in contrast to the entering flow, which means how the adaptation measure is outranked by all the other adaptation measures.

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a_i, x) \quad \text{and} \quad \Phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a_i) \quad (\text{IX.4})$$

where n is the number of adaptation measures considered in the analysis. The net flow (Φ) is the difference of the leaving flow (Φ^+) and the entering flow (Φ^-). The flow score is computed as the difference between the positive flow and the negative flow: $\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i)$

4. RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the results obtained for the modelling components (hydrological, hydraulic and climate change), followed by the multi-criteria analysis for decision support. First, the calibration and validation of the PCSWMM model are presented. Then, the potential adaptation measures are simulated in current and future climates to determine their strengths, weaknesses and possible synergies between them. Finally, the data obtained from PCSWMM modelling as well as other data from practice and expert judgments are fed into a multi-criteria analysis in order to obtain a ranking of the adaptation measures.

4.1 PCSWMM model calibration

The objective of the PCSWMM model is to reproduce the water dynamics of the Saint-Isidore watershed. A few rainfall events were selected to calibrate and validate the PCSWMM model using the water level gauging (between September 12, 2019, and September 11, 2020). Consecutive rainfall events that took place between October 15, 2019, and November 3, 2019, were selected to calibrate the model, providing diversity in the intensity and duration of those events (Reynolds, Halldin, Seibert, Xu, & Grabs, 2020). According to N. Moriasi et al. (2007), several indicators can be used to jointly assess the performance of a hydrological model as satisfactory or not. The model is deemed acceptable when the following conditions are met: 1) the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) > 0.6 , 2) the coefficient of determination (R^2) > 0.6 and 3) the percentage bias (P_{BIAS}) ± 15 %.

Due to the limited number of events with enough rainfall to generate above average water levels, two sequences of two rainfall events (occurring in summer and in fall) were selected for the validation, whereas the remaining ones served for the calibration. Similar values were obtained for both calibration and validation events. The two validation events between October 25 to November 4 are presented in Figure 3 and the performance indicators for both fall and summer event sequences are shown in Table 2.

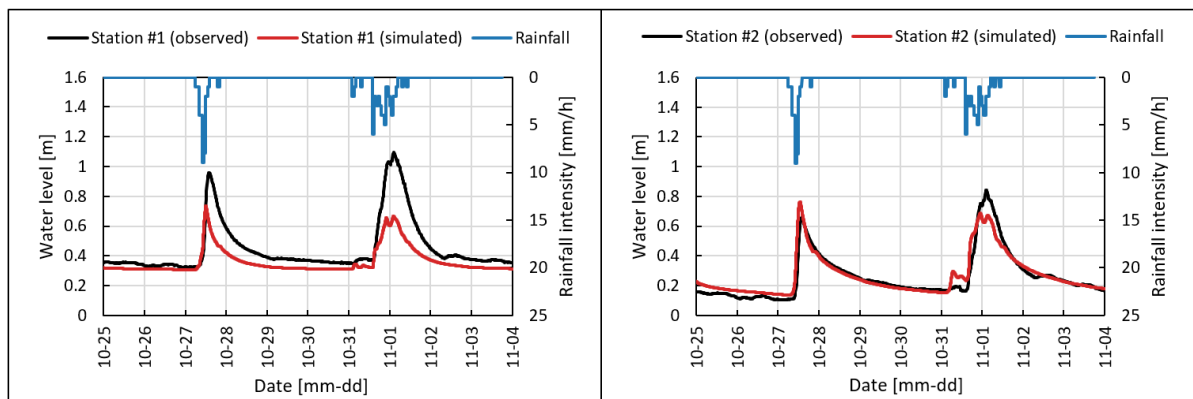


Figure-A XI-3 Validation at Station 1 (left) and Station 2 (right) from October 25 to November 4, 2019

Table-A XI-2 Performance indicators for both validation events

Events dates	Station #	NSE	R²	P_{BIAS}
2019-10-25 to 2019-11-04	Station 1	0.46	0.90	19.0%
	Station 2	0.90	0.90	-2.5%
2020-08-02 to 2020-08-09	Station 1	0.75	0.91	10.0%

Validation results shown in Table 2 indicate that satisfactory performance is obtained for all indicators at Station 2 during the fall event, and Station 1 for the summer events. For the fall events, Station 1 performance is poorer (as seen in Figure 3) and is, in fact, systematically lower than Station 2 performance. This can possibly be explained by the presence of the Boyer culvert and the historical diversion (see Section 3.2.2) that may affect the runoff and routing processes in that particular area. Note that Station 2 data is not available beyond March 13, 2020, due to equipment damages and malfunctioning from that date on. Overall, the calibration was considered satisfactory to conduct the case study and evaluate the performance of the various adaptation measures. However, a larger monitoring time would have provided more rainfall events for both calibration and validation periods, leading to more robust results for the analysis.

4.2 Evaluating the different adaptation measures

4.2.1 Baseline scenario

As seen in Figure 3 for Station 1, the restriction caused by the Boyer culvert is preventing the water level to decrease below approximately 0.4 m following any significant rainfall event. Indeed, the municipality has mentioned that this is a recurrent problem where the water level remains high for a long period of time, further contributing to potential flooding in the residential areas. Figure 4 shows the maximum water levels at a cross-section upstream of the Boyer culvert reached during the 3-hour Chicago storm with a 25-year return period under present climate conditions for the six individual measures described in Section 3.2. A 25 mm

rainfall event was used in the model 3 days before the event to better demonstrate the problem of drainage in the residential area.

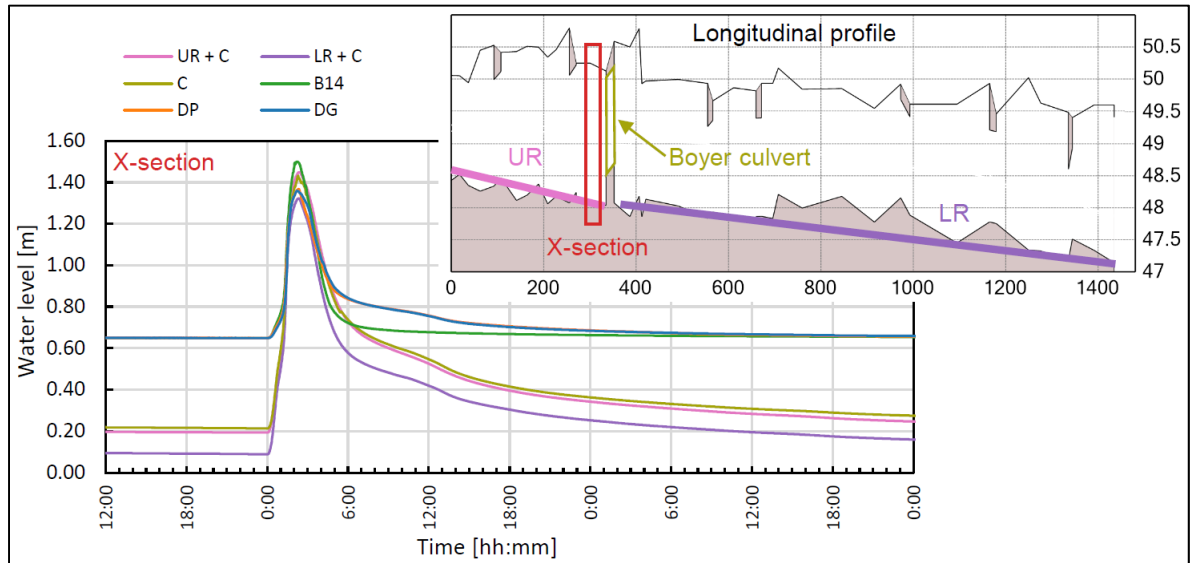


Figure-A XI-4 Cross section (X-section) and longitudinal profile of maximum water levels for each adaptation measure alone for a 3-hour 25-year return period Chicago synthetic storm following a 25 mm rainfall event

Results shown in Figure 4 suggest that the lower Saint-Régis reprofiling and the lowering of the Boyer culvert are needed together (LR + C) to allow the upstream section to properly drain itself and lower the water level following significant rainfall events (similar behaviours were obtained for more frequent events). This can be explained by the culvert's raised elevation with respect to the river bed as well as the important accumulation of sediments downstream of the culvert preventing its lowering alone from achieving the desired result. Thus, the combination of both lower Saint-Régis reprofiling and the lowering of the Boyer culvert (LR + C) are considered as the minimum measure and will serve as the baseline scenario hereafter.

4.2.2 Comparing all mesures together in future climate

Combining all individual adaptation mesures shown in Figure 2 with the baseline scenario (LR + C), the PCSWMM simulations were run once again, and the results are shown in Figure 5 in both the current and future climate conditions (i.e. with the 18 % majoration factor). Furthermore, the maximum potential gain is shown with the black curve, combining all mesures together. All possible combinations of two or more mesures were also tested for the multicriteria analysis, but are not shown in Figure 5.

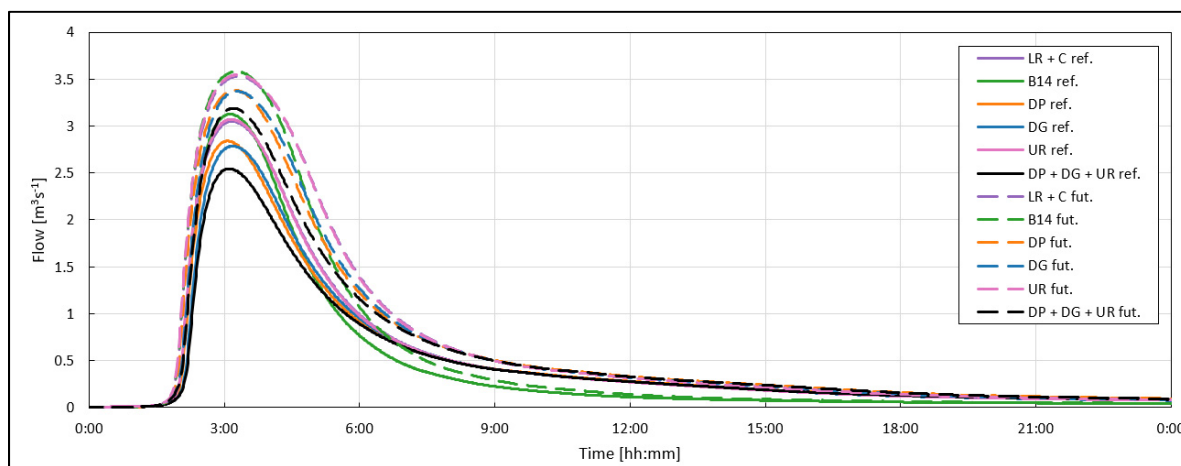


Figure-A XI-5 Hydrographs of the flows at the outlet of the Saint-Régis River (Station 2), for the portion under study, for the baseline (LR + C), the four individual adaptation mesures combined with the LR + C baseline, and the best combination for peak flow reduction for a 3-hour Chicago storm with a 25-year return period under the future climate

The results suggest that each individual mesure provides improvement over the baseline scenario in both the current and future climate in terms of flow at the outlet of the Saint-Régis River segment studied. The only exception is the Branch 14 redirection (B14) which results in a lower total volume, but an increased peak flow. This could be explained due to the smaller storage area within the river bed in the residential area, leading to higher water levels and flows. The combination of the remaining mesures provided the best improvements in terms of peak flow reduction. While the detention pond (DP) and the disconnection of gutters (DG) both provide the largest gain in terms of peak flow reduction, the remaining options are

intertwined together making it difficult to distinguish them. The multi-criteria analysis will allow to obtain a ranking of each individual and combination of adaptation measures to determine the best scenario to be selected according to socioeconomic, technical and environmental factors.

4.2.3 Multi-criteria analysis

The analysis of the robustness of the multi-criteria analysis was carried out by constructing various scenarios with which a specific distribution of the weighting of the criteria is associated. The total weight of 100 % is equally distributed among the three major categories of criteria (socioeconomic, technical and environmental) for the base scenario, while 75 % is assigned to the major category for the other three scenarios. Table 3 presents the parameters as modeled in PROMETHEE, with q and p respectively defining the indifference and preference thresholds in the case of a linear function. Better performances are obtained for smaller values over all sub-criteria.

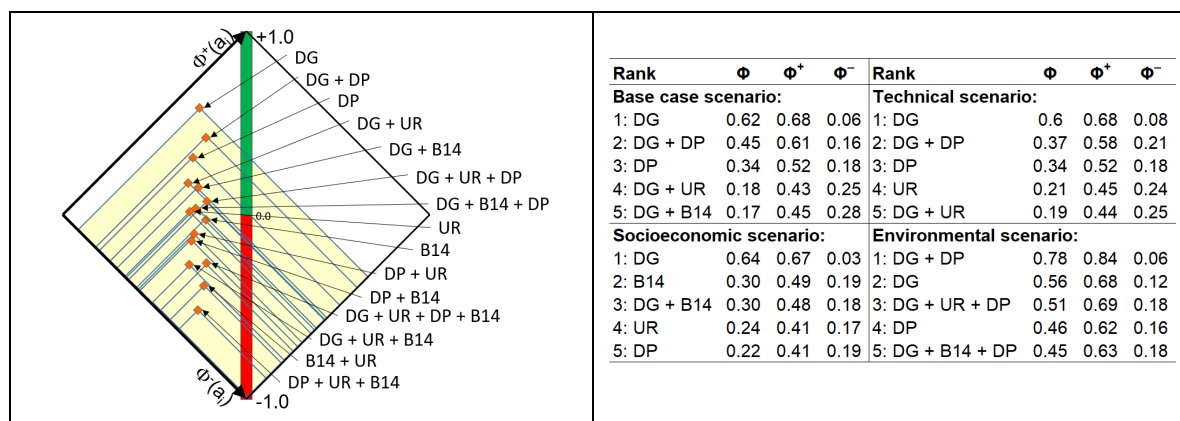
All 16 adaptation measures combinations were included in the multicriteria analysis. To assess the performance of the measures against each other and against the criteria, leaving, entering and net flows are computed, allowing to rank the measures. Figure 6 presents the net (Φ), leaving (Φ^+) and entering (Φ^-) flows as well as the classification of the best five adaptation measures obtained with PROMETHEE.

Table-A XI-3 The sub-criteria and their properties for the multicriteria analysis. The units of q and p are the same as their respective sub-criterion's units

Sub-criteria		Weights [%]				Type	Function	q	p
		Base case	Socioeconomic	Technical	Environmental				
Socio-economic	Administrative complexity	8.33	18.75	3.13	3.13	Quantitative	Linear	n/a	n/a
	Cost of investment	8.33	18.75	3.13	3.13	Quantitative	Linear	82 867	199 472
	Operation and maintenance cost	8.33	18.75	3.13	3.13	Quantitative	Linear	1 980	4 124
	Repair cost	8.33	18.75	3.13	3.13	Quantitative	Linear	5 325	13 282
Technical	Ease of implementation	5.56	2.08	12.50	2.08	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Ease of maintenance	5.56	2.08	12.50	2.08	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Adaptable	5.56	2.08	12.50	2.08	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Water flow	5.56	2.08	12.50	2.08	Quantitative	Linear	0.09	0.14
	Water level	5.56	2.08	12.50	2.08	Quantitative	Linear	0.21	0.35
	Proven solution	5.56	2.08	12.50	2.08	Qualitative	Usual	n/a	n/a
Environm.	Water quality	8.33	3.13	3.13	18.75	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Faunic habitat quality	8.33	3.13	3.13	18.75	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Erosion potential	8.33	3.13	3.13	18.75	Qualitative	Usual	n/a	n/a
	Infiltration potential	8.33	3.13	3.13	18.75	Qualitative	Usual	n/a	n/a
Total		100	100	100	100				

The figure on the left is a visual representation of the base case scenario results, where the leaving flow (Φ^+) and entering (Φ^-) are added together to evaluate the net flow (Φ) corresponding to the red/green bar in the middle. A higher measure on the diamond is preferred. The flows and final ranks for all scenarios are shown in the table on the right.

Figure-A XI-6 Results from the multi-criteria analysis



Results indicate that the disconnection of gutters (DG) is found in the first position for all scenarios, except for the environmental one where it is in second position. The base scenario shows that both DG and the detention pond (DP) share the first three ranks. With respect to the Branch 14 redirection (B14), it reaches second and third positions in the socioeconomic

scenario, but only makes it at the fifth position at best for the other scenarios. It is possible that the cost for investment, operation and maintenance does not allow DP to rank among the best in the socioeconomic scenario. This analysis shows that the ranking is sensitive to the weights given to each scenario, ultimately depending on the preferences of decision-makers.

5. CONCLUSION

A case study was conducted during which the developed methodology was applied to serve as a benchmark for future studies involving very small, ungauged watersheds with the aim of helping small municipalities identify adaptation measures to flooding. The proposed methodology includes three main steps: field data collection; hydrological and hydraulic modelling under present and future climate conditions; and multi-criteria analysis. Field data collection involved installing two water-level stations and recorded data over a one-year period were used to calibrate an event-based PCSWMM model. Then different possible adaptation scenarios were analysed and compared using the PROMETHEE method.

Overall, the results obtained from the hydraulic and hydrological simulations, as well as the multicriteria analysis indicate that a combination of adaptation measures is likely the best option for Saint-Isidore. First, a minimal intervention consisting of downstream reprofiling (LR) and the lowering of the Boyer culvert (C) are necessary to provide proper drainage in the residential area following a significant rainfall event. In terms of resilience against climate change, the addition of gutter disconnection (DG), a dry detention pond (DP), and upstream reprofiling (UR) would lead to the largest peak flow reduction. However, while the DG scenario is an ideal measure based on the multi-criteria analysis conducted, the addition of the DP and/or UR measures would ultimately rely on the decision-makers scenario selection (i.e. socioeconomic, technical and environmental) as well as their respective weighting. It should be noted that the multi-criteria analysis performed in this case study allows the mitigation measures to be further investigated in a design phase and could serve as a preliminary study.

We believe that this methodology could be applied to other cities located in very small ungauged watersheds to select optimal measures to increase their resilience against climate change. The degree of complexity and tools required to conduct such an analysis will ultimately depend on the desired objectives as well as the municipality's capabilities and resources.

6. REFERENCES

- AlQasimi, E., & Mahdi, T.-F. (2019). Flooding of the Saguenay region in 1996: Part 1— modeling River Ha! Ha! flooding. *Natural Hazards*, 96(1), 1-15. doi: 10.1007/s11069-018-3443-4. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3443-4>
- Audet, G. (2019). Vers l'adaptation aux changements hydroclimatiques - Portrait du bassin versant de la rivière Saint-Régis. Sainte-Martine, QC.
- Bélanger, D., Gosselin, P., & Poitras, P. (2006). Changements climatiques au Québec méridional : perceptions des gestionnaires municipaux et de la santé publique. SANTÉCom: Gouvernement du Québec.
- International Joint Commission Canada and United States. (2019). The causes and impacts of past floods in the Lake Champlain-Richelieu River basin - Historical information on flooding.
- Mareschal, B. (2011). PROMETHEE & GAIA Software. Repéré à <http://www.promethee-gaia.net/software.html>
- Martel, J.-L., Mailhot, A., & Brissette, F. (2020). Global and Regional Projected Changes in 100-yr Subdaily, Daily, and Multiday Precipitation Extremes Estimated from Three Large Ensembles of Climate Simulations. *Journal of Climate*, 33(3), 1089-1103. Repéré à <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/3/jcli-d-18-0764.1.xml>

- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2017). Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux de pluviales. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/manuel-calcul-conception/index.htm>.
- Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. (2020). Des mesures durables pour mieux protéger nos milieux de vie - Plan de protection du territoire face aux inondations. Québec, QC: Gouvernement du Québec.
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>. Repéré à <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153&t=3>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green‐ampt Infiltration Parameters from Soils Data. Journal of Hydraulic Engineering, 109(1), 62-70. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62). Repéré à <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281983%29109%3A1%2862%29>
- Reynolds, J. E., Halldin, S., Seibert, J., Xu, C. Y., & Grabs, T. (2020). Robustness of flood-model calibration using single and multiple events. Hydrological Sciences Journal, 65(5), 842-853. doi: 10.1080/02626667.2019.1609682. Repéré à <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1609682>
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas. Paris: Economica.
- Te Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2010). Applied hydrology. New York, NY: McGraw-Hill Education.

Yan, C., Rousse, D., & Glaus, M. (2019). Multi-criteria decision analysis ranking alternative heating systems for remote communities in Nunavik. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1488-1497. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.104>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618331184>

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012). *Hydrologie - Cheminement de l'eau* (2e édition éd.).
- Architecture sans frontières Québec. (2020). Résilience diluvienne. Repéré à <https://www.asf-quebec.org/nos-programmes/resilience-diluvienne/>
- Aronica, G., Hankin, B., & Beven, K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, 22(4), 349-365. doi: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(98\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(98)00017-7). Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170898000177>
- Ashley, S. T., & Ashley, W. S. (2008). Flood Fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 805-818. Repéré à <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/3/2007jamc1611.1.xml>
- Aubert, N. (2019). *Étude de l'évolution de la trajectoire des cours d'eau du bassin versant de la rivière Saint-Régis*.
- Audet, G., Beaudoin-Lebeuf, E., Charbonneau, V., & Pothier, G. (2020a). *Critères proposés en environnement pour l'analyse multicritères à Saint-Isidore - Avis professionnel de l'OBV SCABRIC*. Sainte-Martine.
- Audet, G., Beaudoin-Lebeuf, E., Charbonneau, V., & Pothier, G. (2020b). *Critères proposés en environnement pour l'analyse multicritères à Saint-Isidore - Avis professionnel de l'OBV SCABRIC*. Sainte-Martine.
- Bajamgnigni Gbambie, A. S., Poulin, A., Boucher, M., & Arsenault, R. (2017). Added Value of Alternative Information in Interpolated Precipitation Datasets for Hydrology. *Journal of Hydrometeorology*, 18(1), 247-264. Repéré à https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/18/1/jhm-d-16-0032_1.xml
- Baraër, M. (Producteur). (2017). BVE Sainte-Marthe.
- Beaulieu, R. (2016). *Historique de l'aménagement des cours d'eau agricoles*.
- Bélanger, D., Gosselin, P., & Poitras, P. (2006). *Changements climatiques au Québec méridional : perceptions des gestionnaires municipaux et de la santé publique*. SANTÉCom: Gouvernement du Québec.

- Bennett, J. C., Robertson, D. E., Ward, P. G. D., Hapuarachchi, H. A. P., & Wang, Q. J. (2016). Calibrating hourly rainfall-runoff models with daily forcings for streamflow forecasting applications in meso-scale catchments. *Environmental Modelling & Software*, 76, 20-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.006>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815215300979>
- Beven, K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(5), 2655-2670. doi: 10.5194/hess-24-2655-2020. Repéré à <https://hess.copernicus.org/articles/24/2655/2020/>
- Bizier, P. (1982). *Gravitary Sanitary Sewer Design and Construction No. 60*. New York: American Society of Civil Engineering.
- Bouchard, D., & Lucas Jacob, J. (2017). Mesure et suivi de l'adaptation aux enjeux d'inondations des Québécois aux niveaux individuel et organisationnel. Repéré à https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/Bouchard-Jacob_4C.pdf
- Brière, F. G. (2012). *Distribution et collecte des eaux* (3 éd.). Montréal: Presses internationales Polytechnique.
- Cannon, A. J., & Innocenti, S. (2019). Projected intensification of sub-daily and daily rainfall extremes in convection-permitting climate model simulations over North America: implications for future intensity–duration–frequency curves. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19(2), 421-440. doi: 10.5194/nhess-19-421-2019. Repéré à <https://nhess.copernicus.org/articles/19/421/2019/>
- Champagne, S. (2020). Sainte-Marthe-sur-le-Lac: un an, une digue et des millions plus tard *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/2020-04-27/sainte-marthe-sur-le-lac-un-an-une-digue-et-des-millions-plus-tard>
- Chayer, M. (2016). Il y a 20 ans : le déluge du Saguenay. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/793158/deluge-saguenay-20-ans-1996-inondation>
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479, 200-214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.062>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412010414>
- Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*. New-York, NY, USA: McGraw-Hill Book Co.
- Cianconi, P., Betrò, S., & Janiri, L. (2020). The Impact of Climate Change on Mental Health: A Systematic Descriptive Review. *Front Psychiatry*, 11, 74. doi: 10.3389/fpsy.2020.00074

- CIVILTECH. (2017). The Benefits of Hydrologic/Hydraulic Modeling: A Case Study. Repéré à <https://civiltechinc.com/the-benefits-of-hydrologic-hydraulic-modeling-a-case-study/>
- Coates, L. (1999). Flood Fatalities in Australia, 1788-1996. *Australian Geographer*, 30(3), 391-408. doi: 10.1080/00049189993657. Repéré à <https://doi.org/10.1080/00049189993657>
- Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu. (2020). Inondations de 2011 - Portrait. Repéré à <https://covabar.qc.ca/plan-directeur-eau/portrait/risques-naturels/portrait-des-inondations-de-2011/>
- Comité scientifique en soutien à l'élaboration du plan d'action gouvernemental en aménagement du territoire relatif aux inondations. (2019). *POUR UNE GESTION RESPONSABLE DES ZONES À RISQUE D'INONDATIONS Recommandations du Comité scientifique en soutien à l'élaboration du plan d'action gouvernemental en aménagement du territoire relatif aux inondations* Repéré à https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications-adm/documents/plan_protection_territoire_face_aux_inondations/RAP_comite_scientifique_e_inondations.pdf?1622233445.
- Côté, G. (2006). L'érection de la croix du mont Royal. *Mens*, 7(1), 47-72. doi: <https://doi.org/10.7202/1024222ar>. Repéré à <https://id.erudit.org/iderudit/1024222ar>
- Croteau, M. (2019). Inondations: le Québec paie le prix d'un demi-siècle de laxisme *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/2019-04-27/inondations-le-quebec-paie-le-prix-d-un-demi-siecle-de-laxisme>
- Cunge, J. A. (2003). Of data and models. *Journal of Hydroinformatics*, 5(2), 75-98. doi: 10.2166/hydro.2003.0007. Repéré à <https://doi.org/10.2166/hydro.2003.0007>
- D'Astous, C., & Paquet, L. (2004). Les inondations dans la région de Montréal.
- Dahm, R. (2014). Flood resilience a must for delta cities. *Nature*, 516(7531), 329-329. doi: 10.1038/516329d. Repéré à <https://doi.org/10.1038/516329d>
- Daley, W. R., Shireley, L., & Gilmore, R. (2001). A flood-related outbreak of carbon monoxide poisoning--Grand Forks, North Dakota. *J Emerg Med*, 21(3), 249-253. doi: 10.1016/s0736-4679(01)00380-8
- Daouda, O., Akkari, C., & Bryant, C. (2017). La coconstruction pour renforcer la résilience communautaire. Dans *La ville résiliente Comment la construire ?* (pp. 123-135). Montréal: Les Presses de l'Université de Montréal.

- de Bruijne, M. L. C., Boin, A., & van Eeten, M. J. G. (2010). Resilience. Exploring the concept and its meaning. Dans *Designing Resilience. Preparing for extreme events* (pp. 13-32). University of Pittsburg Press.
- de Carufel, A. M. H. (2017). Les toits verts peinent à pousser à Montréal. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/actualites-en-societe/504033/environnement-les-toits-verts-peinent-a-pousser-a-montreal>
- de Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16(4), 1019-1033. doi: 10.5194/nhess-16-1019-2016. Repéré à <https://nhess.copernicus.org/articles/16/1019/2016/>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.828>. Repéré à <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.828>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001273>
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P. D., Freer, J. E., & Beven, K. J. (2010). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 55(3), 364-376. doi: 10.1080/02626661003683389. Repéré à <https://doi.org/10.1080/02626661003683389>
- Diaz-Nieto, J., & Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, 69(2), 245-268. doi: 10.1007/s10584-005-1157-6. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s10584-005-1157-6>
- Direction de l'expertise hydrique. (2018). *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Québec.
- E. Dahlke, H. (2014, Septembre 2). Discharge measurment using the fluorescent dye dilution method with de FL30 field fluorometer. Repéré
- Ecology Ottawa. (2020). Infrastructures vertes. Repéré à <https://ecologieottawa.ca/infrastructures-vertes/>

- Essou, G. R. C., Sabarly, F., Lucas-Picher, P., Brissette, F., & Poulin, A. (2016). Can Precipitation and Temperature from Meteorological Reanalyses Be Used for Hydrological Modeling? *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 1929-1950. Repéré à https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/17/7/jhm-d-15-0138_1.xml
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2019). ERA5-Land. Repéré à <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>
- European Environment Agency. (2016). *Urban adaptation to climate change in Europe 2016 - Transforming cities in a changing climate* (n° No 12/2016).
- Fisher, L. (2015). Disaster responses: More than 70 ways to show resilience. *Nature*, 518(7537), 35. doi: 10.1038/518035a
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378006000379>
- Fortin, B., Martel, C., & Trahan, P. (2012). Impacts psychologiques et sociaux de l'inondation du Richelieu en 2011: Institut national de santé publique,.
- Généreux, M., Maltais, D., & Gachon, P. (2020). Inondations 2019 - Des impacts psychosociaux évitables. Repéré à <https://www.actualites.uqam.ca/2020/inondations-2019-des-impacts-psychosociaux-importants-mais-evitables>
- Girard, S., 2019a. Nappe phréatique.
- Girard, S., 2019b. Réseau d'égoûts à Saint-Isidore.
- Gouvernement du Canada. (2010a). Les inondations : renseignements généraux. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/inondations/renseignements-generaux.html#économique>
- Gouvernement du Canada. (2010b). Les inondations au Canada : Québec. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/inondations/quebec.html>
- Gouvernement du Canada. (2013a). Les causes des inondations. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/causes-inondation.html>
- Gouvernement du Canada. (2013b). Qu'est-ce qu'une inondation. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/campagne/prevention-inondation/inondation.html>

- Gouvernement du Canada. (2020). Données historiques. Repéré à https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html
- Graf, H., & Altinakar, M. (2008). *Hydraulique fluviale : Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Guitouni, A., Bélanger, M., & Martel, J.-M. (2010). *Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères*. Valcartier.
- Info-Sols. (2019). Informations géographiques sur les terres agricoles. Repéré à <http://www.info-sols.ca/>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. (2008). Carte pédologique, feuillet 31H05102.
- Institut national de santé publique. (2020a). Inondations, des catastrophes coûteuses. Repéré à <http://www.monclimatmasante.qc.ca/inondations.aspx>
- Institut national de santé publique. (2020b). Surveillance de la crue des eaux. Repéré à <https://geoegl.msp.gouv.qc.ca/adnv2/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects* (Cambridge University Press éd.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis - Method and Software*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Jutras, S. (2019a). Vidéo 1 - Introduction. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=IuG8DR3ZBDQ&feature=youtu.be>
- Jutras, S. (2019b). Vidéo 2 - Hydrographie linéaire. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=8Y3yxjqLw0Y&t=903s>
- Jutras, S. (2019c). Vidéo 3 - Correction des ponceaux. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=jvur8Iqqhgq>
- La Financière agricole du Québec. (2019). Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées. Repéré à <https://www.fadq.qc.ca/fr/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees>
- Laganier, R. (2013). Améliorer les conditions de la résilience urbaine dans un monde pluriel : des défis et une stratégie sous contrainte. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 4(4), 65-71. doi: <https://doi.org/10.3917/re.072.0065>

- Lemmen, D. S., Warren, F. J., Barrow, E., Schwartz, R., Andrey, J., Mills, B., & Riedel, D. (2004). *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Sa majesté la Reine du chef du Canada Repéré à https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/perspective/pdf/report_f.pdf.
- Lepage, M.-P., & Bourgeois, G. (2011). *Le réseau québécois de stations météorologiques*. Sa Majesté la Reine du chef du Canada. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., Davis, D. W., & Stakhiv, E. Z. (2008). Private and Public Responses to Flood Risks. *International Journal of Water Resources Development*, 24(4), 541-553. doi: 10.1080/07900620801923286. Repéré à <https://doi.org/10.1080/07900620801923286>
- Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2004). PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 307-317. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X). Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722170300153X>
- Mahaut, V. (2017). La gestion des eaux urbaines en évolution. Dans *La ville résiliente Comment la construire ?* (pp. 175-189). Montréal: Les Presses de l'Université de Montréal.
- Mailhot, A., Panthou, G., & Talbot, G. (2014). *Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec PHASE II*. Repéré à <http://espace.inrs.ca/id/eprint/2421/1/R001515.pdf>
- Maisonnette, V. (2017). Le 14 juillet 1987, c'était le déluge à Montréal! . *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1045083/30-ans-deluge-montreal-pluie-inondations-14-juillet-1987>
- Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux de pluviales. (2017).
- Martel, J.-L., Brissette, F., & Poulin, A. (2020). Impact of the spatial density of weather stations on the performance of distributed and lumped hydrological models. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 45(2), 158-171. doi: 10.1080/07011784.2020.1729241. Repéré à <https://doi.org/10.1080/07011784.2020.1729241>

- Martel, J.-L., Mailhot, A., & Brissette, F. (2020). Global and Regional Projected Changes in 100-yr Subdaily, Daily, and Multiday Precipitation Extremes Estimated from Three Large Ensembles of Climate Simulations. *Journal of Climate*, 33(3), 1089-1103. Repéré à <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/3/jcli-d-18-0764.1.xml>
- Martel, J., Demeester, K., Brissette, F., Poulin, A., & Arsenault, R. (2017). HMETs-A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts. *International Journal of Engineering Education*, 33, 1307-1316.
- Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Šeparović, L., & Dugas, B. (2013). Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Climate Dynamics*, 41(11), 2973-3005. doi: 10.1007/s00382-013-1778-9. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1778-9>
- Maskinongé, A. (2020). Ruissellement. Repéré à <https://www.agirmaskinonge.com/ruissellement>
- Mathevet, T. (2005). *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants* (École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Paris).
- Mayer-Jouanjan, I., & Bleau, N. (2018). *Projet 551013: Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées*. Montréal.
- Mercier, C. (2019). La fréquence des inondations, un casse-tête pour les agriculteurs. *Radio-Canada*.
- Mersy, C., Maisonneuve, V., Limoges, C., Labbé, F., & La Presse Canadienne. (2011). Les conséquences des inondations. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/517726/inondations-impacts>
- MET Office. (2012). Water cycle diagram. Repéré à <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/met-office-for-schools/other-content/other-resources/water-cycle/>
- Meylan, P., & Musy, A. (1999). *Hydrologie fréquentielle*. Bucarest.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015). *Guide d'interprétation Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*. Québec: Gouvernement du Québec.

- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2017). *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux de pluviales*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/manuel-calcul-conception/index.htm>.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2019a). Gestion intégrée des ressources en eau par bassins versants. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/gire-bassins-versants.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2019b). Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques. Repéré à <https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/default.asp>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2020). Service Info-Climat. Repéré à <https://environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/produits.htm>
- Ministère du Développement durable de l'Environnement, d. l. F. e. d. P., & Ministère des Affaires municipales des Régions et de l'Occupation du territoire. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales*. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2017). *Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec*.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2021). Zones inondables - Informations générales. Repéré à <https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/index.htm>
- Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. (2018). 100e anniversaire du Ministère ; Aménagement du territoire et urbanisme. Repéré à <https://www.mamh.gouv.qc.ca/ministere/100e-anniversaire-du-ministere/le-saviez-vous/amenagement-du-territoire-et-urbanisme/>
- Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. (2020). *Des solutions durables pour mieux protéger nos milieux de vie - Plan de protection du territoire face aux inondations*. Repéré à https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protection_territoire_inondations/PLA_inondations.pdf.
- Montembeault, M. (2017). Un printemps « désastreux » pour les agriculteurs de la région. *Radio-Canada*.

- Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2008). General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. Dans S. Sorooshian, K.-L. Hsu, E. Coppola, B. Tomassetti, M. Verdecchia & G. Visconti (Éds.), *Hydrological Modelling and the Water Cycle: Coupling the Atmospheric and Hydrological Models* (pp. 1-24). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-77843-1_1. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_1
- Morse, B., & Turcotte, B. (2018). *Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (volet A)*.
- Murray, J.-F., 2021. Communication personnelle, .
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>. Repéré à <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153&t=3>
- N. Moriasi, D., W. Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. doi: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>. Repéré à <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=46548&t=3>
- OBV Société de conservation et d'aménagement des bassin versants de la Zone Châteauguay. RIVIÈRE SAINT-RÉGIS CURRICULUM VITAE. Repéré à http://scabric.ca/images/documents/projets_en_cours/CV%20Rivière%20Saint-Régis.pdf
- Ordre des ingénieurs du Québec. (2020). Authentification des documents d'ingénierie. Dans *Guide de pratique professionnelle*.
- Ouranos. (2018). LES INONDATIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES. Repéré à <https://ouranos2021.demotriade.ca/wp-content/uploads/FicheAvisInondation2018-Fr.pdf>
- Paiement, A. (2017). *Diagnostic : Stabilisation de la digue en bordure du lac des Deux-Montagnes Sainte-Marthe-sur-le-Lac*.
- Perch-Nielsen, S. L. (2010). The vulnerability of beach tourism to climate change—an index approach. *Climatic Change*, 100(3), 579-606. doi: 10.1007/s10584-009-9692-1. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9692-1>
- Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, RLRQ c Q-2, r 35, Loi sur la qualité de l'environnement RLRQ c Q-2 (2018).

- Public Health England. (2014). Flooding: frequently asked health questions. Repéré à https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20140714060335/http://www.hpa.org.uk/web/HPAweb&HPAwebStandard/HPAweb_C/1213686561005
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 62-70.
- Reynolds, J. E., Halldin, S., Seibert, J., Xu, C. Y., & Grabs, T. (2020). Robustness of flood-model calibration using single and multiple events. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 842-853. doi: 10.1080/02626667.2019.1609682. Repéré à <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1609682>
- Rivard, G. (2005). *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain concepts et applications* (2 éd.). Laval: Alias communication design inc.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica.
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas*. Paris: Economica.
- Samuels, P. G. (1990). *Cross-section location in 1-D models* présentée à International Conference on River Flood Hydraulics at Hydraulics Research, Wallingford, UK.
- Savoie, V. (2011). *Le drainage agricole : problèmes, diagnostic et solutions*.
- Tairou, F. O., Bustinza, R., Gosselin, P., & Bélanger, D. (2011). *Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés aux précipitations non hivernales, aux inondations, aux glissements de terrain et à la sécheresse*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/es/node/3437>.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. Repéré à <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/4/bams-d-11-00094.1.xml>
- Tempels, B., & Hartmann, T. (2014). A co-evolving frontier between land and water: dilemmas of flexibility versus robustness in flood risk management. *Water International*, 39(6), 872-883. doi: 10.1080/02508060.2014.958797. Repéré à <https://doi.org/10.1080/02508060.2014.958797>
- Thomas, I., & Bleau, N. (2017). L'analyse de la vulnérabilité sociale et territoriale. Dans *La ville résiliente Comment la construire ?* (pp. 137-153). Montréal: Les Presses de l'Université de Montréal.

- Thomas, I., & Da Cunha, A. (2017). *La ville résiliente : comment la construire?* Les Presses de l'Université de Montréal.
- Trewin, B. (2015). Classic Examples of Inhomogeneities in Climate Datasets. Repéré à http://etccli.pacificclimate.org/docs/Classic_Examples.pdf
- TVA Nouvelles. (2019). Sainte-Marthe-sur-le-Lac survolée par l'hélicoptère TVA Nouvelles. Repéré à <https://www.tvanouvelles.ca/2019/04/28/des-images-de-la-digue-qui-cede>
- Ville de Saint-Jérôme. (2009). Le bassin de rétention du parc Schulz à Saint-Jérôme. Repéré à <https://www.repertoire.info/bonnespratiques/details/440>
- 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. doi: <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>. Repéré à <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014RG000464>
- Yan, C., Rousse, D., & Glaus, M. (2019). Multi-criteria decision analysis ranking alternative heating systems for remote communities in Nunavik. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1488-1497. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.104>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618331184>