

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

**GESTION DES EAUX PLUVIALES ET CHANGEMENTS
CLIMATIQUES**

PAR

Alain MAILHOT

Samuel BOLDUC

Guillaume TALBOT

Dikra KHEDHAOURIA

RAPPORT NO R-1418

VERSION FINALE

AOÛT 2014



ISBN : 978-2-89146-825-1

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les villes qui ont participé à ce projet et les personnes qui ont contribué directement à la réussite de ce projet.

Nous tenons également à remercier les membres du comité de suivi du projet qui nous ont généreusement accordé de leur temps et dont les avis ont permis de bonifier le projet : M. Sébastien Biner, Mme Barbara Casati et Mme Caroline Larrivée du consortium Ouranos, M. David Huard de David Huard Solutions, M. Denis Isabel de la firme SNC-Lavalin, M. Hervé Logé de la ville de Montréal, M. Jean Painchaud du MDDEFP, Mme Isabelle Boucher et M. Michel Duchesne du MAMROT et Mme Isabelle Tardif du CERIU.

Un grand merci également à l'équipe impacts et adaptation du consortium Ouranos et particulièrement à Mme Caroline Larrivée et M. Alain Bourque qui nous ont épaulés tout au long de la réalisation de ce projet. Nous voulons manifester notre sincère reconnaissance à l'équipe de science du climat qui nous a fait bénéficier de sa précieuse expertise et des données du MRCC et notamment M. Daniel Caya, Mme Anne Frigon, M. Ramon de Elía, Mme Hélène Côté et Mme Diane Chaumont. Un merci spécial à M. Blaise Gauvin St-Denis qui a répondu de façon si aimable et si diligente à nos nombreuses demandes.

Nous désirons souligner la participation des professeurs Geneviève Pelletier et Sophie Duchesne à ce projet. La professeure Pelletier a contribué à l'encadrement de l'un des étudiants impliqués dans le projet (Christophe Vidil) dont les travaux font parties intégrante du présent rapport. La professeure Duchesne a pour sa part participé aux discussions et aux travaux sur la conception et les changements climatiques.

Ce projet a permis d'établir des contacts avec d'autres équipes de recherche œuvrant dans le domaine de l'impact et de l'adaptation aux changements climatiques en milieu urbain. A cet égard, nous voulons souligner la contribution de la professeure Danielle Dagenais de la faculté de l'aménagement à l'Université de Montréal de même que son assistante de recherche Mme Andrea Spector. A souligner également, la collaboration et la contribution de la professeure Sarah Dorner de l'École Polytechnique de Montréal et

de son équipe, notamment, Mme Laurène Autixier, alors étudiante à la maîtrise et maintenant assistante de recherche dans l'équipe de la professeure Dorner.

Les coûts relatifs aux travaux de ce projet ont été assumés par Ouranos grâce au Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre de l'action 26 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

Les travaux sont également réalisés en collaboration avec Ressources naturelles Canada.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Une modification des régimes pluviométriques, conséquence de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, risque d'avoir des impacts majeurs en matière de gestion des eaux en milieu urbain puisque les infrastructures et systèmes en place ont été conçus à partir des séries de pluie historique. Cette conception reposant sur l'hypothèse d'un climat stationnaire, le niveau de service et de risque ainsi établi est supposé représentatif et valable durant toute la durée de vie utile des ouvrages. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes aura pour conséquence des dépassements plus fréquents et de plus forte amplitude par rapport à la capacité des ouvrages en place.

Le présent projet visait deux objectifs principaux : 1) évaluer les impacts des changements climatiques sur les niveaux de service de différents secteurs urbains existants en matière d'évacuation des eaux pluviales; et 2) évaluer le potentiel de diverses mesures d'adaptation afin de maintenir un niveau de service équivalent au niveau de service historique ([1961-1990]) en climat futur ([2041-2070]). Six secteurs ont ainsi été retenus, deux drainés par un réseau unitaire (secteurs B et C) et quatre par des réseaux séparés (secteurs A, D, E et F).

Le modèle SWMM version 5 a été utilisé pour la modélisation des six secteurs sous étude. Une pluie de conception de type SEA de durée une heure a été considérée et majorée de 15 % pour représenter les pluies de la période 2041-2070. Trois périodes de retour ont été retenues pour fin d'analyse à savoir 2, 5 et 10 ans. Plusieurs indicateurs ont été définis pour quantifier les impacts des changements climatiques sur la performance de ces secteurs. Un premier groupe s'intéresse aux volumes infiltrés, de rétention de surface, de surverse et acheminés à l'usine alors qu'un second groupe mesure l'ampleur et l'étendue des surcharges en réseau et des risques d'inondation.

Différents scénarios d'adaptation ont été élaborés et évalués pour chacun des secteurs sous étude. Ces scénarios se composent des mesures suivantes : 1) programme de débranchement de gouttière; 2) mise en place de systèmes de biorétention; 3) redimensionnement de conduites; 4) optimisation des bassins de rétention existants. Les scénarios d'adaptation mis en place pour chacun des secteurs varient en fonction

de l'occupation du territoire, des configurations et des problématiques spécifiques rencontrées (p. ex. contraintes hydrauliques).

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- On assiste à un accroissement (à des degrés divers) de la vulnérabilité des secteurs et une baisse généralisée des niveaux de service (risque accru d'inondation et de refoulements en réseau) en climat futur. La vulnérabilité d'un secteur est d'autant plus grande que ce secteur comporte une fraction importante de surfaces imperméables directement connectées et que son niveau de service est problématique en climat historique.
- Aucun des scénarios d'adaptation simulés ne permet de retrouver les volumes de ruissellement obtenus en climat historique. De même, aucun des scénarios d'adaptation examinés ne permet, même dans les conditions d'infiltration les plus favorables, de ramener les volumes de surverses ou les volumes rejetés au milieu récepteur au niveau historique et ce même pour la période de retour 2 ans.
- Les scénarios d'adaptation de types débranchement de gouttière et systèmes de biorétention permettent de diminuer l'étendue des zones de mise en charge, entraînant une diminution des risques liés aux refoulements en réseau. Ce type de mesures ne permet pas à lui seul (dans le contexte d'application considéré) de récupérer les niveaux de service historiques.
- L'efficacité des mesures de contrôle à la source sur les risques d'inondations et de refoulement dépendent de plusieurs facteurs locaux (configurations des réseaux, particularités hydrauliques locales).
- Le redimensionnement de conduite est la mesure qui a le plus d'impact sur les mises en charge et les inondations. Ces mesures répondent à des problématiques locales précises que les simulations hydrauliques des réseaux ont rapidement mis en évidence.
- Si les mesures de contrôle présentent un intérêt certain pour qui veut améliorer la performance d'un réseau, les applications considérées suggèrent qu'elles ne peuvent à elles seules permettre une adaptation adéquate des systèmes existants aux

changements climatiques, particulièrement pour les événements de pluie les plus intenses. D'autres mesures telles que l'ajout de capacité de rétention sont à envisager ou encore toute mesure qui permettrait d'éliminer tout dysfonctionnement hydraulique.

L'exercice précédent demeure théorique. En effet, les conditions d'infiltration des aménagements de biorétention sont optimales et correspondent à celles prévalent lors de la mise en fonction de ces aménagements. Les performances obtenues pourraient se dégrader avec le temps si l'entretien de ces ouvrages est déficient. L'entretien et l'efficacité à long terme des systèmes de biorétention (et de tous les systèmes de ce type) demeurent un enjeu central (problèmes de colmatage, performance en conditions hivernales en présence de sel de déglacage et d'épandage de sable).

Une analyse économique (réalisée par la firme AECOM) a également été conduite. Elle avait pour principal objectif de déterminer si les coûts de l'adaptation aux changements climatiques se traduisaient par des gains économiques supérieurs en termes de réduction des dommages (analyse coût/bénéfice des mesures d'adaptation proposées). Seul le secteur E a pu être étudié. Quatre scénarios d'adaptation ont été retenus : débranchement des gouttières, optimisation des bassins de rétention, construction de systèmes de biorétention et redimensionnement de tronçons du réseau. L'évaluation des avantages de chaque scénario d'adaptation se fait en mettant en balance les coûts des dommages que la mise en place de ce scénario permet d'éviter et les coûts des dommages dans le cas où aucune mesure d'adaptation n'est mise en place. L'étude économique révèle : 1) le secteur est peu vulnérable et le niveau de dommage historiquement faible; 2) qu'aucun des scénarios d'adaptation proposé n'est économiquement rentable pour ce secteur ; et 3) que le scénario de débranchement des gouttières (scénario 1) est le plus avantageux, suivi par le scénario d'optimisation des bassins de rétention (scénario 2), le scénario de redimensionnement des conduites (scénario 4) et enfin le scénario de construction des cellules de biorétention (scénario 3). Il convient de noter toutefois que les dommages considérés dans cette étude sont des dommages directs (bâtiments, infrastructures) et n'incluent pas les dommages indirects (p. ex. perturbation des activités économiques) ni les dommages et co-bénéfices environnementaux (p. ex. érosion des berges, détérioration des milieux récepteurs), par ailleurs très difficiles à évaluer.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
2.1. Impacts des CC sur la gestion des eaux pluviales	7
2.2. Études d'impacts et adaptation aux CC en gestion des eaux pluviales	10
2.3. Synthèse des travaux publiés et contribution originale de la présente étude.....	13
CHAPITRE 3 : PROJECTIONS CLIMATIQUES.....	17
3.1. Pluies extrêmes	18
3.2. Événements de pluie.....	22
3.2.1. Définition et caractéristiques d'un événement de pluie.....	23
3.2.2. Séries historiques et événements de pluie	23
3.2.3. Caractéristiques observées et simulées et projections en climat futur	41
3.3. Pluies hivernales	41
3.3.1. Tendances historiques.....	42
3.3.2. Comparaison des indices de pluies hivernales simulés et observés	45
3.3.3. Évolution des pluies hivernales en climat futur	50
CHAPITRE 4 : MISE EN PLACE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE	57
4.1. Occupation du territoire	60
4.2. Superficie et représentation spatiale des sous-bassins de drainage	60
4.3. Surfaces imperméables et perméables.....	61
4.4. Surface imperméable directement connectée (SIDC).....	62
4.5. Infiltration.....	64
4.6. Coefficient de rugosité de Manning.....	70
4.7. Pertes par dépression.....	72
CHAPITRE 5 : DESCRIPTION ET REPRÉSENTATION DES SECTEURS RETENUS	75
5.1. Secteur A.....	75
5.1.1. Surfaces imperméables et perméables	78
5.1.2. Modélisation.....	79
5.2. Secteur B.....	81
5.2.1. Surfaces imperméables et perméables	82
5.2.2. Modélisation.....	84

5.3. Secteur C	86
5.3.1. Surfaces imperméables et perméables	88
5.3.2. Modélisation.....	89
5.4. Secteur D	92
5.4.1. Surfaces perméables et imperméables	93
5.4.2. Modélisation.....	95
5.5. Secteur E	96
5.5.1. Surfaces imperméables et perméables	98
5.5.2. Modélisation.....	100
5.6. Secteur F	104
5.6.1. Surfaces imperméables et perméables	104
5.6.2. Modélisation.....	107
CHAPITRE 6 : MODÉLISATION ET SIMULATION HYDROLOGIQUE DES SECTEURS SOUS ÉTUDE	109
6.1. Paramétrisation des modèles	109
6.2. Pluies considérées et projections climatiques	111
6.3. Indicateurs de performances	113
6.3.1. Nombre de nœuds critiques et Moyenne des dépassements maximaux	114
6.3.2. Inondation	115
6.3.3. Infiltration-Évaporation-Rétention	116
6.3.4. Ruissellement	116
6.3.5. Usine 116	
6.3.6. Surverse.....	116
6.3.7. Milieu récepteur	117
6.3.8. Débit maximal	117
CHAPITRE 7 : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DÉVERSEMENTS DE RÉSEAU UNITAIRE (DRU)	119
7.1. Données utilisées	120
7.2. Modèle probabiliste d'occurrence des DRU	123
7.3. Relations entre durées des DRU et caractéristiques des pluies	127
7.4. Application aux séries historiques de pluie	130
7.5. Estimation des caractéristiques des DRU en climat futur	132
7.5.1. Fréquences et durées des DRU en climat historique	133
7.5.2. Fréquences et durées des DRU en climat futur.....	135
CHAPITRE 8 : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SECTEURS RETENUS	141
8.1. Indicateurs de performance et comparaison des performances en climat futur et historique	142
8.2. Secteurs desservis par des réseaux unitaires (B et C)	148

8.2.1. Répartition des volumes supplémentaires de pluie	148
8.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	154
8.2.3. Indicateur Moyenne des dépassements maximaux du seuil critique	156
8.2.4. Indicateur Inondation	158
8.2.5. Synthèse des résultats.....	160
8.3. Secteurs desservis par des réseaux pluviaux (A, D, E et F)	161
8.3.1. Répartition des volumes supplémentaires de pluie	161
8.3.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	163
8.3.3. Indicateur Moyennes des dépassements maximaux du seuil critique	166
8.3.4. Indicateur Inondation	168
8.3.5. Synthèse des résultats.....	172
8.4. Impacts des CC sur le niveau de service des secteurs sous étude :	
 synthèse globale	173
CHAPITRE 9 : ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	177
9.1. Mesures d'adaptation aux CC	177
9.1.1. Débranchement de gouttières.....	178
9.1.2. Systèmes de biorétention	180
9.1.3. Redimensionnement de conduites.....	185
9.1.4. Optimisation manuelle des bassins de rétention	186
9.2. Scénarios d'adaptation retenus pour chaque secteur.....	186
9.2.1. Secteur A	186
9.2.1.1. Débranchement de gouttières.....	187
9.2.1.2. Systèmes de biorétention.....	188
9.2.2. Secteur B	190
9.2.2.1. Débranchement de gouttières.....	191
9.2.2.2. Systèmes de biorétention.....	192
9.2.3. Secteur C	193
9.2.3.1. Débranchement de gouttières.....	195
9.2.3.2. Systèmes de biorétention.....	196
9.2.4. Secteur D	197
9.2.4.1. Débranchement de gouttières.....	199
9.2.4.2. Systèmes de biorétention.....	201
9.2.4.3. Redimensionnement de conduites.....	204
9.2.5. Secteur E	205
9.2.5.1. Débranchement de gouttières.....	206
9.2.5.2. Optimisation manuelle des bassins de rétention.....	208
9.2.5.3. Systèmes de biorétention.....	211
9.2.5.4. Redimensionnement de conduites.....	213
9.3. Indices de comparaison des niveaux de service en climat futur et	
 historique	216
9.4. Secteurs desservis par des réseaux unitaires	217
9.4.1. Secteur C	218
9.4.1.1. Indicateurs Surverse et Usine	219
9.4.1.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	221
9.4.1.3. Indicateur Inondation.....	224

9.4.1.4. Synthèse des résultats pour le secteur C.....	226
9.4.2. Secteur B	227
9.4.2.1. Indicateur Surverse et Usine	227
9.4.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	230
9.4.2.3. Indicateur Inondation.....	231
9.4.2.4. Synthèse des résultats pour le secteur B.....	232
9.5. Secteurs desservis par des réseaux pluviaux.....	233
9.5.1. Secteur A	234
9.5.1.1. Indicateur Ruissellement.....	234
9.5.1.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	236
9.5.1.3. Indicateur Inondation.....	238
9.5.1.4. Synthèse des résultats pour le secteur A.....	239
9.5.2. Secteur D.....	240
9.5.2.1. Indicateur Ruissellement.....	240
9.5.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	243
9.5.2.3. Indicateur Inondation.....	244
9.5.2.4. Synthèse des résultats pour le secteur D.....	246
9.5.3. Secteur E	247
9.5.3.1. Indicateur Ruissellement.....	247
9.5.3.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques	249
9.5.3.3. Indicateur Inondation.....	251
9.5.3.4. Synthèse des résultats pour le secteur E.....	252
CHAPITRE 10 : COMPARAISON DES SECTEURS	255
10.1. Caractéristiques des secteurs sous étude	255
10.2. Impacts des changements climatiques.....	257
10.3. Adaptation aux changements climatiques	259
10.4. Synthèse des principaux résultats	266
CHAPITRE 11 : SENSIBILITÉ AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES	269
11.1. Sensibilité des fractions infiltrées et rejetées en surverse ou au milieu récepteur.....	270
11.2. Sensibilité des indices adaptation des différents indicateurs	272
11.3. Synthèse des principaux résultats	277
CHAPITRE 12 : VOLET ANALYSE ÉCONOMIQUE	281
12.1. Sommaire exécutif du rapport AECOM	281
CHAPITRE 13 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	293
CHAPITRE 14 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	313
ANNEXE 1 : PROPOSITION INITIALE DU PROJET	337

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Simulations NARCCAP utilisées pour l'analyse des pluies intenses (pour une description des différents MRC et MGC voir le site du NARCCAP à l'adresse http://www.narccap.ucar.edu).	20
Tableau 3.2 : Caractéristiques des stations retenues (aéroports) pour l'analyse de tendances. Période de Mai à Octobre	27
Tableau 3.3 : Tendances des médianes des valeurs annuelles de hauteurs (mm), durée(h) et hauteur maximale sur une heure (mm) des événements de pluie. Les valeurs -1, 0 et 1 correspondent respectivement à une tendance négative, nulle et positive (niveau de confiance 95 %).	27
Tableau 3.4 : Tendances des 90 ^e percentiles des valeurs annuelles de hauteurs (mm), durée (h) et hauteur maximale sur une heure (mm) des événements de pluie. Les valeurs -1, 0 et 1 correspondent respectivement à une tendance négative, nulle et positive (niveau de confiance 95 %).	27
Tableau 3.5 : Nombre de stations pour l'ensemble du Canada avec tendances significatives (niveau de confiance 95 %) sur les séries annuelles des médianes. Le nombre entre parenthèses correspond aux nombres de stations avec des tendances positives.....	29
Tableau 3.6 : Pourcentage de stations avec tendances significatives (niveau de confiance 95 %) pour les différents indices de pluies hivernales (pluie durant les mois de janvier et février). Les nombres entre parenthèses correspondent aux pourcentages de stations avec des tendances positives.	43
Tableau 3.7 : Simulations NARCCAP utilisées pour l'analyse des pluies hivernales (pour une description des différents MRC et MGC voir le site du NARCCAP à l'adresse http://www.narccap.ucar.edu).	45

Tableau 4.1 : Liste des secteurs à l'étude.....	59
Tableau 4.2 : Liste des informations à colliger et à préciser pour les sous-bassins de drainage et les conduites lors de la mise en place du modèle EPA SWMM.....	60
Tableau 4.3 : Type et caractéristiques des sols dominant pour chacun des secteurs à l'étude.....	67
Tableau 4.4 : Valeurs attribuées aux capacités d'infiltration à l'équilibre (f_{∞}) de l'équation d'infiltration de Horton selon Musgrave (1955) et USDA (1986).	68
Tableau 4.5 : Capacités d'infiltration à l'équilibre f_{∞} pour différents sols selon Rawls <i>et al.</i> (1983).....	69
Tableau 4.6 : Valeurs attribuées au coefficient de décroissance α de l'équation d'infiltration de Horton.....	70
Tableau 4.7 : Valeurs attribuées au coefficient de rugosité de Manning n pour les surfaces imperméables selon différentes sources.....	71
Tableau 4.8 : Valeurs attribuées au coefficient de rugosité de Manning n pour les surfaces perméables selon différentes sources.....	72
Tableau 4.9 : Valeurs attribuées aux pertes par dépression (mm) pour les surfaces imperméables selon différentes sources.	73
Tableau 4.10 : Valeurs attribuées aux pertes par dépression (mm) pour les surfaces perméables selon différentes sources.....	74
Tableau 5.1 : Caractéristiques générales des sous-bassins de drainage selon la représentation fournie par la ville et celle développée dans le cadre de la présente étude pour le secteur A.....	80

Tableau 6.1 : Valeurs maximales, minimales et médianes des différents paramètres du modèle EPA SWMM (voir Chapitre 4 pour une description de ces paramètres).....	110
Tableau 6.2 : Hauteurs totales (en mm) des pluies de durées 1 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans aux différentes stations pluviométriques.....	113
Tableau 6.4 : Liste des indicateurs de performances pour chaque type de réseau.....	114
Tableau 7.1 : Ouvrages de surverse (ODS) sélectionnés avec le nombre de DRU enregistrés de mai à octobre entre 2007 et 2009 inclusivement, le numéro et la distance de la station météorologique associée (TP : Trop plein ; PP : Poste de pompage ; DEV : Déversoir d'orage ; REG : Régulateur de débit) (tiré de Fortier, 2013).....	122
Tableau 7.2 : Statistiques des coefficients de détermination des régressions entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU aux différents ODS sous étude (tiré de Fortier, 2013).	128
Tableau 7.3 : Variation relative (%) [(futur - historique)/historique] de la fréquence et de la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour l'ensemble des ODS et les simulations aet et aev (tiré de Fortier, 2013).	138
Tableau 8.1 : Sommaire du niveau de service en termes de risques hydrauliques en climat historique et futur pour la période de retour indiquée.....	175
Tableau 9.1 : Mesures d'adaptation retenues pour chacun des secteurs à l'étude	178
Tableau 9.2 : Pourcentage de SIIC et de SIDC avant et après la mise en place des programmes de DG pour les villes des secteurs E et F ainsi que les valeurs retenues pour la modélisation avant et après la mise en place d'un programme de DG.....	180

Tableau 9.3 : Caractéristiques des réservoirs de surface des systèmes de biorétention modélisés dans SWMM (Chapitre 7 de James <i>et al.</i> , 2010).....	183
Tableau 9.4 : Caractéristiques du terreau organique des systèmes de biorétention modélisés dans EPA SWMM.....	183
Tableau 9.5 : Caractéristiques du drain des systèmes de biorétention modélisés dans SWMM	184
Tableau 9.6 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur A.....	187
Tableau 9.7 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrées à la modélisation du secteur A dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.5 pour la localisation des zones imperméables).....	189
Tableau 9.8 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur B.....	191
Tableau 9.9 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur B dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.8 pour la localisation des zones imperméables).....	193
Tableau 9.10 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur C.....	196
Tableau 9.11 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur C dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.11 pour la localisation des zones imperméables).....	197
Tableau 9.12 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur D.....	200

Tableau 9.13 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur D dans le cadre du scénario d'adaptation BIO1 (voir Figure 9.14).	201
Tableau 9.14 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur D dans le cadre du scénario d'adaptation BIO2 (voir Figure 9.15)	203
Tableau 9.15 : Proportion des SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG sur l'ensemble du réseau de drainage E	207
Tableau 9.16 : Capacité maximale atteinte et débits de pointe à la sortie des bassins de rétention pour une pluie en climat futur de période de retour 20 ans du secteur E suite à la modification des structures de vidanges (voir Figure 5.24 pour une localisation des bassins)	209
Tableau 9.17 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur E dans le cadre des scénarios d'adaptation.	212
Tableau 9.18 : Domaines des valeurs possibles de l'indice adaptation, $x_{i,j}$, valeurs correspondantes des indicateurs de niveau de service et interprétation en termes des niveaux de service en climat futur par rapport au niveau de service historique et au niveau de service en climat futur sans adaptation	218
Tableau 10.1 : Aires et fractions occupées par les différents types de surfaces pour les secteurs sous étude.	256
Tableau 10.2 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (période 2041-2070).	257
Tableau 10.3 : Variations relatives des SIDC ($\Delta SIDC / SIDC$) des différents scénarios d'adaptation considérés.....	260

Tableau 10.4 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 2 et 5 ans).....	260
Tableau 10.5 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 2 et 5 ans).....	261
Tableau 10.6 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Inondation pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 5 et 10 ans)	261
Tableau 10.7 : Intervalles de valeurs de l'indice adaptation selon les différents indicateurs et périodes de retour pour une réduction de 10 % des SIDC.	268
Tableau 11.1 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (fraction pluie infiltrée).....	270
Tableau 11.2 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (fraction pluie surverse/milieu récepteur ³).	270
Tableau 11.3 : Scénarios d'adaptation retenus pour l'analyse de sensibilité aux hausses des intensités des précipitations.....	272
Tableau 11.4 : Indice adaptation pour l'indicateur Ruissellement en fonction des hausses des précipitations en climat futur (période de retour 2 et 5 ans).....	272
Tableau 11.5 : Indice adaptation pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction des hausses des précipitations en climat futur (période de retour 2 et 5 ans).	273

Tableau 11.6 : Indice adaptation pour l'indicateur Inondation (période de retour 5 ans) en fonction des hausses des précipitations en climat futur.....273

Tableau 11.7 : Classement des secteurs/scénarios d'adaptation du plus sensible au moins sensible selon les différents indicateurs et les différentes périodes de retour.....279

LISTE DES FIGURES

- Figure 3.1 : Carte localisant les stations de précipitations horaires utilisées dans le cadre de l'analyse par événement de pluie. Les couleurs indiquent le nombre d'années valides disponibles à chaque station.....25
- Figure 3.2 : Histogrammes des périodes couvertes par les séries horaires de précipitations aux différentes stations (les stations sont ordonnées en fonction de leur année de début d'opération).25
- Figure 3.3 : Logarithme des fréquences au non dépassement des hauteurs des évènements en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).....30
- Figure 3.4 : Logarithme des fréquences au non dépassement des intensités moyennes des évènements en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).31
- Figure 3.5 : Logarithme des fréquences au non dépassement des hauteurs maximales des évènements sur une heure en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).31
- Figure 3.6 : Cartes des médianes des distributions mensuelles des hauteurs de pluie (mm) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.32
- Figure 3.7 : Cartes des médianes des distributions mensuelles des hauteurs maximales (Hmax1h, mm) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.....33
- Figure 3.8 : Carte des médianes des distributions mensuelles intensités moyennes (Imoy, mm/h) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.....34

Figure 3.9 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées comprises entre 1 et 3 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).....	36
Figure 3.10 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées comprises entre 4 et 10 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).....	36
Figure 3.11 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées supérieures à 11 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).....	37
Figure 3.12 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées comprises entre 1 et 3 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.....	38
Figure 3.13 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées comprises entre 4 et 10 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.....	39
Figure 3.14 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées supérieures à 11 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.....	40
Figure 3.15 : Amplitudes des tendances détectées (jours/année) pour le nombre de jours avec pluie (mois de janvier et février).	44
Figure 3.16 : Amplitudes des tendances détectées (mm/année) pour la hauteur totale de pluie (mois de janvier et février).	44
Figure 3.17 : Écarts absolus (simulés – observés) entre les nombres annuels moyens de jours avec pluie hivernale pour chaque simulation (voir	

Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.	47
Figure 3.18 : Écarts absolus (simulés – observés) entre les moyennes annuelles des hauteurs de pluie hivernale pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.	48
Figure 3.19 : Écarts absolus (simulés – observés) entre les maxima annuels des intensités journalières de pluie hivernale pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.	49
Figure 3.20 : Boîtes à moustaches (<i>box plots</i>) des écarts absolus (simulés – observés) entre les valeurs des indices de pluie hivernale pour les différentes simulations (voir Tableau 3.7). La ligne du haut correspond aux boîtes à moustaches des valeurs estimées aux stations.	50
Figure 3.21 : Écarts absolus du nombre annuel moyen de jour avec pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.....	51
Figure 3.22 : Écarts absolus des moyennes annuelles des hauteurs de pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.....	52

Figure 3.23 : Écarts absolus des moyennes annuelles des intensités journalières maximales de pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.....	53
Figure 3.24 : Boîtes à moustaches (<i>box plots</i>) des écarts absolus (futur – historique) des indices de pluies hivernales entre les périodes [1960-2000] et [2041-2070] selon les différentes simulations (voir Tableau 3.7). La ligne du haut correspond aux boîtes à moustaches des valeurs estimées aux stations.....	54
Figure 4.1 : Représentation schématique de l'écoulement des eaux de ruissellement vers le réseau de conduites pour un sous-bassin de drainage avec le modèle EPA SWMM.....	57
Figure 4.2 : Représentation du modèle EPA SWMM d'un réseau de drainage fictif constitué de sous-bassins (SB), de conduites (C), de nœuds (N) et d'un exutoire (S) (les lignes pointillées indiquent le lien entre les sous-bassins et le nœud auquel ils se rattachent).....	58
Figure 4.3 : Représentation de la largeur d'écoulement (<i>width</i>) dans EPA SWMM5.....	61
Figure 4.4 : Distinction entre les surfaces imperméables directement connectées (SIDC) et les surfaces imperméables indirectement connectées (SIIC).	63
Figure 4.5 : Classification du drainage des sols des secteurs à l'étude.....	66
Figure 5.1 : Localisation et occupation du territoire du secteur A.	76
Figure 5.2 : Schéma des principales conduites du réseau A (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).	77
Figure 5.3 : Lien entre les secteurs A et B.	78

Figure 5.4 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur A (Toit _{pe} : toit en pente et Toit _{pl} : toit plat).	79
Figure 5.5 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur A (à gauche, la représentation d'origine fournie par la ville et à droite, celle développée dans le cadre de la présente étude).....	80
Figure 5.6 : Représentation du réseau A selon la représentation fournie par la ville à gauche et la représentation développée dans la présente étude à droite.....	81
Figure 5.7 : Occupation du territoire du secteur B.	82
Figure 5.8 : Schéma des principales conduites du réseau du secteur B (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).	83
Figure 5.9 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur B (Toit _{pe} : toit en pente et Toit _{pl} : toit plat).	83
Figure 5.10 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur B (À gauche, la représentation d'origine fournie par la ville et à droite, la représentation développée dans le cadre de la présente étude après redécoupage du territoire).....	85
Figure 5.11 : Représentation du réseau de B selon la représentation d'origine fournie par la ville à gauche et celle développée dans le cadre de la présente étude à droite.....	85
Figure 5.12 : Localisation et occupation du territoire du secteur C.	87
Figure 5.13 : Schéma des principales conduites du réseau desservant le secteur C (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).....	88
Figure 5.14 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur C (Toit _{pe} : toit en pente et Toit _{pl} : toit plat).	89

Figure 5.15 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur C.	90
Figure 5.16 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du réseau C.	91
Figure 5.17 : Profil en travers des rues ajoutées en parallèle des conduites dans la représentation du réseau C.	91
Figure 5.18 : Localisation et occupation du territoire du secteur D.	93
Figure 5.19 : Schéma des principales conduites du réseau D (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).	94
Figure 5.20 : Répartition des surfaces imperméables pour le réseau de drainage D (Toit _{Pe} : toit en pente et Toit _{Pi} : toit plat).	94
Figure 5.21 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du réseau D.	95
Figure 5.22 : Localisation et occupation du territoire du secteur E.	96
Figure 5.23 : Schéma des principales conduites, fossés et cours d'eau du secteur E (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).	97
Figure 5.24 : Localisation du ruisseau (trait bleu), des bassins de rétention (rectangles bleus) et de l'exutoire principal vers la rivière (triangle jaune).	99
Figure 5.25 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur E (Toit _{Pe} : toit en pente et Toit _{Pi} : toit plat).	100
Figure 5.26 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du secteur E.	102
Figure 5.27 : Portion du ruisseau du secteur E faisant office de bassin de rétention (PO-7) longitudinal avec une végétation dense.	103
Figure 5.28 : Déversoir par où les eaux passent des bassins de rétention PO-7 (à droite) à PO-1 (à gauche, ce bassin étant un terrain de baseball).	103

Figure 5.29 : Localisation et occupation du territoire projetée du secteur F (secteur jaune clair : développement résidentiel actuel ; secteur jaune foncé : développement résidentiel projeté).....	105
Figure 5.30 : Représentation d'un système à double drainage comprenant un réseau mineur et un réseau majeur (Source : Jihène Zaiem).....	106
Figure 5.31 : Schéma des principales conduites du réseau F selon le plan de gestion des eaux pluviales de la ville (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).	106
Figure 5.32 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du secteur F.	107
Figure 6.1 : Hyétoigrammes normalisés des pluies de conception : a) AES et b) triangulaire.	112
Figure 6.2 : Schématisation des indicateurs Nombre de nœuds critiques et Moyenne des dépassements maximaux pour les réseaux unitaires et pluviaux.....	115
Figure 7.1 : Localisation des ODS sélectionnés. La couleur des points représente le nombre d'ODS sélectionnés situés dans la même localité (tiré de Fortier, 2013).	121
Figure 7.2 : Exemple de l'application de la procédure d'association DRU – événement de pluie sur une période de 3 mois : a) séquence DRU et événement de pluie avant l'association ; b) séquence DRU associés à l'événement de pluie le plus susceptible de les avoir causés. La longueur des segments correspond à la hauteur de pluie de l'événement pour les segments bleus (axe de gauche) et à la durée des DRU pour les segments rouges (axe de droite) (tiré de Fortier, 2013).....	124
Figure 7.3 : Probabilité d'occurrence (axe de droite; ligne noire) et durée (axe de gauche) d'un DRU en fonction de la hauteur de pluie pour l'un des	

ODS de Trois-Rivières (Principal). Les cercles correspondent aux événements de pluie n'ayant pas entraînés un DRU alors que les points correspondent aux événements de pluie avec DRU (tiré de Fortier, 2013). 126

Figure 7.4 : Modèle de probabilité d'occurrence des DRU (fonctions sigmoïdes) de chacun des 30 ODS (tiré de Fortier 2013). 126

Figure 7.5 : Comparaison du nombre total de DRU simulés et observés durant la période de 2007 à 2009. Les points noirs réfèrent au modèle probabiliste alors que les carrés magenta réfèrent à la méthode de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011). Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95 % des réalisations de la méthode Monte-Carlo (tiré de Fortier 2013). 127

Figure 7.6 : Régression linéaire entre la durée des DRU et les six caractéristiques des événements de pluie : a) la hauteur de pluie totale ; b) la durée de l'événement de pluie ; c) la durée où l'intensité est supérieure à 2 mm/h ; d) le temps sec antérieur ; e) l'intensité moyenne ; et f) l'intensité maximale pour les données de l'ODS de Trois-Rivières entre 2007 et 2009. Les points rouges représentent un événement de pluie associé à un DRU (tiré de Fortier, 2013). 129

Figure 7.7 : Durée totale annuelle des DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste à partir des séries de pluie annuelles de 2007, 2008 et 2009, pour les 30 ODS. Les points encadrés représentent des ODS de la municipalité de Jonquière en 2008. La courbe rouge correspond à la régression et la ligne noire à la droite de pente 1. (tiré de Fortier, 2013). 130

Figure 7.8 : Nombre moyen annuel de DRU simulés aux 30 ODS selon le modèle probabiliste et la méthode de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011) à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Les coefficients de détermination sont calculés en

considérant une régression linéaire entre la hauteur totale de pluie (mm) et le nombre de DRU moyen aux 30 ODS à chaque année (tiré de Fortier, 2013) 131

Figure 7.9 : Durée totale moyenne des DRU simulés aux 30 ODS selon le modèle probabiliste à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Le coefficient de détermination est calculé en considérant une régression linéaire entre la hauteur totale annuelle de pluie (mm) et les durées totales des DRU (h) moyennés sur les 30 ODS à chaque année (tiré de Fortier, 2013)..... 131

Figure 7.10 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste ; b) nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique ; c) durée totale annuelle moyenne des DRU simulés par le modèle probabiliste. La ligne rouge représente la régression linéaire, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et la ligne noire la droite de pente 1. Chaque point correspond aux résultats pour un ODS pour une des séries de pluie à l'une des stations (tiré de Fortier, 2013). 134

Figure 7.11 : Comparaison du nombre mensuel moyen de DRU estimés à partir des quatre séries observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 aux 30 ODS et à chaque mois de la période de mai à octobre. Les lignes rouges représentent les régressions linéaires, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et les lignes noires la droite de pente 1. Chaque valeur en ordonnée correspond au résultat d'un ODS pour une séries de pluie à l'une des stations pour le mois considéré alors que la valeur en abscisse correspond au même ODS en utilisant cette fois la série de pluie simulée à la tuile où se trouve cet ODS (tiré de Fortier, 2013). 135

Figure 7.12 : Comparaison de la durée totale mensuelle de DRU estimés à partir des quatre séries observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 aux 30 ODS et à chaque mois de la période de mai à octobre. Les lignes rouges représentent les régressions linéaires, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et les lignes noires la droite de pente 1. Chaque valeur en ordonnée correspond au résultat d'un ODS pour une série de pluie à l'une des stations pour le mois considéré alors que la valeur en abscisse correspond au même ODS en utilisant cette fois la série de pluie simulée à la tuile où se trouve cet ODS (tiré de Fortier, 2013).	136
Figure 7.13 : Variation relative (%) $[(\text{futur} - \text{historique})/\text{historique}]$ de la fréquence et la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour les 30 ODS pour les simulations aet (points) et aev (cercles). La droite en trait plein correspond à la droite de régression et les tirets aux intervalles de confiance 95 % (tiré de Fortier, 2013).	137
Figure 7.14 : Courbes cumulatives des variations relatives aux différents ODS entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations aet et aev pour un seuil de 0,2 mm (tiré de Fortier, 2013).	137
Figure 7.15 : Variation relative (%) $[(\text{futur} - \text{historique})/\text{historique}]$ entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée totale des DRU sur une base mensuelle pour les simulations aet (points) et aev (cercles) aux 30 ODS (tiré de Fortier, 2013).	139
Figure 8.1 : Composantes du bilan hydrologique pour un réseau unitaire.....	142
Figure 8.2 : Exemple de graphique ternaire utilisé pour représenter la répartition en volume de surverse, infiltré et de rétention de surface (IER) et acheminé vers l'usine des volumes d'eau supplémentaires associés à une pluie de période de retour donnée en climat futur par rapport à la situation historique pour les réseaux d'égouts unitaires.	145

- Figure 8.3 : Exemple de graphique utilisé pour représenter le bilan hydrologique des surplus d'eau générés en climat futur par rapport à la situation historique pour les réseaux d'égouts pluviaux. L'abscisse correspond à la fraction relative des précipitations rejetée au milieu récepteur ou encore à la variation de cette fraction entre climat futur et historique. 146
- Figure 8.4 : Exemple de graphique utilisé pour comparer les indicateurs de performance associés aux surcharges (nombre de nœuds critiques) en climat historique (ligne pleine rouge) et futur (ligne en tiret rouge)... 147
- Figure 8.5 : Exemple de graphique utilisé pour comparer les écarts entre indicateurs de performance associés aux surcharges (différence du nombre de nœuds critiques en climat futur et historique; futur – historique). 148
- Figure 8.6 : Graphiques ternaires de la répartition en pourcentages des volumes supplémentaires de pluie en climat futur en volume de surverse (Surverse), en volume infiltré et en rétention de surface (Infiltration/rétention de surface - IER) et en volume acheminé à l'usine (Usine) pour les secteurs C (colonne de gauche) et B (colonne de droite) pour les périodes de retour 2 ans (A,B), 5 ans (C,D) et 10 ans (E,F)..... 150
- Figure 8.7 : Fonction de répartition des fractions de la pluie supplémentaire en climat futur en volumes de surverses (A,B), en volumes infiltrés et de rétention de surface (IER) (C,D) et en volumes acheminés à l'usine (E,F) pour les secteurs C (colonne de gauche; A,C,E) et B (colonne de droite; B,D,F) en fonction des différentes périodes de retour. 151
- Figure 8.8 : Fonction de répartition des écarts entre période retour 5 ans et 2 ans (courbes continues) et entre période de retour 10 ans et 2 ans (courbes en pointillées) des fractions en volumes de surverses (A,B), en volumes infiltrés (C,D) et en volumes acheminés à l'usine

(E,F) pour les secteurs C (colonne de gauche; A,C,E) et B (colonne de droite; B,D,F) en fonction des différentes périodes de retour. 152

Figure 8.9 : Indicateur Nombre de nœuds critiques (A,B) et variations du nombre de nœuds critiques entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour. 155

Figure 8.10 : 10 Moyenne des dépassements maximums (A,B) et variations de la moyenne des dépassements maximums entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour. 157

Figure 8.11 : Volumes d'inondations (A,B) et variations des volumes d'inondations entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour. 158

Figure 8.12 : Fonction de répartition de la fraction de la pluie supplémentaire en climat futur acheminée au milieu récepteur en fonction des différentes périodes de retour pour les secteurs : A) A ; B) D ; C) E et D) F. 162

Figure 8.13 : Nombre de nœuds critiques (A,C,E,G) et variations du nombre de nœuds critiques entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D (C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour. 165

Figure 8.14 : Moyenne des dépassements maximaux du seuil critique (A,C,E,G) et variations de ces différences moyennes entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D (C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour. 169

Figure 8.15 : Volumes d'inondations (A,C,E,G) et variations de ce volume entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D

(C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour.	171
Figure 9.1 : Schéma de systèmes de biorétention selon PGC (2007) : A) système de biorétention à recharge partielle des eaux souterraines; B) système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines.	181
Figure 9.2 : Coupe longitudinale des systèmes de biorétention modélisés et caractéristiques associées : A) système de biorétention à recharge partielle des eaux souterraines; B) système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines.	183
Figure 9.3 : Scénarios d'adaptation considérés pour le secteur A (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.	187
Figure 9.4 : Augmentations relatives des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur A.....	188
Figure 9.5 : Localisation des surfaces imperméables drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur A pour chacune des zones imperméables (voir Tableau 9.7).	190
Figure 9.6 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur B (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.	191
Figure 9.7 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur B.....	192
Figure 9.8 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le réseau de drainage B (voir Tableau 9.9)	194

Figure 9.9 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur C (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.	195
Figure 9.10 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur C	196
Figure 9.11 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur C (voir Tableau 9.11).	198
Figure 9.12 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur D (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO1, BIO2 : systèmes de biorétention 1 et 2; RC : redimensionnement de conduites. Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.	199
Figure 9.13 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur D.	200
Figure 9.14 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention (scénario BIO1) pour le secteur D.	202
Figure 9.15 : Localisation des surfaces drainées par les systèmes de biorétention du scénario BIO2 de la zone commerciale « Méga Centre » localisée par la zone rouge de l'encadré pour le secteur D.	204
Figure 9.16 : Modifications apportées aux conduites du réseau du secteur D sur la rue Adanac et l'avenue du Semoir. Les chiffres entre parenthèses indiquent les diamètres avant redimensionnement. Le point rouge de l'encadré indique la position de ce sous-secteur.	205
Figure 9.17 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur E (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BR : optimisation manuelle des bassins de rétention; BIO : systèmes de	

biorétention; RC : redimensionnement de conduites). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.....	206
Figure 9.18 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur E suite à la mise en place du programme de DG.	207
Figure 9.19 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur E.....	213
Figure 9.20 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous la rue Charlevoix dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux diamètres originaux alors que celles qui ne sont pas entre parenthèses correspondent aux valeurs après redimensionnement.....	214
Figure 9.21 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous la rue Gaspé entre la rue Gibraltar et la limite sud-ouest de la zone d'étude dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux diamètres originaux alors que celles qui ne sont pas entre parenthèses correspondent aux valeurs après redimensionnement.....	215
Figure 9.22 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous le boulevard Bourque entre le boulevard Mi-Vallon et la limite nord-est de la zone d'étude dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E.....	216
Figure 9.23 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Surverse pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.....	219

Figure 9.24 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Usine pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.....	220
Figure 9.25 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nœuds critiques pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.....	222
Figure 9.26 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nœuds critiques selon trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 5 ans.....	223
Figure 9.27 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 5 ans.....	225
Figure 9.28 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Surverse pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 2 ans.....	228
Figure 9.29 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Usine pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 2 ans.....	229
Figure 9.30 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 5 ans.....	231
Figure 9.31 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur B et la période de retour 10 ans.....	232
Figure 9.32 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Ruissellement pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 2 ans.....	235

Figure 9.33 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Ruissellement pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 5 ans.....	235
Figure 9.34 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques selon trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage A et la période de retour 10 ans.....	237
Figure 9.35 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 10 ans.....	239
Figure 9.36 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour les cinq scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 2 ans.....	241
Figure 9.37 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour les cinq scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 5 ans.....	242
Figure 9.38 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour sept scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 5 ans.....	244
Figure 9.39 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Inondation pour sept scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 10 ans.....	245
Figure 9.40 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour la période de retour 2 ans pour le secteur E.....	248
Figure 9.41 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour la période de retour 5 ans pour le secteur E.....	249

Figure 9.42 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour le secteur E et la période de retour 10 ans.	250
Figure 9.43 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Inondation pour le secteur E et la période de retour 10 ans.....	251
Figure 10.1 : Ratio SIDC/SIT en fonction du ratio SIT/ST pour les secteurs sous étude.....	256
Figure 10.2 : Fraction de pluie supplémentaire infiltrée en fonction du ratio SIDC/ST pour différentes périodes de retour. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour chaque période de retour.	258
Figure 10.3 : Fraction de pluie supplémentaire rejetée en surverses (réseaux unitaires) ou au milieu récepteur (réseaux pluviaux) en fonction du ratio SIDC/ST pour différentes périodes de retour. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour chaque période de retour.	259
Figure 10.4 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 2 ans. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour les différents scénarios d'adaptation (les valeurs des ordonnées à l'origine ont été fixées à 1).	262
Figure 10.5 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour les différents scénarios d'adaptation (les valeurs des ordonnées à l'origine ont été fixées à 1).	263
Figure 10.6 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 2	

ans. La régression linéaire correspond au scénario d'adaptation DG+ BIO (l'ordonnée à l'origine a été fixée à 1).	264
Figure 10.7 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans. La régression linéaire correspond au scénario d'adaptation DG+ BIO (l'ordonnée à l'origine a été fixée à 1).	265
Figure 10.8 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans.....	265
Figure 10.9 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 10 ans.....	266
Figure 11.1 : Fraction de pluie supplémentaire en volume de surverse ou acheminée au milieu récepteur en fonction de l'augmentation des intensités de pluie pour la période de retour 2 ans.....	271
Figure 11.2 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 2 ans).	274
Figure 11.3 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).	275
Figure 11.4 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 2 ans).....	275
Figure 11.5 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).....	276

Figure 11.6 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).....276

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AES	<i>Atmospheric Environment Service</i> (actuel <i>Meteorological Service of Canada</i> ou Service météorologique canadien)
AHCCD	<i>Adjusted Historical Canadian Climate Data</i>
AJL	Aéroport Jean-Lesage à Québec
BIO	Systèmes de biorétention
BMP	<i>Best Management Practice</i>
BR	Bassin de rétention
AMNO	Amérique du Nord (domaine)
CC	Changements climatiques
CDF	<i>Cumulative distribution function</i>
CGCM	<i>Coupled General Circulation Model</i>
CRCM	<i>Canadian Regional Climate Model</i>
CUM	Communauté Urbaine de Montréal
DEV	Déversoir d'orage
DG	Débranchement de gouttière
DM	Débit maximal
DM _{ax} TS	Débit maximal d'eaux usées de temps sec
DM _{oy} TS	Débit moyen d'eaux usées de temps sec
DRU	Débordement de réseau unitaire
EC	Environnement Canada
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GES	Gaz à effet de serre
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
IER	Infiltration-Évaporation-Rétention
INO	Inondation
IPCC	<i>Intergovernmental panel on climate change</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>
MA	Maxima annuel
MAMROT	Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du Territoire

MC	Mise en charge
MCS	Mesures de contrôles à la source
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (anciennement MDDEP)
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
MGC	Modèle global canadien
MOUSE	<i>MOdel for Urban SEwer</i>
MR	Milieu récepteur
MRC	Modèle régional du climat (RCM)
MRCC	Modèle régional canadien du climat
NARCCAP	<i>North American Regional Climate Change Assessment Program</i>
NRSC	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
ODS	Ouvrage de surverse
PET	Aéroport Pierre-Elliott Trudeau (Montréal)
PP	Poste de pompage
RC	Redimensionnement de conduites
REG	Régulateur de débit
RMSE	<i>Root-mean-square error</i>
RNCan	Ressources naturelles CanadaRUIRuissellement
SA	Sans adaptation
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIDC	Surfaces imperméables directement connectées
SIIC	Surfaces imperméables indirectement connectées
SIT	Surfaces imperméables totales
SOMAE	Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux
SP	Surface perméable
SRES	<i>Special Report on Emissions Scenarios</i>
ST	Surface totale
SUR	Surverse
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TP	Trop plein
USI	Usine

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les augmentations des concentrations des gaz à effet de serre (GES) enregistrées depuis le début de l'ère industrielle entraîneront une hausse des températures globales à l'échelle planétaire (Nakicenovic *et al.*, 2000). Cette hausse des températures modifiera l'équilibre actuel et entraînera également des changements parfois importants des régimes pluviométriques de plusieurs régions (Trenberth, 2011; IPCC, 2007; Trenberth *et al.*, 2003). Le portrait global pointe vers une situation où les régions humides seraient sujettes à une augmentation globale des précipitations et les régions arides à une décroissance des précipitations (Sun *et al.*, 2007).

Concernant plus spécifiquement les précipitations extrêmes, le scénario généralement retenu suggère une croissance de la fréquence et de l'intensité de ce type d'événements. Certains auteurs ont formulé l'hypothèse que ces augmentations seraient essentiellement causées par le fait qu'une atmosphère plus chaude peut contenir plus d'humidité (relations de Clausius-Clapeyron). Les volumes d'eau disponibles seraient alors plus importants et entraîneraient une hausse des intensités des événements de pluie extrêmes (Trenberth *et al.*, 2003). Les projections climatiques récentes, suggèrent d'ailleurs qu'au cours des prochaines décennies, les événements pluvieux extrêmes seront plus fréquents à travers le Canada (Mailhot *et al.*, 2012; Monette *et al.*, 2012; Lemmen *et al.*, 2008; Mailhot *et al.*, 2007; Zwiers et Kharin, 1998). Ces projections sont notamment soutenues par des analyses récentes confirmant que la hausse en fréquence et en intensité des événements pluvieux extrêmes pourrait être liée à l'augmentation des GES causée par les activités anthropiques (Min *et al.*, 2011).

Ces modifications aux régimes de températures et de précipitations auront des impacts sur bon nombre de secteurs économiques et d'activités humaines (Ouranos, 2010; Lemmen *et al.*, 2008). En matière de gestion des eaux en milieu urbain, les impacts risquent d'être importants lorsque l'on se souvient que le niveau de service de plusieurs infrastructures a été établi en utilisant les historiques pluviométriques disponibles au moment de leur conception et s'appuie sur l'hypothèse de la stationnarité du climat (Salas *et al.*, 2012; Shaw et Walter, 2012; Galloway, 2011; Milly *et al.*, 2008). Cette hypothèse implique que les données climatiques historiques sont représentatives des

conditions climatiques qu'un ouvrage ou une infrastructure connaîtra tout au long de sa durée de vie utile (Mailhot et Duchesne, 2010). Or la durée de vie utile de ces infrastructures peut atteindre plus d'un demi-siècle ce qui les amènera à connaître un climat assez différent de celui en fonction duquel elles auront été conçues (Mailhot et Duchesne, 2010).

Des pluies extrêmes plus fréquentes pourraient ainsi entraîner une augmentation des risques d'inondations et de refoulements en réseau (Jung *et al.*, 2011; Olsson *et al.*, 2009; Mailhot *et al.*, 2006; Infrastructure Canada, 2006). Ce constat implique que la conception des nouvelles infrastructures, de même que le remplacement des infrastructures existantes, doit être revue afin d'y intégrer les modifications des régimes de pluies dans un contexte de changements climatiques (Arnbjerg-Nielsen, 2011; Forsee et Ahmad, 2011; Kessler, 2011; Grum *et al.*, 2006; Guo, 2006; He *et al.*, 2006; Papa *et al.*, 2004; Watt *et al.*, 2003). De même, il est important d'évaluer comment le niveau de service des réseaux de drainage existant évoluera en climat futur et quelles stratégies peuvent être mises en place afin de maintenir un niveau de service adéquat à long terme (Karamouz *et al.*, 2011; Semadeni-Davies *et al.*, 2008).

Au Québec, les projections climatiques disponibles suggèrent une hausse des intensités des pluies extrêmes à l'horizon 2040-2070 de l'ordre de 10 à 20 % (Mailhot et al. 2008; Mailhot et al. 2012). Si plusieurs événements extrêmes ont frappé le Québec, notamment les zones urbaines au cours des dernières décennies et causés des inondations et des dommages importants, il demeure difficile d'imputer à la seule augmentation de l'occurrence des pluies extrêmes la hausse du nombre d'inondations en milieu urbain. Plusieurs autres facteurs peuvent être en cause comme la vétusté des infrastructures, l'entretien déficient de ces dernières, l'augmentation des surfaces imperméables, et une vulnérabilité plus grande (p. ex. aménagement des sous-sols, construction en zones inondables). Le Bureau d'Assurance du Canada constate d'ailleurs que les indemnités versées par les compagnies d'assurance pour des dommages causés par l'eau sont en hausse et dépassent maintenant les indemnités pour le feu (communication personnelle Jack Chadirdjian du Bureau d'Assurance du Canada).

Devant une telle perspective plusieurs intervenants (représentants des municipalités, des ministères et consultants), conscients des risques et des conséquences que de telles hausses pourraient avoir, s'interrogent sur les mesures à mettre en place afin de faire face à ces changements. La révision des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) est maintes fois évoquée, de même que la majoration à appliquer aux critères de conception actuels afin de tenir compte des CC. Le Ministère des Transports du Québec a ainsi décidé de majorer de 15 % ses critères de conception des ponceaux afin de palier un possible sous-dimensionnement de ces ouvrages en climat futur (communication personnelle de Christian Poirier du Ministère des Transports du Québec).

Deux guides ont été rédigés au cours des dernières années présentant une synthèse des connaissances les plus à jour en matière de gestion des eaux pluviales. Le Guide de gestion des eaux pluviales (MDDEP, 2010) s'adresse aux concepteurs de systèmes de drainage, aux praticiens de l'aménagement urbain (urbanistes, architectes paysagistes, spécialistes en environnement), aux développeurs et décideurs municipaux. Il décrit les grands enjeux en matière de gestion des eaux pluviales et présente une description de différentes approches et techniques (pratiques optimales de gestion des eaux pluviales) ayant pour objectif de minimiser les impacts hydrologiques du développement urbain. Le second guide, publié par le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, intitulé La gestion durable des eaux de pluie - Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable (Boucher 2010), a pour principal objectif de décrire le concept de gestion durable des eaux de pluie, les approches qui s'y rapportent et de sensibiliser les acteurs du milieu municipal et les professionnels de l'aménagement du territoire à l'importance d'adopter de telles approches. Ces deux guides répondaient à un besoin important de la communauté qui souhaitait disposer de documents présentant un état des connaissances des pratiques optimales de gestion des eaux pluviales.

L'enjeu des CC est abordé dans ces deux guides qui tous deux soulignent l'importance de prendre en compte ces changements dans la conception actuelle des ouvrages. Ainsi, le Guide de gestion des eaux pluviales (MDDEP, 2010) propose, sur la base des travaux de Mailhot et al. (2007), de majorer les intensités des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) actuelles de 20 % pour la conception des réseaux mineurs (périodes

de retour de 2 ans à 10 ans) et de 10 % pour la conception des ouvrages associés au réseau majeur et les ouvrages de rétention (périodes de retour de 25 à 100 ans). Les auteurs prennent soin de mentionner que ces recommandations pourront toutefois être modifiées en fonction des projections climatiques disponibles.

Ce contexte montre l'importance d'examiner les impacts potentiels des changements climatiques (CC) sur divers secteurs urbains existants et de voir quels types de mesures d'adaptation pourraient être mis en place pour maintenir un niveau de service à long terme. Le présent rapport rend compte de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet *Gestion des eaux pluviales et changements climatiques* faisant l'objet d'un soutien financier du Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre de l'action 26 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et avec la collaboration de RNCan. L'Annexe 1 reproduit le texte de la proposition initiale déposée pour financement. Ce projet, dont la réalisation s'est échelonnée sur trois ans, avait pour objectifs globaux d'évaluer :

- les impacts des CC sur divers secteurs urbains ;
- différentes mesures d'adaptation afin de permettre le maintien d'un niveau de performance acceptable à long terme.

Le projet s'articule autour de cinq axes de recherche (chaque axe de recherche fait l'objet d'un ou plusieurs chapitres du présent rapport identifié dans ce qui suit) :

- A. Projections climatiques (Chapitre 3) : Ce thème de recherche visait à développer et mettre à jour divers scénarios de projections climatiques relatives aux pluies. Trois types de phénomènes ont été considérés : 1) les pluies extrêmes (Section 3.1); 2) les événements de pluie (Section 3.2); 3) les pluies hivernales (Section 3.3).
- B. Modélisation hydrologique (Chapitres 4 et 5) : Ce deuxième axe visait à mettre en place le modèle hydrologique sur les secteurs sélectionnés (A, B, C, D, E et F). Ce travail impliquait un nombre de tâches variable selon les bassins et qui consistait, par exemple, à affiner la représentation spatiale des secteurs afin d'uniformiser la représentation et de la rendre adéquate au type d'analyse à réaliser (notamment pour l'analyse des mesures d'adaptation). Le Chapitre 4 donne une description générale

des informations et données nécessaires à la mise en place du modèle alors que le Chapitre 5 présente une description détaillée de chacun des secteurs retenus.

- C. Simulation hydrologique (Chapitres 6, 7 et 8) : Le troisième axe visait à définir le protocole de simulations. Les indicateurs de performances utilisés dans chaque secteur ont été définis et un certain nombre de simulations, en climat historique et futur sans mesure d'adaptation, ont été réalisées afin d'évaluer les impacts des CC. Le protocole de simulation est décrit au Chapitre 6 et les résultats pour les différents secteurs sont regroupés au Chapitre 8. Le Chapitre 7 rend compte des travaux portant spécifiquement sur les impacts des CC sur les déversements de réseaux unitaires (DRU).
- D. Analyse économique : Ce volet, bien que partie intégrante de ce projet, n'est pas abordé dans le cadre du présent rapport. L'analyse économique fait l'objet d'un rapport distinct (AECOM, 2013) produit par la firme AECOM à qui ce mandat a été confié. Cet axe de recherche a pour objectif principal l'estimation de l'évolution des impacts économiques des CC en matière de gestion des eaux pluviales. Il s'agit de mettre en balance les croissances de coûts associées à une baisse du niveau de service des systèmes actuels avec les investissements nécessaires pour la mise en place de mesures d'adaptation et la réduction concomitante des coûts des dommages (analyse coût/bénéfice des mesures d'adaptation proposées). Le sommaire exécutif du rapport de la firme AECOM a été intégré au présent rapport (Chapitre 12).
- E. Adaptation aux CC (Chapitres 9, 10 et 11) : Le dernier volet visait à identifier d'éventuels scénarios d'adaptation aux CC pour chacun des secteurs sous étude et à évaluer la performance en climat futur une fois ces scénarios mis en place. Une première comparaison du niveau de service ainsi obtenu (en climat futur avec adaptation) avec le niveau de service historique (en climat historique sans adaptation) permet de voir dans quelle mesure les scénarios d'adaptation permettent de récupérer les niveaux de service historiques. Une deuxième comparaison entre le niveau de service en climat futur avec adaptation et sans adaptation permet d'estimer les améliorations par rapport à la situation sans adaptation. Les résultats obtenus après analyse de chacun des secteurs sont finalement comparés (Chapitre 10) et la sensibilité aux projections climatiques également explorée (Chapitre 11).

Aux chapitres mentionnés plus haut, il faut ajouter le Chapitre 2 qui présente une synthèse de la littérature sur l'impact et l'adaptation aux CC en matière de gestion des eaux pluviales. Le Chapitre 13 dresse la liste des principales conclusions de ce travail, formule une série de recommandations et discute des perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Le présent chapitre présente une revue de littérature des principaux articles publiés au cours des dernières décennies sur l'analyse des impacts des CC (Section 2.1) et sur les impacts et l'adaptation (Section 2.2) en matière de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. À noter que la revue de littérature des articles portant plus spécifiquement sur les déversements des réseaux unitaires est présentée au Chapitre 7. La Section 2.3 explique en quoi la présente étude se distingue des études publiées jusqu'ici sur le sujet.

2.1. Impacts des CC sur la gestion des eaux pluviales

Niemczynowicz (1989) est parmi les premiers à avoir étudié l'impact des CC sur des réseaux de drainage urbains. Pour ce faire, il a modélisé un bassin de drainage existant de la ville de Lund en Suède à l'aide du modèle EPA SWMM (*Environmental Protection Agency Storm Water Management Model*, James *et al.*, 2010; Rossman *et al.*, 2009). Ce réseau de drainage de 1 769 ha est desservi à la fois par un égout unitaire et pluvial. Des pluies de conception de différentes périodes de retour (1, 3, 6 et 10 ans) ont ensuite été considérées. Pour représenter les conditions climatiques futures, ces pluies ont été majorées de 10, 20 et 30 %. Cet auteur a observé que les volumes d'eau entrant dans le réseau de drainage augmentaient légèrement plus que le taux d'accroissement de la pluie. Toutefois, l'augmentation relative des volumes de surverses dépassait largement le taux d'accroissement de la pluie et ce parfois même du double, ce résultat s'expliquant par la structure des ouvrages de surverse. En matière de performances hydrauliques, Niemczynowicz (1989) note qu'une augmentation de 20 et 30 % de l'intensité des pluies pourrait générer d'importants problèmes d'inondations.

Pour majorer les pluies et évaluer l'impact d'une augmentation de l'intensité sur un réseau de drainage urbain, Denault *et al.* (2006) ont analysé les séries des intensités maximales annuelles de pluie pour différentes durées (5, 15 et 30 minutes et 1, 2, 6 12 et 24 heures) afin de détecter des tendances. Pour chacune des durées, ces auteurs ont effectué une régression linéaire et ont remarqué des tendances significatives pour les intensités des événements pluvieux de durées inférieures à deux heures. Ils ont par la

suite procédé à une extrapolation de ces tendances pour construire des projections climatiques à l'horizon 2020 et 2050. Ces auteurs ont également modifié des pluies de conception de 6 et 24 heures, bien qu'aucune tendance significative n'ait été détectée pour ces durées, qu'ils ont ensuite considérés comme données d'entrée au modèle EPA SWMM. Le réseau de drainage modélisé est celui de Mission/Wagg Creek en Colombie-Britannique et couvre une superficie de 440 ha. Les résultats obtenus par ces auteurs montrent que ce réseau de drainage possède une capacité adéquate pour maintenir son niveau de service en climat futur. Toutefois, des conséquences environnementales potentiellement importantes pourraient être observées en raison d'un plus grand volume d'eau de ruissellement acheminé vers les milieux récepteurs contribuant ainsi à la dégradation des écosystèmes naturels présents.

He *et al.* (2006) ont quant à eux utilisé les résultats provenant de modèles globaux du climat (MGC), soit le modèle CGCM, pour estimer les modifications du régime des précipitations et les conséquences en matière de drainage urbain. Ces auteurs ont comparé des données historiques aux sorties du modèle pour la même période (1961-1990). Une fois les biais identifiés pour les précipitations moyennes et maximales annuelles, ils ont ajusté les résultats du modèle pour la période 2061-2100. Dès lors, des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climat futur ont été générées. Par la suite, les courbes IDF en climat historique et futur ont été utilisées pour effectuer des simulations sur un réseau pluvial de Calgary avec le modèle PC SWMM. He *et al.* (2006), ont évalué les changements de débits de pointe à l'exutoire et les surcharges en réseau. Ils concluent que les capacités du réseau de drainage seront inadéquates en climat futur et que les surcharges dans le réseau augmenteront.

Plus récemment, Nie *et al.* (2009) ont majoré de 20, 30 et 50 % des précipitations observées pendant 20 mois afin de représenter plusieurs scénarios climatiques futurs. Ces scénarios sont basés sur les résultats provenant d'un modèle régional climatique (MRC) utilisé en Norvège (HIRHAM), lequel a été piloté par deux MGC (MPI et HAD) à partir du scénario d'émission B2 (Nakicenovic *et al.*, 2000). Ces auteurs ont par la suite effectué des simulations, à l'aide du modèle MOUSE DHI (*Model of Urban Sewer, Danish Hydrological Institute*) pour un bassin de drainage de la ville de Fredrikstad (Norvège) d'une superficie de 364 ha, afin de comparer la situation historique à trois scénarios futurs. Plusieurs indicateurs ont été utilisés pour évaluer la performance du

réseau de drainage en climat historique et futur : 1) le nombre de regards d'égout où des inondations surviennent et les volumes totaux correspondants ; 2) le nombre de nœuds en surcharge où le seuil critique se trouve à 0,9 m en dessous de la surface du sol ; 3) le nombre de bâtiments à risque (bâtiments à proximité d'un nœud en surcharge) ; et 4) les volumes de surverses. Ces auteurs ont observé au cours de cette période des augmentations relatives importantes pour tous les indicateurs en climat futur par rapport à la situation historique. Les volumes totaux d'inondations ont augmenté de 43, 121 et 181 % alors que les volumes de surverses ont crû de 36, 54 et 89 % suivant les trois scénarios climatiques futurs retenus. Sur une base annuelle, les volumes totaux d'inondations et les surverses augmenteraient 2 à 4 fois plus et 1,5 à 3 fois plus respectivement que les précipitations.

Forsee et Hamad (2011) ont évalué la possibilité que les infrastructures de drainage en milieu urbain puissent ne pas répondre aux normes actuelles de conception en climat futur. Ces auteurs ont utilisé le modèle HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*) afin d'évaluer différents impacts associés à une augmentation de l'intensité pour un événement de pluie extrême. La modélisation a été effectuée sur le bassin de drainage Pittman, d'une superficie de 40 ha, situé dans la vallée de Las Vegas (États-Unis). Une pluie de projet utilisée pour la conception des infrastructures de drainage locales a été employée pour estimer la performance de deux bassins de rétention se trouvant dans le réseau de drainage. Il s'agit d'une pluie de six heures de période de retour 100 ans dont l'intensité a été augmentée de 20 % afin de représenter les conditions climatiques futures. Cette augmentation a été établie à partir des données du NARCAPP (*North American Regional Climate Change Assessment Program*) où dans ce cas, trois sorties de MRC pilotés par différents MGC avec le scénario d'émission A2 (Nakicenovic *et al.*, 2000) ont été utilisées. Les simulations indiquent que les critères de conception actuellement en vigueur pourraient potentiellement être insuffisants en climat futur. Pour les bassins de rétention, les auteurs ont observé des augmentations relatives se situant entre 10 et 70 % en ce qui concerne les débits d'entrée et de sortie, les hauteurs d'eau et les volumes.

Finalement, Berggren *et al.* (2012) ont comparé les performances hydrauliques d'un réseau de drainage d'une petite banlieue côtière de la Suède en climat historique et futur avec des pluies réelles. Le réseau de drainage de 54 ha, desservi par un égout

pluvial, a été modélisé par l'un des modèles du groupe DHI (*Danish Hydrological Institute*). Pour évaluer les impacts des CC, ces auteurs ont appliqué un facteur (méthode des deltas) pour modifier une série de pluies historiques (1993-2002). Ces facteurs ont été obtenus en comparant les sorties d'un MRC (RCA3) en climat historique (1971-2000) et futur (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) en considérant le scénario d'émission A2 (Nakicenovic *et al.*, 2000). Les intensités des pluies historiques ont par la suite été augmentées de 8 % à 63 % selon les saisons. Les performances du réseau de drainage ont été estimées à partir d'un indice hydraulique basé sur les surcharges et un seuil critique se trouvant à 0,5 m du sol. Les auteurs ont évalué la fréquence et la durée totale où la hauteur d'eau en conduite dépassait ce seuil critique. Ces indices peuvent être appliqués à un seul événement ou encore à toute la série de pluies. Berggren *et al.* (2012) ont observé une augmentation du nombre de nœuds où le niveau de l'eau atteint la surface du sol ou le seuil critique, pour tous les scénarios climatiques futur par rapport à la situation historique. Ces auteurs concluent donc que les inondations seraient plus fréquentes et de plus longues durées dans les décennies à venir.

2.2. Études d'impacts et adaptation aux CC en gestion des eaux pluviales

Certains auteurs, en plus d'évaluer les impacts des CC sur des réseaux de drainage en milieu urbain, ont analysé divers scénarios d'adaptation. Ainsi, Waters *et al.* (2003) ont majoré une pluie de conception de période de retour deux ans et d'une durée d'une heure de 15 % afin de représenter les conditions climatiques futures. Cette augmentation se traduit par un accroissement de 19 et 13 % des volumes de ruissellement et des débits de pointe respectivement, en plus de générer davantage de surcharges dans le réseau de drainage. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une modélisation réalisée avec EPA SWMM pour un réseau d'égout pluvial de 23,3 ha situé à Burlington en Ontario. En matière d'adaptation, ces auteurs ont analysé quelques mesures d'adaptation dont la déconnection de superficies imperméables au réseau de drainage. Deux scénarios de déconnection des superficies imperméables ont été évalués. Pour le premier scénario, l'équivalent de la moitié de la superficie des toits des maisons est déconnecté alors que pour le second scénario, toute la superficie des toits

des maisons est déconnectée. Waters *et al.* (2003) observent que ces scénarios d'adaptation permettent de réduire les débits de pointe de 18 et 39 % respectivement.

Semadeni-Davies *et al.* (2008) ont évalué les impacts potentiels des CC mais également de l'urbanisation sur un réseau d'égout unitaire de Helsingborg en Suède. Ces auteurs ont utilisé le modèle MOUSE DHI pour simuler une série historique de précipitations enregistrées à toutes les minutes pendant dix ans (1994-2003). Afin de représenter les conditions climatiques futures, ils ont utilisé les résultats de MGC basés sur les scénarios d'émission A2 et B2 (Nakicenovic *et al.*, 2000) pour piloter un MRC (RCAO) afin de comparer les précipitations simulées en climat historique (1961-1991) et futur (2071-2100). Ils ont ainsi déterminé les facteurs de changements mensuels (qui vont de 0,32 à 5,55 selon le mois et le scénario d'émission de GES) à appliquer aux précipitations historiques. Ces auteurs notent que les CC pourraient amplifier les problèmes actuels en matière de drainage urbain notamment en augmentant les volumes et la fréquence des surverses. Semadeni-Davies *et al.* (2008) observent également qu'en diminuant les surfaces imperméables directement connectées de 75 %, il serait possible de réduire presque complètement les épisodes de surverses en climat futur, et ce malgré une croissance démographique de 49 %.

Tout comme Semadeni-Davies *et al.* (2008), Kleidorfer *et al.* (2009) ont analysé les impacts des CC sur les précipitations, en plus de considérer des modifications au niveau de l'utilisation du territoire et de la démographie. Considérant un secteur existant, drainé par un réseau d'égout unitaire, ces auteurs ont créé 250 réseaux de drainage virtuels à partir d'un générateur d'étude de cas décrit dans une étude antérieure (Möderl *et al.*, 2009). À l'aide du modèle EPA SWMM, ils ont ensuite effectué des simulations en utilisant une pluie de conception de différentes périodes de retour (0,5, 1, 2, 3, 5 et 10 ans), et ce, pour de nombreux scénarios d'augmentation des pluies, d'occupation du territoire et d'évolution démographique. Les augmentations d'intensité de la pluie variaient entre 10 et 50 % alors que pour l'utilisation du territoire et la démographie, les valeurs réelles étaient modifiées de -60 et 60 %. Kleidorfer *et al.* (2009) observent que l'augmentation de l'intensité de la pluie génère des impacts plus importants sur les capacités hydrauliques des réseaux de drainage que les modifications apportés à l'occupation du territoire et la démographie. De plus, ils ont pu montrer qu'une augmentation de 20 % de l'intensité de la pluie de période de retour un an a le même

effet qu'une augmentation de 40 % des surfaces imperméables sur les surverses et qu'une réduction de 30 % des surfaces imperméables permettrait de compenser l'augmentation de 20 % de l'intensité de la pluie.

Pyke *et al.* (2011) soulignent que la gestion des eaux pluviales est un enjeu majeur et que certains secteurs pourraient être très vulnérables face aux CC. C'est dans ce contexte qu'ils ont évalué les impacts d'une modification du régime pluviométrique pour deux scénarios de développement d'une ancienne base militaire à Boston (Massachusetts, États-Unis) couvrant un territoire de 567 ha. Le premier scénario prévoit un développement conventionnel, alors que le second prévoit un développement favorisant l'approche de *Low Impact Development* (LID, Ahiablame *et al.*, 2012; Chang, 2010; Dietz, 2007). À titre comparatif, les surfaces imperméables totales représentent 25 % et 16 % du site à l'étude pour le scénario conventionnel et l'approche LID respectivement. Pour évaluer les impacts des CC, ces auteurs ont utilisé une série de pluies historiques qu'ils ont augmentée ou diminuée selon le scénario climatique considéré. En tout, cinq scénarios climatiques futurs ont été retenus pour modifier le patron des précipitations. Ces scénarios de pluie ont par la suite été simulés à l'aide d'un modèle hydrologique (SG WATER) et les résultats ont été comparés sur une base annuelle. Pyke *et al.* (2011) tirent un certain nombre de conclusions de leur étude. D'abord, ils ont constaté que les volumes de ruissellement sont plus sensibles à des changements du niveau d'imperméabilité que des modifications dans le régime pluviométrique, ce qui va à l'encontre des conclusions de Kleidorfer *et al.* (2009). Ces deux articles abondent toutefois dans le même sens en affirmant que la réduction des surfaces imperméables peut potentiellement réduire les conséquences associées à une augmentation des volumes de ruissellement dans un contexte de CC.

Très récemment, Olsson *et al.* (2013) ont modélisé un réseau de drainage de la ville d'Arvika en Suède avec deux modèles, le premier étant le modèle MOUSE DHI et le second le *Tokyo Storm Runoff Model* (Amaguchi *et al.*, 2012). Il est intéressant de noter qu'il s'agit d'un réseau de drainage pluvial qui ne répond pas aux normes exigées en matière de niveau de service établi pour une période de retour 10 ans, selon le guide national utilisé en Suède. Les performances du réseau de drainage en climat historique et futur avec et sans adaptation ont été évaluées en utilisant une pluie de conception d'une durée de 30 minutes et de période de retour 10 ans. Pour représenter les

conditions climatiques futures, l'intensité de la pluie basée sur la pluviométrie historique a été augmentée de 24 %. Cette augmentation provient des résultats obtenus à partir d'un MRC (RCA3) et des sorties de six MGC pour la période 1961-2100 et pour différents scénarios d'émission (A1B, B2 et A2 ; voir Nakicenovic *et al.*, 2000). Globalement, les auteurs observent une augmentation des débits de pointe à l'exutoire ainsi qu'une croissance du ratio ruissellement/pluie totale, et ce pour les deux modèles. De plus, afin de répondre aux normes actuelles en matière de niveau de service, les auteurs ont estimé qu'il serait nécessaire de remplacer près de 3 000 m de conduites par des conduites de diamètre supérieur et d'ajouter de la rétention de surface pour un volume de rétention de l'ordre de 1 810 m³.

2.3. Synthèse des travaux publiés et contribution originale de la présente étude

Pour évaluer les impacts des CC, il est d'abord nécessaire de modifier des pluies réelles ou des pluies de conception afin de représenter les conditions climatiques futures. Plusieurs techniques ont été utilisées à cet effet : 1) modifications arbitraires de pluies de conception ; 2) extrapolation de tendances historiques ; et 3) utilisation des résultats de modèles climatiques en climat historique et futur afin d'estimer des pourcentages de majoration des pluies historiques. Cette dernière technique est la plus utilisée. Pour la majorité des articles cités, les sorties d'un MRC pilotés par un ou plusieurs MGC ont été utilisées. Dans les travaux de Forsee et Hamad (2011), ce sont les résultats provenant du NARCAPP qui ont été employés. Ces derniers ont retenu les résultats de trois MRC pilotés par cinq MGC. Dans le cadre de ce projet, les résultats de Mailhot *et al.* (2012), ont été utilisés. Ces résultats, couvrant tout le Canada, proviennent de six MRC pilotés par cinq MGC et sont également issus des simulations du NARCAPP (voir Chapitre 3 pour plus de détails).

L'analyse des impacts des CC sur un réseau de drainage en milieu urbain nécessite de définir des indicateurs de performances. Les plus fréquemment considérés sont les volumes et les fréquences des surverses, les débits de pointe, les surcharges définies selon un seuil critique et les volumes et la fréquence des inondations. Pour ce projet,

plusieurs indicateurs de performances ont été développés. Certains s'appliquent à la fois aux réseaux d'égouts unitaires ou pluviaux (volumes d'infiltration-évaporation-rétention, volumes de ruissellement, volumes d'inondations, nombre de points critiques sur le réseau et moyenne des dépassements maximaux des points critiques), alors que d'autres indices concernent qu'un seul type de réseau d'égout (volumes acheminés en milieu récepteur et volumes dirigés à l'usine de traitement et/ou volumes de surverse ; voir le Chapitre 6 pour plus de détails).

En matière de scénarios d'adaptation les travaux antérieurs ont analysé la déconnection et la diminution de superficies imperméables, l'augmentation de la rétention de surface et le remplacement de conduites. Dans le cadre du présent projet, la déconnection de superficies imperméables a également été considérée. Tout comme Waters *et al.* (2003), la superficie des toits des maisons a été utilisée pour représenter le potentiel de déconnection qui pourrait être visé dans le cadre d'un programme de débranchement de gouttières. Toutefois, Waters *et al.* (2003) ont effectué cet exercice sur un réseau de drainage de 23 ha alors que, dans la présente étude, cinq réseaux de drainage totalisant 2 197 ha ont été analysés. De plus, les toits plats n'ont pas été considérés dans la présente étude puisqu'il est généralement difficile de les déconnecter du réseau de drainage. Finalement, des objectifs précis de débranchement de gouttières, basés sur les résultats de programmes réels réalisés au Québec ont été utilisés (voir Chapitre 9 pour plus de détails).

Les mesures de contrôle à la source (MCS) de type structurel, par exemple les systèmes de biorétention (PGC, 2007; Roy-Poirier *et al.*, 2010), ont été analysées comme mesure d'adaptation face aux CC dans les études antérieures mais de façon indirecte, c'est-à-dire en modifiant le taux de surfaces imperméables directement et indirectement connectées. Dans le cadre de ce projet, des MCS structurelles ont été ajoutées directement dans les modèles existants afin de drainer les eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables spécifiques. Cela permet de considérer les différentes composantes de tels aménagements et d'avoir une meilleure compréhension de leurs impacts réels en matière de gestion des eaux pluviales. Finalement, d'autres mesures d'adaptation ont été envisagées selon les différents secteurs à l'étude, tels que le redimensionnement de conduites et l'optimisation de bassins de rétention existants (voir Chapitre 9 pour plus de détails).

La plupart des études publiées jusqu'ici, excepté Semadeni-Davis *et al.* (2008) qui considère un réseau unitaire et un réseau pluvial et Kleidorfer *et al.* (2009) avec leurs réseaux de drainage virtuels, se limite à l'analyse d'un seul réseau. Cinq secteurs différents sont analysés dans le cadre de la présente étude ce qui permet de mieux apprécier la diversité des impacts et des stratégies d'adaptation possibles pour différents secteurs existant.

L'implantation des mesures d'adaptation se fait selon une hiérarchisation des interventions d'adaptation, les mesures favorisant une réduction apports au réseau étant d'abord considérés (p. ex. débranchement de gouttière, systèmes de biorétention) puis les mesures visant à stocker les eaux pluviales ou à améliorer les capacités hydrauliques (p. ex. redimensionnement, bassins de rétention). Le potentiel de chaque type de mesure est ensuite analysé à partir de considérations et de critères spécifiques à chaque secteur analysé (p. ex. espace disponible, distribution des surfaces imperméables, proximité de surfaces perméables). Les mesures d'adaptation répertoriées dans la littérature demeurent relativement imprécises quant aux critères spécifiques d'implantation des mesures. Ainsi Semadeni-Davis *et al.* (2008) parlent d'une diminution des surfaces imperméables directement connectées (SIDC) alors que Kleidorfer *et al.* (2009) indiquent une diminution des SIT sans préciser de quelles surfaces ou de quels types de surfaces imperméables il s'agit (stationnements, entrées résidentielles, *etc.*). Waters *et al.* (2003) évaluent la déconnection à l'équivalent de 50 ou 100 % des surfaces des toits des maisons. Les études antérieures ont plutôt tenté d'évaluer de façon globale les gains que permettraient l'implantation de certaines mesures d'adaptation alors que, dans la présente étude, les scénarios d'adaptation évalués se veulent plus réalistes puisque développés en fonction des configurations de chaque secteur.

L'examen de plusieurs jeux de paramètres possibles permet d'explorer les impacts et l'efficacité des mesures d'adaptation pour diverses réponses hydrologiques possibles. Il faut voir que le calage de modèles hydrologiques urbains se base souvent sur un nombre très restreint d'événements pluvieux et que, de ce fait, les incertitudes sur les valeurs calées des paramètres demeurent importantes. L'exploration de plusieurs jeux de paramètres permet de voir dans quelle mesure les résultats et conclusions sont robustes aux incertitudes sur ces paramètres.

L'examen de trois projections climatiques distinctes permet d'évaluer la sensibilité de la réponse des secteurs aux possibles incertitudes sur ces projections. Une telle approche, également adoptée par certains auteurs (p. ex. Niemczynowicz, 1989) se justifie par les incertitudes encore importantes sur ces projections. Une sensibilité plus ou moins grande aux projections peut s'avérer un critère de sélection intéressant pour une mesure d'adaptation, une mesure dont la performance est peu sensible aux projections climatiques pouvant s'avérer plus intéressante à mettre en place (Dessai *et al.*, 2009).

CHAPITRE 3 : PROJECTIONS CLIMATIQUES

Les travaux réalisés dans le cadre du volet *Projections climatiques* visaient à développer des scénarios de projections climatiques pour trois types de variables : 1) les pluies extrêmes ; 2) les événements de pluie (succession événements sec et pluvieux) ; et 3) les pluies hivernales. Ces projections seront utilisées dans le cadre des travaux ultérieurs d'impacts et adaptation. Ainsi les projections sur les pluies extrêmes serviront lors de l'analyse des secteurs urbains alors que les projections sur les événements de pluie font partie intégrante de l'analyse des impacts des CC sur les déversements de réseau unitaire. Quant aux pluies hivernales, il s'agit, d'une part, d'analyser les tendances historiques pour ce type de phénomène (p. ex. fréquence d'occurrence, hauteurs annuelles, etc.) et, d'autre part, de procéder à l'analyse des séries simulées par les modèles climatiques afin de déterminer leur évolution en climat futur.

Trois ensembles de données ont été considérés pour ces analyses. Le premier ensemble regroupe les données observées aux stations d'Environnement Canada (EC) et du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, rebaptisé depuis l'automne 2012 Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs ou plus simplement MDDEFP). Les séries de pluies horaires, de maximas journaliers (hauteur de pluie maximale enregistrée chaque jour pour des durées de 5 minutes à 12 heures) et de pluies et températures journalières aux stations météorologiques à travers le Canada ont ainsi été colligées. Ces séries ont été utilisées pour fin de comparaison avec les séries simulées par les modèles (Section 3.1), pour la construction et la caractérisation des événements de pluie (Section 3.2) et pour les analyses de tendance des pluies hivernales (Section 3.3).

Le deuxième ensemble de données regroupe les séries de précipitations de deux simulations du modèle régional canadien du climat (MRCC, version 4.2.3; Caya et Laprise, 1999; Music et Caya, 2007; Laprise, 2008 ; de Elía et Côté, 2010). Ces deux simulations, libellées *aet* et *aev*, couvrent les années de 1961 à 2100 et sont pilotées par le modèle canadien couplé de climat global (MCCG3/T47 à une résolution d'environ 3,75 x 3,75 degré de latitude-longitude; Scinocca *et al.*, 2008; Flato *et al.*, 2000). Les simulations globale et régionale ont été produites en suivant les scénarios de projections des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols de l'IPCC SRES A2, également

appelé forçage, (Nakicenovic *et al.*, 2000) pour la période 2001 à 2100 et le scénario « observé du XXe siècle » du GIEC pour les années de 1961 à 2000. Le domaine de simulation du MRCC est l'Amérique du Nord (domaine AMNO) avec une grille de résolution horizontale de 45 km x 45 km. Les séries de précipitations au pas de temps de 15 minutes (agrégées au pas de temps horaire) aux différents points de grille, ou tuile, du domaine AMNO ont été utilisées dans le cadre de ce projet. Ces séries ont été utilisées pour le développement des projections des pluies extrêmes (Section 3.1) et pour l'analyse en événements de pluie (Section 3.2).

Le troisième ensemble de données est constitué des simulations du *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP; Mearns *et al.*, 2009, 2012). Ce programme de simulations vise à combiner différents modèles globaux et régionaux, et ce afin de mieux évaluer les incertitudes liées aux différentes représentations de ces modèles. Ces simulations ont été utilisées pour le développement de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climat futur à l'échelle pancanadienne (Section 3.1) et pour l'investigation des tendances futures en matière de pluies hivernales (Section 3.3 ; plus de détails sur ces simulations seront donnés à chacune de ces sections).

Deux articles ont été publiés dans le cadre des travaux réalisés dans cet axe de recherche ou en marge de ces travaux. Le premier, Mailhot *et al.* (2010), porte sur l'analyse des séries du modèle global canadien du climat et s'intéresse aux maxima annuels des précipitations journalières. Situé en marge de ce projet, ces travaux ne seront pas abordés dans ce chapitre. Le second, Mailhot *et al.* (2012), présente l'ensemble des travaux d'analyse des séries du NARCCAP. Bien que l'analyse de ces séries n'ait pas été prévue initialement, l'intérêt scientifique d'une telle analyse s'est rapidement imposé. La Section 3.1 décrit ces travaux mais le lecteur est invité à consulter l'article pour les détails techniques.

3.1. Pluies extrêmes

Des travaux visant à établir des projections de courbes IDF en climat futur à partir des séries simulées par une version plus ancienne du MRCC (version 3.7.1 piloté par le CGCM2) avaient été réalisés et publiés avant le début du projet décrit dans le présent

rapport (Mailhot *et al.*, 2007). Cette recherche avait permis de montrer que les intensités des pluies maximales annuelles pour les durées comprises entre 2 heures et 24 heures sur la région sud du Québec augmenteraient d'environ 15 % en climat futur (période 2041-2070), des augmentations plus importantes étant observées pour les plus grandes périodes de retour (20 ans). Bien que novateur, la portée de ces conclusions demeurerait limitée puisqu'une seule simulation avait été considérée et que seule la région sud du Québec avait été analysée.

Plusieurs études se sont depuis intéressées à la question des incertitudes liées aux projections climatiques. Trois principales sources d'incertitudes sont à considérer soit celles liées aux projections d'émissions des GES, celles associées aux modèles climatiques (globaux ou régionaux) et celles provenant de la variabilité interne (ou naturelle) du climat (Hawkins et Sutton, 2009, 2011; Deser *et al.*, 2012). Ces différentes incertitudes sont investiguées en considérant, dans le premier cas, différents scénarios d'émissions de GES (Nakicenovic *et al.*, 2000), différents modèles et combinaisons de modèles dans le second cas (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007) et plusieurs réalisations possibles du climat issues de conditions initiales différentes (simulations appelées membres) dans le dernier cas (Lucas-Picher *et al.*, 2008; Deser *et al.*, 2012).

L'accès récent aux séries du NARCCAP a donc été mis à profit dans le cadre du projet (Mearns *et al.*, 2009). L'objectif était de développer une approche multi-modèle d'estimation des courbes IDF en climat futur (période 2041-2070) utilisant les simulations du NARCCAP pour l'ensemble du Canada. La présente section présente un résumé de ces travaux. Le lecteur est invité à consulter Mailhot *et al.* (2012) pour plus de détails.

Les simulations NARCCAP utilisées étaient celles disponibles au moment de faire ce travail (d'autres simulations se sont ajoutées depuis) et sont présentées au Tableau 3.1. Ces simulations combinent différents modèles régionaux du climat (MRC) et modèles globaux du climat (MGC). Les simulations ont été classées en trois groupes : 1) MRC piloté par des réanalyses (en l'occurrence NCEP/DOE Reanalysis II ; Kanamitsu *et al.*, 2002) ; 2) MRC piloté par un MGC en climat historique (période 1971-2000) ; et 3) MRC piloté par un MGC en climat futur (période 2041-2070).

Tableau 3.1 : Simulations NARCCAP utilisées pour l'analyse des pluies intenses (pour une description des différents MRC et MGC voir le site du NARCCAP à l'adresse <http://www.narccap.ucar.edu>).

Groupe	MRC	Pilote	Période simulée
Piloté réanalyses	ECPC	NCEP	1982-2005
	HRM3	NCEP	1982-2004
	MM5I	NCEP	1982-2004
	RCM3	NCEP	1982-2004
	WRFG	NCEP	1982-2004
	CRCM	NCEP	1982-2003
Piloté MGC – climat historique	HRM3	HadCM3	1971-2000
	MM5I	CCSM	1971-2000
	RCM3	CGCM3	1971-2000
	RCM3	GFDL	1971-2000
	CRCM	CGCM3	1971-2000
Piloté MGC – climat futur	HRM3	HadCM3	2041-2070
	RCM3	CGCM3	2041-2070
	RCM3	GFDL	2041-2070
	CRCM	CGCM3	2041-2070

Les séries de précipitations pour chacune de ces simulations sont disponibles à un pas de temps de trois heures pour chaque point de grille. Le domaine simulé correspond à l'Amérique du Nord. Seules les tuiles couvrant le Canada ont été considérées dans le cadre de cette étude. À noter que les grilles de simulations utilisées sont propres à chaque MRC (la résolution des différentes grilles est d'environ 50 km x 50 km mais sont décalés les unes par rapport aux autres) et qu'une grille commune a été définie afin de combiner les résultats des différentes simulations.

Les intensités des maximas annuelles (MA) pour les durées 6, 12, 24, 72 et 120 heures ont été extraites de chacune des séries simulées en chaque point de grille. Ces séries des MA ont ensuite été ajustées à la distribution *Generalized Extreme Value* (GEV; Coles, 2001; CSA, 2012). Les paramètres de la distribution GEV ont été estimés à l'aide de la méthode des L-moments (Hosking et Wallis, 1997). Les valeurs des pluies intenses associées aux durées susmentionnées et aux périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans ont enfin été calculées.

Une comparaison avec les quantiles de pluies intenses obtenues à partir d'une analyse des séries homogénéisées de précipitations journalières aux stations d'EC a d'abord été réalisée (Mekis et Hogg, 1999). Des 432 stations à travers le Canada que contient ce jeu de données, seules les stations avec plus de 15 années de données valides au total ont été retenues (les années retenues n'ont pas à être consécutives). La comparaison du rapport entre quantiles de pluies intenses simulées (moyennes sur les différentes simulations) et observées (les différentes valeurs aux stations se trouvant à l'intérieur d'un point de grille étant comparées à la valeur à ce point de grille) a permis de montrer que :

- ces valeurs étaient, pour la grande majorité des points de grille, comprises entre 0,8 et 1, ce qui est cohérent avec l'hypothèse que les intensités simulées sont des moyennes spatiales sur un élément de grille (Osborn et Hulme, 1997; Chen et Knutson, 2008) ;
- globalement, les différences entre le groupe piloté réanalyses et le groupe piloté MGC étaient peu significatives, suggérant que l'utilisation d'un MGC comme pilote n'entraînait pas de dégradation marquée de la performance ;
- en termes de distribution spatiale, les plus grands écarts sont observés en Colombie-Britannique où plusieurs valeurs se situent dans l'intervalle 1,1 à 1,4 suggérant une surestimation des valeurs observées (régions montagneuses où l'estimation des quantiles de pluies extrêmes posent un défi tant pour l'observation que pour la simulation).

Les différences entre climat futur et historique ont été estimées en divisant le territoire canadien en 14 zones climatiques. Des valeurs moyennes régionales pour chaque période et chaque région ont été calculées permettant ainsi d'évaluer la variation relative des pluies intenses entre climat futur et historique pour les différentes durées et périodes de retour considérées. Ces variations relatives varient sensiblement d'une région à l'autre (indiquant toutefois globalement une tendance à la hausse des intensités) allant par exemple de 20 à 25 % selon la période de retour et la durée pour la région des Grands Lacs et du Sud de l'Ontario à aucune augmentation pour la durée 120 heures pour la région sud de la Colombie-Britannique. Pour la région du sud du

Québec (essentiellement la vallée du St-Laurent), les projections suggèrent des augmentations de l'ordre de 10 à 20 %. Tous les résultats de ces analyses sont présentés dans Mailhot *et al.* (2012).

3.2. Événements de pluie

Plusieurs applications hydrologiques exigent de préciser comment se succèdent les périodes sèches et humides ou encore de représenter la séquence pluviométrique en événements de pluies et en périodes sèches. Cette succession de périodes sèches et humides détermine les conditions initiales et l'état des systèmes hydrologiques qui conditionnent eux-mêmes la réponse hydrologique lorsque survient un événement pluvieux donnée. Idéalement donc l'exploration de la réponse hydrologique passe par la donnée d'une séquence météorologique (pluie, température, *etc.*) sur une période suffisamment longue pour permettre de couvrir les principales conditions historiques rencontrées (année sèche, année humide), et ce à des résolutions spatiales et temporelles adéquates pour permettre une modélisation réaliste de cette réponse. Dans le cas des bassins en milieu urbain, leur temps de réponse relativement court (de l'ordre de 1 heure dans certains cas) demande de préciser les hauteurs de pluie à des pas de temps de l'ordre de 5 minutes (Freni *et al.*, 2010). De même dans le cas d'événements de pluies extrêmes de type convectif, il peut être nécessaire d'avoir une caractérisation spatiale à plus fine résolution afin de tenir compte du caractère local et hétérogène de ces systèmes de précipitations (Berne *et al.*, 2004). On le voit, la simulation hydrologique en milieu urbain exige une représentation à fine résolution temporelle et spatiale des champs de précipitations.

Les travaux relatifs à la définition et la caractérisation des événements de pluies initialement prévus ne sont pas entièrement complétés (cette question est abordée en partie au Chapitre 7). Nous présentons dans ce qui suit un résumé des travaux réalisés à ce jour. Ainsi, après avoir expliqué comment sont définis les événements de pluie et décrit les caractéristiques de ces événements (section 3.2.1), la section 3.2.2 aborde la question de savoir comment les données historiques de pluies peuvent être utilisées pour définir des événements de pluie. Enfin la section 3.3.3 décrit les travaux en cours

visant, dans un premier temps, à comparer les caractéristiques des événements de pluie observés et simulés par le MRCC et, dans un second temps, à voir comment ces caractéristiques évolueront en climat futur.

3.2.1. Définition et caractéristiques d'un événement de pluie

La définition d'un événement de pluie exige de préciser, d'une part, la durée sèche inter-événement et, d'autre part, la hauteur minimale de pluie (seuil à partir de laquelle le pas de temps en question peut être considéré comme « humide ». Il existe à cet effet plusieurs définitions possibles (Dunkerley, 2008). Celle retenue dans le cadre des présents travaux considère un temps sec inter-événement de 1 heure et un seuil de 0,3 mm. La durée du temps inter-événement se justifie par le fait que les séries horaires de pluies sont utilisées pour fins de comparaison avec le MRCC et le seuil de 0,3 mm est tributaire de la résolution des pluviomètres (l'effet de la conversion dans les années 1980 du système anglais au système métrique a également été considéré dans le choix de ce seuil).

Les caractéristiques suivantes des événements de pluie ainsi définis sont ensuite analysées : 1) hauteur totale ; 2) durée ; 3) intensité moyenne ; 4) intensité maximale (p.ex. sur une heure) ; 5) durée des périodes sèches (durée inter-événements). Une analyse saisonnière et mensuelle est effectuée puisque les conditions et les systèmes à l'origine de ces événements de pluie varient selon les mois et les saisons.

3.2.2. Séries historiques et événements de pluie

Historiquement, la collecte de données météorologiques s'est faite à travers des stations dispersées sur le territoire. Au Canada, la densité de stations demeure relativement faible compte tenu de l'étendue du territoire et des faibles densités de population. Si la couverture en stations journalières demeure acceptable, le nombre de stations horaires ou encore de moins d'une heure est très modeste. Qui plus est, l'archivage des données s'est fait en ne retenant, pour les stations munies de pluviomètres à auget basculeur (*i.e.* les stations où les enregistrements permettent d'estimer les intensités pour des durées de l'ordre de la minute), que les maximas journaliers pour différentes durées (CSA, 2012). Ce faisant il n'est pas possible de reconstituer les chroniques météorologiques (p. ex. les hauteurs de pluie tombées à chaque cinq minutes).

Les données horaires de précipitations aux différentes stations EC représentent la source de données pour l'analyse en événements de pluie. L'utilisation de ces séries horaires permet un découpage en événements de pluie même si cette résolution temporelle demeure relativement grossière par rapport à la durée moyenne de ces événements (notamment des pluies de courtes durées). La Figure 3.1 présente une carte localisant les stations horaires d'EC utilisées pour l'analyse en événements de pluie. À noter que seule la période de mai à octobre est considérée, les pluviomètres n'étant pas en fonction durant la période hivernale. Aussi, seules les stations avec plus de 10 ans de données valides sont retenues (le critère retenu est moins sévère que celui utilisé pour l'analyse des extrêmes de pluie qui était de 15 années de données valides puisque, dans ce dernier cas, la variabilité interannuelle est beaucoup plus importante). Une année (ou un mois) est considérée valide si la période de données manquantes représente moins de 10 % de la période totale (mois ou année). Une année correspond à la période du mois de mai à octobre inclusivement. Pour l'analyse annuelle, le nombre de stations avec plus de 10 ans de données valides est de 434. Il est important de noter que le décompte final du nombre de station est fonction de l'échelle de temps considéré. En effet, pour une station donnée, il arrive que plus de 10 ans de données soient disponibles à l'échelle mensuelle mais pas à l'échelle annuelle et vice versa.

La Figure 3.2 présente les périodes couvertes par les séries valides disponibles aux différentes stations. Cette figure montre que les plus vieilles stations sont en opération depuis les années 50, que le premier contingent de stations a été mis en opération dans les années 60, que le nombre de stations en opération a sensiblement augmenté au cours des années 70 à 90 et qu'ensuite plusieurs stations ont été fermées au cours des années 90. Cette figure montre également que, même si plusieurs stations sont encore en opération, il n'a pas été possible d'obtenir les séries jusqu'aux dernières années et que le contrôle de qualité de ces données reste à faire.

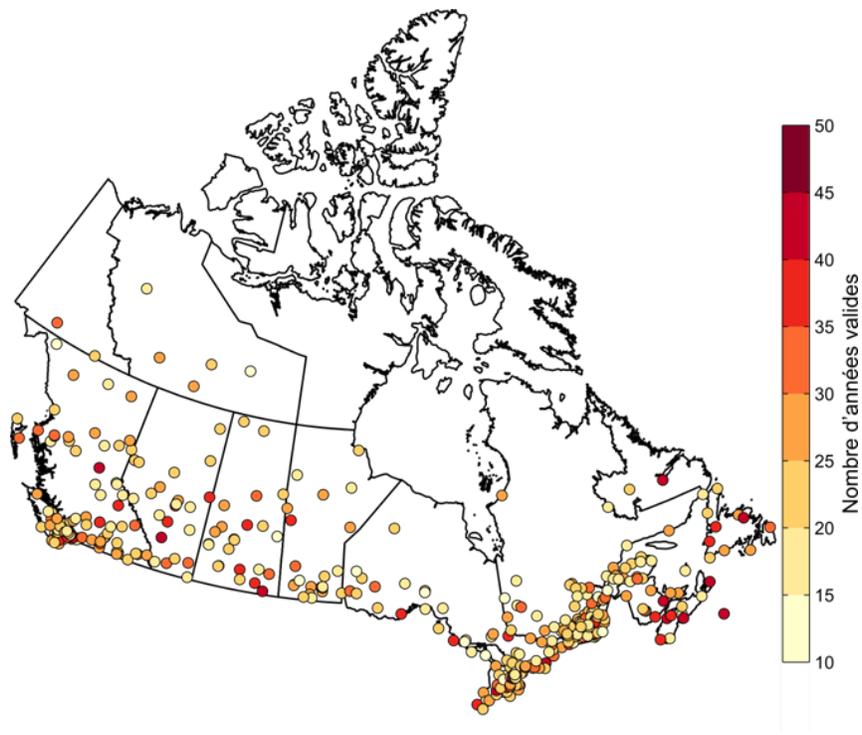


Figure 3.1 : Carte localisant les stations de précipitations horaires utilisées dans le cadre de l'analyse par événement de pluie. Les couleurs indiquent le nombre d'années valides disponibles à chaque station.

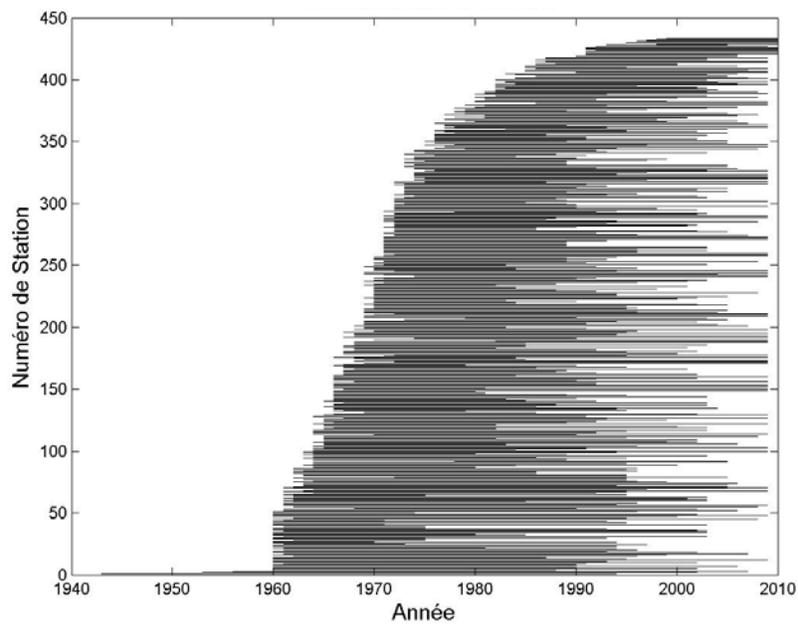


Figure 3.2 : Histogrammes des périodes couvertes par les séries horaires de précipitations aux différentes stations (les stations sont ordonnées en fonction de leur année de début d'opération).

A titre préliminaire, les séries à cinq stations ont été analysées afin d'explorer les tendances sur les médianes et les 90^e percentiles des valeurs annuelles de trois caractéristiques des événements de pluies (hauteur, durée et hauteur maximale sur une heure). Les cinq stations ont été choisies de façon à être issues de régions climatiques différentes et sont celles pour lesquelles les séries disponibles étaient les plus longues. Les statistiques ont été calculées sur les mois de mai, août et septembre. L'un des objectifs étant de voir si l'on observe des comportements singuliers, en termes de tendance, en fonction des mois et des régions. Le Tableau 3.2 donne toutes les informations relatives à chacune de ces cinq stations. Les résultats sont illustrés aux Tableaux 3.3 et 3.4.

Il est à noter que pour la représentativité des statistiques annuelles des caractéristiques des événements, un filtre sur le nombre d'événements a été mis en place. En effet, il arrive que des stations pour un mois donné d'une année donnée ne présentent qu'un seul événement. Il n'est donc pas possible de calculer une statistique sur cet échantillon. Ainsi, pour le calcul de la médiane et du 90^e percentile des valeurs annuelles d'une caractéristique, on s'est assuré que pour la période choisie (mois ou année), il y ait au moins 10 événements de pluies. Cette méthode est encore préliminaire et reste à approfondir mais elle permet d'ores et déjà de se faire une première idée.

Le test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1955) avec un seuil de confiance à 95% a été choisi pour l'analyse de tendance. Par ailleurs, seules les séries de plus de 25 ans ont été ici considérées. La condition de 10 ans de données est conservée pour les autres analyses telles que la répartition du nombre d'événement en fonction de leurs durées.

Tableau 3.2 : Caractéristiques des stations retenues (aéroports) pour l'analyse de tendances. Période de Mai à Octobre

Station	Région climatique associée selon Plummer et al. (2005)	Période couverte
Vancouver	Côte ouest	[1960-2008]
Calgary	Ouest des Rocheuses	[1960-2009]
Winnipeg	Plaine du nord	[1960-1994]
Toronto	Région des Grands Lacs	[1960-2008]
Québec	Forêt Nord Est	[1961-1995]

Tableau 3.3 : Tendances des médianes des valeurs annuelles de hauteurs (mm), durée(h) et hauteur maximale sur une heure (mm) des événements de pluie. Les valeurs -1, 0 et 1 correspondent respectivement à une tendance négative, nulle et positive (niveau de confiance 95 %).

Station	Hauteur (mm)			Durée (h)			Hauteur maximale sur une heure (mm)		
	Mai	Aout	Sept.	Mai	Aout	Sept.	Mai	Aout	Sept.
Vancouver	0	1	0	1	1	0	0	0	0
Calgary	0	1	1	0	0	1	0	0	1
Winnipeg	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Toronto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Québec	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Tableau 3.4 : Tendances des 90^e percentiles des valeurs annuelles de hauteurs (mm), durée (h) et hauteur maximale sur une heure (mm) des événements de pluie. Les valeurs -1, 0 et 1 correspondent respectivement à une tendance négative, nulle et positive (niveau de confiance 95 %).

Station	Hauteur (mm)			Durée (h)			Hauteur maximale sur une heure (mm)		
	Mai	Aout	Sept.	Mai	Aout	Sept.	Mai	Aout	Sept.
Vancouver	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
Calgary	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Winnipeg	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Toronto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Québec	0	0	0	1	0	0	0	-1	0

On peut voir pour ces cinq stations que (il convient de considérer que ces résultats demeurent préliminaires) :

- la station de Québec est celle qui montre un plus grand nombre de tendances positives en ce qui concerne les médianes des caractéristiques retenues, et ce pour tous les mois ;
- comparativement aux autres mois, le mois d'août est celui où l'on observe le plus de tendances pour les médianes des hauteurs et des hauteurs maximales sur une heure ;
- enfin, l'analyse des 90^e percentiles montrent beaucoup moins de tendances significatives (la détection de ces tendances est d'ailleurs beaucoup plus difficiles que celles sur les moyennes).

Cette même analyse a été menée sur la médiane de l'ensemble des caractéristiques, sur toutes les stations valides et à l'échelle annuelle et mensuelle (Tableau 3.5). Il est à noter que le nombre total de stations valides (première ligne du Tableau 3.5) dans l'analyse de tendance varie selon l'échelle temporelle et selon s'il agit de caractéristiques de temps de pluie ou de temps sec. En effet, chaque mois ou année (période de mai à octobre) étant considéré de façon indépendante, il arrive qu'une station présente plus de 25 ans de données pour un mois donné mais pas forcément pour les autres mois ou à l'échelle annuelle. En parallèle, le critère sur le nombre minimal d'évènements annuel pour l'estimation des statistiques (médianes ou 90^e percentiles) joue sur les différences entre nombre de stations pour l'analyse des périodes sèche, des périodes sèches et sur le total du nombre d'année disponible. Par exemple, il peut arriver que, pour une station et une échelle temporelle donnée, 10 évènements de pluie et neuf périodes sèches soient observés sur une année. L'année en question ne sera donc considérée que pour l'analyse des périodes humides.

On peut remarquer que les tendances observées sont globalement toutes positives. Les hauteurs, les hauteurs maximales sur une heure et les intensités moyennes sont les caractéristiques qui montrent le plus grand nombre de tendances significatives (niveau de confiance de 95 %), ce qui n'est pas le cas pour les durées sèches et humides. Ces résultats demandent toutefois à être investigués de plus près. En effet, certaines de ces tendances pourraient être des artefacts liées au changement d'appareillage ou à la

conversion des unités anglaises (pouces) aux unités du système métrique dans les années 1970. Un travail de validation reste donc à faire afin de voir si ces modifications ont pu avoir une incidence sur le seuil et sur les caractéristiques des événements de pluie.

Tableau 3.5 : Nombre de stations pour l'ensemble du Canada avec tendances significatives (niveau de confiance 95 %) sur les séries annuelles des médianes. Le nombre entre parenthèses correspond aux nombres de stations avec des tendances positives.

Caractéristiques	Annuel	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.
Nombre total de stations-humide	265	142	202	188	168	162	134
Hauteur (mm)	200(200)	45(45)	75 (75)	62(62)	55(55)	64(64)	56(56)
Durée (h)	6(5)	6(2)	4(3)	4(2)	1(0)	4(3)	6(6)
Hauteur maximale sur une heure (mm)	202(202)	65(65)	95(95)	77(77)	73(73)	87(87)	81(81)
Intensité moyenne (mm)	217(217)	85(85)	133(133)	110(109)	97(97)	120(120)	104(104)
Nombre total de stations-sec	265	129	195	181	159	154	124
Durée période sèche (h)	90(90)	14(13)	19(19)	22(21)	15(14)	23(22)	19(19)

Il est également intéressant de regarder la distribution des caractéristiques à chacune des stations. Un travail préliminaire a permis de voir que les caractéristiques des stations présentaient une distribution fortement asymétrique. Une transformation logarithmique des courbes empiriques des fréquences cumulées a été appliquée afin d'améliorer la représentation visuelle de ces courbes. Ainsi on peut voir aux Figure 3.3 à 3.5, le logarithme des fréquences au non dépassement des hauteurs, des intensités et des hauteurs maximales sur une heure pour quatre stations au mois de mai. On peut voir que la station de Vancouver se détache des autres stations, avec des probabilités de non dépassement plus faibles pour toutes les caractéristiques.

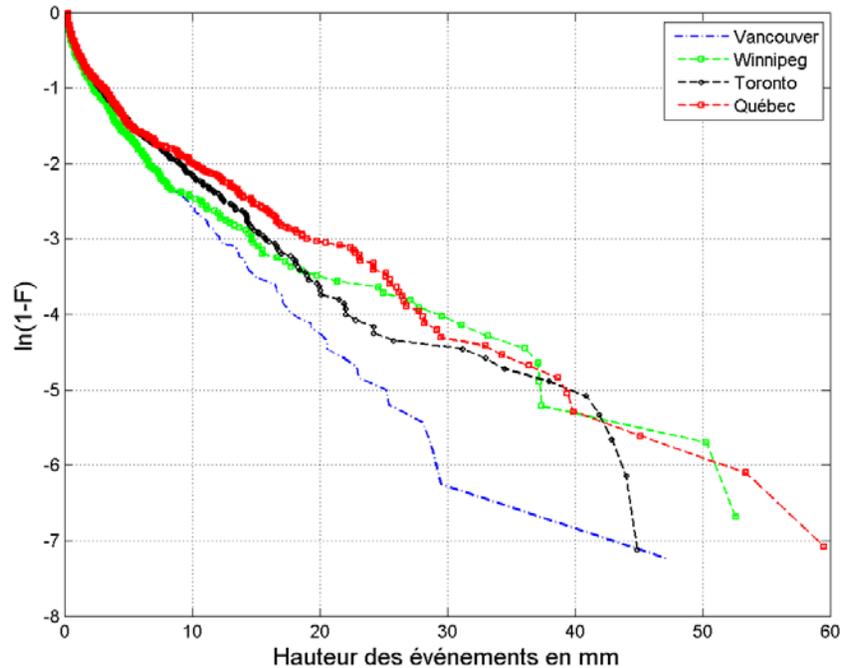


Figure 3.3 : Logarithme des fréquences au non dépassement des hauteurs des événements en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).

Il est également important de connaître la répartition spatiale des statistiques de ces caractéristiques. Il a été choisi de travailler avec la médiane car elle est moins sensible aux valeurs extrêmes. Les figures 3.6 à 3.8 illustrent les cartes des médianes des hauteurs, des hauteurs maximales sur une heure et des intensités moyennes, le tout pour une analyse en événement. On peut remarquer qu'en terme de hauteur (Figure 3.6), la structure spatiale n'est pas si marquée sauf peut-être aux mois de juin et juillet où on observe des valeurs plus importantes au sud de la province de Québec. La Figure 3.7 des médianes des hauteurs maximales sur une heure montre déjà un peu plus de contrastes. En effet, en général les valeurs sont plus importantes à l'est et à l'ouest, et elles le seront d'autant plus pour les mois de juin à septembre. On remarquera peu de variabilité dans les Plaines. Les médianes des intensités moyennes ont le même comportement que les hauteurs maximales sur une heure (Figure 3.8).

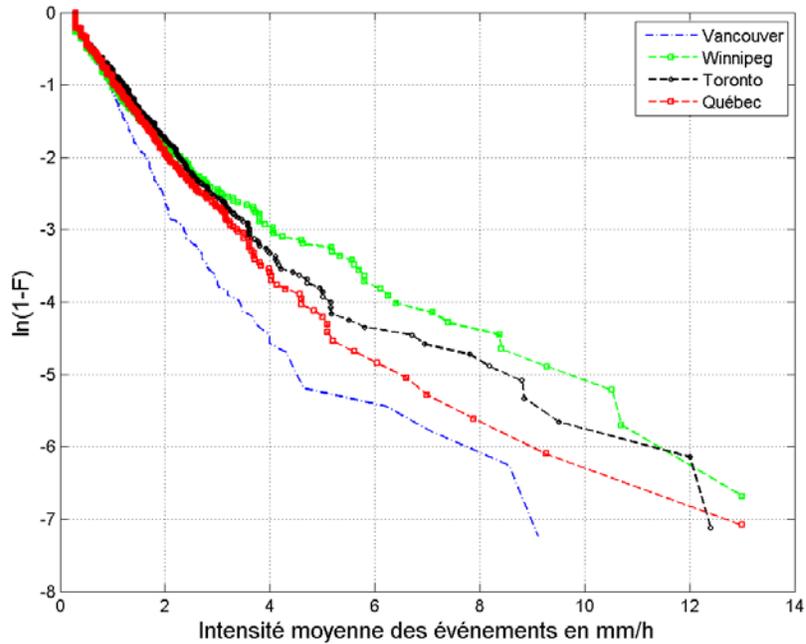


Figure 3.4 : Logarithme des fréquences au non dépassement des intensités moyennes des événements en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).

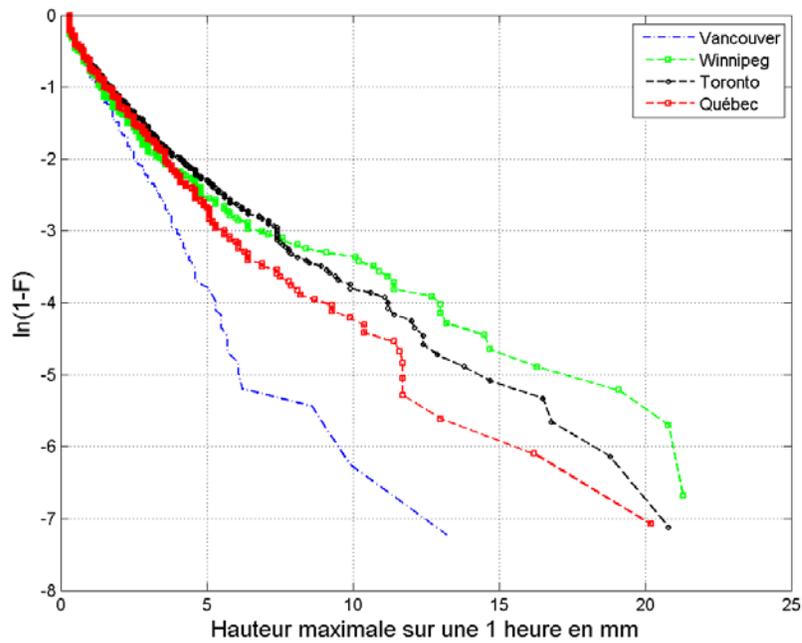


Figure 3.5 : Logarithme des fréquences au non dépassement des hauteurs maximales des événements sur une heure en mm au mois de mai pour Vancouver (bleu), Winnipeg (vert), Toronto (noir) et Québec (rouge).

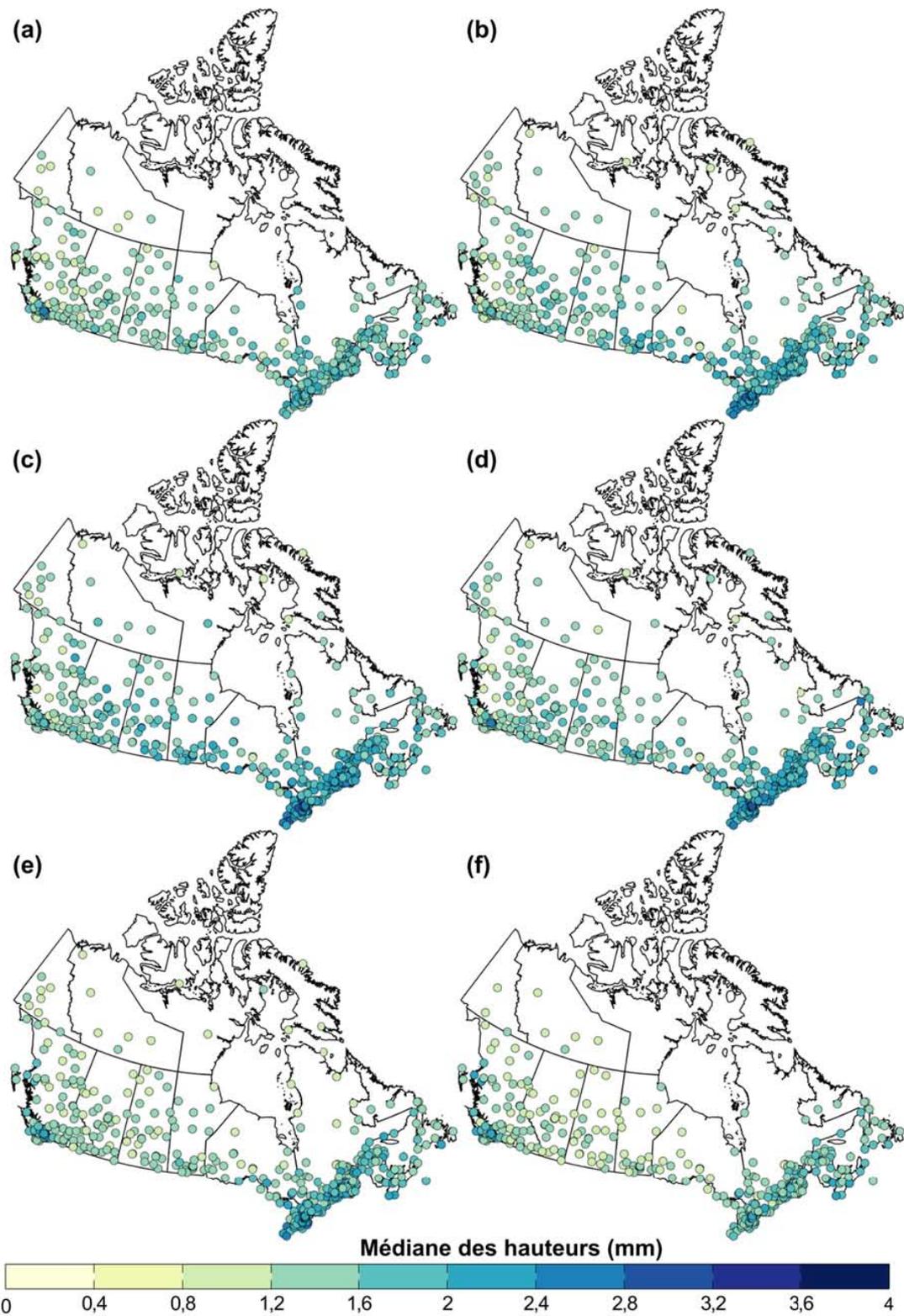


Figure 3.6 : Cartes des médianes des distributions mensuelles des hauteurs de pluie (mm) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.

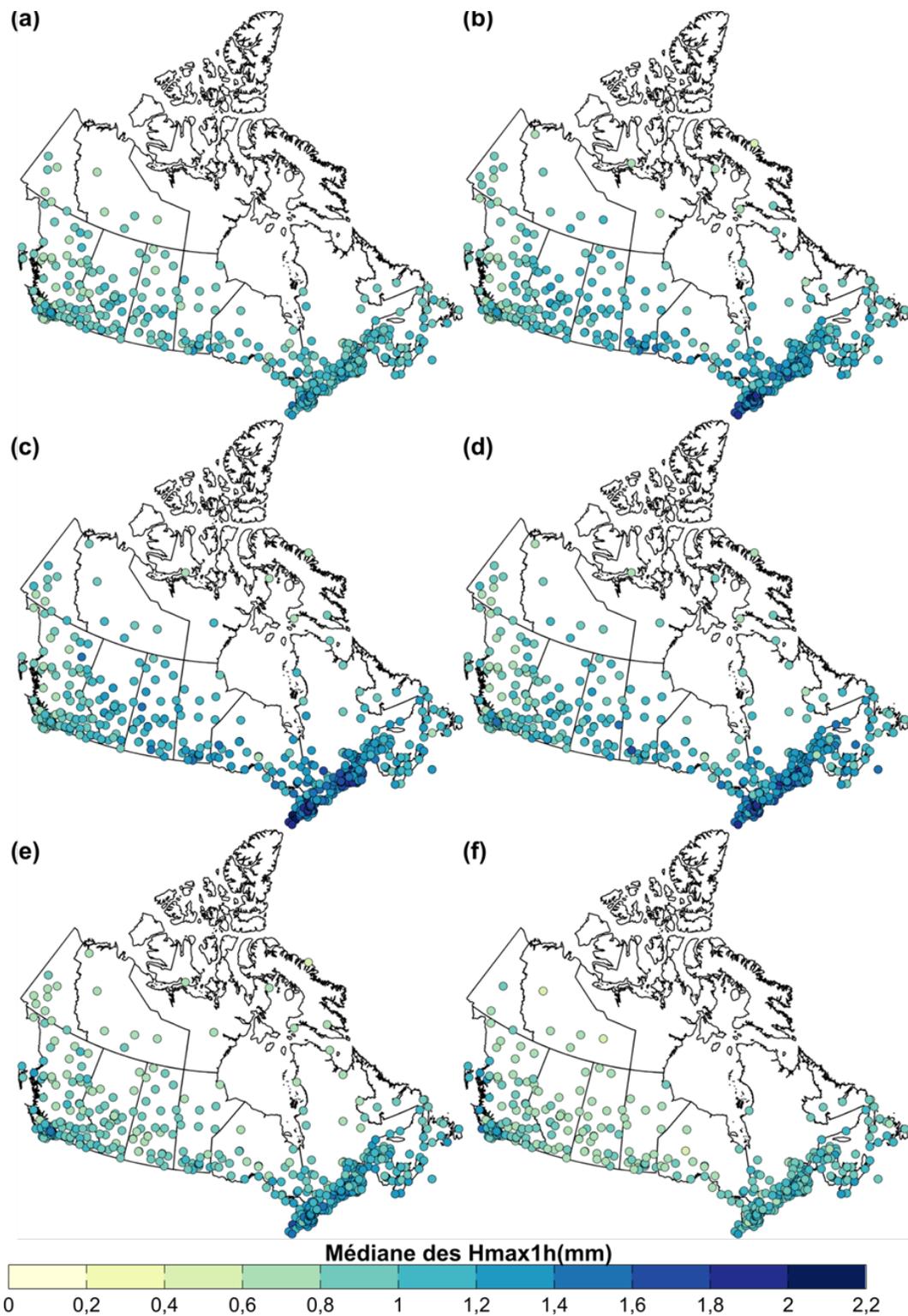


Figure 3.7 : Cartes des médianes des distributions mensuelles des hauteurs maximales (Hmax1h, mm) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.

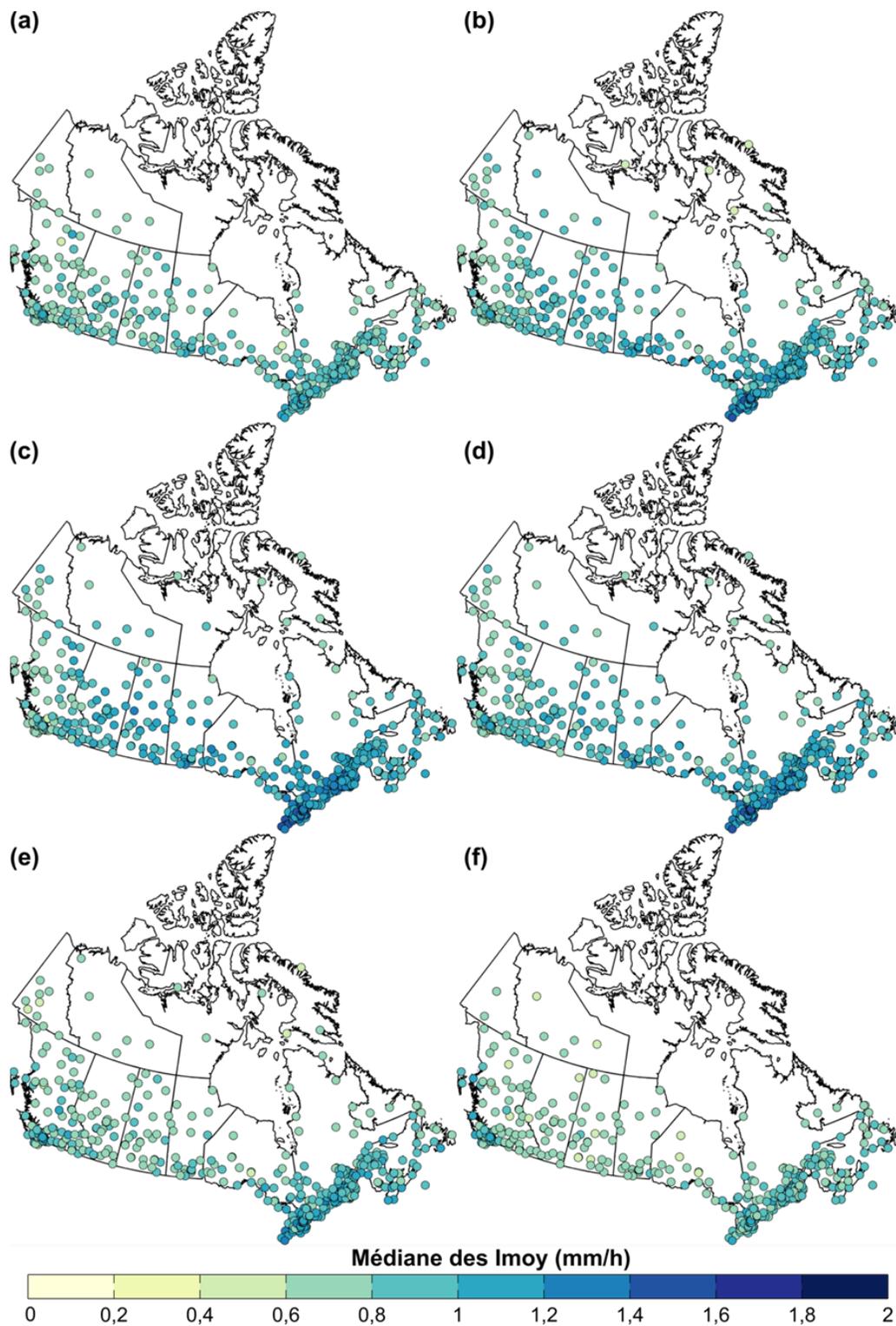


Figure 3.8 : Carte des médianes des distributions mensuelles intensités moyennes (I_{moy} , mm/h) par événement par mois : (a) mai ; (b) juin ; (c) juillet ; (d) août ; (e) septembre ; (f) octobre.

Pour les durées des événements de pluie, trois classes ont été définies à savoir les événements de : 1) courtes durées (1 à 3 heures); 2) moyennes durées (4 à 10 heures); 3) longues durées (11 heures et plus). Cette classification est dictée par le type de processus en jeu dans la génération des événements de pluie. Ainsi les processus convectifs domineront dans le cas des événements de courtes durées alors que les événements de longues durées seront généralement associés à des systèmes synoptiques ou attribuables à des effets orographiques. Enfin, les pluies de moyennes durées seront le résultat de systèmes comportant à la fois une composante convective et synoptique (Hand *et al.*, 2004; CSA, 2012).

Il est intéressant de voir l'évolution au fil des mois du nombre moyen d'événements au cours de la période de mai à octobre. Pour ce faire, on s'est d'abord concentré sur les cinq stations mentionnées précédemment. On peut voir que :

- pour les événements de courtes durées (1 à 3 heures ; Figure 3.9), les stations de Québec, Calgary et Winnipeg montrent une croissance du nombre d'événements pour les mois de juin à août puis une diminution à partir du mois de septembre. Les stations de Vancouver et Toronto présentent un comportement différent;
- pour les événements de moyenne durée (4 à 10 heures ; Figure 3.10), le nombre moyen d'événements mensuel est moins important que pour les événements de courtes durées. De plus, le nombre moyen d'événements à Vancouver augmente de façon significative au mois d'octobre alors qu'il diminue à Calgary. À Québec, ce genre d'événement connaît un minimum pour les mois de juin et juillet ;
- pour les événements de longue durée (11 heures et plus ; Figure 3.11), encore une fois, le nombre moyen d'événements est bien inférieur par rapport aux deux cas précédents. On pourra aussi noter que Vancouver voit ce genre d'événements devenir plus important au mois d'octobre.

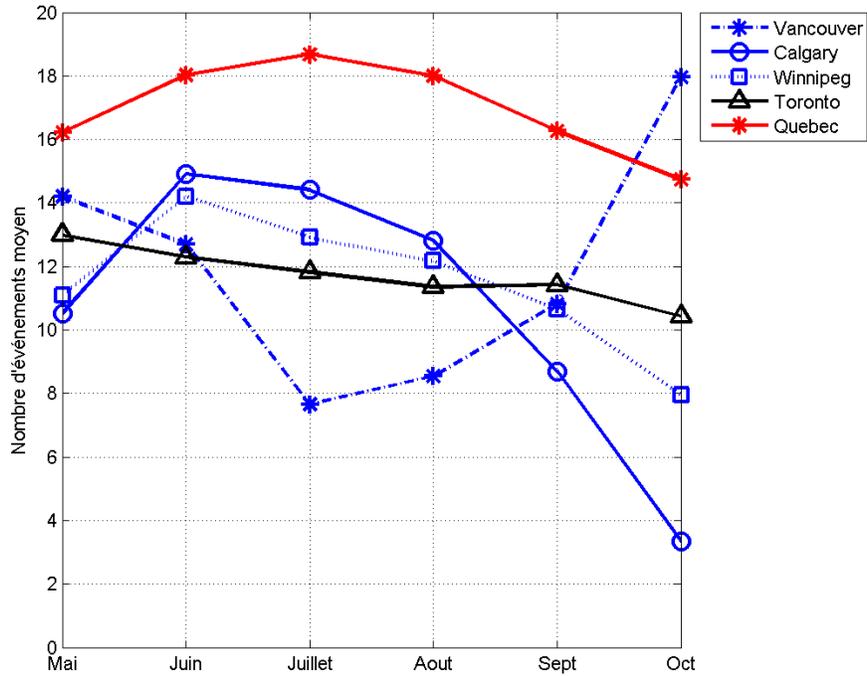


Figure 3.9 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées comprises entre 1 et 3 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).

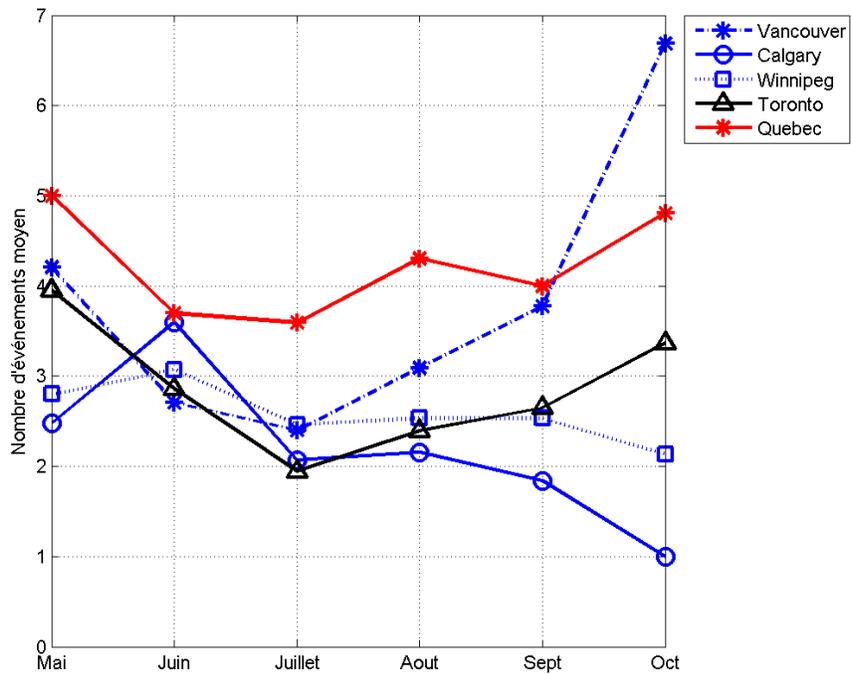


Figure 3.10 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées comprises entre 4 et 10 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).

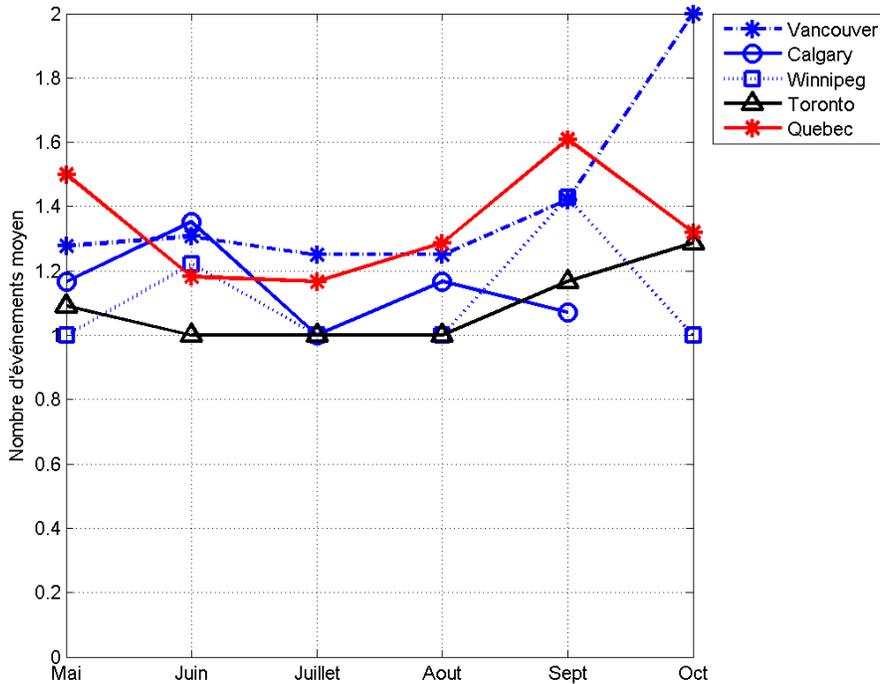


Figure 3.11 : Nombre moyen d'événements par mois pour les durées supérieures à 11 heures, pour Vancouver (bleu étoile), Winnipeg (bleu carré), Calgary (bleu cercle), Toronto (noir triangle) et Québec (rouge étoile).

On a également regardé pour chacune des classes de durées, la répartition spatiale du nombre moyen d'événements à chaque mois de la période de mai à octobre. La classe des événements courts montre la plus grande variabilité spatiale. On observe sur la Figure 3.12, à l'extrême ouest, le nombre moyen d'événement diminue en été pour augmenter à nouveau au mois d'octobre. Par ailleurs, on remarque que peu importe les mois, la région sud du Québec et l'ouest de la Colombie-Britannique sont les territoires où le nombre moyen d'événements courts est le plus important. En augmentant les durées (Figure 3.13 et Figure 3.14), le nombre moyen d'événements diminue considérablement mais avec toujours, pour la plupart des mois, des valeurs plus importantes à l'est et à l'ouest du territoire.

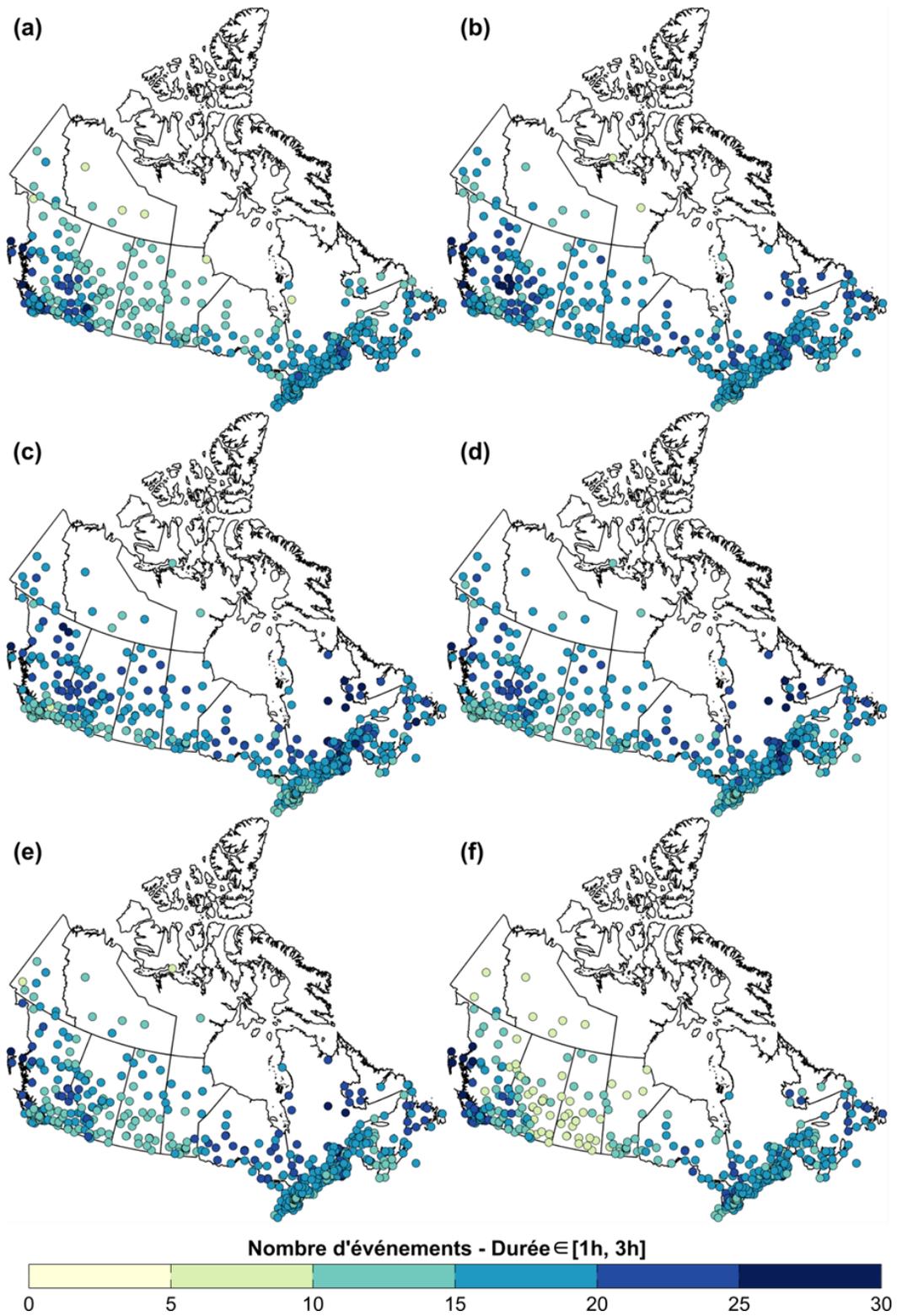


Figure 3.12 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées comprises entre 1 et 3 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.

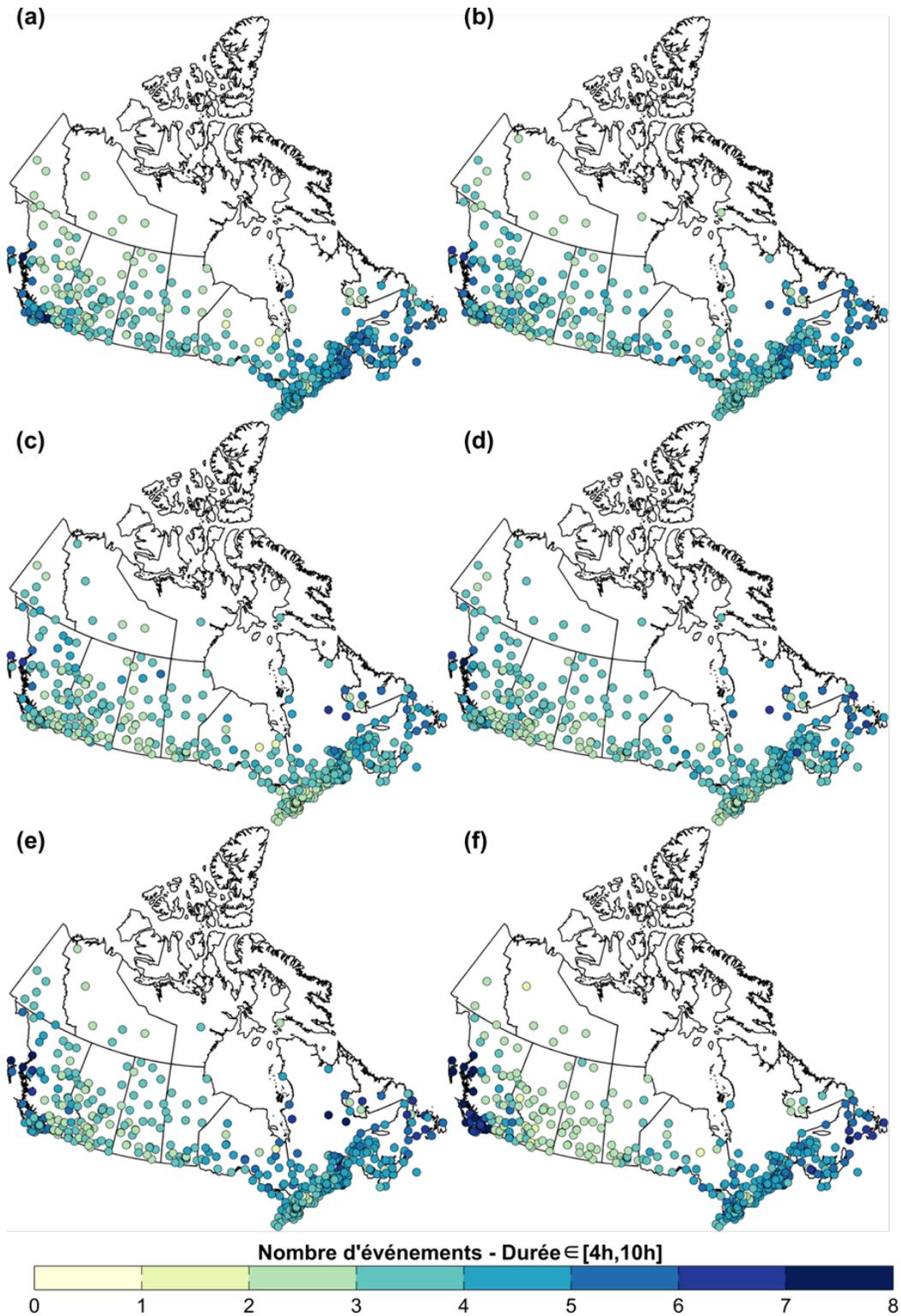


Figure 3.13 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées comprises entre 4 et 10 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.

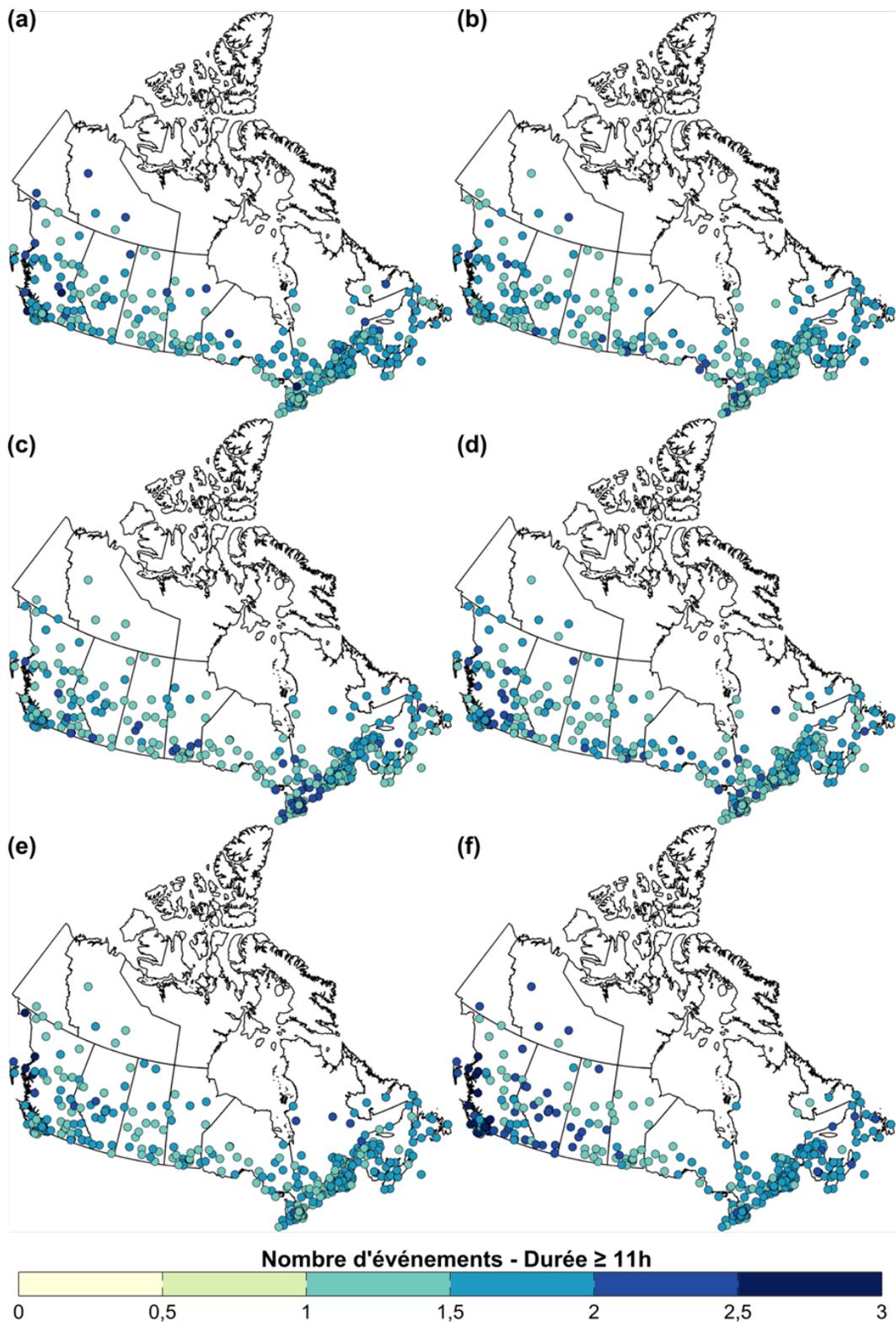


Figure 3.14 : Cartes du nombre mensuel moyen d'événements de durées supérieures à 11 heures pour les mois : (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août, (e) septembre, (f) octobre.

3.2.3. Caractéristiques observées et simulées et projections en climat futur

L'étape suivante consiste à analyser les séries de deux simulations du MRCC pour la période historique et à comparer les caractéristiques des événements simulés à celles des événements enregistrés aux stations pluviométriques. Cette comparaison permettra de vérifier la cohérence entre valeurs simulées et observées, essentielle à l'interprétation des résultats du modèle. L'analyse des caractéristiques des événements de pluie simulées en période future et la comparaison avec les mêmes caractéristiques en période historique permettront enfin de voir comment celles-ci seront modifiées par les CC. À titre d'exemple, il sera possible de voir si les CC affecteront le nombre d'événements de courtes durées pour chaque saison, l'intensité moyenne et maximale des événements de pluie ou encore la durée moyenne des événements.

3.3. Pluies hivernales

Si les pluies d'été, généralement intenses et de courtes durées, et les pluies automnales, de moindre intensité mais de plus longue durée, peuvent s'avérer critiques en matière de gestion des eaux pluviales en milieu urbain, il ne faut pas pour autant négliger les pluies hivernales. Ces dernières sont définies comme étant des précipitations sous forme liquide survenant pendant les mois de janvier et février, donc pendant des mois où l'essentiel des précipitations est sous forme solide. Ces pluies sont les plus susceptibles de poser de problèmes en matière de drainage en milieu urbain. Lors de tels événements, des températures moyennes sous le point de congélation et des accumulations de neige au sol sont généralement enregistrées. Le ruissellement et l'évacuation des eaux pluviales sont alors souvent gênés par la présence de neige et de glace au sol ou sur les puisards d'égout, pouvant ainsi entraîner des accumulations importantes d'eau dans les rues. Dans des cas plus extrêmes, lorsque la pluie s'accompagne d'une hausse marquée des températures, un dégel des cours d'eau et la formation d'embâcles peuvent également entraîner l'inondation de certains secteurs urbains.

Les travaux présentés dans ce qui suit concernent dans un premier temps, l'analyse des tendances historiques des pluies hivernales (Section 3.3.1), la comparaison des indices de pluies hivernales simulés et observés (Section 3.3.2) et enfin le développement de projections futures (Section 3.3.3).

3.3.1. Tendances historiques

Groleau *et al.* (2007) ont réalisé une analyse des tendances historiques de divers indices liés aux pluies hivernales. Les séries de précipitations utilisées proviennent du *Adjusted Historical Canadian Climate Data* (AHCCD; pour plus d'informations voir le site <http://ec.gc.ca/dccha-ahccd/> et pour une description de la méthodologie d'ajustement de ces données consulter Mekis et Hogg, 1999). Les séries de cette base de données ont été homogénéisées, c'est-à-dire corrigées afin de palier d'éventuelles erreurs ou inexactitudes dues aux déplacements des instruments, aux changements d'instruments ou toute autre modification aux sites ou aux instruments de mesure qui auraient pu affecter les valeurs enregistrées (Easterling *et al.*, 1999). Soixante (60) stations localisées dans le sud du Québec et au Nouveau-Brunswick ont été considérées dans cette étude. Les périodes couvertes par les différentes stations varient et sont globalement inclus dans la période 1895-2005.

Six indices liés aux pluies hivernales ont été définis (rappelons que l'on s'intéresse aux précipitations sous forme liquide des mois de janvier et février de chaque année). De ces indices annuels, quatre seront présentés dans ce qui suit à savoir : 1) la hauteur totale de pluie hivernale (mm) ; 2) la hauteur moyenne journalière (mm/jour; correspond au total de pluie hivernale divisé par nombre de jour avec données) ; 3) la hauteur maximale journalière (mm) ; et 4) le nombre de jours avec pluie.

Le test de Mann-Kendall avec Bootstrap (nécessaire à cause de la présence de nombreuses valeurs nulles pour certains indices; Mann, 1945; Kendall, 1955; Helsel et Hirsch, 2002) et la pente de Sen (Sen, 1968) ont été utilisés pour l'analyse de tendance. Le test de Mann-Kendall permet d'établir l'existence d'une tendance à la hausse ou à la baisse statistiquement significative (le niveau de confiance de 95% a été utilisé) dans les

séries des valeurs annuelles des différents indices. Le test de Sen permet d'estimer l'amplitude de cette tendance.

Cette approche a été reprise dans la présente étude et a été appliquée aux séries des précipitations quotidiennes des stations opérées par le MDDEFP. Cent trente-trois (133) stations comptant plus de 50 années de données et couvrant à des degrés divers la période 1900-2011 ont été analysées. Le Tableau 3.6 présente les pourcentages de stations avec tendances significatives selon les résultats de Groleau *et al.* (2007) et selon la présente étude. Bien que les stations et les séries soient différentes, on constate que les pourcentages de stations avec tendance sont comparables. Ainsi le nombre de jours avec pluie est l'indice présentant le plus fort pourcentage de stations avec tendances significatives, suivi de la hauteur moyenne journalière et de la hauteur totale. Les hauteurs maximales journalières de pluie hivernale quant à elle présente un nombre moindre de tendances significatives. À noter que dans tous les cas, la très grande majorité de tendances détectées est positive, indiquant une augmentation des valeurs de ces indices. Globalement, la tendance est donc vers une hausse du nombre de jours avec pluie, de la hauteur totale de pluie hivernale enregistrée, de la hauteur moyenne journalière de pluie hivernale et, dans une moindre mesure, des hauteurs maximales journalières enregistrées.

Tableau 3.6 : Pourcentage de stations avec tendances significatives (niveau de confiance 95 %) pour les différents indices de pluies hivernales (pluie durant les mois de janvier et février). Les nombres entre parenthèses correspondent aux pourcentages de stations avec des tendances positives.

Indices annuels	Groleau <i>et al.</i> (2007)	Présents travaux
Hauteur totale	32(30)	29(26)
Hauteur moyenne journalière	30(28)	32(29)
Hauteur maximale journalière	17(15)	18(16)
Nombre de jours avec pluie	45(42)	38(37)

La Figure 3.15 et la Figure 3.16 présentent les cartes des amplitudes des tendances détectées pour le nombre de jour avec pluie et la hauteur totale de pluie hivernale respectivement. Aucune structure régionale particulière ne semble émaner de ces cartes si ce n'est que les régions limitrophes aux États-Unis, l'Outaouais et la grande région de Montréal semblent plus affectés.

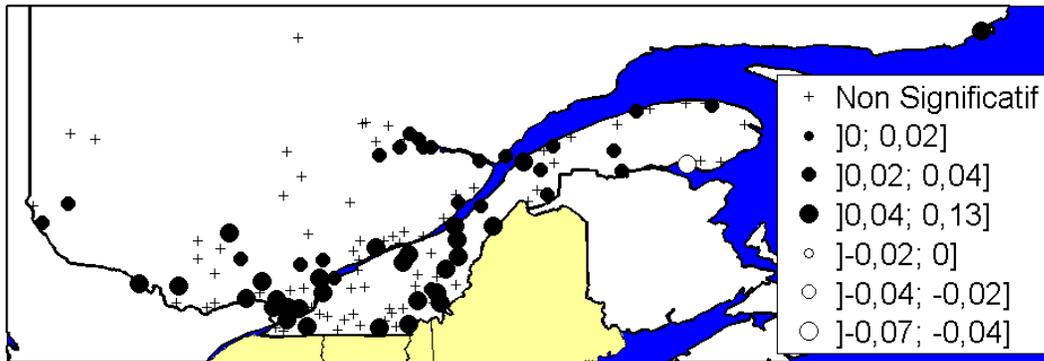


Figure 3.15 : Amplitudes des tendances détectées (jours/année) pour le nombre de jours avec pluie (mois de janvier et février).

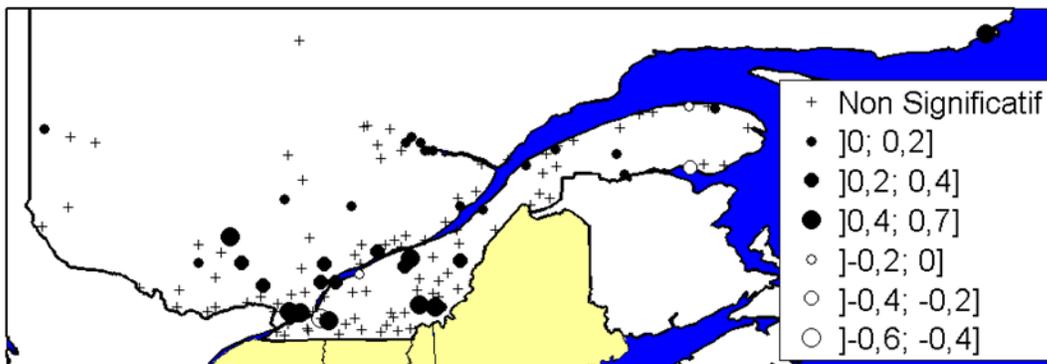


Figure 3.16 : Amplitudes des tendances détectées (mm/année) pour la hauteur totale de pluie (mois de janvier et février).

3.3.2. Comparaison des indices de pluies hivernales simulés et observés

Les séries simulées du NARCCAP sont utilisées (voir section 3.1 pour une description du NARCCAP). Le Tableau 3.7 dresse la liste des simulations considérées (à noter que ces simulations diffèrent de celles de Tableau 3.1 utilisées pour l'estimation des précipitations extrêmes). Deux variables sont considérées à savoir les températures et les précipitations totales à chaque point de grille aux pas de temps de 3 heures. Les séries des températures sont utilisées afin de faire la distinction entre précipitations solides et liquides, la température de transition étant fixée à 2°C. Ainsi, les précipitations totales pour un pas de temps de 3 heures sont assimilées à de la pluie si la température pendant ce pas de temps est supérieure à 2°C et à de la neige si la température est inférieure à 2°C (Auer, 1974; Kienzle, 2008). Les hauteurs de pluie et de neige sont ensuite agrégées au pas de temps journalier et les indices définis à la section 3.3.1 estimés en chaque point de grille. Les résultats présentés dans ce qui suit couvrent la région sud du Québec.

Tableau 3.7 : Simulations NARCCAP utilisées pour l'analyse des pluies hivernales (pour une description des différents MRC et MGC voir le site du NARCCAP à l'adresse <http://www.narccap.ucar.edu>).

MRC	Pilote	Période simulée (présent)	Période simulée (futur)
CRCM	CCSM	1971-1999	2041-2070
CRCM	CGCM3	1971-2000	2041-2070
MM5I	CCSM	1971-1999	2041-2070
WFRG	CCSM	1971-1999	2041-2070
ECP2	GFDL	1971-2000	2041-2070
RCM3	CGCM3	1971-2000	2041-2070
WFRG	CGCM3	1971-2000	2041-2070

Les indices des pluies hivernales calculés à partir des séries simulées ont d'abord été comparés aux valeurs correspondantes aux stations. Les valeurs aux points de grille ont ainsi été comparées aux valeurs des stations se trouvant à l'intérieur d'un point de grille donné (à noter que lorsque plusieurs stations se trouvent à l'intérieur d'un même point de grille, la valeur moyenne aux stations est utilisée). Également, les valeurs moyennes

aux stations correspondent aux valeurs moyennes sur la période historique disponible qu'il y ait ou non des tendances significatives à ces stations. Les Figures 3.17 à 3.19 présentent les cartes des écarts absolus entre les valeurs des indices simulés et observés pour le sud Québec. La Figure 3.20 présente pour sa part les boîtes à moustaches (*box plots*) des écarts absolus entre valeurs des indices simulées et observées pour les différentes simulations.

Ces figures montrent que :

- la simulation CRCM-CCSM surestime le nombre de jours avec pluies hivernales sur l'ensemble du territoire, la hauteur totale de pluie hivernale et la hauteur annuelle maximale pour la partie nord du territoire. Par contre, elle sous-estime ces mêmes variables pour la partie sud ;
- la simulation ECP2-EFGL sous-estime très nettement tous les indices pour l'ensemble du territoire (ce qui suggère un biais froid pour ce couple de modèles) ;
- toutes les simulations (sauf CRCM-CCSM qui, par contre, surestime nettement le nombre moyen de jours avec pluies hivernales) sous-estiment de façon générale les totaux de pluies hivernales. De même, toutes les simulations ont tendance à sous-estimer les valeurs maximales journalières ;
- les simulations RCM3-CGCM3 et WRF3-CGCM3 sous-estiment tous les indices mais de façon plus marquée dans la partie sud ;
- le nombre annuel moyen de jour avec pluies hivernales pour les simulations MMI5-CCSM et WRF3-CCSM est sensiblement similaire aux valeurs observées.

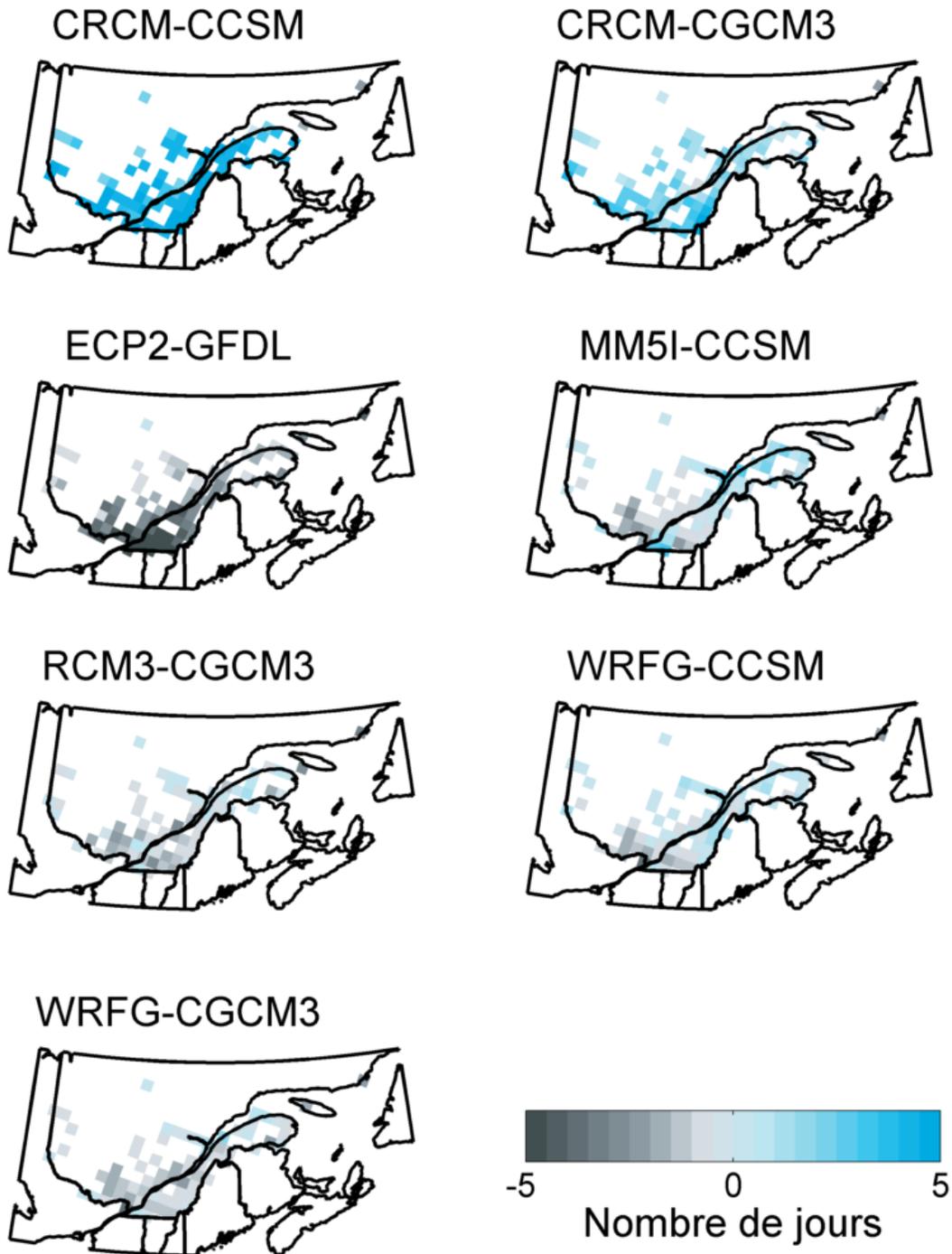


Figure 3.17 : Écarts absolus (simulés – observés) entre les nombres annuels moyens de jours avec pluie hivernale pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.

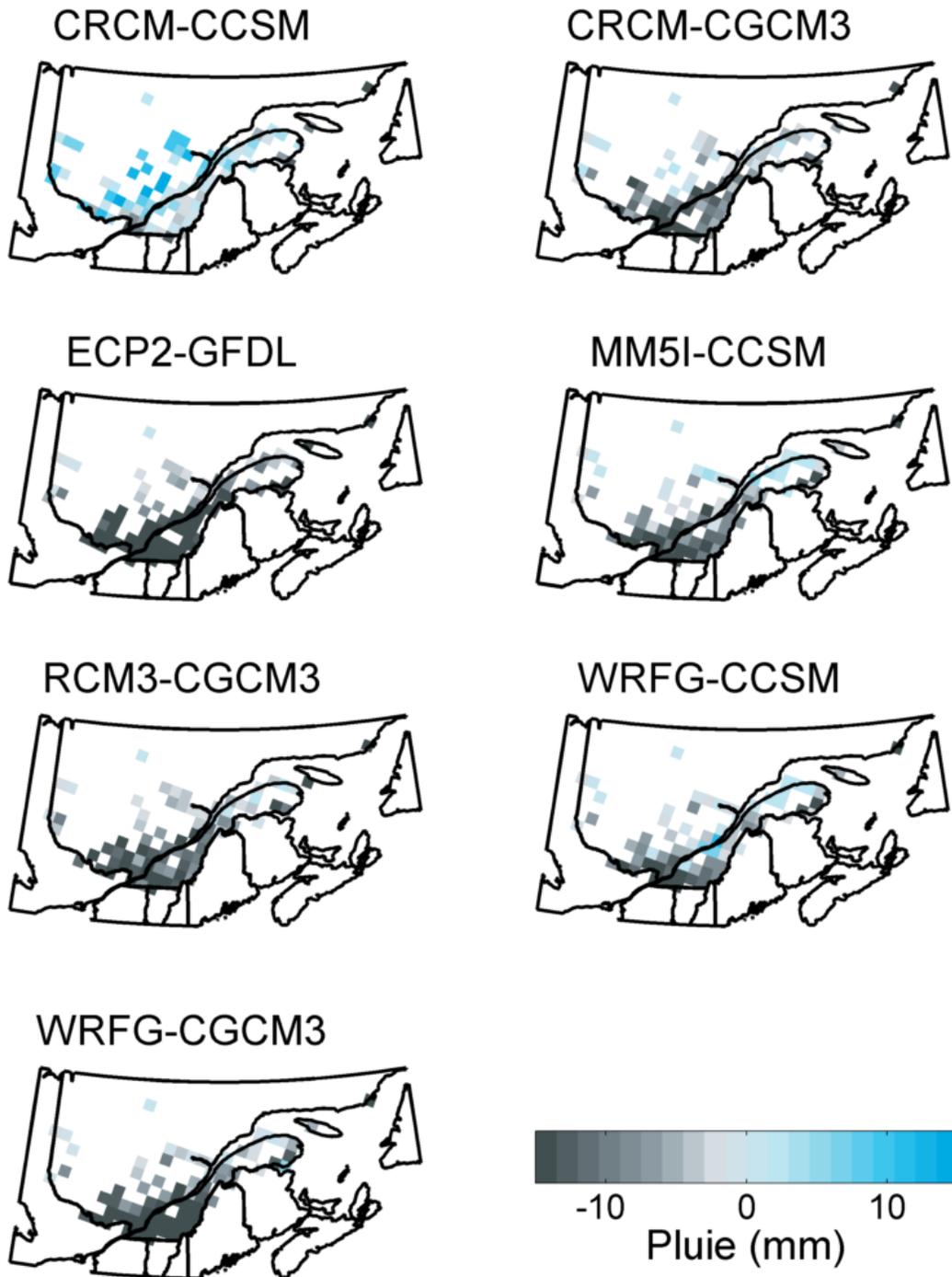


Figure 3.18 : Écart absolu (simulés – observés) entre les moyennes annuelles des hauteurs de pluie hivernale pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.

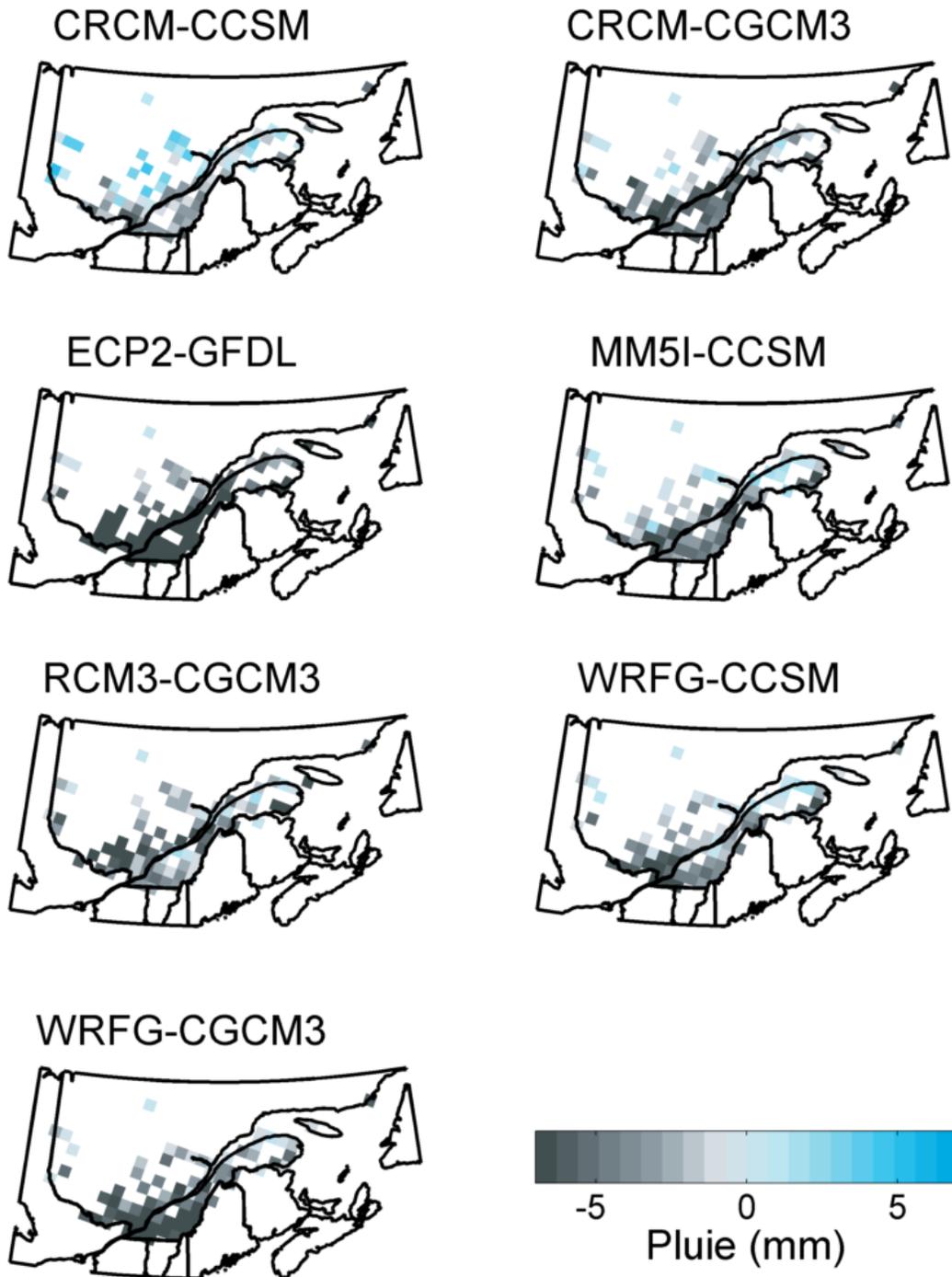


Figure 3.19 : Écarts absolus (simulés – observés) entre les maxima annuels des intensités journalières de pluie hivernale pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les tuiles blanches correspondent aux tuiles où l'on ne trouve aucune station. La valeur moyenne des moyennes annuelles aux stations est considérée lorsque plus d'une station se trouve à l'intérieur d'une tuile.

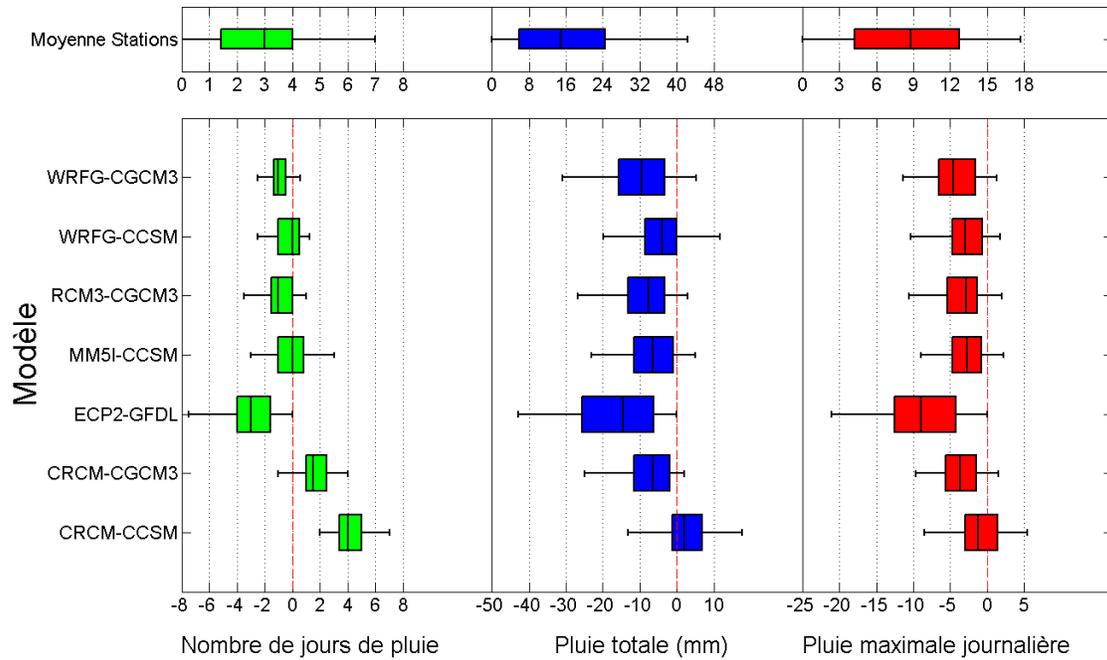


Figure 3.20 : Boîtes à moustaches (*box plots*) des écarts absolus (simulés – observés) entre les valeurs des indices de pluie hivernale pour les différentes simulations (voir Tableau 3.7). La ligne du haut correspond aux boîtes à moustaches des valeurs estimées aux stations.

3.3.3. Évolution des pluies hivernales en climat futur

Un aperçu des travaux réalisés à ce jour relativement au développement de projections futures sur les pluies hivernales est présenté dans ce qui suit. À noter que ces résultats demeurent préliminaires. Comme le suggère les résultats de la section précédente, des travaux supplémentaires seront nécessaires afin notamment de corriger les biais observés. Aucune correction de ce type n'est appliquée dans ce qui suit.

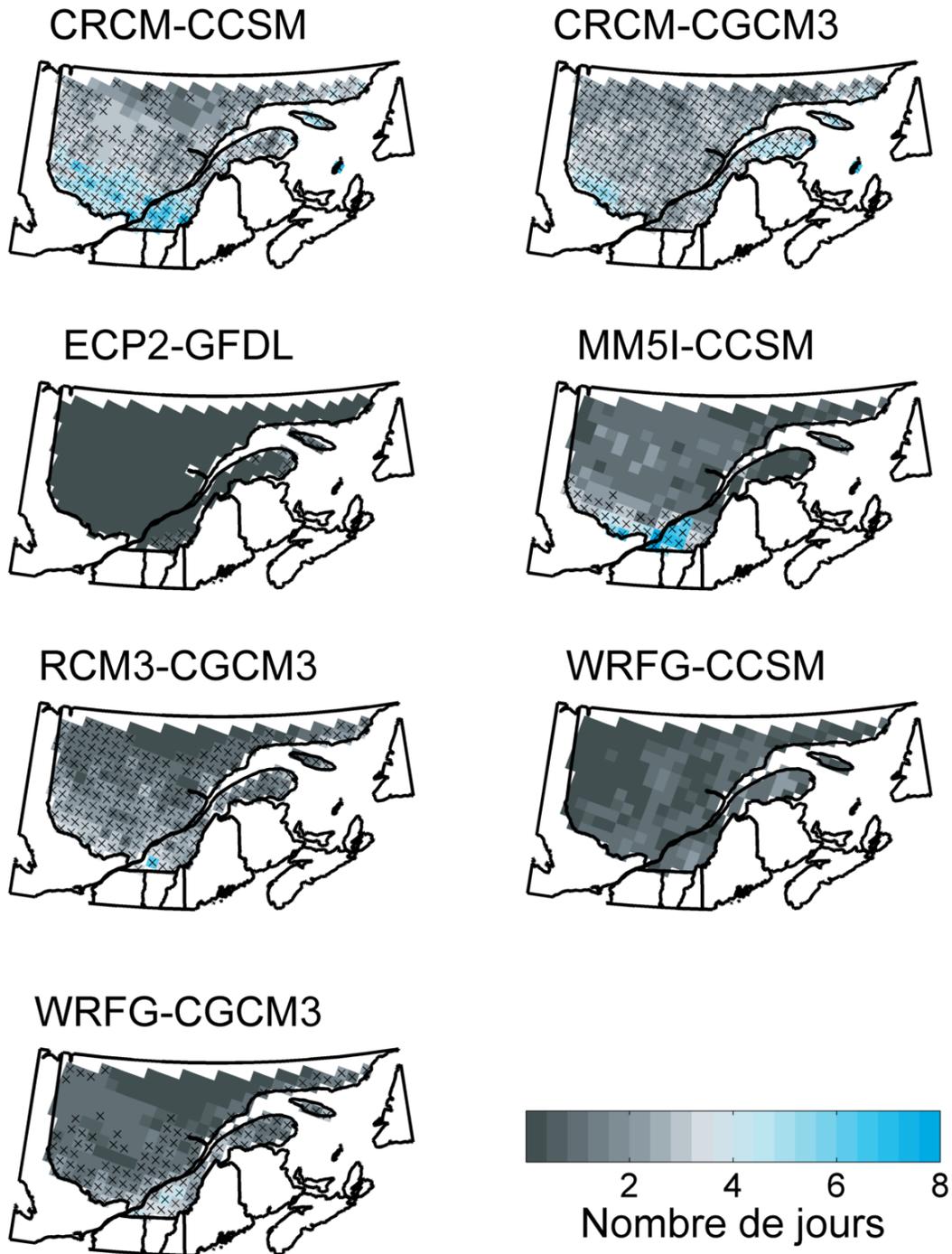


Figure 3.21 : Écart absolu du nombre annuel moyen de jour avec pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.

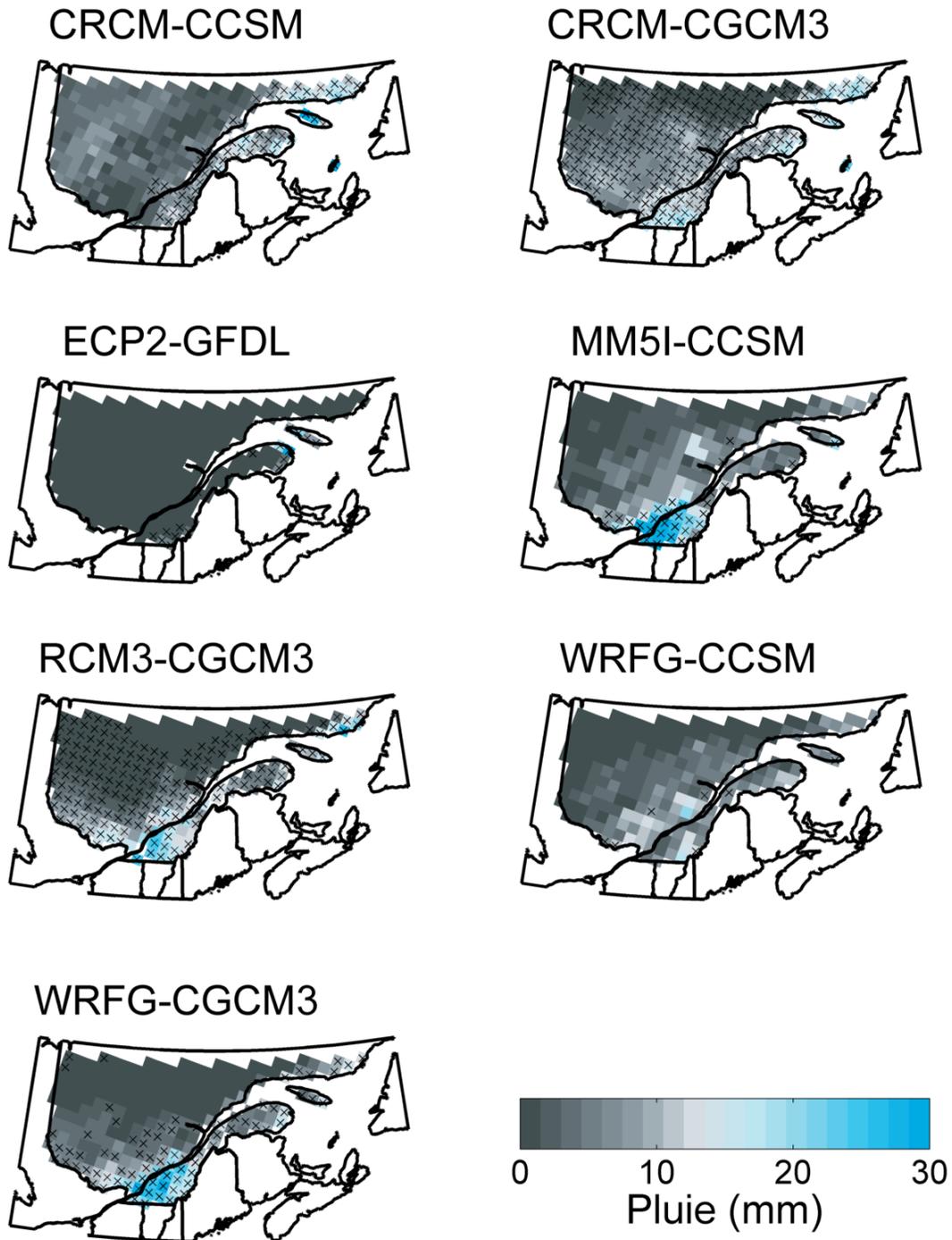


Figure 3.22 : Écarts absolus des moyennes annuelles des hauteurs de pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.

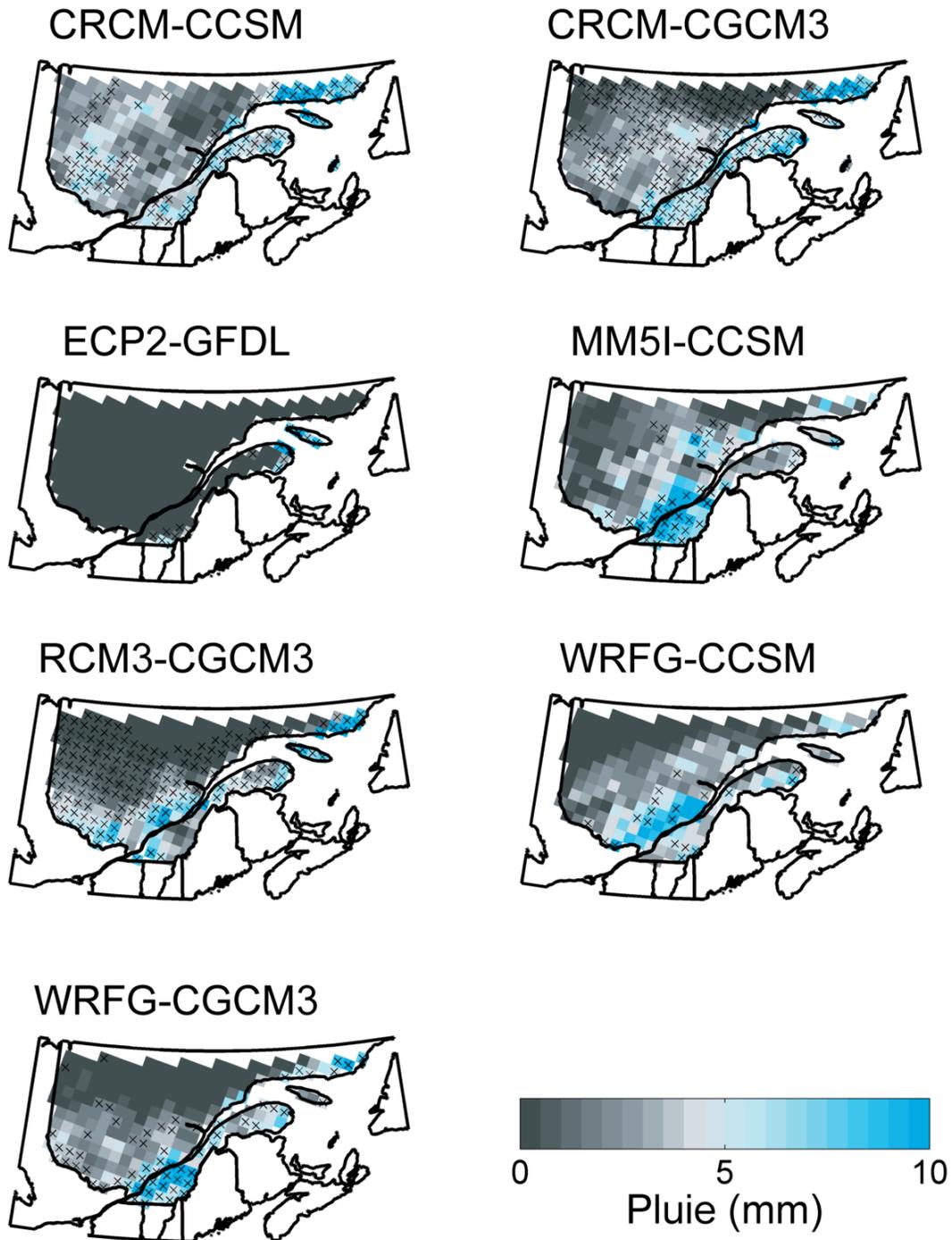


Figure 3.23: Écart absolu des moyennes annuelles des intensités journalières maximales de pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour chaque simulation (voir Tableau 3.7). Les croix indiquent que les différences sont statistiquement significatives à 95 %.

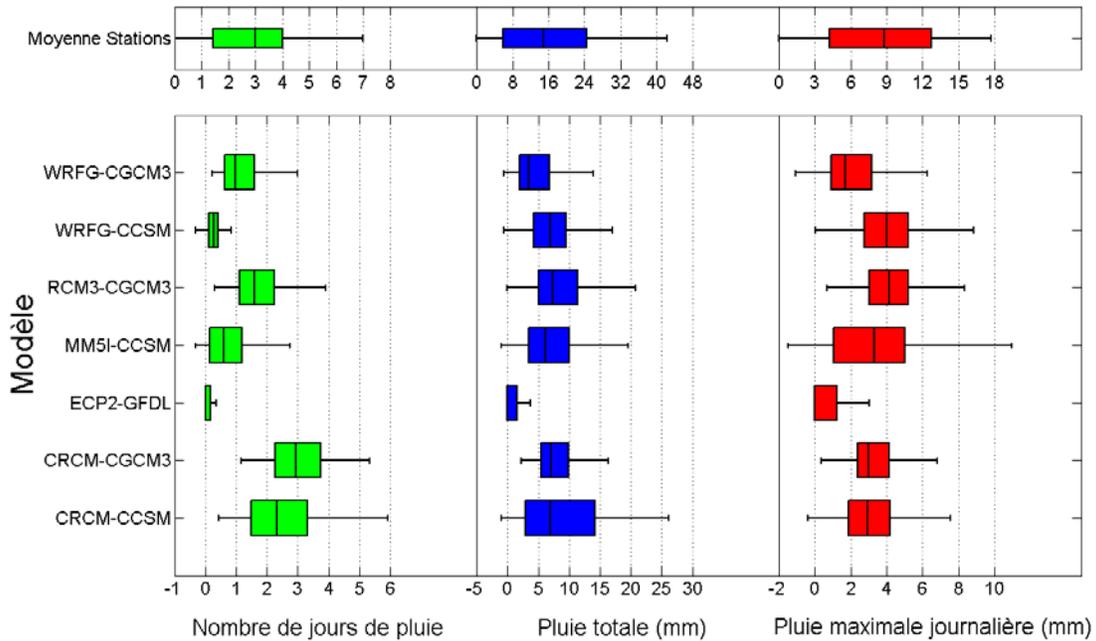


Figure 3.24 : Boîtes à moustaches (box plots) des écarts absolus (futur – historique) des indices de pluies hivernales entre les périodes [1960-2000] et [2041-2070] selon les différentes simulations (voir Tableau 3.7). La ligne du haut correspond aux boîtes à moustaches des valeurs estimées aux stations.

Les périodes [1971-2000] et [2040-2070] sont considérées. Les Figures 3.21 à 3.23 présentent les écarts absolus entre ces deux périodes pour chacun des indices et chacune des simulations. La Figure 3.24 présente les box plots des écarts absolus des indices de pluies hivernales entre les périodes [1971-2000] et [2041-2070] pour l'ensemble des tuiles du territoire sous étude. Afin de déterminer si un changement est significatif, le test non-paramétrique U de Mann-Whitney (aussi appelé test de rang de Wilcoxon) a été utilisé (Hollander et Wolfe, 1999). Ce test permet de vérifier si les médianes des deux échantillons (présent et futur) sont significativement différentes (le niveau de confiance de 95% a été utilisé). Il est à noter que des améliorations au test U de Mann-Whitney seront éventuellement nécessaires en raison du fait que les séries comportent de nombreuses valeurs égales à zéro (plus particulièrement dans les régions nordiques), ce qui pourrait diminuer considérablement l'efficacité du test. De plus ce test suppose que les médianes à comparer proviennent de la même distribution dont l'une a subi une translation par rapport à l'autre (modification du paramètre de

position). Ces hypothèses demeurent fortes et doivent être vérifiées dans ce cas spécifique.

On constate à l'examen de ces figures que :

- la simulation ECP2-GFDL est peu sensible au forçage et montre des augmentations modestes des indices ; à noter que les changements sont toutefois statistiquement significatifs pour la partie au sud du St-Laurent (il convient de se souvenir que, conformément aux conclusions de la section précédente, cette simulation présente un biais froid et sous-estime les indices de pluies hivernales) ;
- toutes les simulations (sauf ECP2-GFDL et WRFG-CCSM) indiquent des hausses significatives du nombre de jours avec pluies hivernales sur une partie plus ou moins grande du territoire (aucune ne suggère de tendance à la baisse sauf en de rares tuiles). Les augmentations en valeurs absolues sont plus importantes pour les parties sud (allant jusqu'à 7 à 8 jours pour la région près de l'Ontario pour la simulation MM5I-CCSM mais de l'ordre de 4 à 5 jours pour la plupart des simulations) et décroissent au fur et à mesure que l'on se déplace vers le nord. Les valeurs médianes et la dispersion des valeurs varient sensiblement d'une simulation à l'autre ;
- les hausses des hauteurs totales varient d'une simulation à l'autre (de façon moins marquée que le nombre de jour cependant) mais toutes, sauf WRFG-CCSM, indiquent des hausses significatives pour la partie sud du territoire. Les hausses seraient de l'ordre de 4 à 10 mm (comparativement à des valeurs observées de l'ordre de 7 à 24 mm – voir partie du haut de la Figure 3.24) ;
- des hausses des pluies maximales journalières sont également suggérées par l'ensemble des simulations (sauf ECP2-GFDL où ces changements sont peu importants).

Ces résultats suggèrent une hausse du nombre de jours, de la hauteur totale et des intensités maximales journalières de pluies hivernales essentiellement pour la partie sud

du territoire sous étude. Ce résultat est cohérent avec l'idée d'une hausse des températures qui ferait en sorte de favoriser pendant la période hivernale la transition par le point de congélation des régions dont les températures moyennes s'approchent de cette valeur.

Les impacts de ces changements, somme toute significatifs, sur la gestion des eaux pluviales demeurent importants. Une augmentation de la fréquence des pluies hivernales pourra se traduire par une augmentation des épisodes d'inondation en milieu urbain à cause du gonflement des cours d'eaux suite à ces précipitations et à la possible formation d'embâcles. Ces épisodes plus fréquents sont également propices aux accumulations d'eau en milieu urbain. Plusieurs municipalités ont déjà mis en place des procédures visant à dégager les puisards lorsque les services météorologiques annoncent des pluies hivernales de sorte à permettre l'écoulement des eaux vers le réseau.

CHAPITRE 4 : MISE EN PLACE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

Dans le cadre de ce projet, le *Storm Water Management Model* (EPA SWMM Version 5.0) a été utilisé pour évaluer l'impact des CC et différents scénarios d'adaptation. Ce modèle a été développé par le *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) et simule le ruissellement et l'écoulement en conduite de systèmes de drainage complexes en milieu urbain (James *et al.*, 2010; Rossman, 2009). Il s'agit d'un modèle hydrologique et hydraulique comprenant deux composantes majeures. L'une simule le ruissellement en surface et estime les volumes de ruissellement selon la proportion de superficies imperméables et perméables et les capacités d'infiltration alors que l'autre composante simule l'écoulement en conduite (Figure 4.1).

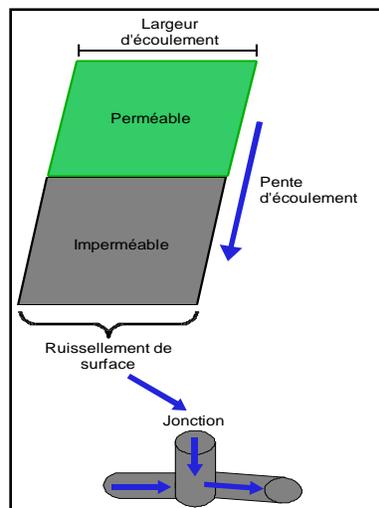


Figure 4.1 : Représentation schématique de l'écoulement des eaux de ruissellement vers le réseau de conduites pour un sous-bassin de drainage avec le modèle EPA SWMM.

En ce qui concerne l'impact des CC sur des réseaux de drainage urbain, le modèle EPA SWMM a été utilisé à plusieurs occasions par différents auteurs (Karamouz *et al.*, 2011; Nguyen *et al.*, 2009; Kovacs et Clement, 2009; Kleidorfer *et al.*, 2009; Denault *et al.*, 2006; Waters *et al.*, 2003; Niemczynowicz, 1989). En matière d'adaptation aux CC,

le modèle EPA SWMM est en mesure de simuler différentes mesures de contrôles à la source (MCS). La déconnexion de superficies imperméables, à travers, par exemple, le débranchement de gouttières, est possible en raison de la distinction entre les surfaces imperméables directement connectées (SIDC) et les surfaces imperméables indirectement connectées (SIIC) et de la possibilité de diriger les eaux de ruissellement d'une surface imperméable vers une surface perméable (Chen *et al.*, 2008; EPA, 2006; Huber, 2001). L'ajout à la modélisation de MCS structurelles, notamment les systèmes de biorétention, est une autre possibilité offerte par EPA SWMM (James *et al.*, 2010; Gironas *et al.*, 2009).

Dans le modèle EPA SWMM, les réseaux de drainage sont subdivisés en plusieurs sous-bassins de drainage connectés aux conduites du réseau en divers points appelés nœuds. Tous les sous-bassins de drainage sont liés à un nœud et, parfois, plusieurs sous-bassins de drainage peuvent être connectés à un même nœud. Ces derniers reçoivent les eaux de ruissellement des sous-bassins de drainage auxquels ils sont attachés et les dirigent vers le réseau de conduites (Figure 4.2).

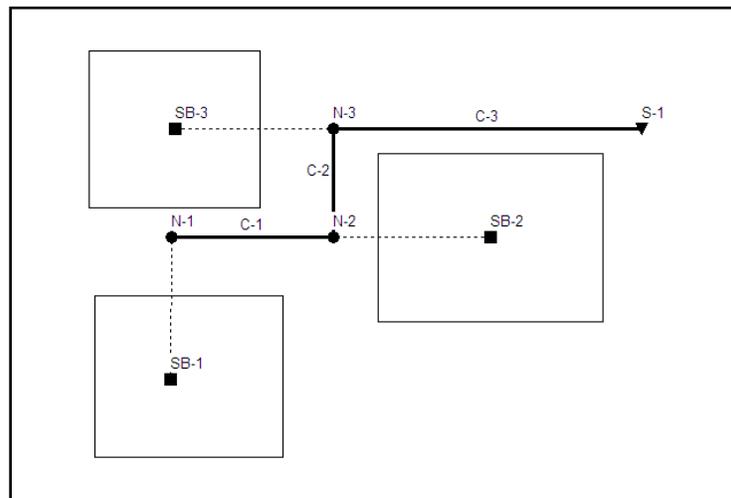


Figure 4.2 : Représentation du modèle EPA SWMM d'un réseau de drainage fictif constitué de sous-bassins (SB), de conduites (C), de nœuds (N) et d'un exutoire (S) (les lignes pointillées indiquent le lien entre les sous-bassins et le nœud auquel ils se rattachent).

Le modèle EPA SWMM a été utilisé pour les six secteurs à l'étude. Une description plus détaillée de chacun de ces secteurs est présentée au Chapitre 5. Pour tout le document, les réseaux de drainage seront nommés tel que présenté dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Liste des secteurs à l'étude

Secteur	Type de réseau
A	Pluvial
B	Unitaire
C	Unitaire
D	Pluvial
E	Pluvial
F	Pluvial

Il est à noter que les secteurs A et B sont situés dans la même ville. Le lien entre ces deux secteurs sera discuté plus en détails au Chapitre 5.

Beaucoup d'informations nécessitent d'être colligées et structurées lors de la mise en place du modèle hydrologique pour chacun de ces secteurs. Le Tableau 4.2 présente une liste des données requises relativement aux sous-bassins de drainage et aux conduites ainsi qu'une brève description de chacun de ces éléments. Les prochaines sections décriront en détails comment ces informations ont été obtenues. Il est important de préciser que les informations associées à la longueur des conduites, à la hauteur des radiers et à la profondeur des nœuds avaient déjà été colligées par les intervenants municipaux et ne sont donc pas décrites dans les prochaines sections.

Tableau 4.2 : Liste des informations à colliger et à préciser pour les sous-bassins de drainage et les conduites lors de la mise en place du modèle EPA SWMM.

Information	Description
Occupation du territoire	Type de zonage à l'échelle du bassin de drainage et des sous-bassins de drainage
Superficie	Superficie du sous-bassin (ha)
Représentation de l'écoulement	Définit la largeur de l'écoulement des eaux de ruissellement dans un sous-bassin de drainage (m)
Imperméabilité	Pourcentage de surfaces imperméables par rapport à la surface totale d'un sous-bassin
SIDC	Pourcentage de surfaces imperméables directement connectées
Infiltration	Capacité d'infiltration pour un bassin de drainage selon l'équation de Horton
Coefficient de Manning	Caractéristiques de l'écoulement quant à la rugosité des surfaces perméables et imperméables et pour les conduites
Pertes par dépression	Hauteur de pluie pouvant s'accumuler sur une surface avant que le ruissellement ne débute (mm)

4.1. Occupation du territoire

L'occupation du territoire a été déterminée à l'aide de *Google Earth Pro* et de l'application *Street View* et était divisée selon les classes suivantes : 1) résidentielle, 2) commerciale, 3) industrielle, 4) institutionnelle, 5) forestière et agricole, 6) voirie et 7) autoroute. Pour les classes résidentielles et industrielles, aucune distinction n'a été faite entre les développements de faible ou de haute densité. Ainsi, pour chaque secteur à l'étude et pour tous les sous-bassins de drainage, la superficie correspondante à chaque type d'occupation du territoire a été évaluée.

4.2. Superficie et représentation spatiale des sous-bassins de drainage

La superficie des sous-bassins de drainage a été calculée avec *Google Earth Pro*. En ce qui concerne la représentation de l'écoulement couramment appelée *width*, (que nous traduirons librement par *largeur d'écoulement*), l'équation suivante a été utilisée :

$$w_k = L(2 - S_k) \quad (4.1)$$

où w_k est la largeur d'écoulement du sous-bassin k , S_k l'aire du sous-bassin k définie par :

$$S_k = \frac{(A_{2,k} - A_{1,k})}{(A_{2,k} + A_{1,k})} \quad (4.2)$$

et $A_{1,k}$ et $A_{2,k}$ représentent les aires de chaque côté du chenal d'écoulement du sous-bassin k et L la longueur du chenal d'écoulement (Skotnicki et Sowinski 2009, Figure 4.3).

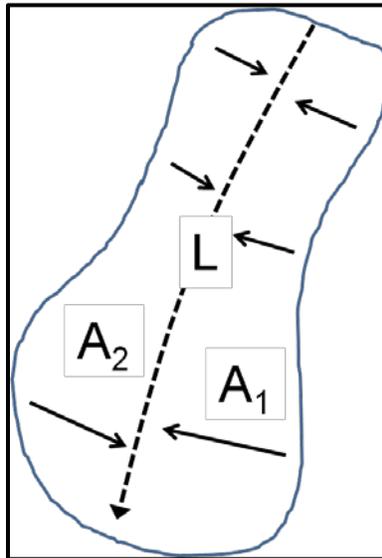


Figure 4.3 : Représentation de la largeur d'écoulement (*width*) dans EPA SWMM5.

4.3. Surfaces imperméables et perméables

Pour estimer les surfaces imperméables, différentes sources d'informations ont été utilisées. *Google Earth Pro* a permis de calculer la superficie des rues, des trottoirs et

des stationnements en traçant des polygones. Les superficies des rues, des trottoirs et des stationnements ont été calculées avec *Google Earth Pro* où chaque entité a été traitée individuellement en traçant des polygones avec l'outil *Règle*. Pour les toits des bâtiments par contre, des couches d'informations géographiques, indiquant la superficie de chaque toit, étaient disponibles. Les surfaces imperméables ont alors été divisées selon les catégories suivantes : 1) les toits, 2) les rues et les trottoirs et 3) les stationnements, lesquels inclus les entrées résidentielles. Il est important de noter que les surfaces imperméables associées à divers aménagements paysagers, par exemple les chemins de pierres, ont été ajoutés aux stationnements. Ainsi, pour chaque sous-bassin de drainage, la répartition des surfaces imperméables est connue. Finalement, la différence entre l'aire totale d'un sous-bassin et les surfaces imperméables a permis d'obtenir la superficie perméable.

4.4. Surface imperméable directement connectée (SIDC)

Les surfaces imperméables peuvent être divisées en deux catégories : 1) les surfaces imperméables directement connectées au réseau de drainage (SIDC) et 2) les surfaces imperméables indirectement connectées au réseau de drainage (SIIC). Les eaux de ruissellement qui s'écoulent sur les SIDC se dirigent entièrement vers le réseau de drainage. Pour les SIIC, les eaux de ruissellement de ces surfaces imperméables transitent par des surfaces perméables avant d'atteindre le réseau de drainage. Ainsi, les eaux de ruissellement provenant de ces surfaces imperméables sont retardées et en partie ou totalement infiltrées (Figure 4.4).

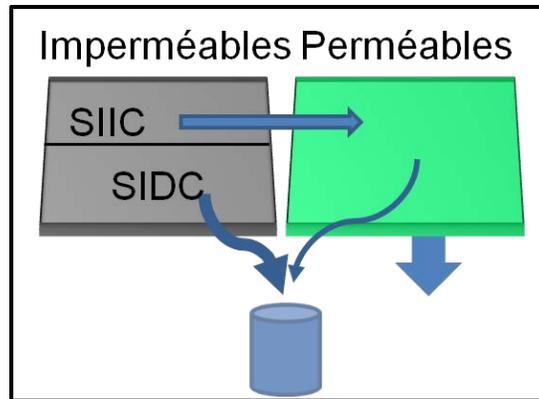


Figure 4.4 : Distinction entre les surfaces imperméables directement connectées (SIDC) et les surfaces imperméables indirectement connectées (SIIC).

Pour évaluer les SIDC/SIIC en zones commerciale, industrielle et institutionnelle, des visites de terrain sur quatre des secteurs à l'étude (A, B, D et E) ont été effectuées. En tout, 33 ha, 26 ha et 19 ha ont été examinés afin de différencier les SIDC des SIIC en zones commerciale, industrielle et institutionnelle respectivement. En zone commerciale, les SIDC variaient entre 86 % et 100 % des surfaces imperméables totales alors qu'en zones industrielle et institutionnelle, elles se situaient entre 90 % et 100 % et 80 % et 100 %. Pour la mise en place des modèles, des valeurs de 93 %, 95 % et 90 % ont été conservées pour estimer les SIDC en zones commerciale, industrielle et institutionnelle respectivement.

En milieu résidentiel, des visites de terrain ont également été effectuées afin d'identifier les SIDC et les SIIC. Toutefois, il s'est avéré très difficile pour les toits des bâtiments, de statuer de leur connexion. Dès lors, des résultats provenant de programmes de débranchements de gouttières réalisés pour les secteurs E et F ont été utilisés. Pour le secteur E, 28 505 maisons ont été visitées et les intervenants municipaux ont évalué que 55 % des maisons étaient directement connectées au réseau de drainage. Pour le secteur F, les intervenants municipaux ont visité 8 200 maisons et ont déterminé que 56 % d'entre elles étaient directement connectées au réseau de drainage. En raison du nombre important de maisons inspectées et de la similitude entre les évaluations, nous avons considéré, lors de la mise en place des modèles, que les SIDC correspondaient à 55 % de la superficie totale des toits en pente en secteur résidentiel.

Dans le modèle EPA SWMM, les SIIC ont été représentées à partir de l'option *Subarea Routing* qui permet de spécifier la proportion de surfaces imperméables dont les eaux de ruissellement sont dirigées vers les surfaces perméables (Chen *et al.*, 2008; Huber, 2001).

4.5. Infiltration

L'équation décrivant l'évolution de la capacité d'infiltration dans les sols perméables est donnée par l'équation de Horton :

$$f_p(t) = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \exp(-\alpha t) \quad (4.3)$$

où $f_p(t)$ est l'infiltration au temps t (mm/h), f_∞ est l'infiltration à l'équilibre lorsque $t \rightarrow \infty$ (mm/h), f_0 est l'infiltration initiale ($t=0$) (mm/h) et α est le coefficient de décroissance (h^{-1}). L'infiltration estimée par cette équation suppose que la hauteur de pluie, à chaque pas de temps, est supérieure à la capacité d'infiltration et conséquemment la diminution de la capacité d'infiltration ne dépend que du temps. Autrement on a :

$$f(t) = \min\{f_p(t), i(t)\} \quad (4.4)$$

Afin de tenir compte du fait que l'intensité de la pluie peut être inférieure à la capacité d'infiltration à certains pas de temps, on considère la hauteur totale de pluie infiltrée (mm) pendant l'intervalle de temps $[0, t_p]$ donnée par :

$$F_p(t_p) = \int_0^{t_p} f_p dt = f_\infty t_p + \frac{(f_0 - f_\infty)}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t_p)] \quad (4.5)$$

On définit un temps équivalent pendant lequel le volume infiltré selon l'équation de Horton est égale au volume réel infiltré.

On procède donc comme suit. Supposons connu le temps équivalent t_p et la hauteur infiltrée correspondante $F(t_p)$ (en début de simulation on suppose $t_p = 0$ $F(t_p) = 0$).

La hauteur de pluie susceptible d'être infiltrée au pas de temps suivant Δt est donnée par :

$$\bar{f}_p(t_p) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{t_p + \Delta t} f_p dt = \frac{F(t_p + \Delta t) - F(t_p)}{\Delta t} \quad (4.6)$$

Cette capacité « théorique » est comparée à l'intensité de pluie pendant ce même pas de temps et l'infiltration effective est associée à la plus petite valeur :

$$\bar{f} = \begin{cases} \bar{f}_p & \text{si } i(\Delta t) \geq \bar{f}_p(\Delta t) \\ i & \text{si } i(\Delta t) < \bar{f}_p(\Delta t) \end{cases} \quad (4.7)$$

où $i(\Delta t)$ est l'intensité moyenne de pluie pendant le pas de temps Δt . La hauteur totale infiltrée est ensuite mise à jour :

$$F(t_p + \Delta t) = F(t_p) + \bar{f} \Delta t \quad (4.8)$$

La mise à jour du temps équivalent t'_p s'effectue ensuite de la façon suivante. Si $\bar{f} = \bar{f}_p$ on a $t'_p = t_p + \Delta t$ alors que si $\bar{f} = i(\Delta t)$, on doit résoudre l'équation suivante :

$$F(t_p + \Delta t) = f_\infty t'_p + \frac{(f_0 - f_\infty)}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t'_p)] \quad (4.9)$$

Les nouvelles valeurs à considérer pour le pas de temps suivant sont donc t'_p et $F(t_p + \Delta t)$.

En ce qui concerne les capacités des sols des différents secteurs à l'étude, les cartes pédologiques et la banque de données sur les sols de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement ont été utilisées (www.irda.qc.ca). Le Tableau

4.3 indique les types de sols dominants et leurs caractéristiques pour chacun des secteurs d'étude. Les sources mentionnées au Tableau 4.3 proviennent d'études pédologiques réalisées dans les secteurs en question.

La Figure 4.5 dresse un bilan de la capacité de drainage des secteurs à l'étude. Pour la majorité des secteurs (A, B, C, D et F), le drainage des sols peut être considéré comme déficient. Il n'y a que pour le secteur E que le drainage des sols est plus favorable. Les caractéristiques de drainage des sols ont été retenues pour déterminer les capacités d'infiltration des secteurs à l'étude. Ainsi, pour les secteurs A, B, C, D et F une capacité d'infiltration initiale, f_0 , de 75 mm/h a été retenue. Cette valeur est souvent utilisée par défaut pour les bassins urbanisés typiques avec peu ou pas de végétation au Québec (MDDEP, 2010). De plus, elle peut être associée à un sol de type B (Huber et Dickinson, 1988) et C (UDFCD, 2008), selon les groupes définis par le *Natural Resources Conservation Service* – NRSC (voir Musgrave, 1955 et USDA, 1986), ce qui correspond dans l'ensemble aux types de sols de ces secteurs. Pour le secteur E, la capacité d'infiltration initiale, f_0 , correspond à 100 mm/h. Il s'agit de la valeur médiane des valeurs proposées par Hubert et Dickinson (1988) pour des sols de type A et B.

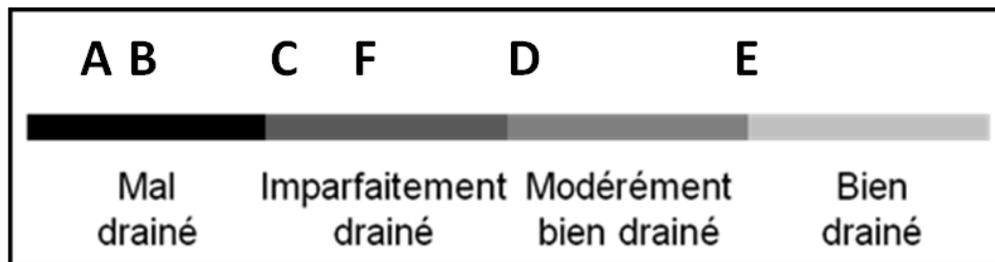


Figure 4.5 : Classification du drainage des sols des secteurs à l'étude.

Tableau 4.3 : Type et caractéristiques des sols dominant pour chacun des secteurs à l'étude.

Secteur	Type de sol	Nom du sol	Abréviation du sol	Drainage du sol	Source
A et B	Loam	Longueuil	LG4	Mal drainé	Martin et Nolin (1991a,b) Nolin (1985)
C	Loam argileux	Châteauguay	Ch	Modérément bien drainé	Lajoie et Baril (1956)
	Loam argileux	Macdonald	M	Mal drainé	
	Argile	Saint-Ubain	U	Mal drainé	
D	Loam argileux	Tilly	Ty	Modérément bien drainé	Rompré et Gagnon (2001)
	Loam argileux à argile	Joly	Jy	Imparfaitement drainé	
E	Loam sableux	Ascot	A	Bien drainé	Ouellet et Rompré (1998)
	Loam rocheux	Magog	MI	Imparfaitement drainé	Cann et Lajoie (1943)
F	Loam sableux à loam	Sainte-Marie	Mai	Imparfaitement drainé	Ouellet et Rompré (1998)
	Loam à loam sableux	Sainte-Marie	Mai	Imparfaitement drainé	Dubé et Camiré (1996) Laflamme et al. (1989)

Pour établir une fourchette de valeurs réalistes, les capacités d'infiltration ont été diminuées et augmentées de 25 mm/h. Pour les secteurs A, B, C, D et F, nous obtenons un intervalle se trouvant entre 50 mm/h et 100 mm/h. La valeur minimale (50 mm/h) peut être attribuée à des argiles, lesquelles sont présentes dans tous les types de sols des secteurs à l'étude ou encore à des loams humides (Huber et Dickinson, 1988). Ainsi, d'une certaine façon, cette fourchette de valeurs tient compte de l'humidité des sols. La valeur maximale (100 mm/h) est la valeur la plus élevée attribuée à des sols de type B et C (UDFCD, 2008; Butler et Davies, 2006). Pour le secteur E, les bornes inférieures et supérieures sont de 75 mm/h et 125 mm/h. Ces sols contiennent des loams (type B),

auxquels certaines sources attribuent une valeur de 75 mm/h tel que mentionné précédemment. De plus, ils contiennent également du sable pour lequel Huber et Dickinson (1988) suggèrent une valeur d'environ 75 mm/h lorsqu'il est humide et 125 mm/h lorsqu'il est sec.

Pour l'infiltration à l'équilibre, f_{∞} , les valeurs se situent entre 1 mm/h et 7 mm/h pour les secteurs A, B, C, D et F. La borne inférieure correspond à la plus petite valeur attribuée à un sol de type C (USDA, 1986; Musgrave, 1955). De plus, cette valeur correspond à un loam argileux qui caractérise certains des secteurs à l'étude (Rawls *et al.*, 1983). La borne supérieure quant à elle correspond à la valeur maximale donnée à un sol de type B (USDA, 1986; Musgrave, 1955). Dans ce cas, la valeur médiane est de 4 mm/h, ce qui représente la capacité d'infiltration d'un sol entre les types C et B (USDA, 1986; Musgrave, 1955). Pour le secteur E, la fourchette de valeurs se situe entre 4 mm/h et 10 mm/h. La borne inférieure est en fait la plus petite valeur donnée à un sol de type B (USDA, 1986; Musgrave, 1955). La borne supérieure correspond quant à elle à la valeur maximale attribuée à un sol de type A selon Musgrave (1955) et à la valeur suggérée pour un sol de type loam sableux selon Rawls *et al.* (1983). Ce dernier sol est largement représenté dans le secteur E. Finalement, la valeur médiane est de 7 mm/h, soit la valeur qui se trouve à la jonction d'un sol de type B et A (USDA, 1986; Musgrave, 1955). Le Tableau 4.4 indique les valeurs proposées par Musgrave (1955) et USDA (1986) alors que le Tableau 4.5 montre les valeurs obtenues par Rawls *et al.* (1983) pour différents sols.

Tableau 4.4 : Valeurs attribuées aux capacités d'infiltration à l'équilibre (f_{∞}) de l'équation d'infiltration de Horton selon Musgrave (1955) et USDA (1986).

Type de sol	Capacité d'infiltration f_{∞} (mm/h)
A	> 7,6*
	7,6 - 11,4**
B	3,8 - 7,6
C	1,3 - 3,8
D	0 - 1,3

*USDA (1986)

**Musgrave (1955)

Tableau 4.5 : Capacités d'infiltration à l'équilibre f_{∞} pour différents sols selon Rawls et al. (1983).

Sols	Capacité d'infiltration f_{∞} (mm/h)
Sable	117,8
Sable loameux	29,9
Loam sableux	10,9
Loam	3,4
Loam limoneux	6,5
Loam sablo-argileux	1,5
Loam argileux	1,0
Loam limono-argileux	1,0
Argile sableuse	6,0
Argile limoneuse	0,5
Argile	0,3

Pour atteindre l'infiltration à l'équilibre f_{∞} à partir de l'infiltration initiale f_0 , il est nécessaire de définir un coefficient de décroissance α (Tableau 4.6). Dans la littérature, les valeurs suggérées se situent généralement entre 2 h^{-1} et 7 h^{-1} (Rossman, 2009) même si des valeurs réelles beaucoup plus élevées ont été estimées (Wanielista, 1978; Pit *et al.*, 1999). Dans notre cas nous avons choisi un intervalle entre 2 h^{-1} et 6 h^{-1} afin d'obtenir une valeur médiane de 4 h^{-1} ce qui correspond à la valeur suggérée par défaut par Huber et Dickinson (1988).

Tableau 4.6 : Valeurs attribuées au coefficient de décroissance α de l'équation d'infiltration de Horton.

Référence	Coefficient de décroissance α (h^{-1})
Rossmann (2009)	2 à 7
UDFCD (2008)	2,52 à 6,48
Butler and Davies (2006)	2
Pit <i>et al.</i> (1999)	-372 à 2 760
Maidment (1992)	0,8 à 2,0
Huber et Dickinson (1988)	(4,14)* 3 à 6**
Wanielista <i>et al.</i> (1978)	0,8 à 49,1

*Valeur par défaut

**Valeurs suggérées par l'auteur

4.6. Coefficient de rugosité de Manning

Le coefficient de rugosité de Manning, identifié par n , intervient dans le calcul de la vitesse d'écoulement d'un liquide sur une surface. Avec le modèle EPA SWMM, trois coefficients de rugosité de Manning doivent être identifiés. L'un pour l'écoulement en conduite et les deux autres pour le ruissellement sur les surfaces perméables et imperméables. Le Tableau 4.7 présente plusieurs valeurs proposées par différents auteurs du coefficient de rugosité de Manning pour les surfaces imperméables. La fourchette de valeurs varient grandement passant de 0,010 à 0,020. La valeur la plus élevée (0,020) est largement supérieure aux autres valeurs trouvées dans la littérature. Cette valeur provient de Brière (2006), un ouvrage de référence au Québec lorsqu'il est question de conception de réseaux d'aqueducs et de réseaux de drainage. Il est possible que Brière (2006) ait considéré les conditions climatiques qui prévalent au Québec et qui affectent grandement l'état des surfaces imperméables (les rues notamment). Pour cette raison, la valeur proposée par Brière (2006) n'a pas été rejetée et la valeur retenue pour la modélisation des réseaux de drainage est de 0,015 ce qui correspond à la valeur médiane parmi celles présentées au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Valeurs attribuées au coefficient de rugosité de Manning n pour les surfaces imperméables selon différentes sources.

Description	Coefficient de Manning n	Référence
Béton ou asphalte	0,010 - 0,013	Woolhiser (1975)
Béton lisse	0,011	McCuen (1989)
Asphalte lisse	0,011	Schall <i>et al.</i> (2008)
Béton lisse	0,012	Schall <i>et al.</i> (2008)
Asphalte lisse	0,012	Crawford and Linsley (1966)
Asphalte	0,012	McCuen (1989)
Pavé et toit	0,014	ODOT (2005)
Asphalte ou béton	0,015	LFUCG (2005)
Surface dites imperméables (béton, asphalte, etc.)	0,020	Brière (2006)

Puisque pour tous les secteurs à l'étude, à l'exception d'un seul, le milieu résidentiel domine largement, les zones perméables ont été assimilées à des surfaces gazonnées (Robbins et Birkenholtz, 2003). Pour ce type de surface, la fourchette de valeurs trouvées dans la littérature est très variable (Tableau 4.8). Pour les surfaces gazonnées qualifiées de parsemées, les valeurs sont toutes inférieures à 0,24. À l'inverse, pour les surfaces gazonnées définies comme denses, les valeurs sont toutes supérieures à 0,24. Finalement, pour le pâturin de Kentucky, les valeurs sont beaucoup plus élevées allant jusqu'à 0,48. Dans le cadre de ce projet, la valeur retenue est 0,35. Pour les secteurs à l'étude, la majorité des zones bâties ont plus de 10 ans, nous jugeons alors que le gazon a eu suffisamment de temps pour bien s'établir et que les valeurs associées à du gazon parsemé pouvaient être rejetées (0,24 et moins). La fourchette de valeurs retenues se situe alors entre 0,25 et 0,45. Par la suite, bien que les semences à gazon contiennent beaucoup de pâturin de Kentucky (voir SCHL, 2010), il est peu réaliste d'attribuer une valeur de 0,45 pour toutes les zones perméables. Nous avons ainsi retenu 0,35, valeur médiane entre le gazon dense et le pâturin de Kentucky.

Finalement, pour le coefficient de rugosité de Manning des conduites en béton ou en ciment, les fourchettes de valeurs retrouvées dans la littérature sont généralement semblables et varient entre 0,010 et 0,017 (James *et al.*, 2010; MDDEP, 2010; Brière, 2006; Butler et Davies, 2006; ASCE et WEF, 1969; Chow, 1959). Dans le cadre de ce

projet, nous avons utilisé une valeur de 0,014 considérant que les conduites des différents secteurs à l'étude ont pour la plupart plusieurs années de service.

Tableau 4.8 : Valeurs attribuées au coefficient de rugosité de Manning n pour les surfaces perméables selon différentes sources.

Description	Coefficient de Manning n	Référence
Végétation parsemée	0,053-0,13	Woolhiser (1975)
Surface gazonnée plane	0,10	Brière (2006)
Herbe courte	0,15	McCuen (1989)
Prairie d'herbe courte	0,10-0,20	Woolhiser (1975)
Gazon parsemé	0,20	Crawford et Linsley (1966)
Herbe dense	0,24	McCuen (1989)
Terrain de jeux, gazon parsemé	0,24	ODOT (2005)
Herbe dense	0,24	Schall <i>et al.</i> (2008)
Gazon dense	0,35	Crawford and Linsley (1966)
Parcs et cimetières, gazon dense	0,40	ODOT (2005)
Pâturin de Kentucky	0,17-0,48	Woolhiser (1975)
Pâturin du Kentucky	0,45	Engman (1986)
Pâturin du Kentucky	0,45	LFUCG (2005)

4.7. Pertes par dépression

Les pertes par dépression représentent la quantité d'eau pouvant s'accumuler sur une surface avant que le ruissellement ne débute. Dans EPA SWMM, il est nécessaire d'identifier des valeurs distinctes pour les surfaces imperméables et perméables. Pour les surfaces imperméables, on retrouve dans la littérature des valeurs variant entre 0,5 mm et 7,6 mm (Tableau 4.9). Les valeurs les plus élevées sont attribuées aux toits plats (7,5 mm et 7,6 mm). Pour les secteurs à l'étude, les toits plats ne comptent pas pour une grande part des surfaces imperméables totales. Cette proportion s'élève à 15 % dans le cas du secteur A. Ainsi, ces valeurs n'ont pas été retenues puisque non représentative de la majorité des surfaces imperméables des secteurs à l'étude. La valeur minimale de Butler et Davies (2006) a également été écartée puisqu'elle est

considérablement plus basse que les autres valeurs minimales proposées. Lorsqu'on ne tient plus compte de ces valeurs, l'intervalle varie entre 1,0 mm et 3,2 mm. Pour ce projet, nous avons considéré une fourchette de valeurs se situant entre 1,0 mm et 4,0 mm.

Tableau 4.9 : Valeurs attribuées aux pertes par dépression (mm) pour les surfaces imperméables selon différentes sources.

Type de surface	Dépression (mm)	Référence
Zone imperméable	1,0 - 2,5	Viessman (1966)
Zone imperméable	1,3 - 2,5	ASCE et WEF (1969)
Zone imperméable	1,5 - 2,8	Viessman <i>et al.</i> (1977)
Zone imperméable	0,5 – 2,0	Butler et Davies (2006)
Toit plat	2,5 - 7,5	
Surface pavée	1,6 (0,8 - 3,2)	Tholin et Keifer (1959)
Grandes surfaces pavées	2,5* (1,3 - 3,8)**	UDFCD (2008)
Toits plats	2,5 (2,5 - 7,6)	
Toits avec pente	1,3 (1,3 - 2,5)	

*Valeur suggérée par l'auteur

**Valeurs possibles

Les pertes par dépression varient grandement selon les sources pour les surfaces perméables. Dans la littérature, les valeurs oscillent entre 2,5 mm et 12,70 mm pour les zones gazonnées (Tableau 4.10). Certaines sources proposent des valeurs pouvant aller jusqu'à 15,24 mm pour les zones boisées et les champs (UDFCD, 2008). Toutefois, dans le cadre du présent projet, cette valeur n'a pas été retenue pour deux raisons. Premièrement, pour tous les secteurs à l'étude, les zones forestières représentent moins de 30 % des surfaces perméables excepté pour F. Il serait irréaliste dans cette situation de donner cette valeur à toutes les surfaces perméables incluant les zones gazonnées. Deuxièmement, certaines références proposent des valeurs inférieures à 15,24 mm en milieu forestier (7,62 mm voir ASCE et WEF, 1969). Nous avons donc considéré une fourchette de valeurs se situant entre 3 mm et 13 mm.

Tableau 4.10 : Valeurs attribuées aux pertes par dépression (mm) pour les surfaces perméables selon différentes sources.

Type de surface	Dépression (mm)	Référence
Graminées en zones urbaines	2,50	Huber et Dickinson (1988)
Gazon	2,54-5,08	ASCE et WEF (1969)
Gazon	8,89 (5-12,70)	UDFCD (2008)
Zones perméables	6,35 (3,18-12,70)	Tholin et Keifer (1959)

CHAPITRE 5 : DESCRIPTION ET REPRÉSENTATION DES SECTEURS RETENUS

Les impacts des CC ont été évalués sur six réseaux de drainage localisés dans cinq villes du sud du Québec. Deux de ces réseaux de drainage sont situés dans une même ville, soit A et B. Le réseau de drainage C ne devait pas initialement être considéré dans le cadre de ce travail. Toutefois, puisque la modélisation avec EPA SWMM5 était disponible en raison de travaux effectués dans un projet antérieur, ce secteur a été considéré afin de pouvoir comparer deux réseaux d'égout unitaires (B et C). Le Tableau 4.1 indique les abréviations qui seront utilisées tout au long du rapport pour identifier les différents réseaux de drainage à l'étude. Les sections qui suivent présentent une description de chacun de ces secteurs.

5.1. Secteur A

Le secteur A couvre 446 ha et est majoritairement résidentiel mais comprend également de grandes zones forestières et industrielles (Figure 5.1). Le reste du territoire est divisé en zones commerciales, en parcs, en zones institutionnelles (0,3 %) et en autoroute (0,2 %).

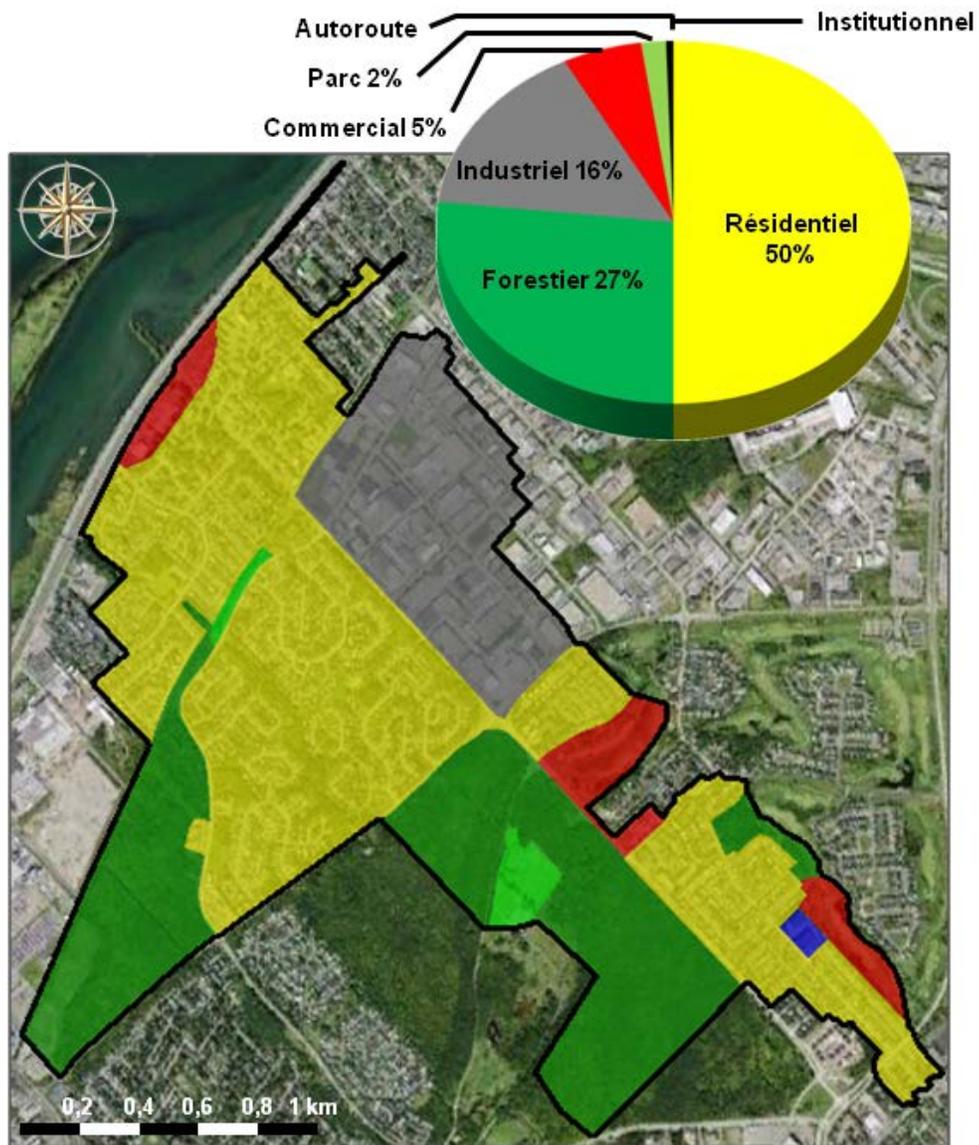


Figure 5.1 : Localisation et occupation du territoire du secteur A.

Le réseau d'égout en place est de type pluvial et la majorité des infrastructures de gestion des eaux pluviales datent des années 1980 et 1990. Certaines sections, en aval du secteur notamment, sont plus vieilles et leurs infrastructures de drainage ont été mises en place à partir de 1945. La Figure 5.2 donne un aperçu général du réseau de drainage de ce secteur.

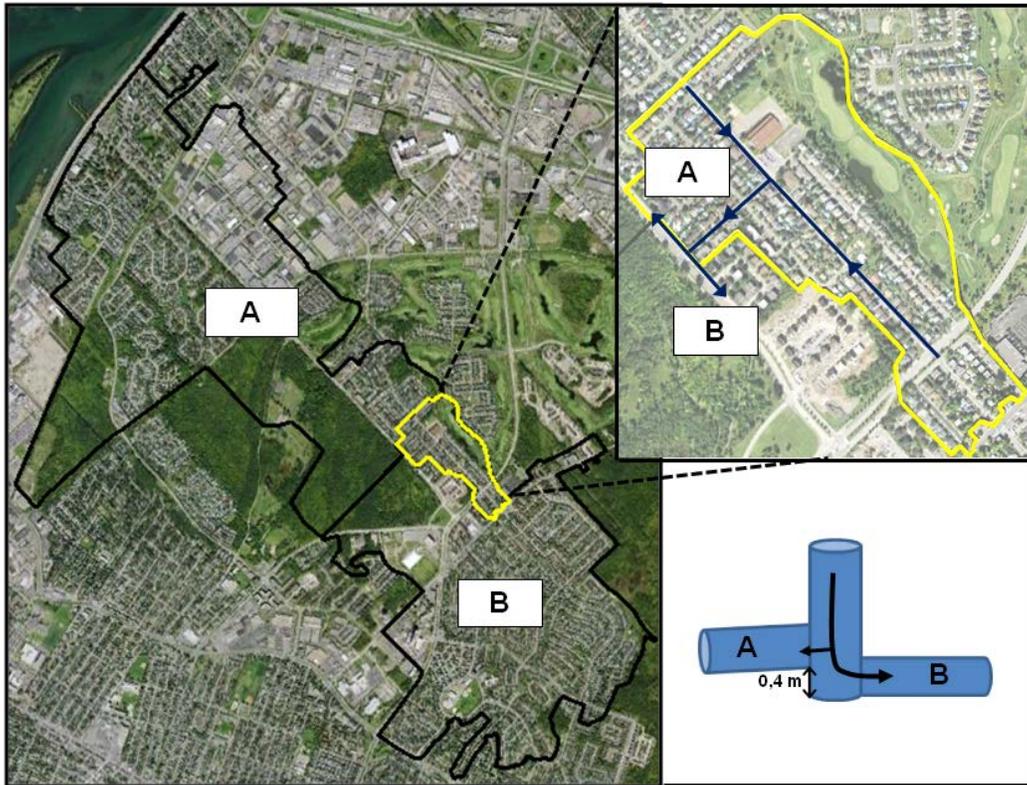


Figure 5.3 : Lien entre les secteurs A et B.

5.1.1. Surfaces imperméables et perméables

Pour le réseau A, les surfaces imperméables totales (SIT) représentent 38 % de la surface totale du territoire. Bien que ce réseau comprenne de grandes zones industrielles fortement imperméables, le taux d'imperméabilisation est moyennement élevé en raison des nombreux secteurs forestiers. Les stationnements comptent pour la majorité des SIT et les toits plats sont nombreux notamment en raison de la zone industrielle (Figure 5.4). Les toits en pentes représentent une part importante des SIT et indiquent un potentiel intéressant pour le débranchement de gouttières.

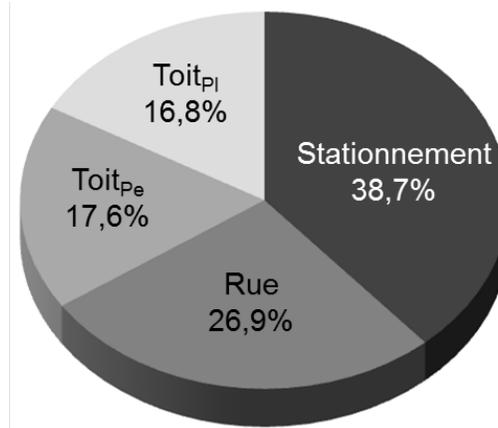


Figure 5.4 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur A (Toit_{Pe} : toit en pente et Toit_{Pl} : toit plat).

5.1.2. Modélisation

La ville où se trouve le secteur A a confié le mandat de réaliser le modèle de l'ensemble de son réseau de drainage à une firme de consultant. Des mesures de débits ont été effectuées dans certains secteurs à des fins de calage. Les paramètres retenus pour le calage de ces secteurs ont ensuite été transposés aux autres secteurs selon le type de réseau d'égout (pluvial ou unitaire (communication personnelle d'un intervenant de la ville en question)). Il s'agit d'une modélisation de résolution grossière. Selon les intervenants municipaux, les résultats sont globalement satisfaisants mais demeurent imprécis localement.

Ce type de représentation permet difficilement de répondre aux objectifs du projet d'étude, lequel demande une modélisation plus fine et détaillée du réseau de drainage. Le modèle a donc été complètement refait en commençant par la discrétisation du territoire. À l'origine, le modèle fourni par la ville du secteur A comptait 65 sous-bassins de drainage. Suite au nouveau découpage du territoire, il en compte maintenant 160. Le Tableau 5.1 donne certaines caractéristiques sur la taille des sous-bassins de drainage et la Figure 5.5 donne un aperçu du découpage du territoire fourni par la ville et celui réalisé dans le cadre du présent travail.

Tableau 5.1 : Caractéristiques générales des sous-bassins de drainage selon la représentation fournie par la ville et celle développée dans le cadre de la présente étude pour le secteur A.

Sous-bassins	Ville	Présente étude
Nombre	65	160
Taille moyenne (ha)	6,9	2,8
Taille médiane (ha)	5,0	2,0
Taille min. (ha)	0,5	0,2
Taille max. (ha)	71,0	42,0



Figure 5.5 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur A (à gauche, la représentation d'origine fournie par la ville et à droite, celle développée dans le cadre de la présente étude).

Suite au redécoupage du territoire en sous-bassins de drainage, la représentation du réseau de conduites a également été affinée. Plusieurs conduites ont été ajoutées en raison du plus grand nombre de sous-bassins de drainage. Cette étape a été réalisée à partir des couches d'informations géographiques et de cartes fournies par les intervenants municipaux de la ville du secteur A. Le nombre de nœuds est alors passé de 401 à 597 et la longueur totale des conduites de 28 km à un peu moins de 41 km. La Figure 5.6 donne un aperçu des structures de réseau avant et après ces modifications.



Figure 5.6 : Représentation du réseau A selon la représentation fournie par la ville à gauche et la représentation développée dans la présente étude à droite.

5.2. Secteur B

Le secteur B est situé dans la même ville que le secteur A, et se trouve au sud-est de ce dernier. Le secteur couvre 308 ha et est presque entièrement résidentiel. Des zones institutionnelles et forestières importantes sont également présentes. Les parcs et les zones commerciales complète l'occupation du territoire (Figure 5.7).

Le secteur est desservi par un réseau d'égout unitaire mis en place majoritairement au cours des années 1960 et 1970. Toutefois, ce secteur comprend également des développements plus récents des années 1980, 1990 et même 2000. Les eaux de ruissellement sont acheminées vers un collecteur de 2,7 m de diamètre, lequel reçoit également les eaux de ruissellement de plusieurs autres secteurs avant d'acheminer le tout à la station de traitement des eaux usées (Figure 5.8).

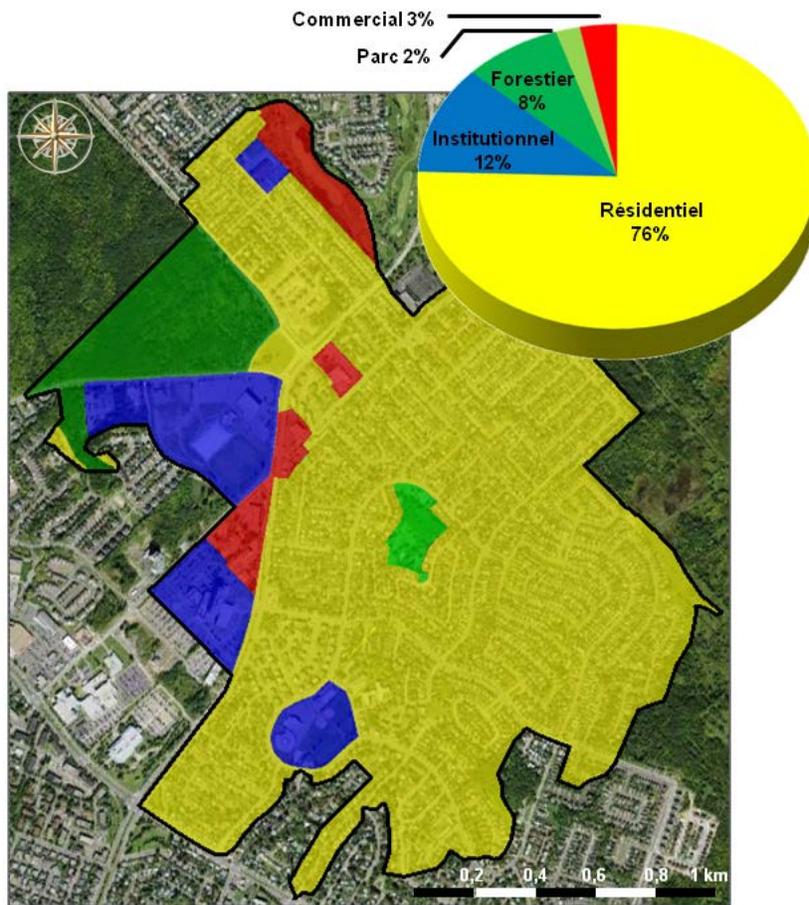


Figure 5.7 : Occupation du territoire du secteur B.

5.2.1. Surfaces imperméables et perméables

Le taux d'imperméabilisation du réseau B est moyennement élevé (44 %). Les grands espaces de stationnements, souvent associés aux zones commerciales et institutionnelles, sont peu nombreux pour ce secteur et ce sont donc les rues qui comptent pour la majorité des surfaces imperméables (Figure 5.9). La proportion de toits en pente est très élevée puisque ce secteur est majoritairement résidentiel (unifamiliale) et suggère un très fort potentiel pour le débranchement de gouttières.

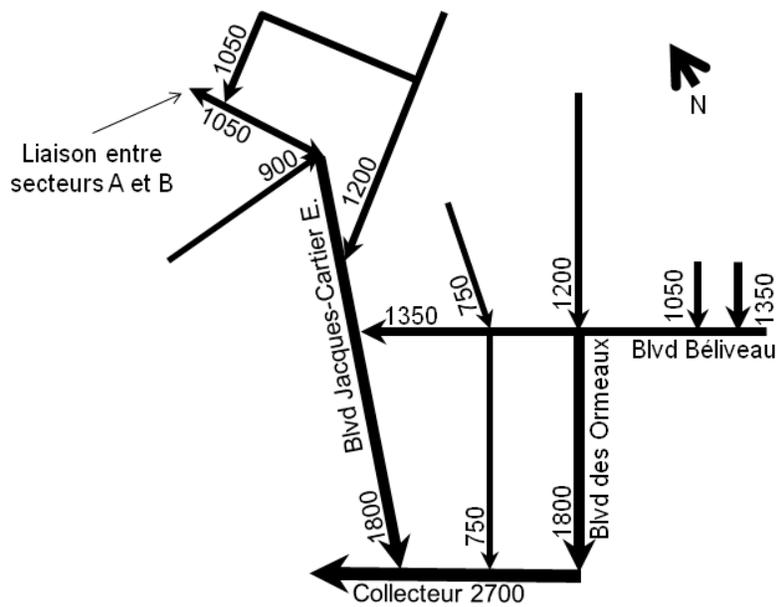


Figure 5.8 : Schéma des principales conduites du réseau du secteur B (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).

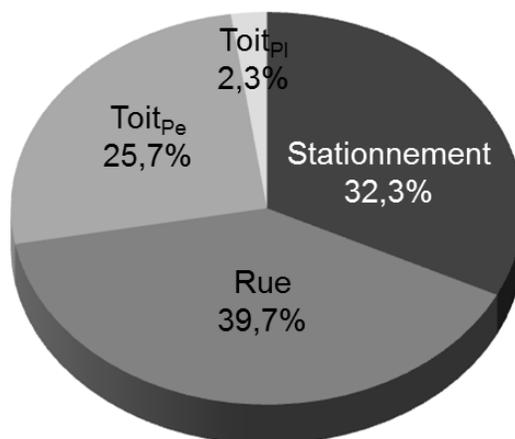


Figure 5.9 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur B (Toit_{Pe} : toit en pente et Toit_{Pl} : toit plat).

5.2.2. Modélisation

Tout comme le réseau de drainage A, le territoire du réseau de drainage B a été redécoupé et plusieurs conduites ont été ajoutées afin d'améliorer la résolution de la représentation de ce secteur. La représentation fournie par la ville comptait 42 sous-bassins de drainage. Suite au redécoupage du territoire, il en compte maintenant 168. Le Tableau 5.2 donne certaines caractéristiques sur la taille des sous-bassins de drainage et la Figure 5.10 donne un aperçu du découpage du territoire selon la représentation fournie par la ville et celle développée dans le cadre de la présente étude.

Tableau 5.2: Caractéristiques générales des sous-bassins de drainage selon la représentation d'origine de la ville et selon la représentation développée dans le cadre de la présente étude pour le secteur B.

Sous-bassins	Ville	Présente étude
Nombre	42	168
Taille moyenne (ha)	7,3	1,8
Taille médiane (ha)	5,8	1,5
Taille min. (ha)	0,6	0,2
Taille max. (ha)	29,9	20,7

La représentation du réseau de conduites a également été modifiée. Le nombre de nœuds est passé de 156 à 579 et le linéaire totale de conduites est presque de 37 km alors qu'il était d'un peu plus de 11 km. La Figure 5.11 donne un aperçu des représentations avant et après ces modifications.



Figure 5.10 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur B (À gauche, la représentation d'origine fournie par la ville et à droite, la représentation développée dans le cadre de la présente étude après redécoupage du territoire).

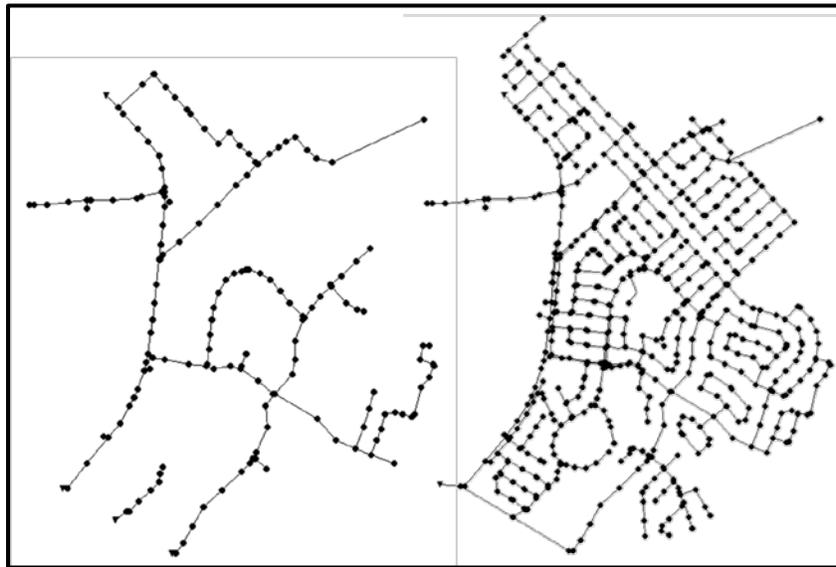


Figure 5.11 : Représentation du réseau de B selon la représentation d'origine fournie par la ville à gauche et celle développée dans le cadre de la présente étude à droite.

Tel que mentionné précédemment, le collecteur qui recueille les eaux de ruissellement du secteur B capte également les eaux de ruissellement d'autres secteurs situés tant en amont qu'en aval du secteur B. Ainsi, il est difficile de déterminer un seuil au-delà duquel les eaux dirigées vers le collecteur seront déversées au milieu récepteur au lieu d'être acheminées vers la station d'épuration. Toutefois, après discussions avec les intervenants municipaux de la ville, il appert que pour ce collecteur, des surverses surviennent pratiquement à chaque événement pluvieux. Ainsi, pour déterminer si les apports au réseau de drainage sont acheminés à la station d'épuration ou déversés en milieu récepteur, la valeur correspondant au débit maximal d'eaux usées de temps sec ($DM_{ax}TS$) a été utilisée. Ce débit a été estimé à partir du débit moyen d'eaux usées de temps sec ($DM_{oy}TS$), lequel est obtenu en effectuant une simulation en absence de précipitations. Les intrants en temps sec correspondent à une consommation de 320 litres par personne par jour et en considérant une moyenne 2,33 personnes par habitation ou logement. Ainsi, le $DM_{oy}TS$ est de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui implique, selon Brière (2006), un facteur de pointe maximal et minimal de 2,63 et 0,38 respectivement. Ces facteurs de pointe peuvent alors être utilisés pour multiplier le $DM_{oy}TS$ et ainsi obtenir les débits maximal et minimal journalier. Ils ont permis de créer un patron temporel journalier du débit d'eaux usées qui a été appliqué aux intrants préalablement définis. Une simulation a alors été relancée et un $DM_{ax}TS$ de $0,13 \text{ m}^3/\text{sec}$ a été trouvé. Cette valeur a alors été conservée comme seuil au-delà duquel les eaux sont déversées en milieu récepteur.

5.3. Secteur C

Le secteur C a une superficie de 330 ha et est presque complètement résidentiel (Figure 5.12). Il est important de noter également qu'une grande zone industrielle se trouve dans les parties les plus en amont du secteur. Les superficies restantes se divisent entre zones commerciales, parcs, zones institutionnelles et forestières (0,7%).

Le réseau d'égout en place est de type unitaire et date dans l'ensemble des années 1960 et 1970. Un collecteur principal, situé sous le boulevard Perras, reçoit les eaux de douze collecteurs secondaires (Figure 5.13). Une structure de dérivation, placée sous la

jonction de la 25e Avenue et de la rue Octave-Pelletier achemine ensuite les eaux usées vers la station d'épuration. Cette structure possède une vanne régulatrice qui contrôle le débit vers l'intercepteur. Lorsque le débit dans le collecteur est supérieur à 4,25 m³/s, les eaux excédentaires sont évacuées vers le milieu récepteur à proximité via un émissaire. Le réseau de conduites fait au total un peu moins de 29 km dont les diamètres varient entre 300 et 1 800 mm.

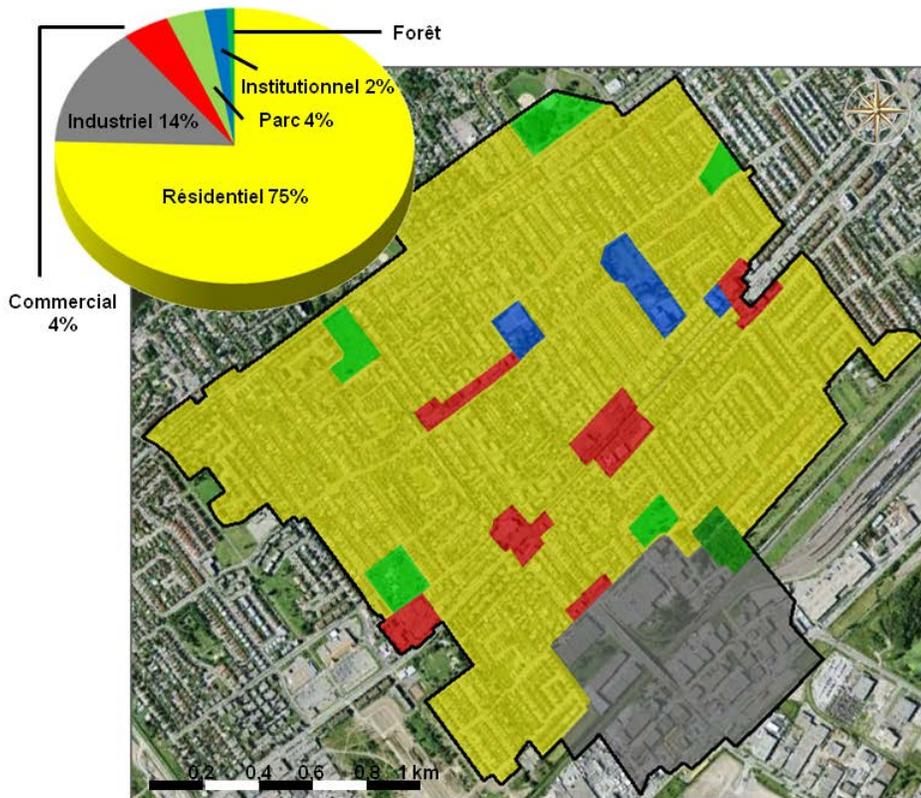


Figure 5.12 : Localisation et occupation du territoire du secteur C.

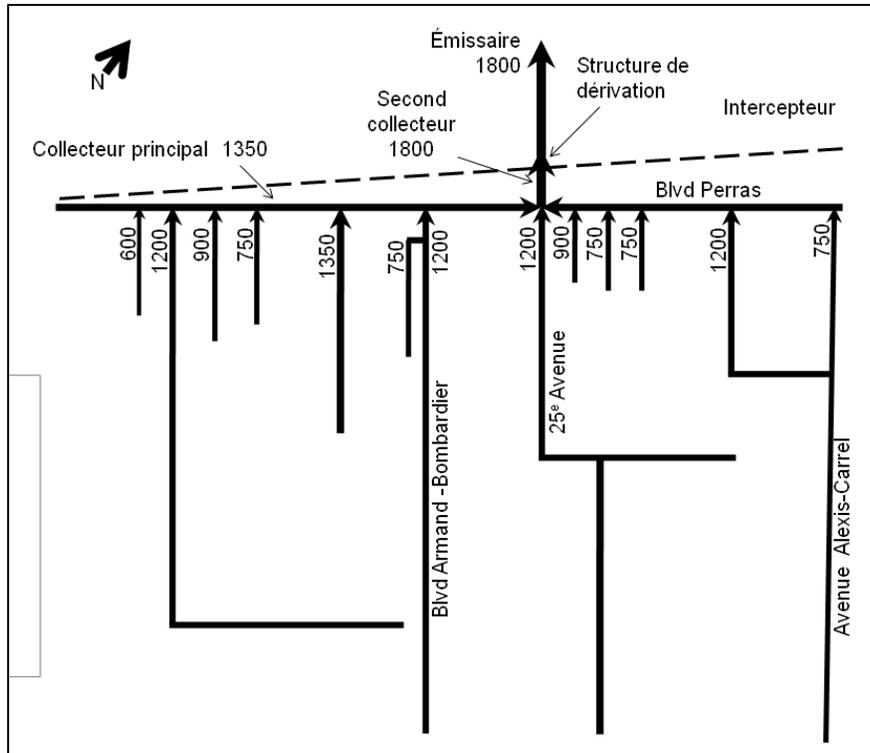


Figure 5.13 : Schéma des principales conduites du réseau desservant le secteur C (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).

5.3.1. Surfaces imperméables et perméables

Le taux d'imperméabilisation du secteur C est très élevé (54 %). Bien qu'il soit fortement résidentiel, tout comme le secteur B, l'imperméabilisation est plus importante en raison des condominiums étagés, des habitations multifamiliales et des maisons en rangées qui sont très nombreux et généralement plus imperméabilisés. Pour le secteur B, les habitations unifamiliales représentaient plus de 95 % du résidentiel. Les rues dominent en ce qui concerne les SIT et la proportion de toits en pente indique un potentiel intéressant pour le débranchement de gouttières (Figure 5.14). Finalement, les toits plats qui représentent une part non négligeable des SIT se trouvent non seulement en zone industrielle mais également en secteur résidentiel.

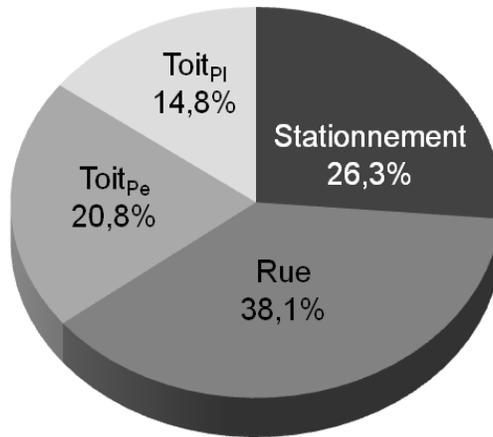


Figure 5.14 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur C (Toit_{pe} : toit en pente et Toit_{pl} : toit plat).

Pour le secteur C, en raison de la moins bonne qualité des photos et des images (moins récentes et de moindres résolutions), il n'a pas été possible d'estimer la superficie de toutes les entrées résidentielles. Ainsi, au moins deux entrées ont été mesurées pour chacun des sous-bassins de drainage ayant du résidentiel. Au total, la surface de 204 entrées résidentielles a été estimée. Une moyenne de 57,7 m² a été obtenue et cette moyenne a été multipliée par le nombre d'entrées résidentielles dans chaque sous-bassin.

5.3.2. Modélisation

La modélisation, à l'aide du logiciel XP SWMM, du réseau de drainage a été réalisée lors d'un projet antérieur dans le cadre de la mise en place d'un bassin de rétention. Ce bassin de rétention, d'une capacité de 24 500 m³ a été ajouté au réseau de drainage suite à des épisodes récurrents d'inondations et de refoulements. Il est situé le long d'un boulevard et répond à deux objectifs, soit d'assurer un niveau de service adéquat en matière d'inondations et de refoulements et de diminuer les volumes d'eau rejetés au milieu récepteur. Pour la réalisation de ce projet, la modélisation ne tient pas compte du bassin de rétention, l'intérêt étant de voir ce qu'il adviendrait d'un réseau de drainage problématique en climat futur.

En matière de discrétisation, le territoire a été subdivisé en 149 sous-bassins de drainage dont la superficie moyenne est de 2,2 ha (0,65 à 5,65 ha). La Figure 5.15 montre le découpage du territoire en sous-bassins de drainage. Le réseau de conduites comprend 405 tronçons de conduites totalisant 394 nœuds et un linéaire de plus de 28 500 km (Figure 5.16).



Figure 5.15 : Découpage du territoire en sous-bassins pour le secteur C.

En raison des problèmes hydrauliques du réseau C (en l'absence du bassin de rétention ajouté ultérieurement) des volumes d'eau importants sont expulsés du réseau lors des simulations. Ces volumes d'eau, qui sont interprétés comme des volumes d'inondation, ne retournent pas au réseau et ne font donc pas partie du bilan hydrique qui, dans le cas d'un réseau unitaire, se divise en trois compartiments : 1) volumes infiltrés, 2) volumes acheminés à l'usine de traitement et 3) volumes déversés au milieu récepteur. Pour pallier ce problème, un réseau de rue parallèle aux conduites a été ajouté à la représentation du réseau. Ainsi, lorsque l'eau déborde du réseau d'égout, elle s'accumule dans les rues et retourne dans le réseau lorsque les capacités le permettent (Figure 5.17).

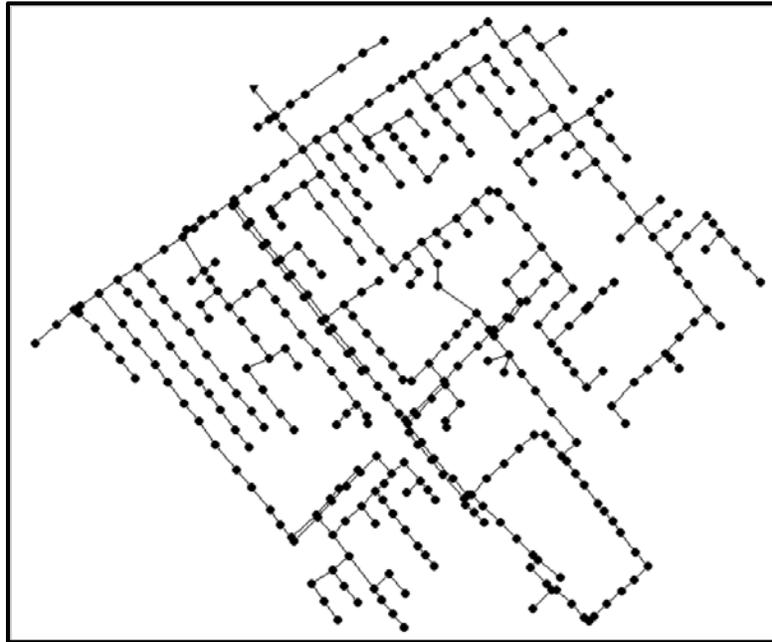


Figure 5.16 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du réseau C.

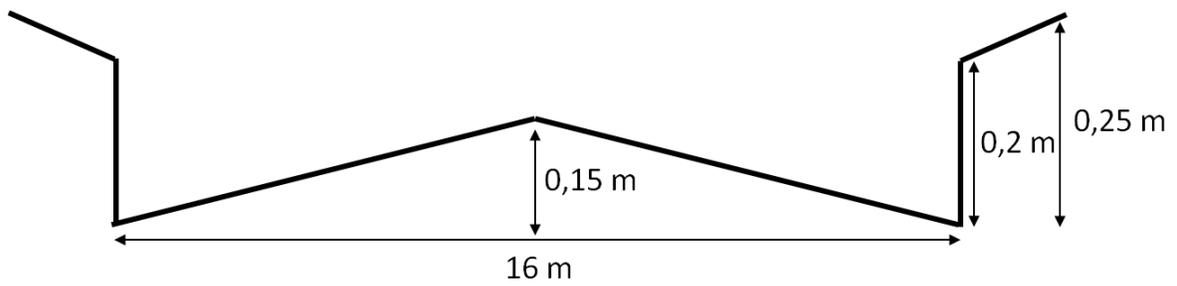


Figure 5.17 : Profil en travers des rues ajoutées en parallèle des conduites dans la représentation du réseau C.

5.4. Secteur D

Le secteur D couvre à l'origine une superficie d'un peu moins de 3 000 ha. Ce territoire est toutefois trop grand et la discrétisation du territoire est parfois trop grossière pour les besoins de la présente étude. On y retrouve notamment des sous-bassins de drainage en zone résidentielle de plus de 90 ha. Pour pallier ce problème, un sous-secteur a été découpé à l'intérieur des limites du secteur d'origine. Il est important de noter que ce sous-secteur représente un bassin de drainage en soi puisqu'il n'y a pas d'intrant à ajouter provenant de l'amont et qu'il sera considéré comme un bassin de drainage à part entière dans ce qui suit. Le secteur retenu couvre 416 ha et est majoritairement résidentiel (Figure 5.18). On y retrouve également de grandes zones commerciales, industrielles et forestières. Le reste du territoire est occupé par des autoroutes, des zones à vocation institutionnelle et utilisés par la voirie.

Ce secteur est drainé par un égout pluvial mis en place entre 1970 et 1990 bien que certaines parties soient plus anciennes (1950) et d'autres plus récentes (2000). Les eaux de ruissellement sont acheminées vers deux cours d'eau : une rivière et un ruisseau, lequel est un tributaire de la rivière en question. Ces cours d'eau sont situés à l'ouest du sous-secteur (Figure 5.19). Finalement, un bassin de rétention en surface de 5 650 m³ est présent à l'est du territoire.

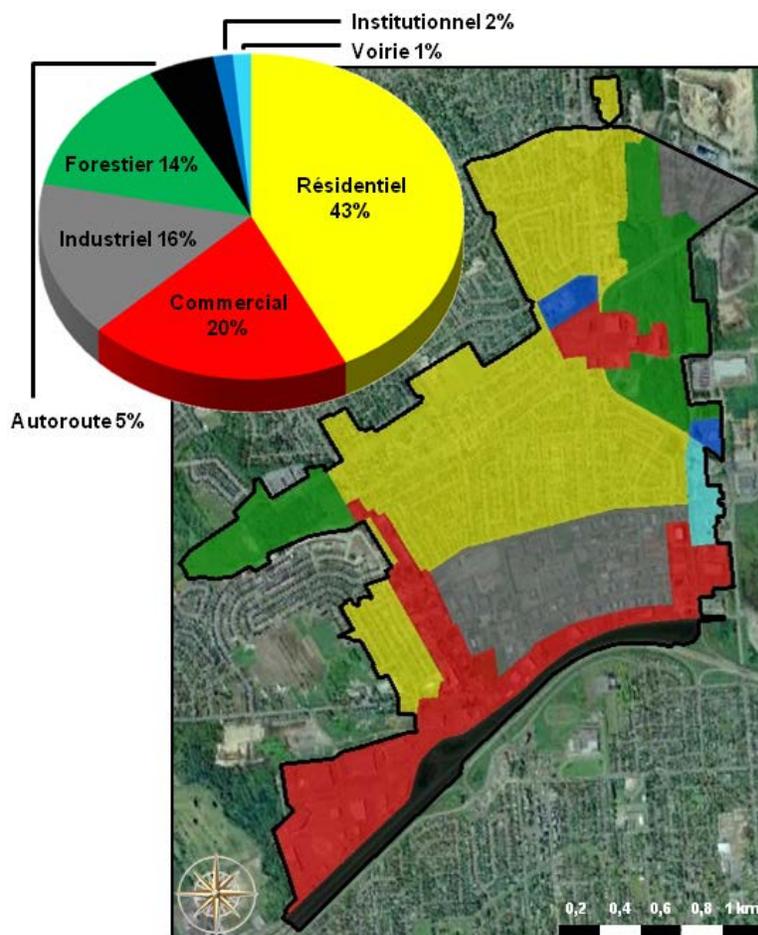


Figure 5.18 : Localisation et occupation du territoire du secteur D.

5.4.1. Surfaces perméables et imperméables

Le secteur D comporte plusieurs zones industrielles et commerciales. Cela explique notamment le taux élevé de SIT (51 %) et également la grande proportion de stationnements par rapport aux SIT (Figure 5.20). Ces zones sont aussi responsables des SIDC très élevées de ce secteur (89 %). Finalement, il est important de souligner que les toits en pente, ceux pour lesquels il est possible de déconnecter les gouttières, ne représentent qu'une faible proportion des SIT.

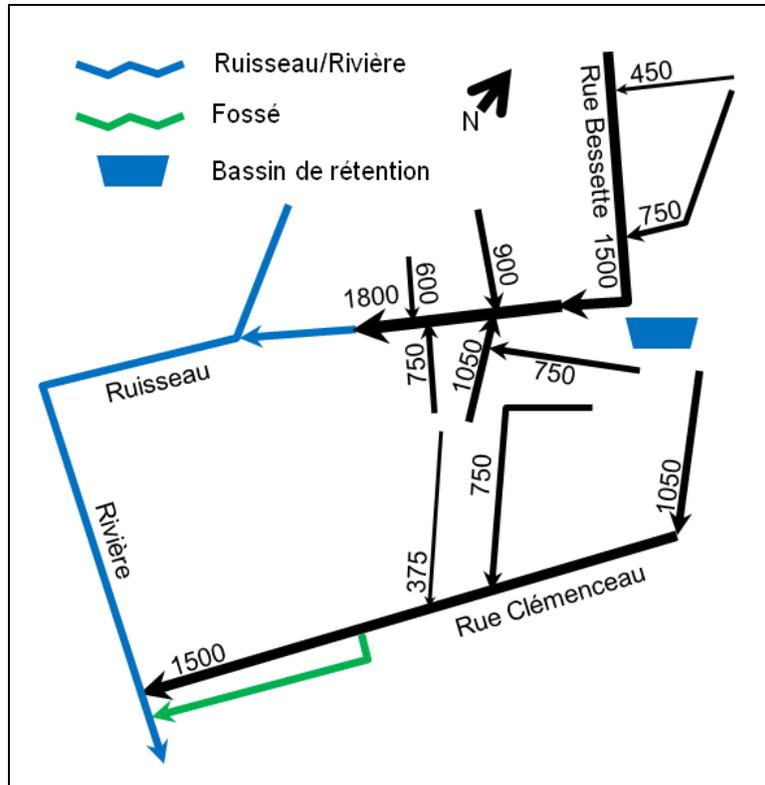


Figure 5.19 : Schéma des principales conduites du réseau D (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).

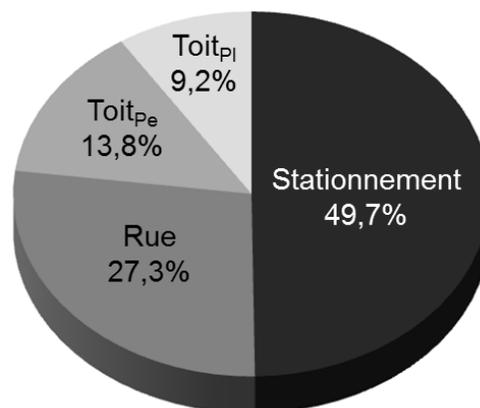


Figure 5.20 : Répartition des surfaces imperméables pour le réseau de drainage D (Toit_{pe} : toit en pente et Toit_{pl} : toit plat).

5.4.2. Modélisation

Le modèle de l'ensemble du réseau D a été calé par le consultant de la ville à partir de pluies réelles et de mesures de débits à l'exutoire du réseau (fleuve Saint-Laurent). Ce calage intègre plusieurs secteurs dont celui considéré dans la présente étude. Toutefois, ce calage global peut difficilement être utilisé lorsque l'un des sous-secteurs est considéré.

Le modèle du réseau de drainage D est très détaillé et convient aux objectifs de ce projet d'étude tant en matière de discrétisation du territoire que du réseau de conduites. Il comprend 491 sous-bassins de drainage dont la superficie moyenne est de 0,85 ha (0,03 à 33,8 ha), 681 nœuds, 34 km de conduites et 3 km de chenaux et fossés à surface libre (Figure 5.21).



Figure 5.21 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du réseau D.

5.5. Secteur E

Le secteur E occupe une superficie de 698 ha et est majoritairement résidentiel (Figure 5.22). Il comprend également de grandes zones forestières et à vocation commerciale. Les autoroutes (2,6 %, noire) de même que des zones industrielles (1,8 %, gris) et institutionnelles (1,1 %, bleu) occupent le reste du secteur.

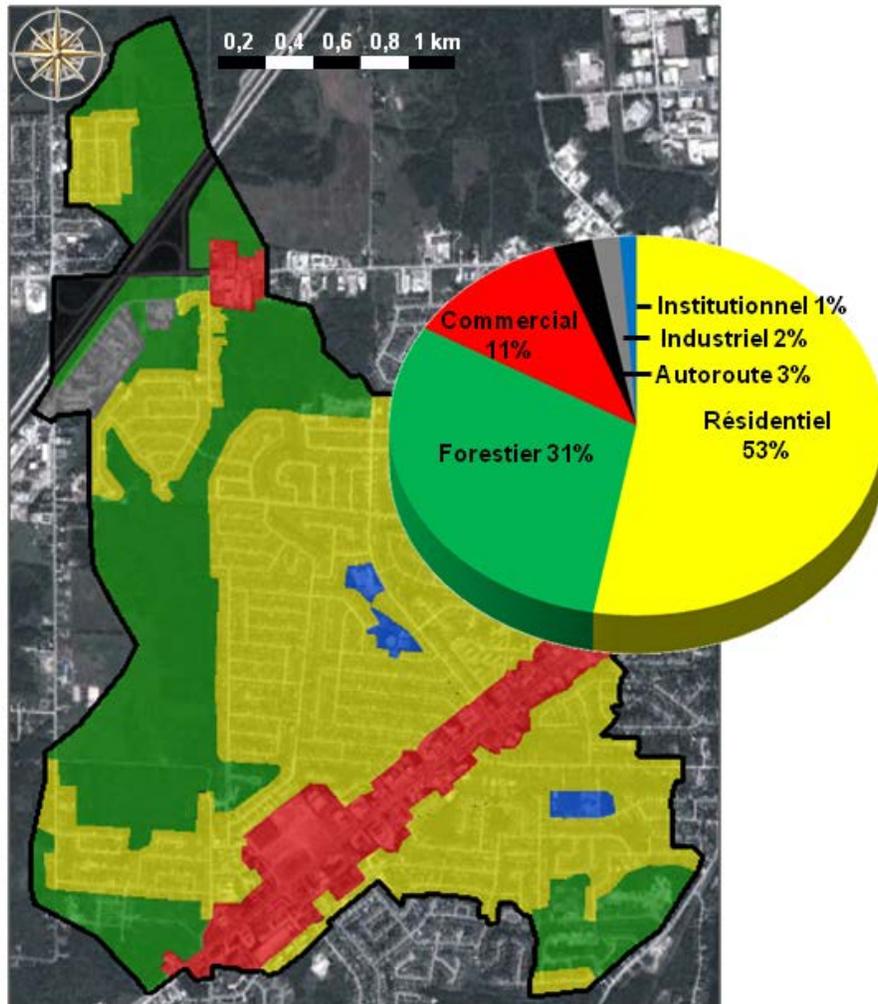


Figure 5.22 : Localisation et occupation du territoire du secteur E.

Le développement du secteur E a débuté dans les années 1970 et se poursuit encore à l'heure actuelle. Un réseau d'égout pluvial évacue les eaux de ruissellement à divers points dans un ruisseau, lequel traverse le secteur pour se déverser dans une rivière au nord-est du secteur. La Figure 5.23 donne un aperçu général du réseau de conduites, de fossés et de cours d'eau du secteur E. Plusieurs bassins de rétention se trouvent dans ce secteur et une majorité est située le long du ruisseau (Figure 5.24). Il s'agit de bassins de rétention de surface dont les capacités varient entre 500 et 18 000 m³ (Tableau 5.4).

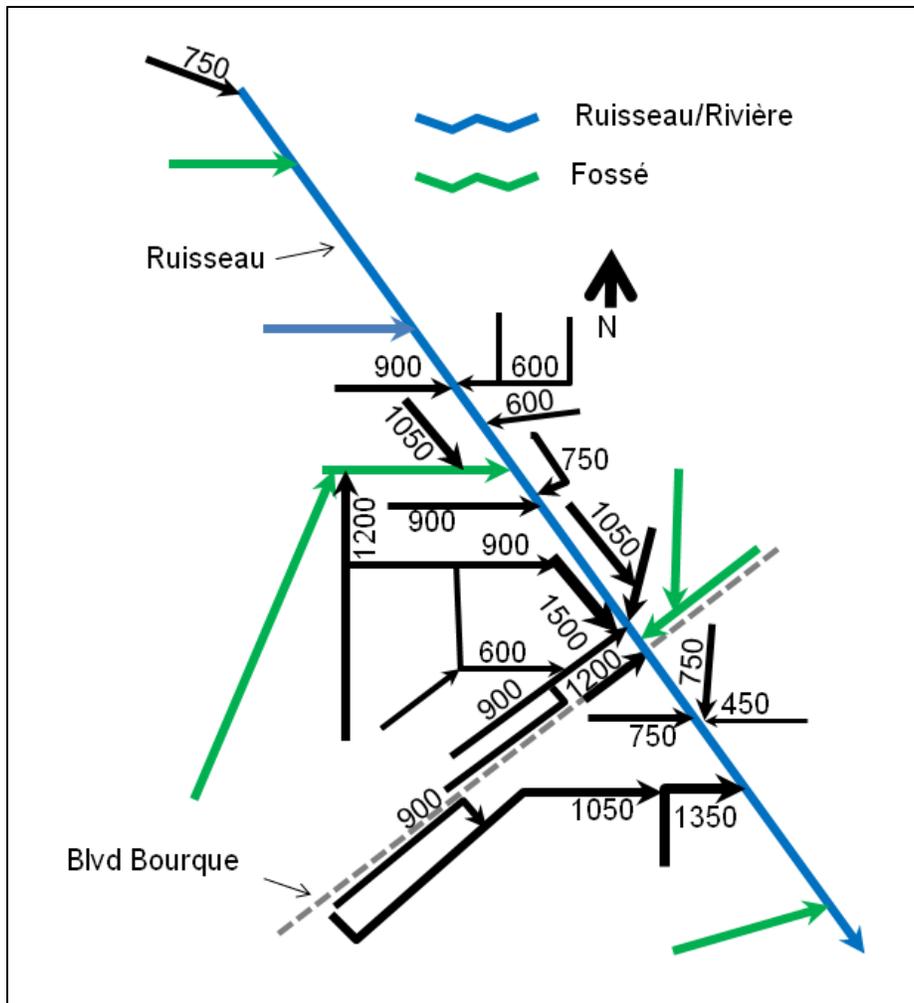


Figure 5.23 : Schéma des principales conduites, fossés et cours d'eau du secteur E (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).

Tableau 5.3 : Caractéristiques des bassins de rétention du secteur E.

Identifiant (voir Figure 5.24)	Volume (m ³)
PO-1	18 000
PO-2	2 334
PO-4	7 110
PO-5	2 315
PO-6	5 500
PO-7	4 400
PO-8	476
PO-9	5 200
PO-10	707

5.5.1. Surfaces imperméables et perméables

Les SIT ne représentent que 28 % de la superficie de ce secteur. Cela s'explique notamment par la présence de grandes zones forestières et la faible présence de zones commerciales et industrielles. Les stationnements constituent la majorité des SIT, mais c'est la proportion élevée de toits en pente qui attire le plus l'attention (Figure 5.25). Il est donc permis de penser qu'un programme de débranchement de gouttière pourrait offrir un potentiel intéressant de réduction des apports à condition évidemment qu'une fraction significative des eaux de ruissellement des toits soient acheminées directement au réseau.

Il est important de noter que pour le secteur E, la qualité des ortho photos disponibles et des images de *Google Earth Pro* n'était pas adéquate pour permettre, dans la majorité des cas, une estimation juste de la superficie des entrées résidentielles. Pour remédier à ce problème, la superficie d'un peu moins de 300 entrées résidentielles a été estimée lorsque les images disponibles le permettaient et la moyenne a été appliquée à l'ensemble des entrées résidentielles sur le territoire (70 m²). Cette valeur a été par la suite multipliée par le nombre d'entrées résidentielles pour chaque sous-bassin de drainage.

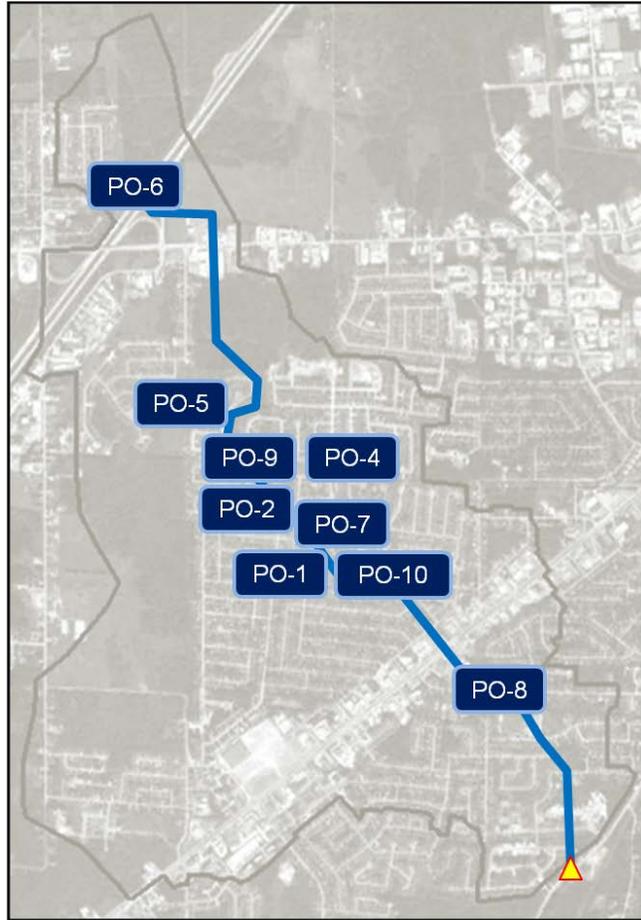


Figure 5.24 : Localisation du ruisseau (trait bleu), des bassins de rétention (rectangles bleus) et de l'exutoire principal vers la rivière (triangle jaune).

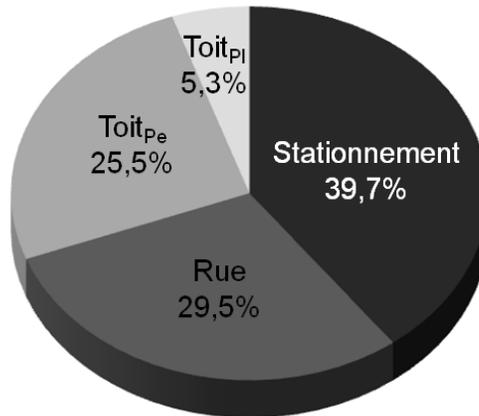


Figure 5.25 : Répartition des surfaces imperméables pour le secteur E (Toit_{pe} : toit en pente et Toit_{pl} : toit plat).

5.5.2. Modélisation

La ville où se trouve le secteur E a procédé elle-même à la mise en place du modèle hydrologique de ce secteur. Le modèle ainsi obtenu n'a pas été formellement calé, mais des simulations préliminaires ont permis de constater que les hauteurs d'eau dans les bassins de rétention simulées pour un événement de pluie donné étaient réalistes (communication personnelle des intervenants de la ville).

Le logiciel *SewerGEMS* de *Bentley* a été utilisé (Bentley, 2012). Celui-ci comprend un outil de conversion permettant de créer un fichier d'entrée pour EPA SWMM5. Certaines informations n'ont cependant pas été transférées lors de la conversion, notamment pour les sous-bassins de drainage. De plus, le modèle de la ville utilise les paramètres de la méthode *SCS Runoff Curve Number* (USDA 1986) pour caractériser l'écoulement de surface et l'infiltration. Or, cette méthode est mal adaptée à la présente étude, particulièrement lorsqu'il est question de mesures d'adaptation visant à réduire les SIDC. En effet, cette méthode utilise un indice qui intègre à la fois l'occupation du sol, l'imperméabilité et le type de sol. Il n'est donc pas possible de distinguer les SIDC des SIIC. Dès lors, le découpage du territoire en sous-bassins de drainage a été revu et les paramètres les caractérisant estimés à nouveau. Ainsi, le secteur de E est subdivisé en 354 sous-bassins de drainage dont la superficie moyenne est de 1,97 ha (0,21 à 25,8 ha). En ce qui concerne le réseau d'égout, il est constitué de 1 035 nœuds pour un

linéaire de conduite de près de 49 km (Figure 5.26). Finalement, le réseau comprend également 14 km de chenaux à surface libre représentant les cours d'eau et les fossés.

Des modifications majeures ont également été apportées au bassin de rétention PO-7 qui n'apparaît plus dans la représentation utilisée dans le cadre de ce projet. Les bassins de rétention sont représentés dans EPA SWMM5 par un réservoir à l'intérieur duquel il n'y a pas d'écoulement à proprement parler. En d'autres termes, les eaux s'accumulent uniformément dans le bassin et se vident en fonction de la hauteur d'eau et des infrastructures de vidange. Il n'y a donc pas de paramètres associés, par exemple, au coefficient de rugosité de Manning. Or le bassin de rétention PO-7 ne peut être représenté de cette façon puisqu'il s'agit d'un tronçon de ruisseau s'étirant sur près de 150 m, modifié de manière à ce que les eaux s'y accumulent et ayant une végétation très dense (Figure 5.27). Le bassin de rétention PO-7 est donc maintenant représenté par une conduite trapézoïdale de 145 m, avec une profondeur de 1,75 m, une largeur de 8 m à sa base et un coefficient de rugosité de Manning de 0,04.



Figure 5.26 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du secteur E.

Finalement, le bassin de rétention PO-7 est relié au bassin de rétention PO-1 par un déversoir (Figure 5.28). Afin de représenter plus fidèlement la réalité, la structure de vidange (*Outlet* suivant la terminologie utilisée dans SWMM) qui auparavant liait les deux bassins de rétention a été remplacée par un déversoir trapézoïdal, de 0,5 m de haut et de 30 m de long.



Figure 5.27 : Portion du ruisseau du secteur E faisant office de bassin de rétention (PO-7) longitudinal avec une végétation dense.



Figure 5.28 : Déversoir par où les eaux passent des bassins de rétention PO-7 (à droite) à PO-1 (à gauche, ce bassin étant un terrain de baseball).

5.6. Secteur F

Le secteur F est très grand, couvrant 738 ha, mais est à 80 % forestier (Figure 5.29). Les zones résidentielles viennent en seconde place en superficie, le reste du territoire étant occupé par des zones industrielles (3,7 %), commerciales (3,0 %) et à vocation institutionnelle (1,0 %).

L'occupation du territoire présentée au paragraphe précédent ainsi qu'à la Figure 5.29 correspond à l'occupation projetée selon le Plan de développement du territoire de la ville en question. Sur la Figure 5.29, la zone jaune plus foncée, occupé actuellement par une forêt, fera éventuellement place au cours des prochaines années à un quartier résidentiel selon ce plan de développement. La représentation utilisée dans la présente étude est celle après développement.

Le réseau d'égout du secteur F est de type pluvial et a été mis en place à partir des années 1980 et se développe encore actuellement. Les eaux de ruissellement, provenant d'un premier ruisseau et d'un collecteur, se dirige ensuite vers un second ruisseau situé au sud-est (Figure 5.31). Le plan de gestion des eaux pluviales de la ville prévoit de mettre en place un système de double drainage pour les secteurs encore à développer ainsi que trois bassins de rétention. Le système de double drainage est composé d'un réseau mineur comprenant les conduites et conçu pour un événement de période de retour 2 ans et d'un réseau majeur représenté par les rues et dont la conception est basée sur un événement de période de retour 100 ans. La Figure 5.30 explique plus en détail le concept de double drainage. La Figure 5.31 quant à elle donne un aperçu du réseau de drainage F selon le plan de gestion des eaux pluviales de la ville.

5.6.1. Surfaces imperméables et perméables

En raison des zones forestières importantes dans le secteur F, les SIT ne représentent que 15 % de la surface totale alors que les SIDC comptent pour 84 % des SIT. En ce qui concerne la répartition des surfaces imperméables, aucune information en ce sens n'a été colligée. D'abord, les sources d'informations permettant de calculer les surfaces imperméables n'étaient pas disponibles (ortho photos et couches d'informations

géographiques) et les images disponibles sur *Google Earth Pro* n'étaient pas suffisamment précises pour permettre d'estimer ces surfaces.

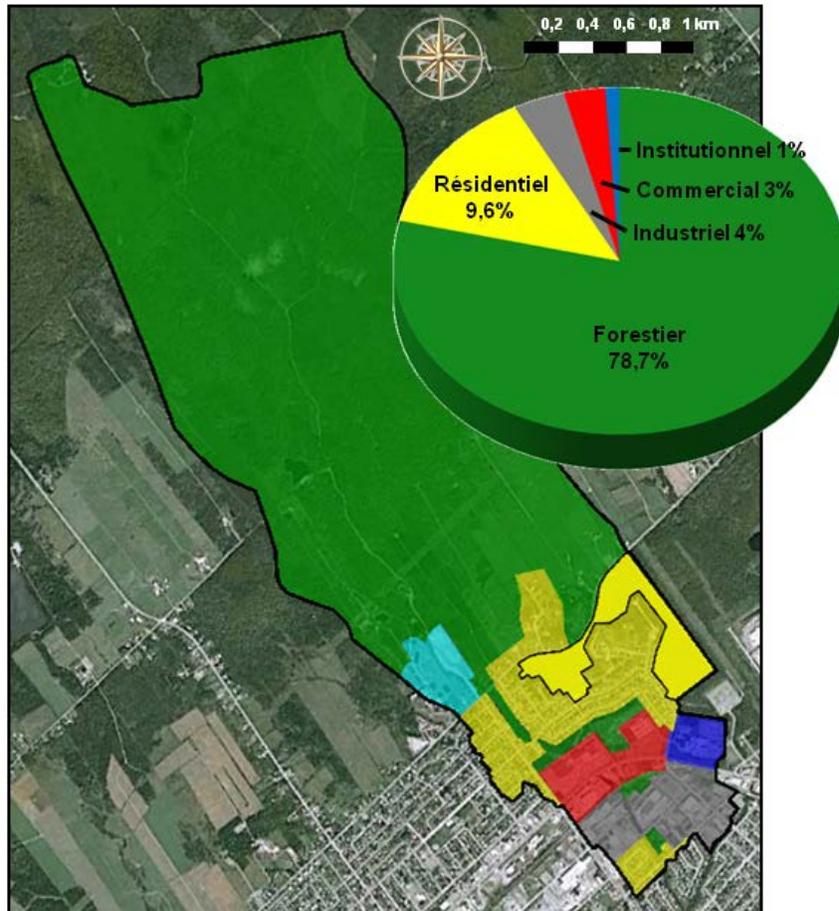


Figure 5.29 : Localisation et occupation du territoire projetée du secteur F (secteur jaune clair : développement résidentiel actuel ; secteur jaune foncé : développement résidentiel projeté).

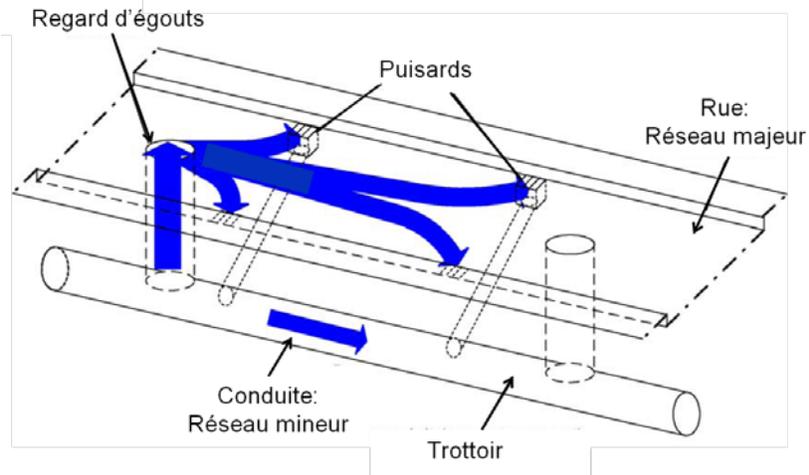


Figure 5.30 : Représentation d'un système à double drainage comprenant un réseau mineur et un réseau majeur (Source : Jihène Zaiem).

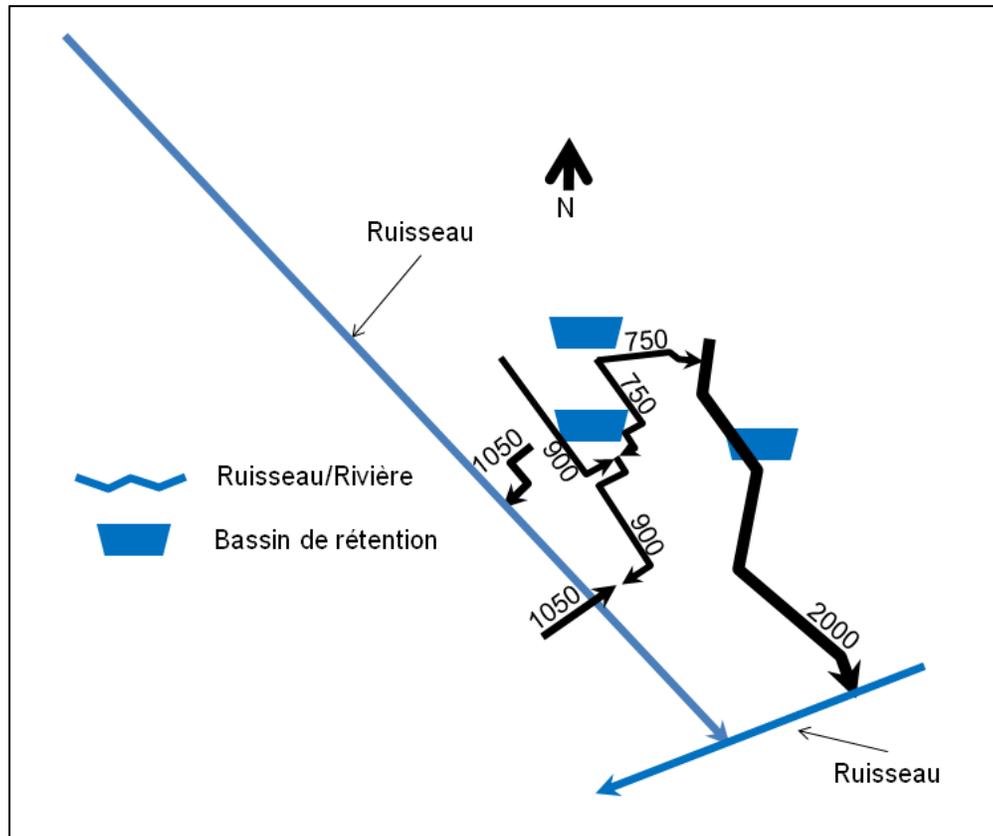


Figure 5.31 : Schéma des principales conduites du réseau F selon le plan de gestion des eaux pluviales de la ville (les chiffres représentent le diamètre des conduites en millimètre).

5.6.2. Modélisation

La représentation du réseau F a été fournie par la ville et un seul élément a été modifié pour la réalisation de ce projet. Au départ, le secteur F a été modélisé avec le modèle XP SWMM. Or, il est possible d'utiliser deux modèles d'infiltration différents dans ce modèle. Ainsi, pour les sous-bassins forestiers, le modèle d'infiltration utilisé était le *SCS Runoff Curve Number* alors que pour les autres sous-bassins de drainage, le modèle de Horton était considéré. Le modèle EPA SWMM5 ne permettant l'utilisation que d'un seul modèle d'infiltration, à savoir le modèle de Horton, il a été nécessaire de convertir certains paramètres de la méthode *SCS Runoff Curve Number*, par exemple, la pente et la largeur d'écoulement (*width*).

La représentation du secteur F ne compte que 35 sous-bassins de drainage. Il est important de noter que les sous-bassins de drainage forestiers sont très grands allant jusqu'à 321 ha. Le réseau d'égout comprend 87 nœuds et un peu plus de 2,5 km de conduites (Figure 5.32). Finalement, près de 5 km de cours d'eau est modélisé.

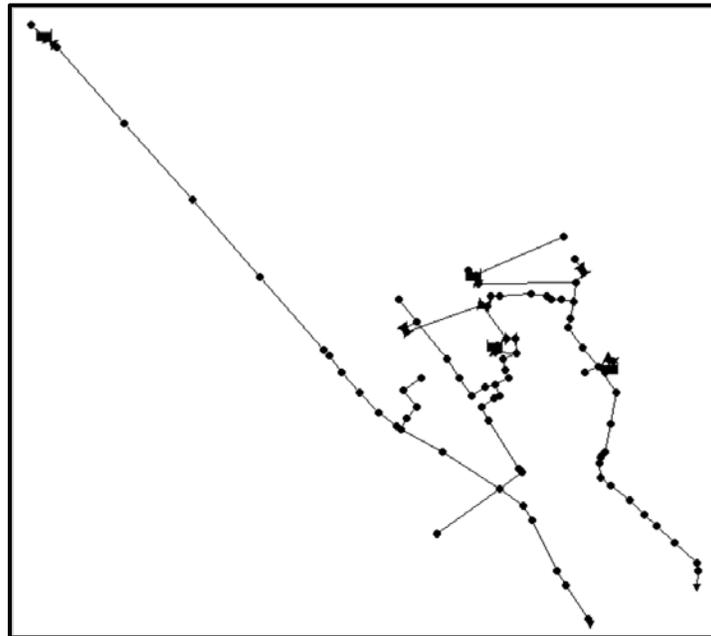


Figure 5.32 : Représentation du réseau de conduites et de nœuds du secteur F.

CHAPITRE 6 : MODÉLISATION ET SIMULATION HYDROLOGIQUE DES SECTEURS SOUS ÉTUDE

Le présent chapitre entend décrire le protocole de modélisation et de simulation retenu. La section 6.1 aborde la question des paramètres de modélisation et explique, en l'absence de données permettant un calage du modèle sur les secteurs retenus, comment les possibles réponses hydrologiques des secteurs sont investiguées. La section 6.2 donne une description des pluies utilisées et décrit les projections climatiques considérées pour les simulations en climat futur. Enfin, les indices de performances développés pour caractériser le niveau de service (ou niveau de performance) des secteurs à l'étude sont décrits à la section 6.3.

6.1. Paramétrisation des modèles

Plusieurs des secteurs sous étude ont fait l'objet d'un calage préalable par les consultants appelés à mettre en place les modèles des différents secteurs. Cependant, pour les raisons décrites au Chapitre 5, les représentations transmises par les villes ont dû être retravaillées afin de les adapter au travail d'analyse en cours. Le calage initial réalisé par les consultants n'étant plus valide et ne disposant pas des données issues des campagnes ayant permis au calage initial des modèles, une solution a donc dû être trouvée pour pallier cette absence de données.

Le Chapitre 4 a présenté une revue de la littérature qui a permis d'identifier des fourchettes de valeurs plausibles pour les différents paramètres du modèle EPA SWMM. Le Tableau 6.1 reprend et présente une synthèse de ces informations. Aux valeurs minimales et maximales répertoriées, s'ajoutent la valeur médiane des intervalles retenus.

Tableau 6.1 : Valeurs maximales, minimales et médianes des différents paramètres du modèle EPA SWMM (voir Chapitre 4 pour une description de ces paramètres).

Valeur	Paramètre								
	Largeur*** d'écoulement (width)	f_0 (mm/h)	f_∞ (mm/h)	α (h ⁻¹)	Perte par dépression (mm)		Coefficient de Manning n		
					Imp.	Perm.	Conduite	Imp.	Perm.
Inférieure	-25 %	50* - 75**	1* - 4**	2	1	3	0,011	--	--
Médiane	0 %	75* - 100**	4* - 7**	4	2,5	8	0,014	0,015	0,035
Supérieure	+25 %	100*-125**	7* - 10**	6	4	13	0,017	--	--

*Secteur A, B, C, D et F

** Secteur E

***La largeur d'écoulement est calculée pour chaque sous-bassin. Les pourcentages indiqués ici correspondent aux pourcentages autour de la valeur estimée assimilée à la valeur médiane.

A défaut de connaître la valeur du jeu de paramètre propre à chaque secteur, il a été décidé d'explorer systématiquement l'espace paramétrique défini par les valeurs de paramètres du Tableau 6.1. Chaque combinaison de paramètres (3 valeurs possibles pour chacun des 7 paramètres soit $3^7 = 2\,187$ combinaisons possibles) a été considérée et simulée. Cette approche permet d'explorer l'ensemble de la réponse hydrologique possible et permet du coup de voir dans quelle mesure les différents résultats et conclusions dépendent de la paramétrisation retenue. Cette façon de faire a cependant un coût en termes de temps de calcul et complique l'analyse et l'interprétation des résultats.

Une approche de type Monte-Carlo où les valeurs de paramètres sont tirées aléatoirement dans le sous-espace des valeurs de paramètres possibles a également été implémentée et comparée aux résultats de l'approche précédente. Ces résultats ne seront pas présentés dans ce qui suit. Le choix d'avoir recours à une approche d'exploration systématique de l'espace paramétrique plutôt qu'une approche aléatoire se justifie par le fait qu'une approche systématique permet de comparer les réponses avant et après adaptation pour des jeux de paramètres similaires. De plus cette façon de faire nous assure d'explorer l'ensemble de l'espace paramétrique, même les jeux de paramètres plus improbables. A noter également que chaque jeu de paramètres se voit accordés le même poids dans l'analyse. Ce choix méthodologique pourra être revu s'il

s'avérait, sur la base d'informations plus précises, possible d'attribuer des probabilités différentes aux multiples jeux de paramètres.

6.2. Pluies considérées et projections climatiques

La modélisation hydrologique des secteurs sous étude exige de préciser les événements de pluie à considérer. Idéalement, ces dernières doivent être représentatives des conditions hydrologiques critiques où le niveau de service des infrastructures en place risque d'être altéré. Les pluies de conception (ou de projet) sont souvent utilisées pour la conception et le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (Pelletier *et al.*, 2009). Ces pluies fournissent une représentation de la répartition temporelle de la pluie. Leur utilisation demande de préciser la durée totale de l'événement (fixée en fonction du temps de concentration du bassin considéré) et du volume de pluie totale généré. Cette dernière est établie à partir des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF ; CSA, 2012). Le caractère plus ou moins extrême de l'événement est précisé par la période de retour de l'événement, qui correspond à la durée moyenne séparant deux événements d'intensités égales ou supérieures à une intensité donnée (CSA, 2012). Une fois la durée et la période de retour précisées, l'intensité moyenne de l'événement est estimée à partir des courbes IDF.

Deux pluies de conception sont considérées dans le cadre du présent travail. La première est la pluie de type AES (*Atmospheric Environment Service* maintenant le *Meteorological Service of Canada* ou *Service météorologique canadien*) développée par Hogg (1980, 1982). Elle est couramment utilisée par les consultants au Canada et elle est considérée comme étant appropriée au contexte canadien (Pelletier *et al.*, 2009; MDDEP, 2010). Pour ce projet d'étude, l'élaboration du hyétogramme est basée sur la démarche et les valeurs fournies par Watt *et al.* (1986). La durée de cette pluie est d'une heure, ce qui correspond approximativement au temps de concentration des réseaux sous étude.

La pluie de projet triangulaire d'une durée de 24 heures a également été considérée. Cette pluie, de plus longue durée, est particulièrement utile pour les secteurs à l'étude où il y a des bassins de rétention (MDDEP, 2010). Dans le cas présent, la pluie

triangulaire de durée 24 heures est utilisée pour les secteurs E et F. La Figure 6.1 présente les hyétogrammes normalisés des pluies AES et triangulaire.

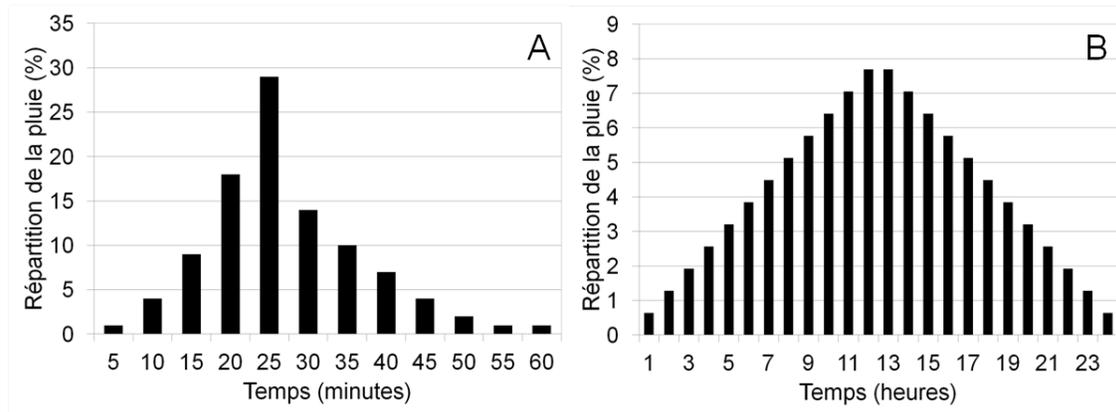


Figure 6.1 : Hyétogrammes normalisés des pluies de conception : a) AES et b) triangulaire.

Les courbes IDF utilisées sont celles établies à partir des séries des stations météorologiques les plus près des secteurs sous étude. Ces courbes ont été estimées à l'aide de l'approche fréquentielle régionale en utilisant la distribution des valeurs extrêmes généralisés (*Generalized Extreme Value* ou GEV ; pour plus de détails voir Mailhot et Talbot, 2011a,b).

Le Tableau 6.2 présente les hauteurs d'eau pour les deux pluies de conception considérées. Quatre périodes de retour seront considérées par la suite à savoir 2, 5, 10 et 20 ans. Les pluies de période de retour 2 ans serviront essentiellement à évaluer la performance des mesures de types contrôle à la source destinées à améliorer le niveau de service pour des événements de pluie plus fréquents et de plus faibles intensités. Les pluies de période de retour 10 et 20 ans correspondent aux périodes de retour de conception utilisées dans de nombreuses municipalités et serviront à établir le niveau de service en matière de refoulements et de risque d'inondations.

Tableau 6.2 : Hauteurs totales (en mm) des pluies de durées 1 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans aux différentes stations pluviométriques.

Secteurs	Durée (h)	Période de retour (ans)			
		2	5	10	20
A et B	1	20,9	28,1	33,1	38,0
	24	47,3	61,5	71,0	80,0
C	1	22,3	30,0	35,3	40,5
	24	46,6	60,6	69,9	78,8
D	1	21,9	29,5	34,7	39,8
	24	53,3	69,4	80,1	90,3
E	1	22,4	30,1	35,5	40,7
	24	46,2	60,1	69,3	78,2
F	1	24,4	32,7	38,5	44,2
	24	56,5	73,5	84,8	95,6

Les pluies de conception majorées de 10, 15 et 20% seront utilisées pour représenter les conditions en climat futur (période 2040-2070). Ces valeurs sont basées sur la littérature et sur les projections établies par Mailhot *et al.* (2012) (voir Chapitre 3 pour plus de détails). Il est à noter que l'essentiel des résultats qui seront présentés dans ce qui suit sont basés sur la majoration de 15 % (valeur médiane des hausses suggérées).

6.3. Indicateurs de performances

Plusieurs indicateurs de performances ont été développés afin d'évaluer le niveau de service des différents réseaux de drainage en climat historique et futur. Parmi ceux-ci, certains sont communs aux réseaux d'égout pluviaux et unitaires. C'est le cas des indicateurs : Nombre de nœuds critiques, Moyenne des dépassements maximaux, Inondation, Infiltration-Évaporation-Rétention et Ruissellement. Pour les réseaux d'égouts unitaires, les indicateurs Surverse et Usine s'ajoutent alors que pour les réseaux d'égouts pluviaux, on a les indicateurs Milieu récepteur et Débit maximal (Tableau 6.4). Les prochaines sections donnent une description de chacun de ces indicateurs de performances.

Tableau 6.3 : Liste des indicateurs de performances pour chaque type de réseau.

Réseaux pluviaux	Réseaux unitaires
Nombre de nœuds critiques	Nombre de nœuds critiques
Moyenne des dépassements maximaux	Moyenne des dépassements maximaux
Inondation	Inondation
Infiltration-Évaporation-Rétention	Infiltration Infiltration-Évaporation-Rétention
Ruissellement	Ruissellement
Milieu récepteur	Surverse
Débit maximal	Usine

1. L'Indicateur Mise en charge est défini à travers deux indicateurs distincts.

6.3.1. Nombre de nœuds critiques et Moyenne des dépassements maximaux

Ces indicateurs de performance permettent d'évaluer l'étendue et l'ampleur des mises en charge en réseau. Les mises en charge surviennent lorsque la ligne piézométrique dépasse la couronne des conduites (Brière, 2012). Le risque associé à ces mises en charge est évalué en fonction d'une hauteur critique au-delà de laquelle on estime que les mises en charge peuvent conduire à des refoulements importants voire à des inondations des sous-sols ou en rue. Ce risque est jugé réel lorsque la ligne piézométrique est à moins de 0,9 mètre de la surface du sol pour les réseaux d'égouts unitaires et 0,5 mètre pour les réseaux d'égouts pluviaux (Figure 6.2). Deux variables sont estimées pour quantifier l'étendue et l'ampleur des mises en charge. Pour estimer l'étendue des mises en charge (et du risque que ces dernières font peser), le nombre total de nœuds où la ligne piézométrique dépasse la valeur seuil pendant un événement pluvieux est estimé. Plus ce nombre est élevé, plus l'étendue des mises en charge est importante. La deuxième variable, utilisée pour quantifier l'ampleur des mises en charge correspond à l'amplitude moyenne des dépassements maximaux en chaque nœud que l'on peut exprimer sous la forme :

$$I_c = \frac{1}{n_{MC}} \sum_{j=1}^n \max_t \left\{ \max \left[0, (h_{j,t} - h_s) \right] \right\} \quad (6.1)$$

où I_c est la variable caractérisant l'ampleur des mises en charge, $h_{j,t}$ est la hauteur piézométrique au pas de temps t et au nœud j , h_s est la hauteur critique au-delà de laquelle les mises en charge sont risquées et n_{MC} est le nombre de nœuds où à un moment ou à un autre il y a dépassement de la hauteur critique.

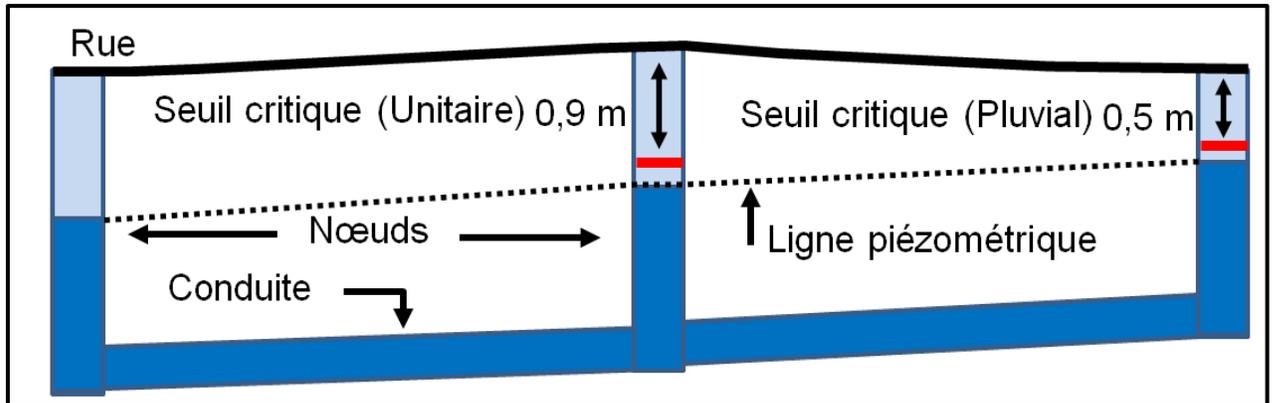


Figure 6.2 : Schématisation des indicateurs Nombre de nœuds critiques et Moyenne des dépassements maximaux pour les réseaux unitaires et pluviaux.

6.3.2. Inondation

L'indicateur Inondation est en fait la valeur associée au *Internal Outflow* du *Status Report* de EPA SWMM. Cette valeur représente le volume d'eau expulsé du réseau lorsque la hauteur d'eau dans un nœud donné atteint la surface du sol. Il faut bien voir qu'une fois ces volumes d'eau expulsés du réseau, EPA SWMM ne simule par leur écoulement subséquent (à moins de représenter explicitement les rues dans le modèle auquel cas les eaux expulsées du réseau peuvent être de nouveau retournées au réseau ; voir Section 5.6). Ce volume est donc un indicateur indirect du risque d'inondation et s'ajoute aux indicateurs de mises en charge qui constituent en quelque sorte le premier niveau d'alerte.

6.3.3. Infiltration-Évaporation-Rétention

L'indicateur Infiltration-Évaporation-Rétention correspond aux volumes totaux d'eau infiltrés, évaporés et retenus à la surface du territoire sur l'ensemble du secteur. Ce type d'indicateur est pertinent notamment lorsque des mesures favorisant l'infiltration sont mises en place. Ce volume correspond aux variables *Infiltration Loss*, *Evaporation Loss* et *Final Surface Storage* du *Status Report* de EPA SWMM.

6.3.4. Ruissellement

L'indicateur Ruissellement correspond, comme son nom l'indique, au volume total de ruissellement et donc au volume total acheminé jusqu'au réseau. Cette valeur correspond à la variable *Surface Runoff* du *Status Report* de EPA SWMM. Il faut toutefois faire attention puisque l'indicateur RUI n'est pas égale au volume total à l'exutoire du réseau pluvial. En effet, aux volumes de ruissellement peuvent s'ajouter des eaux parasites et parfois des eaux usées domestiques provenant de branchements croisés.

6.3.5. Usine

Pour les réseaux d'égouts unitaires, une large part des volumes de ruissellement est acheminée vers la station d'épuration afin d'y être traitée. L'intérêt de cet indicateur est qu'il permet de voir comment les eaux acheminées au réseau se distribuent entre les eaux rejetées au milieu récepteur et celles qui sont traitées à l'usine. Ces volumes d'eau sont comptabilisés à partir des débits en conduite. Dès que le débit à l'exutoire du réseau dépasse la capacité de traitement de l'usine (voir section 5.2.2 pour les seuils au-delà desquels les eaux sont rejetées au milieu récepteur), le volume d'eau excédentaire est comptabilisé et correspond aux volumes rejetés au milieu récepteur.

6.3.6. Surverse

Les conséquences environnementales associées aux déversements de réseau unitaire (DRU) en milieu récepteur sont nombreuses (MTP & SGC 2001; Holeton *et al.*, 2011; voir Chapitre 7 pour une discussion détaillée de ces enjeux). L'indicateur Surverse a donc été développé pour les réseaux unitaires et représente le volume total des eaux rejetées directement au milieu récepteur aux différents ouvrages de surverses. Ce

volume est estimé à partir des débits seuils transmis par les responsables municipaux, débits au-delà desquels les volumes excédentaires sont rejetés au milieu récepteur. Ces débits seuils dépendent des configurations particulières de chaque ouvrage de surverse et de la capacité de traitement de l'usine.

6.3.7. Milieu récepteur

L'indicateur Milieu récepteur correspond, pour les réseaux pluviaux, aux volumes totaux déversés au milieu récepteur. Il intègre donc les volumes de ruissellement, les volumes d'eaux parasites (infiltrations d'eau souterraine dans le réseau) et parfois des eaux usées domestiques (branchements croisés).

6.3.8. Débit maximal

L'indicateur Débit maximal représente, comme son nom l'indique, le débit maximal à l'exutoire principal pour une pluie et un secteur donné. En milieu urbain les problèmes associés à l'érosion et aux glissements de terrain en milieu récepteur sont fréquents en période de pluie (Tillinghast *et al.*, 2012; Jacobson, 2011; MDDEP, 2010). Cet indice permet d'évaluer le risque associé à ces phénomènes. Il est important de noter toutefois que les résultats des simulations permettront d'estimer par exemple les augmentations des débits maximaux à l'exutoire des réseaux mais qu'il demeure difficile de statuer sur le pouvoir d'érosion effectif qui en résulte.

CHAPITRE 7 : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DÉVERSEMENTS DE RÉSEAU UNITAIRE (DRU)

Les débordements des réseaux d'égouts unitaires (DRU) constituent un enjeu environnemental de premier plan et sont reconnus comme une source importante de polluants (Walsh *et al.*, 2005; Passerat *et al.*, 2011). Pour les villes situées dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent, le volume des DRU représente plus de 90 milliards de litres d'eaux usées brutes rejetées directement dans les lacs et les rivières (Sierra Legal, 2006). Devant l'importance de cet enjeu, et considérant que les régimes pluviométriques de plusieurs régions seront sensiblement modifiés par les changements climatiques (IPCC, 2007), il y a lieu de s'interroger sur les impacts que ces derniers auront sur l'évolution future des DRU.

De nombreuses villes d'Europe et d'Amérique du Nord dépendent encore de réseaux d'égouts unitaires pour gérer leurs eaux usées, et par conséquent, sont aux prises avec une problématique de DRU. Aux États-Unis, l'*Environmental Protection Agency* (EPA) estime qu'il y a plus de 40 millions de personnes réparties dans 772 grandes villes dont les eaux usées sont collectées par de tels systèmes (EPA, 2008) dont les villes de New-York, Chicago, Boston et Detroit. Sachant que 98 % de la population du Québec occupe le bassin versant du fleuve Saint-Laurent (Godmaire et Demers, 2009), il n'est pas étonnant de constater la volonté des gouvernements et des municipalités de s'attaquer à la problématique des DRU.

Le présent chapitre rend compte des travaux dont l'objectif principal était d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la fréquence et la durée des DRU, ces deux caractéristiques (fréquence et durée) étant celles pour lesquelles des données sont disponibles. Pour ce faire, une analyse des données de DRU de 30 ouvrages de surverse (ODS), répartis sur le territoire de 16 municipalités du Québec, a d'abord été réalisée. En utilisant des données observées de pluviométrie provenant de stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS, les épisodes de DRU sont associés à un événement de pluie susceptible de l'avoir généré. La relation entre les DRU (fréquence et durée) et les caractéristiques de la pluie (hauteur de pluie, durée, intensité, *etc.*) est ensuite examinée. Cette analyse a pour but d'établir, pour chaque

ODS, un modèle probabiliste qui permet d'estimer la fréquence et la durée des DRU à partir d'une série de pluie. La seconde étape du projet s'intéresse aux impacts des changements climatiques sur les DRU. Les relations établies précédemment sont utilisées pour déterminer l'évolution future de la fréquence et de la durée des DRU à partir des séries de précipitations simulées par le modèle régional canadien du climat (MRCC). Une comparaison des fréquences et durées observées aux différents ODS et des valeurs estimées en utilisant les séries de précipitations simulées par le MRCC est également réalisée. Une procédure visant à corriger les biais entre les caractéristiques des DRU obtenues à partir des séries de pluie simulées et des séries observées est développée et appliquée.

L'ensemble des travaux présentés dans ce chapitre a été réalisé dans le cadre de la maîtrise de Mme Claudine Fortier. Le lecteur est invité à consulter Fortier (2013) pour plus de détails. Le texte qui suit s'en inspire très largement et reprend certaines parties du texte de Fortier (2013). La revue de littérature relative à la question des DRU et des CC ne sera pas reprise dans ce qui suit. Le lecteur est invité à consulter Fortier (2013).

7.1. Données utilisées

Les données des DRU à 30 ouvrages de surverses (ODS) répartis dans 16 municipalités du Québec ont été utilisées. Ces données proviennent de la base de données SOMAE (Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux) du Gouvernement du Québec (MAMROT, 2000 ; Moreira, 2010). Les dates d'occurrence et les durées des débordements durant les mois de mai à octobre pour les années 2007 à 2009 ont ainsi été colligées. Les données utilisées sont : le nom de l'ouvrage de surverse, la date et la durée des DRU en heure. Ces données sont journalières, c'est-à-dire qu'on ne peut connaître le moment de la journée pendant lequel le DRU est survenu.

Les types de DRU sont regroupés en cinq catégories : 1) causé par la pluie; 2) causé par la fonte des neiges; 3) survenant en situation d'urgence (p. ex. bris de matériel, accidents, nettoyage et panne électrique); 4) survenant en temps sec et 5) autres (p. ex. erreurs humaines, obstructions ponctuelles, cause inconnue). Les DRU causés par la

pluie constituent 56 % du nombre total des DRU répertoriés en 2009 et sont les seuls considérés dans le cadre de ce projet.

Les ODS retenus devaient satisfaire certains critères précis parmi lesquels : 1) distance avec une station météorologique de moins de 20 km ; 2) nombre minimal annuel de 20 DRU ; 3) population considérée lors de la conception de la station d'assainissement d'au moins 2 000 habitants ; 4) années avec données de 2007 à 2009 inclusivement ; 5) données durant les mois de mai à octobre inclusivement. Un contrôle de qualité des données de DRU disponibles a finalement été réalisé afin de ne conserver que les ODS avec des jeux de données les plus complètes et précises possibles (pour une description précise de ces critères de qualité voir Fortier, 2013). La Figure 7.1 présente une carte localisant les 30 ODS finalement retenus.

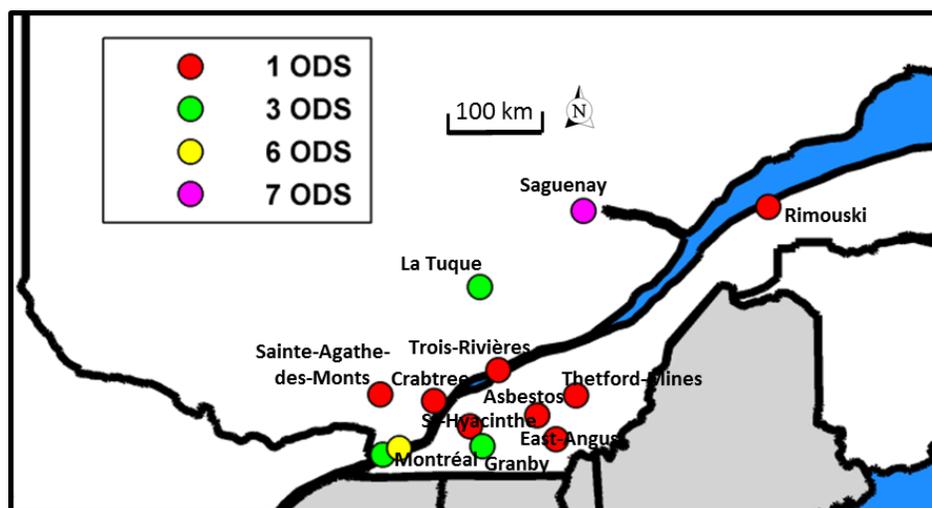


Figure 7.1 : Localisation des ODS sélectionnés. La couleur des points représente le nombre d'ODS sélectionnés situés dans la même localité (tiré de Fortier, 2013).

Les données de précipitations proviennent des stations opérées par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP, anciennement MDDEP). Les données utilisées comprennent, entre autres, la date, l'heure et la hauteur de précipitation enregistrée à chaque station météorologique pour un nombre d'années variable entre 1960 et 2009.

Le Tableau 7.1 présente la liste des ODS retenus avec certaines données relatives aux stations météorologiques qui leur sont associées et aux données de DRU de chaque ouvrage.

Tableau 7.1 : Ouvrages de surverse (ODS) sélectionnés avec le nombre de DRU enregistrés de mai à octobre entre 2007 et 2009 inclusivement, le numéro et la distance de la station météorologique associée (TP : Trop plein ; PP : Poste de pompage ; DEV : Déversoir d'orage ; REG : Régulateur de débit) (tiré de Fortier, 2013).

#	Municipalité	Nom de l'ODS	Type d'ODS	Nombre de DRU entre 2007 et 2009	Distance de la station météo la plus proche (km)	Durée moyenne des DRU (h)
1	THETFORD MINES (BLACK LAKE)	ENTRÉE DE LA STATION	TP	149	6,7	5,7
2	LA TUQUE	No 04 LAVIOLETTE	PP	75	3,6	1,4
3	LA TUQUE	No 02 BOSTONNAIS	PP	104	6,3	3,7
4	LA TUQUE	No 05 LAEROPORT	PP	89	2,2	1,8
5	TROIS-RIVIÈRES MÉTROPOLITAIN	PRINCIPAL	PP	45	7,5	4,9
6	GRANBY	LAURENT	DEV	109	3,0	5,3
7	GRANBY	RUTHERFORD	DEV	104	2,4	3,7
8	GRANBY	ST-URBAIN	DEV	122	2,4	2,5
9	VAUDREUIL-DORION	PRINCIPAL (O)	PP	45	12,5	1,1
10	VAUDREUIL-DORION	OUIMET (TP POMPÉ)	PP	58	12,1	2,6
11	SALABERRY-DE-VALLEYFIELD	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	PP	26	3,4	1,4
12	SAINTE-AGATHE-DES-MONTS	STATION (amont prétraitement)	TP	120	16,6	1,3
13	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	P-17	PP	117	4,7	7,0
14	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	OZANNE	REG	112	10,6	1,7
15	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	P-14 (MONT-FORTIN)	PP	130	9,9	5,1
16	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	MGR BÉGIN	REG	136	12,0	2,7
17	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	P-12 (STE-FAMILLE)	PP	150	10,6	5,3
18	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	SAINT-HUBERT	REG	121	10,9	1,8
19	SAGUENAY (JONQUIÈRE)	ANGERS	REG	145	11,4	4,5
20	PINCOURT	No 02 (TP POMPÉ)	PP	20	16,6	1,8
21	PINCOURT	No 01 (TP POMPÉ)	PP	41	16,6	1,3
22	PINCOURT	1 (POMPÉ)	PP	65	13,4	2,1
23	EAST-ANGUS	MALTAIS	PP	98	15,9	2,3
24	CRABTREE	ENTRÉE MUNICIPALE	TP	77	6,3	5,6
25	COTEAU-DU-LAC	LIPPÉE (amont)	PP	49	10,0	6,6
26	COTEAU-DU-LAC	BLANCHARD (2e amont)	PP	43	5,8	3,1
27	BEAUHARNOIS	SAUVÉ (POMPÉ)	PP	68	18,0	2,0
28	ASBESTOS	STATION DÉPURATION	REG	44	13,7	4,9
29	SAINTE-HYACINTHE	ENTRÉE USINE	TP	112	11,1	4,3
30	RIMOUSKI	No 8 (JULIEN REHEL)	PP	38	0,9	2,0
Moyenne				87,1	9,2	3,3
Médiane				93,5	10,3	2,7
Écart-Type				39,7	5,0	1,8
Max				150	18,0	7,0
Min				20	0,9	1,1

7.2. Modèle probabiliste d'occurrence des DRU

Un recoupement entre les séries pluviométriques enregistrées aux stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS a permis d'associer certains DRU à un événement de pluie et, vice et versa, de constater l'absence de DRU pour certains événements de pluie.

Un événement de pluie est défini comme étant une période pluvieuse bornée par deux périodes de temps sec d'une durée minimale prédéterminée. Une heure est considérée humide s'il tombe 0,2 mm de pluie ou plus pendant cette heure alors qu'elle est assimilée à une période de temps sec si moins de 0,2 mm est enregistré (les raisons de ce choix sont expliquées à la Section 7.5). Plusieurs valeurs ont été suggérées par ailleurs pour la période sec inter-événement (Bracken *et al.*, 2008 ; Schroeder *et al.*, 2011 ; D'Aoust *et al.*, 2012). Les valeurs répertoriées dans la littérature varient généralement entre 1 h et 24 h (Dunkerley, 2008). Un temps sec inter-événement de 12 h est utilisé pour séparer deux événements de pluie dans le cadre du présent travail. Ce choix se justifie essentiellement par le fait que les données des DRU sont enregistrées quotidiennement et qu'une durée inter-événement plus petite ne présente pas d'intérêt. Finalement, après découpage de la série de pluie horaire en événements de pluie, seuls ceux ayant une hauteur totale de plus de 0,5 mm sont retenus et ainsi éventuellement associés à un DRU.

Les caractéristiques suivantes sont estimées pour chaque événement de pluie : a) la hauteur de pluie générée ; b) sa durée; c) son intensité moyenne ; d) son intensité maximale sur une heure ; e) la durée pendant laquelle l'intensité horaire est supérieure à 2 mm/h et f) la durée du temps sec antérieur.

Une procédure a ensuite été développée afin d'associer chaque DRU à l'événement de pluie le plus susceptible de l'avoir produit (pour une description détaillée de cette procédure, le lecteur est invité à consulter Fortier, 2013). La Figure 7.2 présente un exemple de séquence d'événements de pluie et de la séquence de DRU correspondantes à l'ODS situé à proximité de la station météorologique.

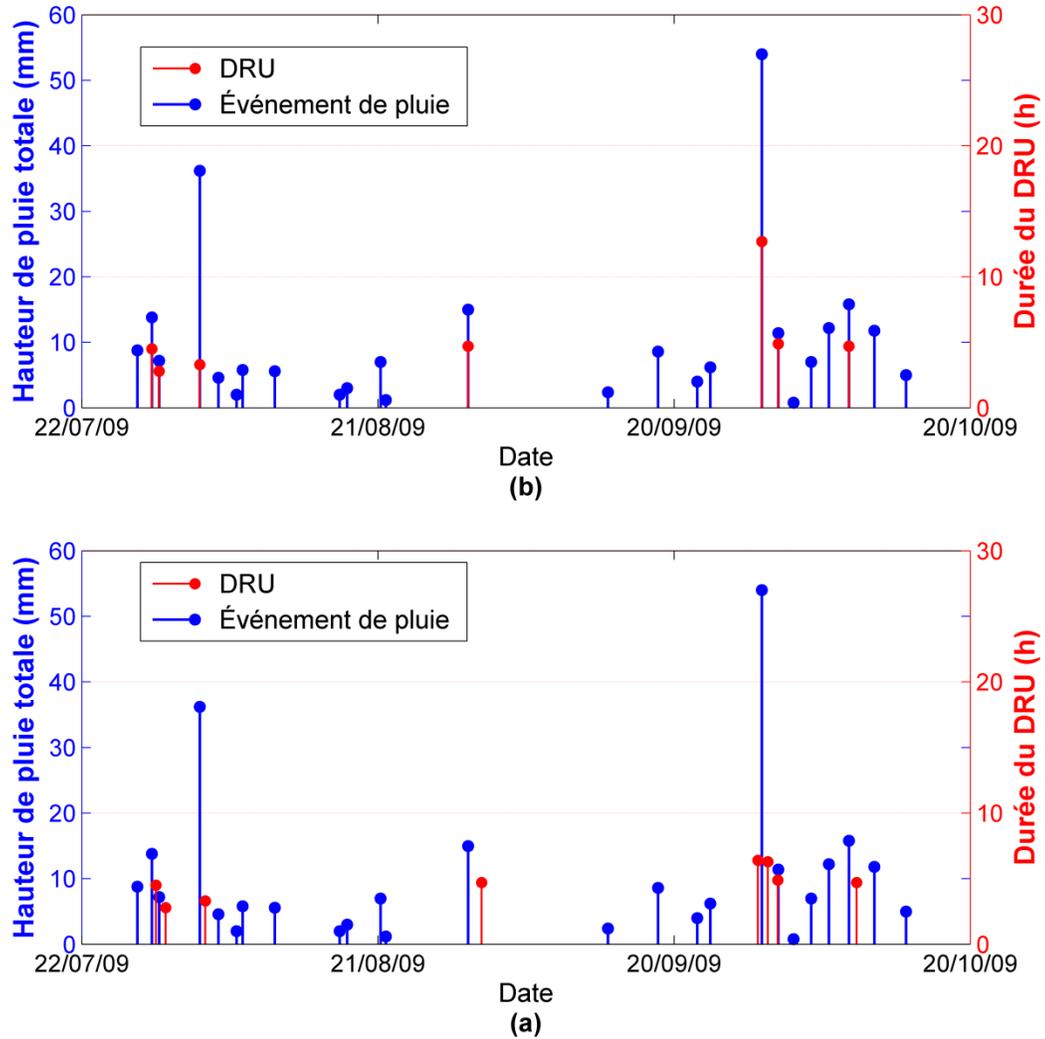


Figure 7.2 : Exemple de l'application de la procédure d'association DRU – événement de pluie sur une période de 3 mois : a) séquence DRU et événement de pluie avant l'association ; b) séquence DRU associés à l'événement de pluie le plus susceptible de les avoir causés. La longueur des segments correspond à la hauteur de pluie de l'événement pour les segments bleus (axe de gauche) et à la durée des DRU pour les segments rouges (axe de droite) (tiré de Fortier, 2013).

Un modèle conceptuel a par la suite été développé afin de lier la hauteur des événements de pluie à l'occurrence ou non d'un DRU. Dans sa version la plus simple, une hauteur critique de pluie est définie, hauteur au-delà de laquelle il y a occurrence d'un DRU (Furlow *et al.*, 2007; Patz *et al.*, 2008; Riechel *et al.*, 2010). Schroeder *et al.* (2011) ont proposé une technique permettant de déterminer cette hauteur critique de

pluie à partir des données opérationnelles de DRU observés sur le terrain et des hauteurs de pluies correspondantes. Cette approche a d'ailleurs été considérée dans la suite de cette étude.

Une autre approche a été développée dans le cadre de la présente étude. La Figure 7.3 présente les résultats de cette correspondance entre DRU et événement de pluie pour un des ODS à l'étude. L'examen de cette figure montre qu'il n'est pas possible de définir une hauteur de pluie critique unique au-delà de laquelle il y a débordement, et ce en raison des multiples facteurs, autres que la hauteur de pluie (p. ex. configuration des réseaux, distribution spatiale de la pluie, etc.), qui peuvent avoir une incidence sur la probabilité d'occurrence de DRU. De plus, la hauteur de pluie à la station météorologique la plus proche demeure une estimation de la hauteur de pluie réelle tombée sur le bassin dont l'exutoire est l'ODS considéré.

Ce constat suggère d'utiliser une approche probabiliste permettant d'estimer la probabilité d'occurrence d'un DRU étant donnée la hauteur de pluie de l'événement (courbe noire de la Figure 7.3). Ce type d'approche permet, par exemple, d'affirmer que, pour l'ODS représenté à la Figure 7.3, un événement de pluie de 15 mm a une probabilité d'environ 50 % d'engendrer un DRU. La fonction utilisée pour représenter cette probabilité (fonction strictement croissante comprise entre 0 et 1) est la fonction sigmoïde comportant deux paramètres estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (pour les détails techniques voir Fortier 2013). Les paramètres de la fonction sigmoïde ont finalement été estimés pour les 30 ODS à l'étude. La Figure 7.4 présente l'ensemble des fonctions de probabilités ainsi estimées pour chacun des ODS à l'étude.

Le modèle probabiliste développé a finalement été utilisée pour générer des séquences probables (approche Monte-Carlo) du nombre annuel de DRU pour chacun des ODS à l'étude sur la période où les fréquences d'occurrence des DRU sont disponibles. La Figure 7.5 compare les valeurs moyennes estimées et les valeurs observées pour la période de 2007-2009. Les fréquences des DRU obtenues à l'aide du modèle de la hauteur critique de Schroeder *et al.* (2011) sont également présentées. Le modèle proposé permet de bien reproduire les fréquences de DRU observées.

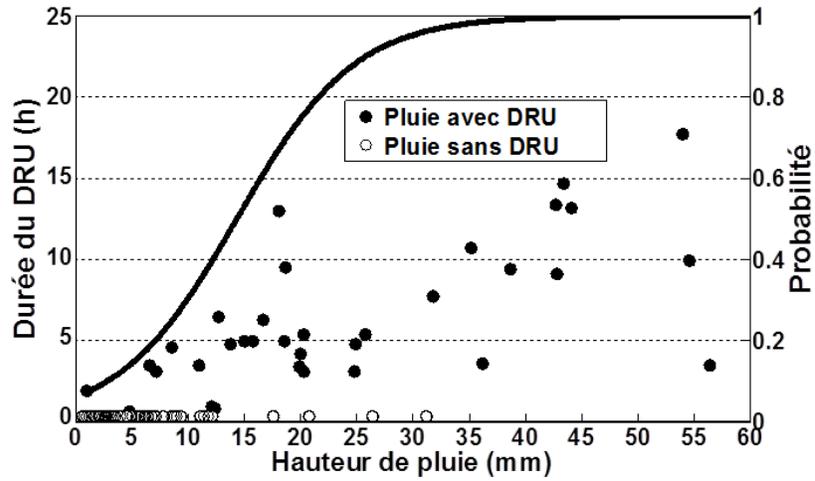


Figure 7.3 : Probabilité d'occurrence (axe de droite; ligne noire) et durée (axe de gauche) d'un DRU en fonction de la hauteur de pluie pour l'un des ODS de Trois-Rivières (Principal). Les cercles correspondent aux événements de pluie n'ayant pas entraînés un DRU alors que les points correspondent aux événements de pluie avec DRU (tiré de Fortier, 2013).

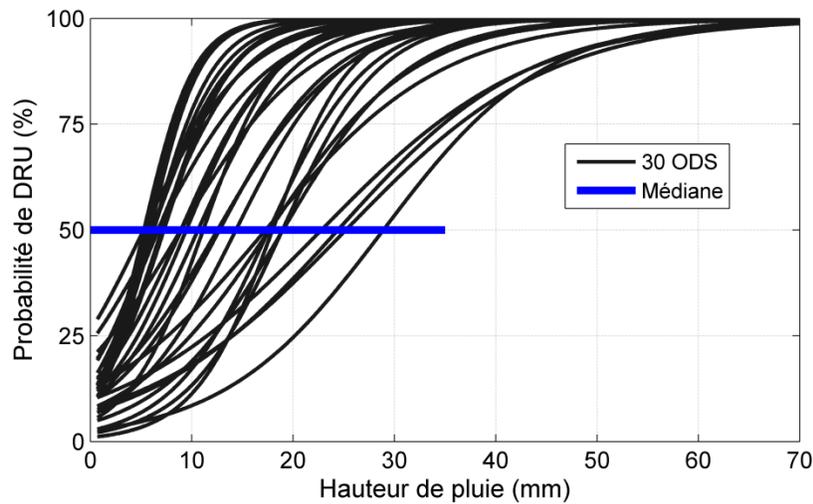


Figure 7.4 : Modèle de probabilité d'occurrence des DRU (fonctions sigmoïdes) de chacun des 30 ODS (tiré de Fortier 2013).

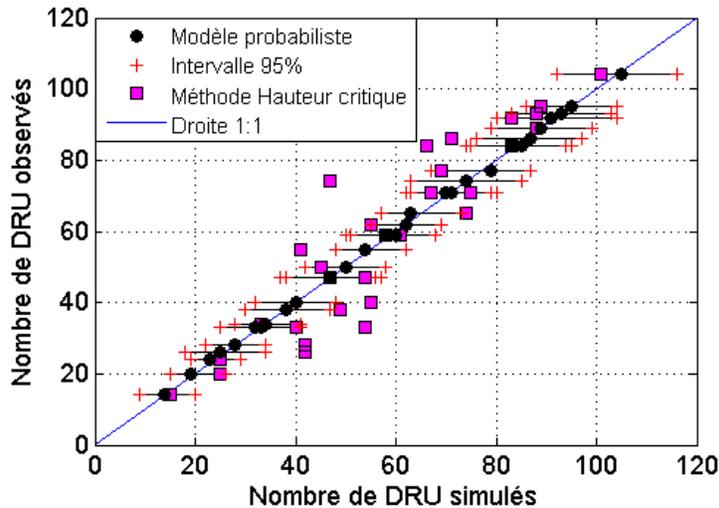


Figure 7.5 : Comparaison du nombre total de DRU simulés et observés durant la période de 2007 à 2009. Les points noirs réfèrent au modèle probabiliste alors que les carrés magenta réfèrent à la méthode de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011). Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95 % des réalisations de la méthode Monte-Carlo (tiré de Fortier 2013).

7.3. Relations entre durées des DRU et caractéristiques des pluies

La Figure 7.3 suggère également l'existence d'une corrélation entre la hauteur de pluie et la durée du DRU. Une analyse a dès lors été menée afin d'établir une régression linéaire entre la durée des DRU et les caractéristiques suivantes des événements de pluie : 1) la hauteur de pluie totale ; 2) la durée de l'événement de pluie ; 3) l'intensité moyenne ; 4) l'intensité maximale ; 5) la durée pendant laquelle l'intensité est supérieure à 2mm/h, et ; 6) le temps sec antérieur. Une régression linéaire simple a été considérée entre la durée des DRU et chacune de ces caractéristiques. Le Tableau 7.2 présente un résumé de ces résultats. Il appert que le meilleur indicateur pour évaluer la durée d'un DRU est la hauteur de pluie, suivi du nombre d'heure où l'intensité est supérieure à 2 mm/h. Les régressions linéaires obtenues pour ces deux variables sont statistiquement significatives pour les 30 ODS (niveau de confiance de 95 %). La durée de l'événement et son intensité maximale sont corrélées significativement à la durée des DRU pour 20 ODS alors que ce nombre est de 6 pour l'intensité moyenne et de 1 pour

la durée du temps sec antérieur. Ces résultats corroborent ce que d'autres études ont rapportées (Schroeder *et al.*, 2011 ; D'Aoust *et al.*, 2012) à savoir l'existence d'une corrélation significative entre la hauteur de pluie et la durée du DRU. La Figure 7.6 présente un exemple de ces régressions pour l'ODS de Trois-Rivières. Un modèle de régression multiple entre durée des DRU et plusieurs caractéristiques des événements de pluie a également été considéré mais n'a pas permis d'améliorer de façon marquée la qualité des régressions obtenues (pour plus de détails voir Fortier 2013). Le modèle de régression simple entre durée des DRU et hauteur totale de pluie des événements a donc été retenu pour la suite des analyses.

Tableau 7.2 : Statistiques des coefficients de détermination des régressions entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU aux différents ODS sous étude (tiré de Fortier, 2013).

Coefficient de détermination R2	Caractéristiques des événements de pluie					
	Hauteur de pluie	Durée où l'intensité > 2 mm/h	Durée de l'événement de pluie	Intensité maximale	Intensité moyenne	Temps sec antérieur
R2 Moyen	0,37	0,34	0,15	0,10	0,06	0,02
Écart-type des valeurs de R2	0,15	0,16	0,12	0,07	0,13	0,02
R2 minimum	0,10	0,11	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
R2 maximum	0,63	0,68	0,43	0,32	0,54	0,12

Ce modèle a été appliqué aux 30 ODS sous étude afin d'estimer la durée totale des DRU pour chacune des années 2007, 2008 et 2009. La Figure 7.7 compare ces valeurs aux valeurs observées. Le coefficient de détermination entre valeurs observées et simulées est de 0,85 ce qui suggère un très bon accord entre ces valeurs. On observe également que la dispersion est plus importante pour les ODS débordant pour une durée totale importante (entre 200 et 300 h) que pour ceux qui débordent moins longtemps (entre 0 et 50 h). Notons enfin que les points encadrés sont tous issus d'ODS associés à la série de pluie de la station météorologique de Jonquière au Saguenay, et ce, pour l'année 2008 seulement. Les DRU de l'année 2008 pour ces ODS

sont caractérisés par deux ou trois DRU d'une durée de 24 h et plus qui ont ainsi conduit à une durée totale observée plus grande que celle estimée par le modèle. Finalement, la droite 1 : 1 de la figure se confond presque avec la ligne de régression linéaire, démontrant un modèle bien ajusté et exempt de biais.

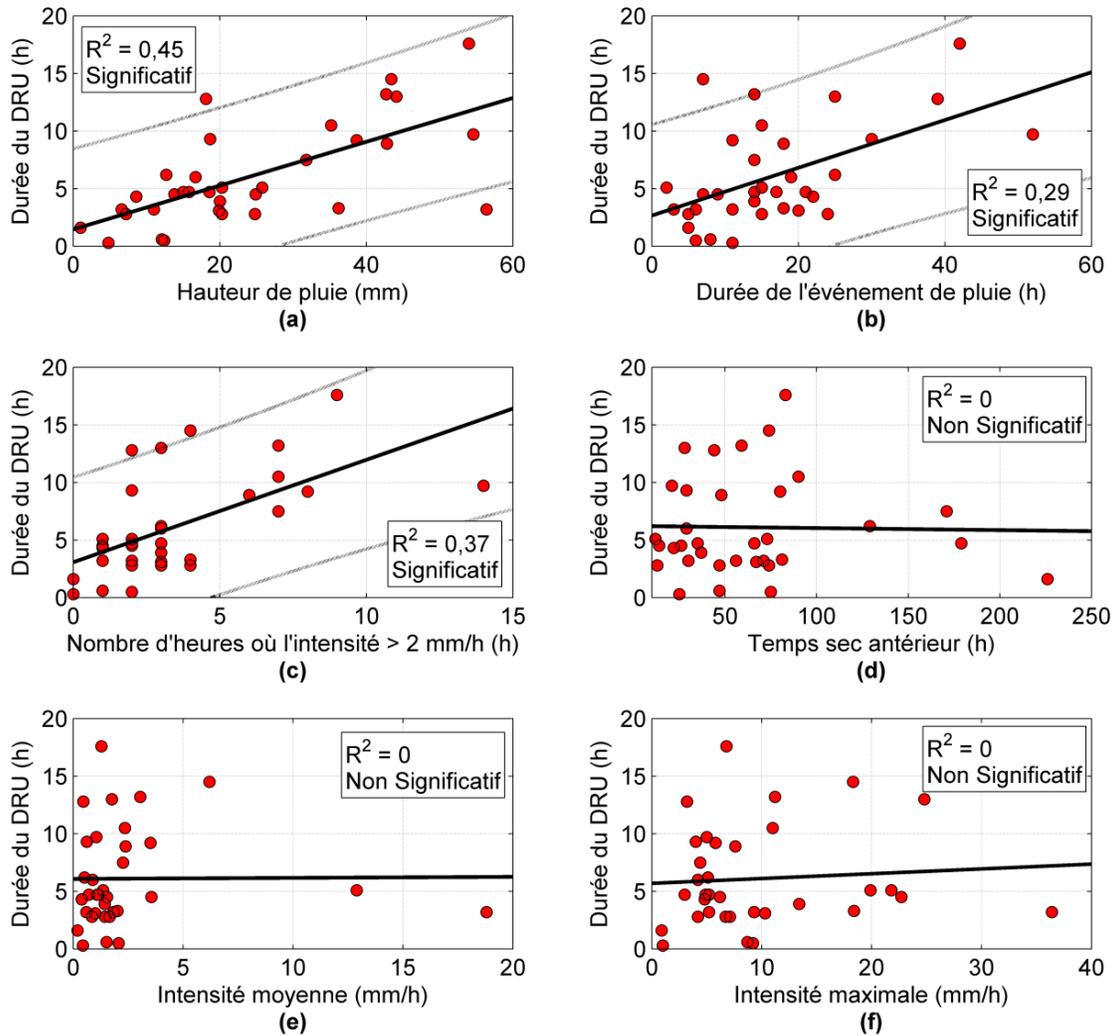


Figure 7.6 : Régression linéaire entre la durée des DRU et les six caractéristiques des événements de pluie : a) la hauteur de pluie totale ; b) la durée de l'événement de pluie ; c) la durée où l'intensité est supérieure à 2 mm/h ; d) le temps sec antérieur ; e) l'intensité moyenne ; et f) l'intensité maximale pour les données de l'ODS de Trois-Rivières entre 2007 et 2009. Les points rouges représentent un événement de pluie associé à un DRU (tiré de Fortier, 2013).

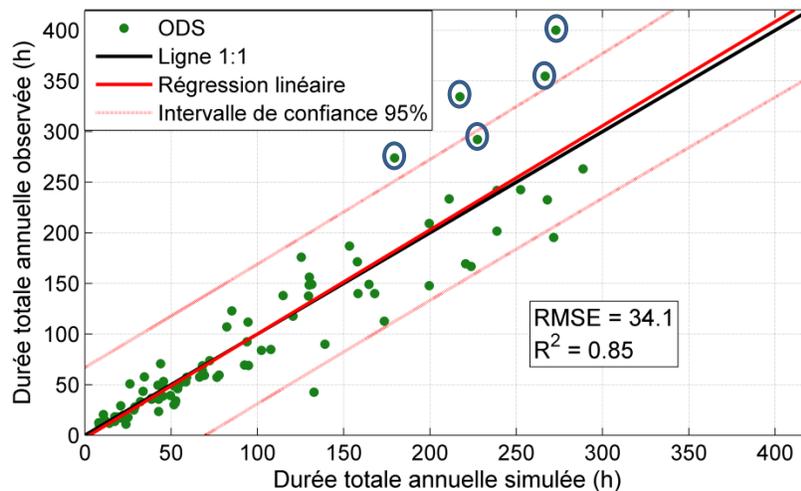


Figure 7.7 : Durée totale annuelle des DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste à partir des séries de pluie annuelles de 2007, 2008 et 2009, pour les 30 ODS. Les points encadrés représentent des ODS de la municipalité de Jonquière en 2008. La courbe rouge correspond à la régression et la ligne noire à la droite de pente 1. (tiré de Fortier, 2013).

7.4. Application aux séries historiques de pluie

Le modèle développé permet d'estimer le nombre annuel moyen et la durée moyenne des DRU aux différents ODS à partir des séries historiques de pluie. Afin d'apprécier la variabilité historique de la fréquence et de la durée des DRU, les hauteurs de pluie des événements formés à partir de la série historique de Thetford Mines entre 1979 et 2006 ont été utilisés et le nombre annuel et la durée annuelle totale des DRU ont été estimés aux 30 ODS sous étude pour le modèle probabiliste et le modèle de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011). Les Figures 7.8 et 7.9 présente respectivement les valeurs annuelles du nombre de DRU et de la durée totale aux 30 ODS. Pour la fréquence annuelle des DRU, on constate que les deux modèles donnent des résultats relativement similaires bien que le modèle de la hauteur critique donne des résultats souvent légèrement supérieurs au modèle probabiliste. Par ailleurs, sans surprise, fréquence et durée, notamment cette dernière, sont très bien corrélées à la hauteur totale de précipitation (le modèle retenu s'appuie explicitement sur la corrélation entre probabilité d'occurrence et durée des DRU et hauteur de pluie).

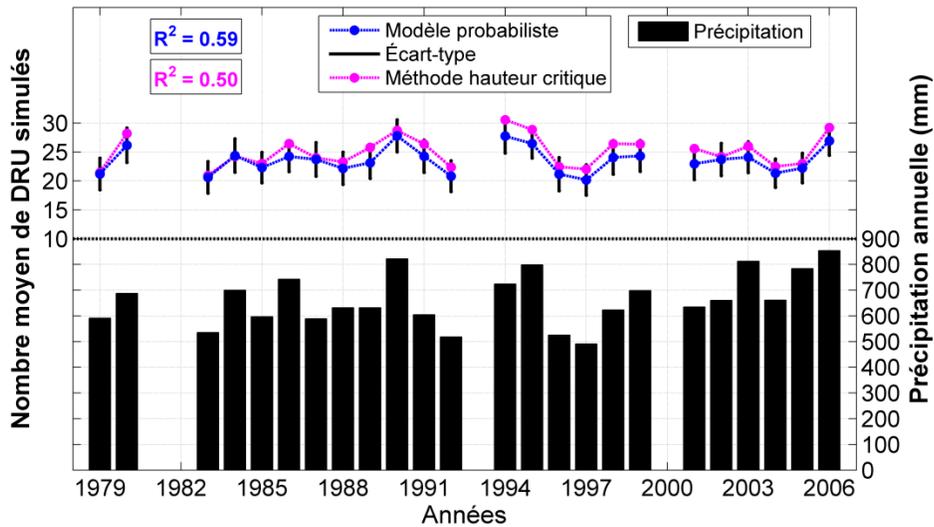


Figure 7.8: Nombre moyen annuel de DRU simulés aux 30 ODS selon le modèle probabiliste et la méthode de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011) à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Les coefficients de détermination sont calculés en considérant une régression linéaire entre la hauteur totale de pluie (mm) et le nombre de DRU moyen aux 30 ODS à chaque année (tiré de Fortier, 2013)

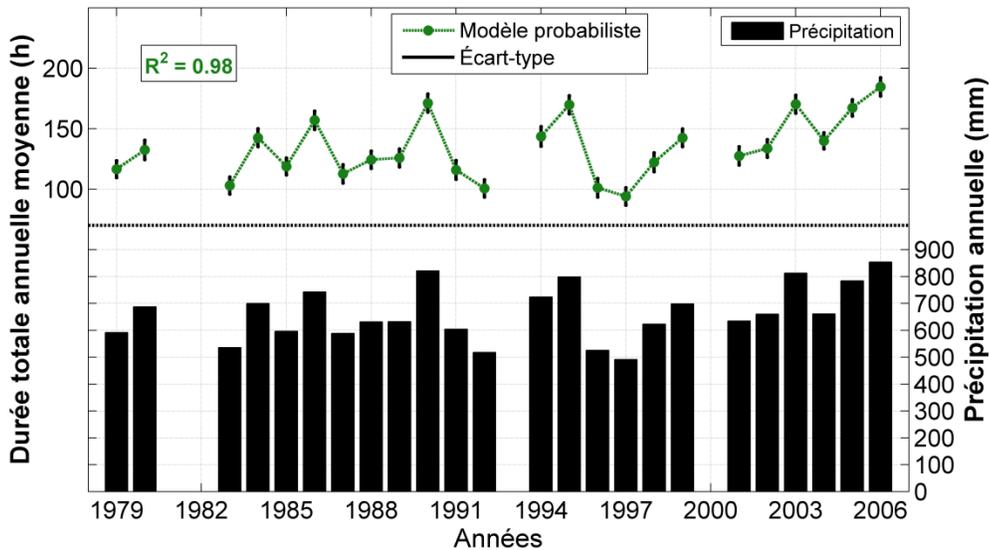


Figure 7.9: Durée totale moyenne des DRU simulés aux 30 ODS selon le modèle probabiliste à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Le coefficient de détermination est calculé en considérant une régression linéaire entre la hauteur totale annuelle de pluie (mm) et les durées totales des DRU (h) moyennés sur les 30 ODS à chaque année (tiré de Fortier, 2013).

7.5. Estimation des caractéristiques des DRU en climat futur

Les séries de précipitations simulées par le modèle régional canadien du climat (MRCC) ont été utilisées pour estimer l'évolution future des caractéristiques des DRU (Caya et Laprise, 1999; Laprise, 2008; de Elía et Côté, 2010). Deux simulations (aev et aet) sur le domaine AMNO (Amérique du Nord), pilotée à leurs frontières par les champs atmosphériques provenant de deux membres du modèle canadien couplé de climat global (CGCM3; Scinocca *et al.*, 2008; Flato *et al.*, 2000) ont été utilisées. Les simulations globale et régionale ont été produites en suivant les scénarios projetés de gaz à effet de serre et d'aérosols du GIEC SRES A2 (Nakicenovic *et al.*, 2000). Ces simulations couvrent la période 1961-2100. La résolution spatiale du modèle régional est de 45 km x 45 km (une tuile) et les champs de précipitations sont disponibles aux 15 minutes.

Les séries de précipitations du MRCC ont été agrégées aux heures et les séries aux tuiles correspondant à chaque ODS ont été considérées. Ces séries ont ensuite été utilisées pour générer des séries de DRU à chaque ODS à partir des modèles de DRU de chaque ODS développés précédemment.

Les séries de pluie simulées par le MRCC sont ensuite découpées en événements de pluie selon les mêmes critères que ceux utilisés pour le développement des associations DRU-pluie, enregistrées entre 2007 et 2009 (seuil horaire minimal de 0,2 mm pour considérer l'état pluie ; durée inter-événement minimal de 12 heures ; hauteur minimal de 0,5 mm pour un événement de pluie). Le seuil de 0,2 mm a été choisi car il offre un compromis acceptable entre le nombre d'événements et la « perte » de volume d'eau total associés aux valeurs en deçà du seuil. Un seuil de 0,3 mm pour les deux simulations aet et aev a également été évalué. Étant donné le faible impact du seuil sur les résultats, l'accent est mis dans ce qui suit sur le cas où le seuil est de 0,2 mm. On identifie par aet02 et aev02 les résultats relatifs aux simulations aet et aev utilisant un seuil de 0,2 mm et par aet03 et aev03 ceux obtenus à partir des simulations aet et aev utilisant un seuil de 0,3 mm.

7.5.1. Fréquences et durées des DRU en climat historique

Les résultats du modèle probabiliste évalués à partir des séries de pluie observées entre 1977 et 2009 ont été comparés à ceux obtenus lorsque les séries simulées, pour la même période, de pluie du MRCC sont considérées. Les séries observées entre 1977 et 2009 proviennent de quatre stations météorologiques : Thetford Mines (7028441), Trois-Rivières (701HE63), Granby (7022800) et Shawinigan (7018000). Ces stations ont été retenues puisqu'elles présentent les séries de précipitations les plus longues et les plus complètes. Les résultats du modèle probabiliste sont pondérés en fonction de la période couverte par les données de pluie disponible lorsque moins de 15 % de données sont manquantes pour la période de mai à octobre. Les années avec plus de 15 % de données manquantes ne sont pas prises en compte. Le nombre d'années manquantes varie de 7 à 14 années selon la station considérée.

La Figure 7.10 présente les résultats obtenus pour la simulation aet (les résultats pour la simulation aev sont très similaires et ne sont pas présentés ; voir Fortier 2013). Les résultats lorsque le modèle de la hauteur critique est utilisé sont également présentés. Les séries de pluie simulées aux tuiles où se trouve chaque ODS sont considérés. Ces graphiques montrent la présence d'un biais pour le nombre moyen de DRU lorsque ce nombre est estimé avec les quatre séries historiques observées par rapport au résultat utilisant les séries simulées par le MRCC. L'utilisation des séries du MRCC conduit à une surestimation du nombre de DRU lorsque ce nombre est faible et une sous-estimation lorsque ce nombre est plus élevé suggérant que le modèle génère trop d'événements de faibles intensités et pas suffisamment d'événements de plus fortes intensités. Une régression linéaire est calculée à partir de la méthode des moindres carrés. Le coefficient de détermination et le RMSE sont indiqués dans chaque cas. A noter que les durées des DRU obtenues en utilisant les séries de pluie simulées ne présentent pas de biais notables et que les résultats obtenus diffèrent très peu selon la simulation du MRCC utilisée.

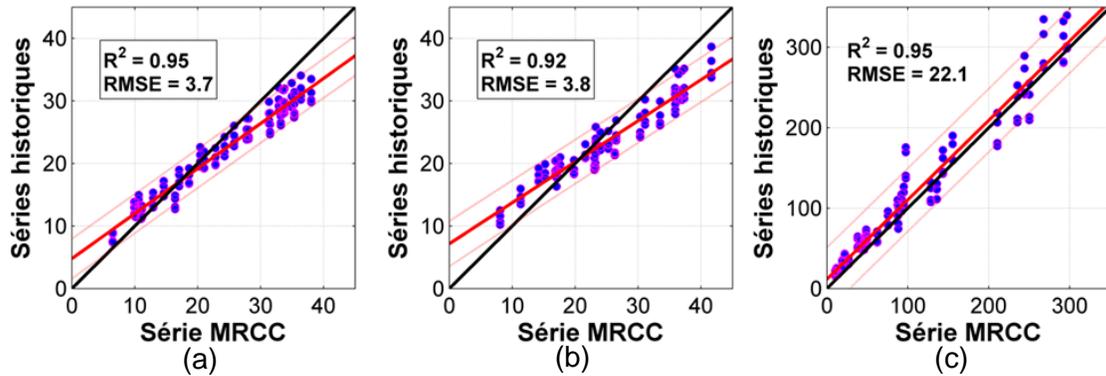


Figure 7.10 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste ; b) nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique ; c) durée totale annuelle moyenne des DRU simulés par le modèle probabiliste. La ligne rouge représente la régression linéaire, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et la ligne noire la droite de pente 1. Chaque point correspond aux résultats pour un ODS pour une des séries de pluie à l'une des stations (tiré de Fortier, 2013).

Le même exercice a été réalisé à partir des séries de précipitations mensuelles observées et simulées. Les Figures 7.11 et 7.12 comparent les résultats obtenus à chacun des mois pour le nombre et la durée totale mensuel des DRU. Le biais observé à l'échelle annuelle (ensemble des mois de mai à octobre) pour le nombre de DRU se décline maintenant en plusieurs variantes selon le mois considéré. De même la durée semble diversement affectée selon le mois considéré. Ces résultats montrent l'importance de corriger les biais observés, l'idée étant d'avoir un accord acceptable en climat historique. Cette correction de biais est ensuite appliquée aux valeurs futures sur la base de l'hypothèse que ce biais demeure inchangé lorsque le modèle climatique simule le climat futur (Ehret *et al.*, 2012). Pour chaque résultat annuel ou mensuel tiré de l'application du modèle probabiliste à partir des séries du MRCC, une correction de biais, basée sur les régressions établies à partir des ensembles de points des Figures 7.11 et 7.12, est donc appliquée (pour plus de détails voir Fortier, 2013).

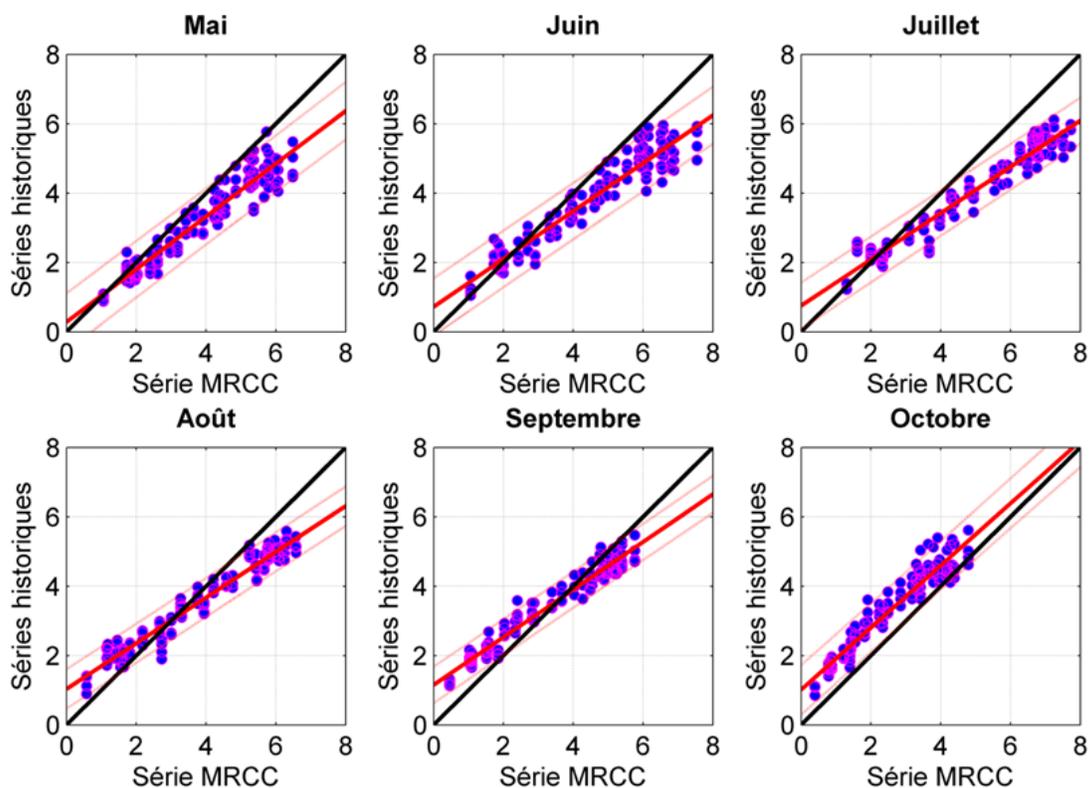


Figure 7.11 : Comparaison du nombre mensuel moyen de DRU estimés à partir des quatre séries observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 aux 30 ODS et à chaque mois de la période de mai à octobre. Les lignes rouges représentent les régressions linéaires, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et les lignes noires la droite de pente 1. Chaque valeur en ordonnée correspond au résultat d'un ODS pour une série de pluie à l'une des stations pour le mois considéré alors que la valeur en abscisse correspond au même ODS en utilisant cette fois la série de pluie simulée à la tuile où se trouve cet ODS (tiré de Fortier, 2013).

7.5.2. Fréquences et durées des DRU en climat futur

La période future est définie dans le cas présent comme la période 2070-2100 alors que la période historique réfère à la période 1961-1990. La Figure 7.13 présente les résultats (après correction des biais) pour les variations relatives des fréquences annuelles d'occurrence et des durées totales annuelles des DRU entre climat futur et historique pour chaque ODS selon les deux simulations climatiques disponibles. Pour les fréquences annuelles de DRU, des variations positives et négatives sont estimées selon l'ODS avec une variation moyenne pour l'ensemble des ODS et pour les deux

simulations de l'ordre de -1,5 %. La dispersion des variations de durée aux ODS est également importante avec, dans ce cas, une majorité d'ODS montrant des variations négatives (Figure 7.14). Cependant la variation moyenne à l'échelle de tous les ODS et des deux simulations demeure très modeste (4 %) et non significative. Enfin, il convient de noter que les deux simulations donnent des résultats relativement similaires bien que la simulation aet génère des variations moins importantes de la fréquence et de la durée des ODS entre climat futur et historique. Il semble juste, dès lors, de conclure qu'il n'est pas possible de discerner un signal clair de changement de la fréquence d'occurrence et de la durée des DRU à l'échelle annuelle (période de mai à octobre).

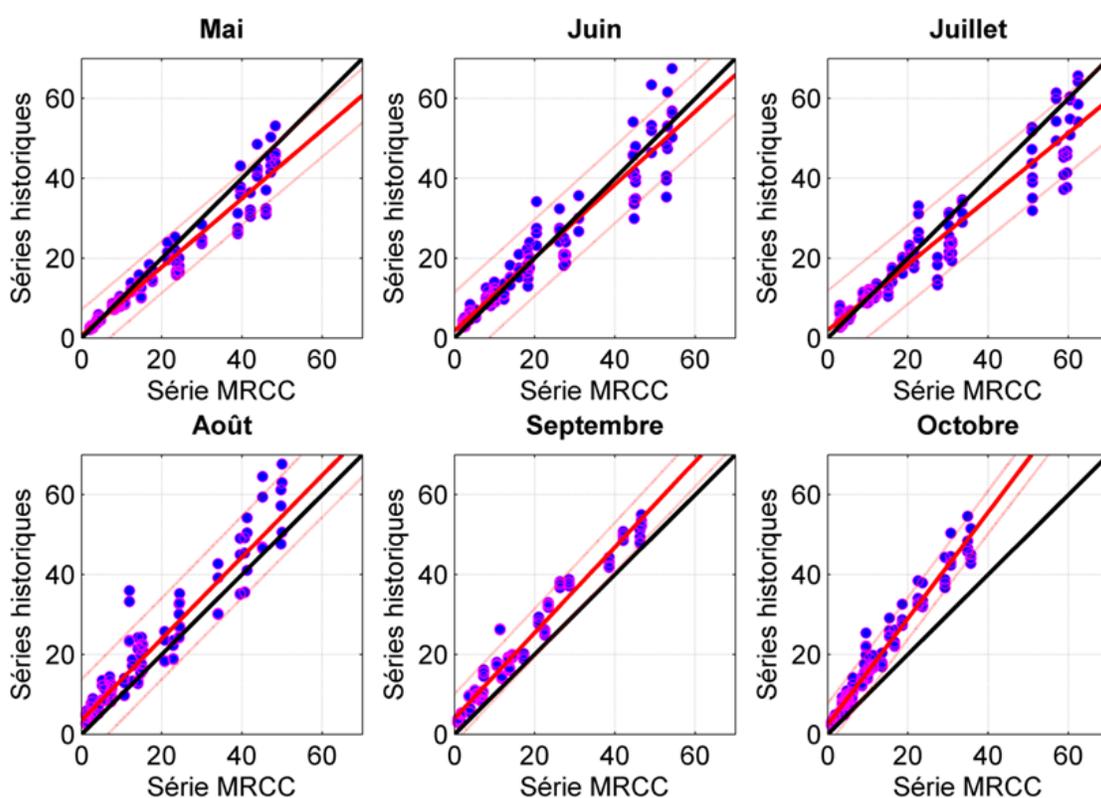


Figure 7.12 : Comparaison de la durée totale mensuelle de DRU estimés à partir des quatre séries observées et de la série du MRCC aet02 entre 1977 et 2009 aux 30 ODS et à chaque mois de la période de mai à octobre. Les lignes rouges représentent les régressions linéaires, les lignes en pointillée (en rose pâle) les intervalles 95 % et les lignes noires la droite de pente 1. Chaque valeur en ordonnée correspond au résultat d'un ODS pour une série de pluie à l'une des stations pour le mois considéré alors que la valeur en abscisse correspond au même ODS en utilisant cette fois la série de pluie simulée à la tuile où se trouve cet ODS (tiré de Fortier, 2013).

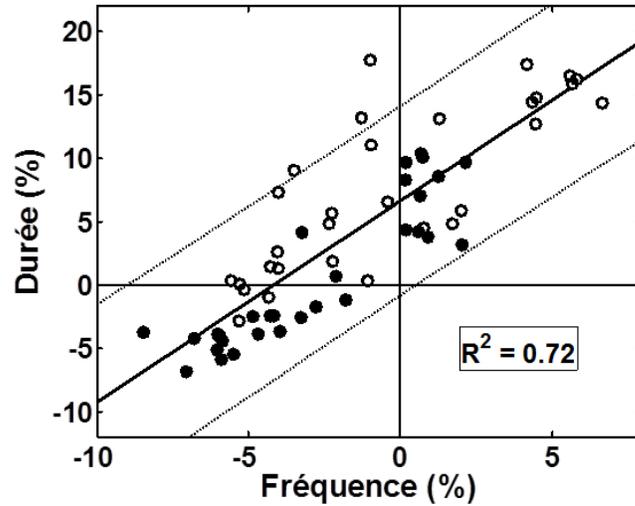


Figure 7.13 : Variation relative (%) [(futur – historique)/historique] de la fréquence et la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour les 30 ODS pour les simulations aet (points) et aev (cercles). La droite en trait plein correspond à la droite de régression et les tirets aux intervalles de confiance 95 % (tiré de Fortier, 2013).

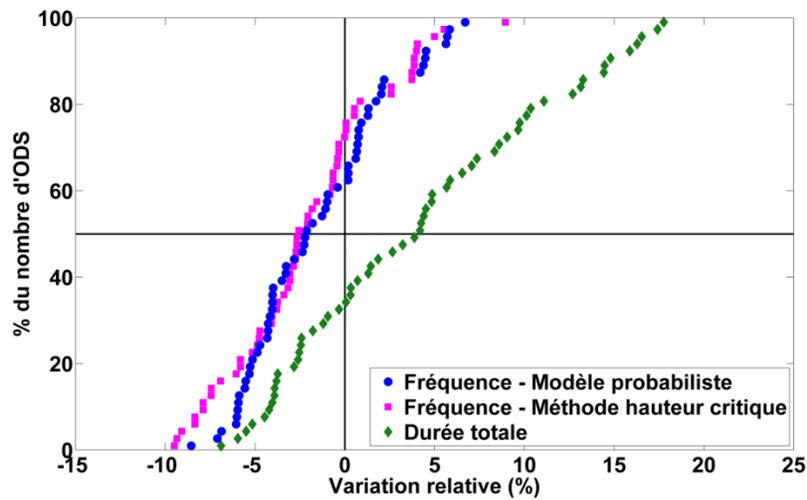


Figure 7.14 : Courbes cumulatives des variations relatives aux différents ODS entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations aet et aev pour un seuil de 0,2 mm (tiré de Fortier, 2013).

Une analyse similaire à l'échelle mensuelle révèle que les variations sont, cette fois, beaucoup plus marquées pour certains mois sur l'ensemble des ODS (Figure 7.15). Ainsi les mois de mai et, dans une moindre mesure, de septembre et octobre montrent des augmentations sensibles de la fréquence et de la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100. A l'opposé, la grande majorité des ODS connaîtront des réductions de la fréquence et de la durée des DRU pendant les mois de juin et juillet alors que le mois de juin subira peu de changement. Le Tableau 7.3 présente un résumé de ces résultats.

Le signal de changement est donc beaucoup plus marqué à l'échelle mensuelle qu'à l'échelle annuelle. On assiste donc à une redistribution intra-annuelle des DRU sans changement notable de leur fréquence et de leur durée à l'échelle annuelle. Ce type de redistribution pourrait toutefois avoir des impacts importants sur les milieux récepteurs s'il advenait que les augmentations surviennent durant des périodes de plus grande vulnérabilité de ces milieux.

Tableau 7.3 : Variation relative (%) [(futur - historique)/historique] de la fréquence et de la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour l'ensemble des ODS et les simulations aet et aev (tiré de Fortier, 2013).

	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Mai à octobre
Variation relative de la fréquence (%)	12	1	-13	-12	1	3	-1.5
Variation relative de la durée (%)	23	4	-17	-12	22	21	4

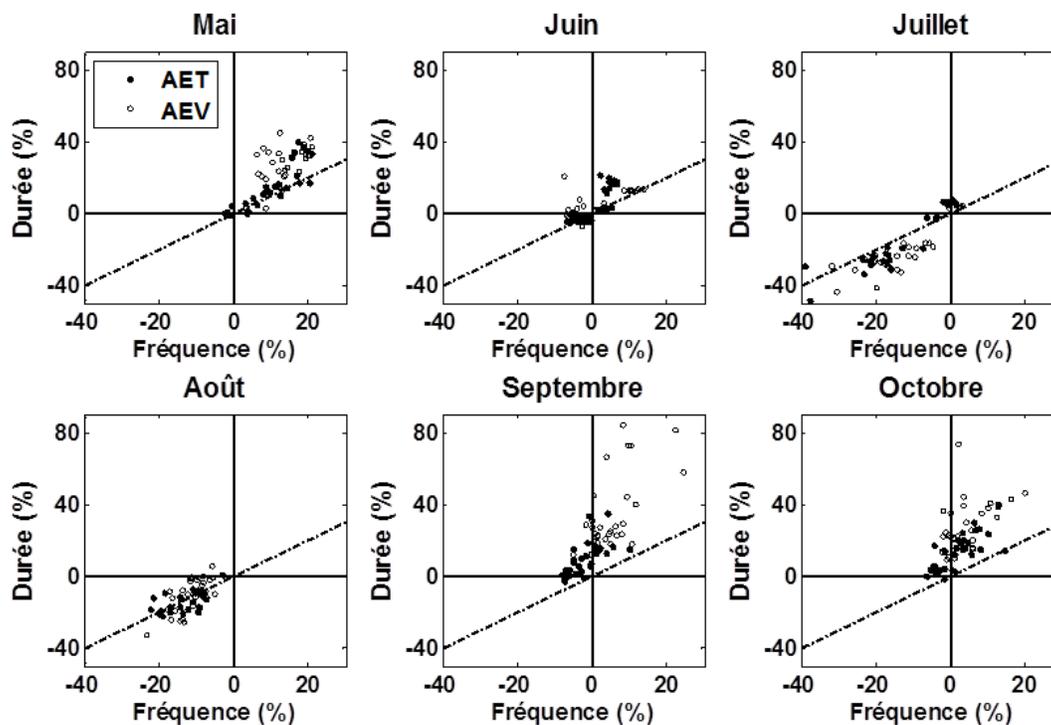


Figure 7.15 : Variation relative (%) $[(\text{futur} - \text{historique})/\text{historique}]$ entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée totale des DRU sur une base mensuelle pour les simulations aet (points) et aev (cercles) aux 30 ODS (tiré de Fortier, 2013).

CHAPITRE 8 : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SECTEURS RETENUS

Ce chapitre présente les résultats des analyses des impacts des CC pour les différents secteurs à l'étude. Les secteurs sont regroupés selon qu'il s'agit de réseaux unitaires (B et C; Section 8.2) ou pluviaux (A, D, E et F; Section 8.3).

Plusieurs dimensions sont à considérer lors de la comparaison des performances des différents secteurs (six secteurs urbains, dont deux unitaires et quatre pluviaux) en climat futur et historique : 1) les différents jeux de paramètres (incertitudes sur la réponse hydrologique); 2) les périodes de retour (2, 5 et 10 ans; impact en fonction du caractère plus ou moins extrême des événements de pluie); 3) les projections climatiques (+10 %, +15 %, +20 %; incertitude sur l'évolution future des pluies intenses à l'horizon 2040-2070); et 4) les indicateurs de performance (caractère multidimensionnel du niveau de service).

Les indicateurs de performance retenus sont définis dans un premier temps à la Section 8.1. Chaque indicateur est associé à une composante du bilan hydrologique. La comparaison des niveaux de service en climat futur et historique a été effectuée selon deux approches. La première consiste à comparer les distributions des valeurs des indicateurs de performance en climat futur aux distributions correspondantes en climat historique. Cette façon de faire permet de voir comment les CC affectent globalement le niveau de service. La seconde consiste à calculer les différences entre climat futur et historique des indicateurs de performance (écarts absolus ou relatifs) pour un jeu donné de paramètres et à examiner la distribution de ces écarts. Cette seconde approche nous informe sur les variations des indicateurs entre climat futur et historique pour différentes réponses hydrologiques possibles.

L'examen selon les périodes de retour est réalisé essentiellement en fonction de l'indicateur du niveau de service considéré. Ainsi la période de retour de 2 ans est utilisée pour apprécier la distribution des volumes d'eau selon les différentes composantes hydrologiques alors que la période de retour 10 ans est utilisée pour examiner les impacts sur les risques d'inondations et de refoulements en réseau. Enfin les résultats pour la période de retour 5 ans serviront en quelque sorte à apprécier

l'évolution des niveaux de service pour des pluies d'intensité intermédiaire qui, en principe, ne devraient pas poser de problème en climat historique mais qui, dans certains cas, pourraient se révéler problématiques en climat futur.

8.1. Indicateurs de performance et comparaison des performances en climat futur et historique

La présente section décrit les différents indicateurs utilisés pour comparer les performances historiques et futures des secteurs sous étude. Les premières analyses portent sur le bilan hydrologique. La Figure 8.1 présente les composantes de ce bilan pour un réseau unitaire.

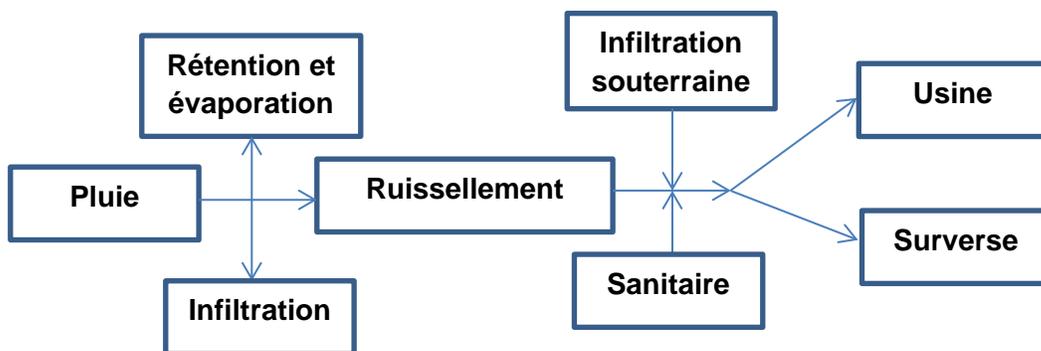


Figure 8.1 : Composantes du bilan hydrologique pour un réseau unitaire

Pour un réseau unitaire, le bilan global pour un événement de pluie donnée en climat historique est défini par :

$$P + Sa + Is = Su + R + I + U \tag{8.1}$$

où P est le volume total de pluie, Sa le volume d'eau sanitaire, Is les volumes provenant des infiltrations dans le réseau de conduites pendant la durée de

l'événement, Su le volume d'eau de surverse, R le volume retenu en surface et évaporé, I le volume infiltré et U le volume acheminé à l'usine. En climat futur, le même événement de pluie sera majoré d'un volume δP ce qui se traduira par des augmentations respectives des volumes infiltrés δI , des volumes évaporés et retenus en surface δR , des volumes de surverses δSu et des volumes acheminés à l'usine δU . On suppose que les contributions provenant des eaux sanitaires et des eaux souterraines demeurent pour leurs parts inchangées. Le même bilan en climat futur s'écrit donc :

$$(P + \delta P) + Sa + Is = (Su + \delta Su) + (R + \delta R) + (I + \delta I) + (U + \delta U) \quad (8.2)$$

Prenant la différence entre les deux équations précédentes, on a :

$$\frac{\delta Su}{\delta P} + \frac{\delta U}{\delta P} + \frac{(\delta I + \delta R)}{\delta P} = 1 \quad (8.3)$$

ou encore :

$$\frac{(Su_f - Su_h)}{(P_f - P_h)} + \frac{(U_f - U_h)}{(P_f - P_h)} + \frac{[(I_f - I_h) + (R_f - R_h)]}{(P_f - P_h)} = 1 \quad (8.4)$$

où les variables avec l'indice f correspondent aux valeurs en climat futur et celles avec l'indice h aux valeurs en climat historique.

Il est important de noter que, dans certains cas, par exemple lorsque la période de retour augmente, une partie de l'eau en réseau est expulsée de ce dernier, la ligne piézométrique atteignant dans ces cas la surface du sol. Dans le cas du secteur C, la modélisation utilisée permet de réinjecter ultérieurement ces volumes dans le réseau et ces derniers sont donc comptabilisés comme volumes de surverses ou volumes acheminés à l'usine. Dans le cas du secteur B, puisque la capacité d'acheminer les volumes à l'usine est très limitée, ces volumes sont assimilés à 98 % comme des volumes de surverses et à 2 % comme des volumes acheminés à l'usine.

Dans le cas d'un réseau pluvial, on obtient de la même façon :

$$\frac{(Mr_f - Mr_h)}{(P_f - P_h)} + \frac{[(I_f - I_h) + (R_f - R_h)]}{(P_f - P_h)} = 1 \quad (8.5)$$

où Mr correspond aux volumes rejetés au milieu récepteur. Certains des secteurs retenus comportent des bassins de rétention. Dans ce cas, les volumes encore présents dans ces bassins à la fin de la période de simulation sont assimilés à des volumes acheminés au milieu récepteur. De même les volumes expulsés du réseau (volume d'inondation) à cause des mises en charge sévères sont assimilés à des volumes rejetés au milieu récepteur.

L'équation 8.4 indique comment les volumes excédentaires de pluie en climat futur se répartissent entre les compartiments infiltration/rétention, usine et surverse. Il est possible de représenter cette répartition à l'aide d'un graphique ternaire. La Figure 8.2 présente l'exemple d'un tel graphique où le point rouge indiquerait, par exemple, que le volume d'eau supplémentaire associé à une pluie de période de retour donnée en climat futur se répartit à parts égales entre les surverses et l'infiltration (40 %) et que le reste (20 %) a été acheminé vers la station d'épuration. Ce type de graphique sera utilisé pour représenter cette distribution des volumes supplémentaires de pluie en climat futur.

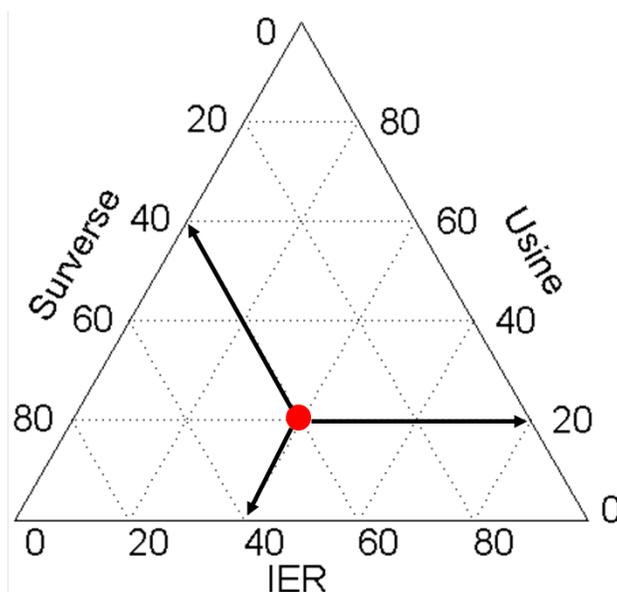


Figure 8.2 : Exemple de graphique ternaire utilisé pour représenter la répartition en volume de surverse, infiltré et de rétention de surface (IER) et acheminé vers l'usine des volumes d'eau supplémentaires associés à une pluie de période de retour donnée en climat futur par rapport à la situation historique pour les réseaux d'égouts unitaires.

Dans le cas des réseaux d'égouts pluviaux puisque seuls deux compartiments sont en jeu (voir équation 8.5), seule la donnée de l'un des volumes est nécessaire et dans le cas présent l'indice associé au volume rejeté au milieu récepteur a été utilisé. Ainsi pour chaque jeu de paramètres, les valeurs des fractions ont été triées en ordre croissant et présentées sous la forme d'une fonction de répartition définissant la probabilité au non dépassement (*Cumulative distribution function* ou CDF en anglais). Ainsi, le point rouge de la Figure 8.3 indique que les volumes d'eau supplémentaires générés en climat futur sont, pour 50 % des jeux de paramètres considérés, dans une proportion de 50 % ou moins rejetés au milieu récepteur. Des graphiques similaires sont produits pour les écarts des fractions entre climat futur et historique. Dans ce cas, les écarts entre ces fractions en climat futur et historique sont estimés et ordonnés et la Figure 8.3 indiquerait dans ce cas, en considérant le point rouge, que dans 50 % des cas (jeux de paramètres) les écarts entre climat futur et historique des fractions rejetées au milieu récepteur augmentent de 50 %.

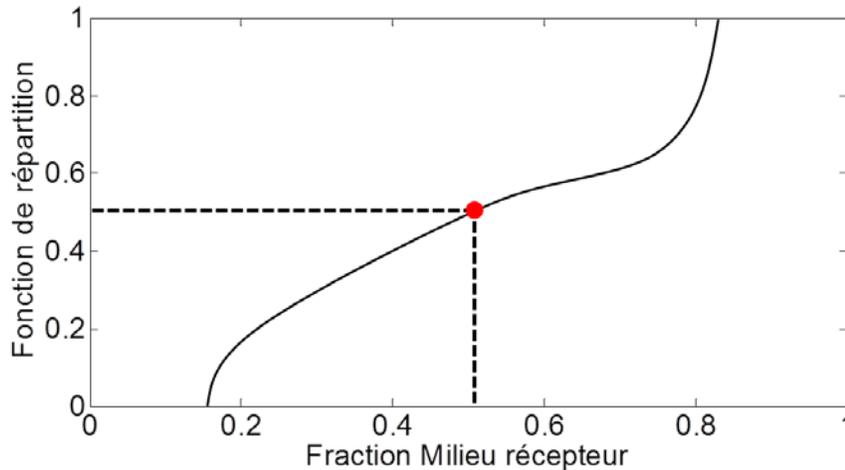


Figure 8.3 : Exemple de graphique utilisé pour représenter le bilan hydrologique des surplus d'eau générés en climat futur par rapport à la situation historique pour les réseaux d'égouts pluviaux. L'abscisse correspond à la fraction relative des précipitations rejetée au milieu récepteur ou encore à la variation de cette fraction entre climat futur et historique.

En ce qui concerne les indicateurs de performance associés aux surcharges (nombre de nœuds critiques, moyenne des dépassements maximaux et inondations), deux types de graphiques similaires à ceux présentés pour le bilan hydrologique sont présentés tant pour les réseaux pluviaux qu'unitaires. Le premier présente la fonction de répartition basée sur les valeurs brutes pour chacun des indicateurs de performance. Ainsi par exemple, la Figure 8.4 présente le nombre de nœuds critiques pour tous les jeux de paramètres en climat historique (ligne pleine) et en climat futur (ligne pointillée). Ce type de graphique permet d'apprécier l'étendue des surcharges pour tous les jeux de paramètres et de comparer globalement l'impact des CC. Les tirets noirs indiquent qu'en climat historique, 40 % des jeux de paramètres engendrent 150 nœuds critiques ou plus et qu'en climat futur 40 % des jeux de paramètres engendreront 200 nœuds critiques ou plus. Ce type de représentation permet d'avoir une vision globale des impacts des CC sur les surcharges mais il ne permet pas de comparer la situation en climat futur et historique pour un jeu de paramètres donné.

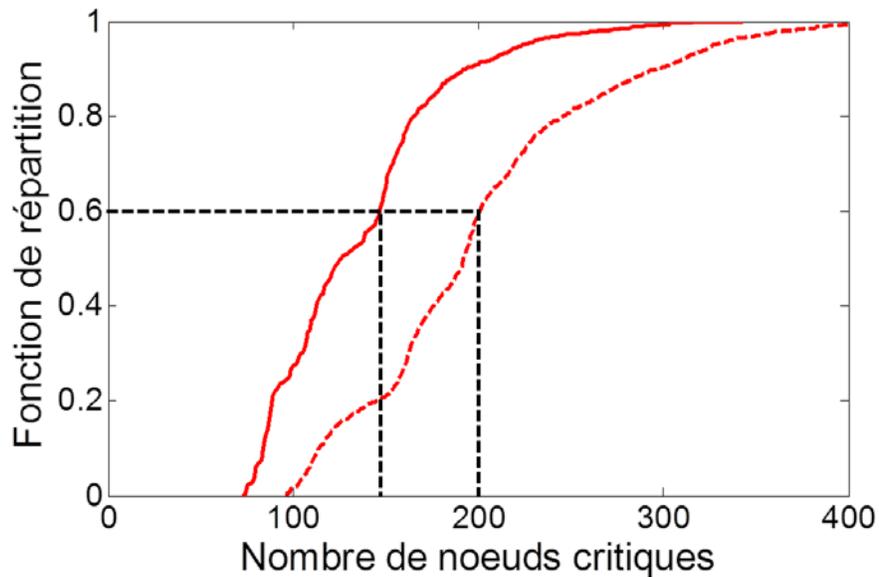


Figure 8.4 : Exemple de graphique utilisé pour comparer les indicateurs de performance associés aux surcharges (nombre de nœuds critiques) en climat historique (ligne pleine rouge) et futur (ligne en tiret rouge).

L'autre type de représentation considère les écarts entre nombre de nœuds critiques en climat futur et historique et permet donc de comparer directement les performances pour un jeu de paramètres donné. La fonction de répartition correspondant à ces écarts est également estimée. La Figure 8.5 présente un exemple de la courbe associée à une telle fonction pour le nombre de nœuds critiques. La ligne en tiret noir montre que, dans 50 % des cas, le nombre de nœuds critiques en climat futur augmente de 85 ou plus par rapport au climat historique. Des courbes similaires ont été construites pour les indicateurs moyenne des dépassements maximums et inondations.

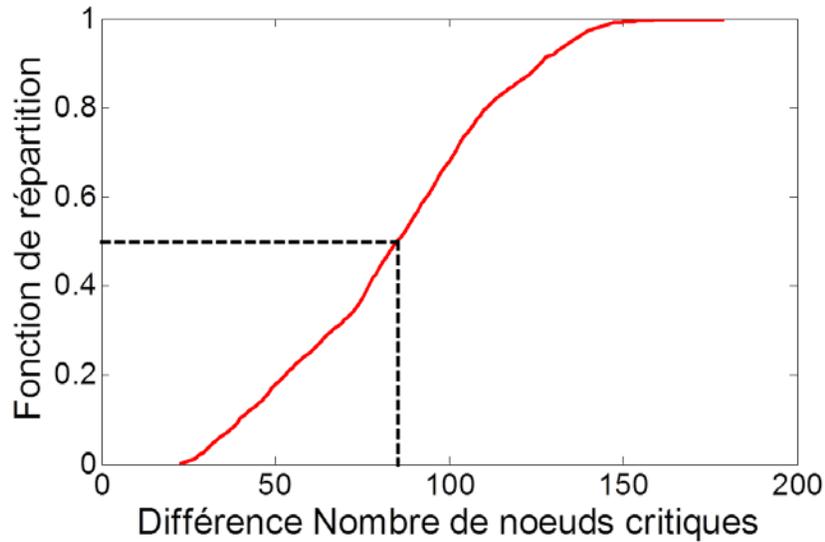


Figure 8.5 : Exemple de graphique utilisé pour comparer les écarts entre indicateurs de performance associés aux surcharges (différence du nombre de nœuds critiques en climat futur et historique; futur – historique).

8.2. Secteurs desservis par des réseaux unitaires (B et C)

Les secteurs B et C sont considérés dans la présente section. Ces secteurs sont drainés par des réseaux unitaires (voir Chapitre 5 pour une description détaillée de ces secteurs).

8.2.1. Répartition des volumes supplémentaires de pluie

La Figure 8.6 présente les graphiques ternaires de la répartition des volumes supplémentaires de pluie entre les différentes composantes du bilan hydrologique pour les réseaux unitaires B et C. Pour le secteur C, l'examen des résultats pour la période de retour 2 ans (Figure 8.6A) montre que de 30 à 78 % des volumes de pluie supplémentaires en climat futur se retrouveront en volumes de surverses alors que 10 à 50 % des eaux supplémentaires seront acheminées à l'usine. Ce résultat indique que, même pour la période de retour la plus petite et dans les meilleures conditions d'infiltration et de rétention de surface (pertes par dépression élevées), au moins 50 % des volumes d'eau supplémentaires générés par l'augmentation des hauteurs de pluie en climat futur se retrouveront à l'usine ou au milieu récepteur (Figure 8.7A,C,E).

Les valeurs des paramètres pour lesquels la fraction infiltrée est la plus élevée correspondent aux cas où les capacités d'infiltration sont très bonnes et où les pertes par dépression sur les surfaces perméables sont importantes. Pour la période de retour 2 ans cependant, on remarque que certaines valeurs sont légèrement inférieures à zéro (Figures 8.6A et 8.7C). En effet, 24 points ont des valeurs variant entre -1,14 et -0,03 % ce qui signifie que, malgré une augmentation des précipitations, les volumes d'eau qui s'infiltrent en climat futur sont légèrement plus faibles que les volumes infiltrés en climat historique. Les jeux de paramètres de ces 24 points ont en commun de présenter des capacités d'infiltration faibles ($f_0 = 50$ mm/h, $f_\infty = 1$ mm/h) et une décroissance rapide de cette capacité ($\alpha = 6$ h⁻¹). De plus, les pertes par dépression pour les surfaces perméables ne sont que de 3 mm. Bien qu'un examen des raisons précises de ces valeurs négatives n'ait pas été conduit (ces valeurs sont très petites) l'hypothèse d'erreurs dues à la précision des calculs numériques n'est pas à exclure.

Un comportement très différent est observé dans le cas du réseau B. Dans ce cas, la capacité d'acheminer des volumes supplémentaires vers l'usine est très limitée de sorte que les volumes de pluie supplémentaires sont acheminés entre les composantes infiltration et surverse dans des proportions allant, selon les paramètres considérés, de 30 à près de 100 % pour les surverses et de près de 0 à plus de 60 % pour les volumes infiltrés (Figure 8.7B,D). Les volumes supplémentaires acheminés à l'usine restent très modestes (moins de 3 % dans le meilleur des cas).

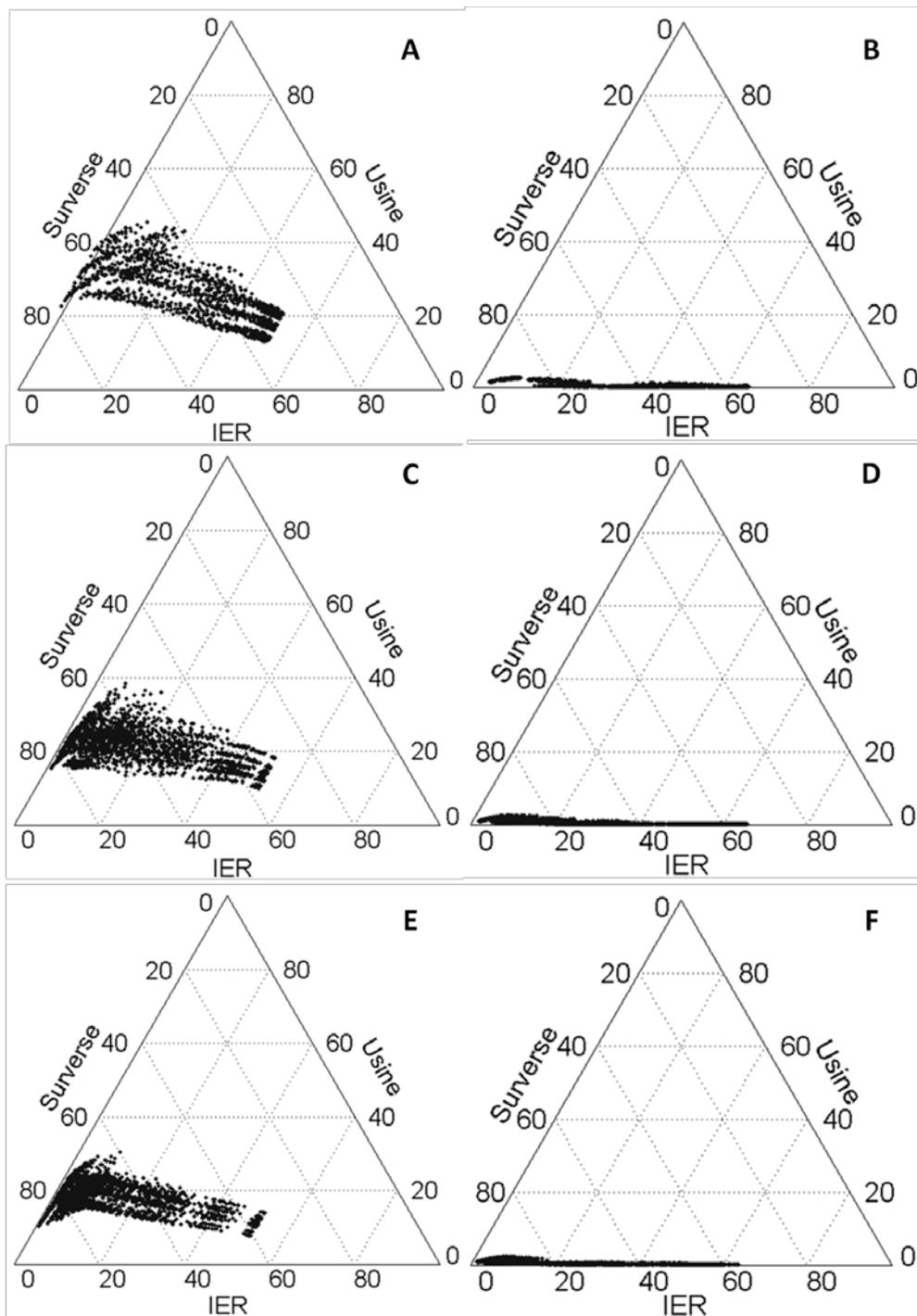


Figure 8.6 : Graphiques ternaires de la répartition en pourcentages des volumes supplémentaires de pluie en climat futur en volume de surverse (Surverse), en volume infiltré et en rétention de surface (Infiltration/rétention de surface - IER) et en volume acheminé à l'usine (Usine) pour les secteurs C (colonne de gauche) et B (colonne de droite) pour les périodes de retour 2 ans (A,B), 5 ans (C,D) et 10 ans (E,F).

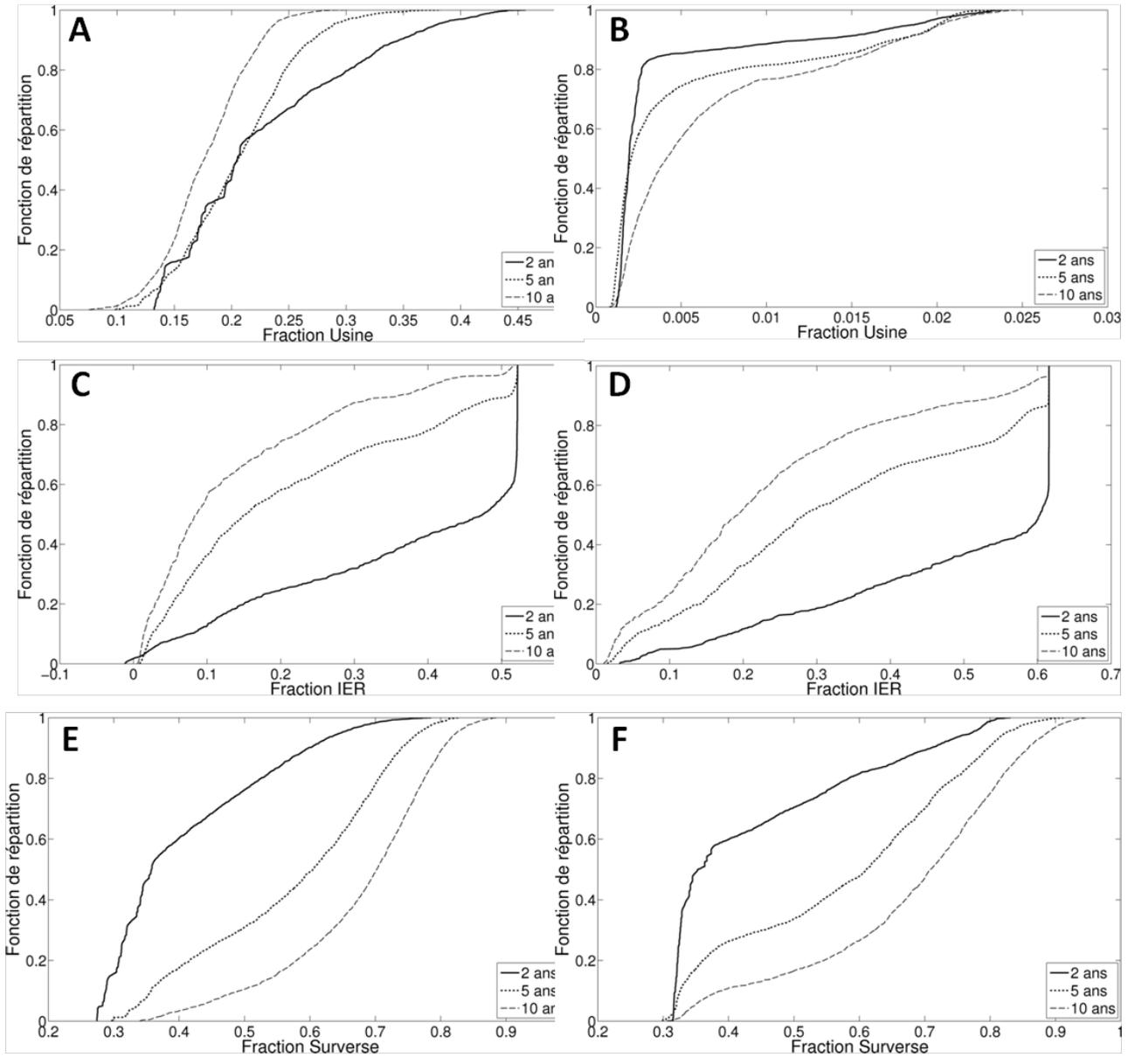


Figure 8.7 : Fonction de répartition des fractions de la pluie supplémentaire en climat futur en volumes de surverses (A,B), en volumes infiltrés et de rétention de surface (IER) (C,D) et en volumes acheminés à l'usine (E,F) pour les secteurs C (colonne de gauche; A,C,E) et B (colonne de droite; B,D,F) en fonction des différentes périodes de retour.

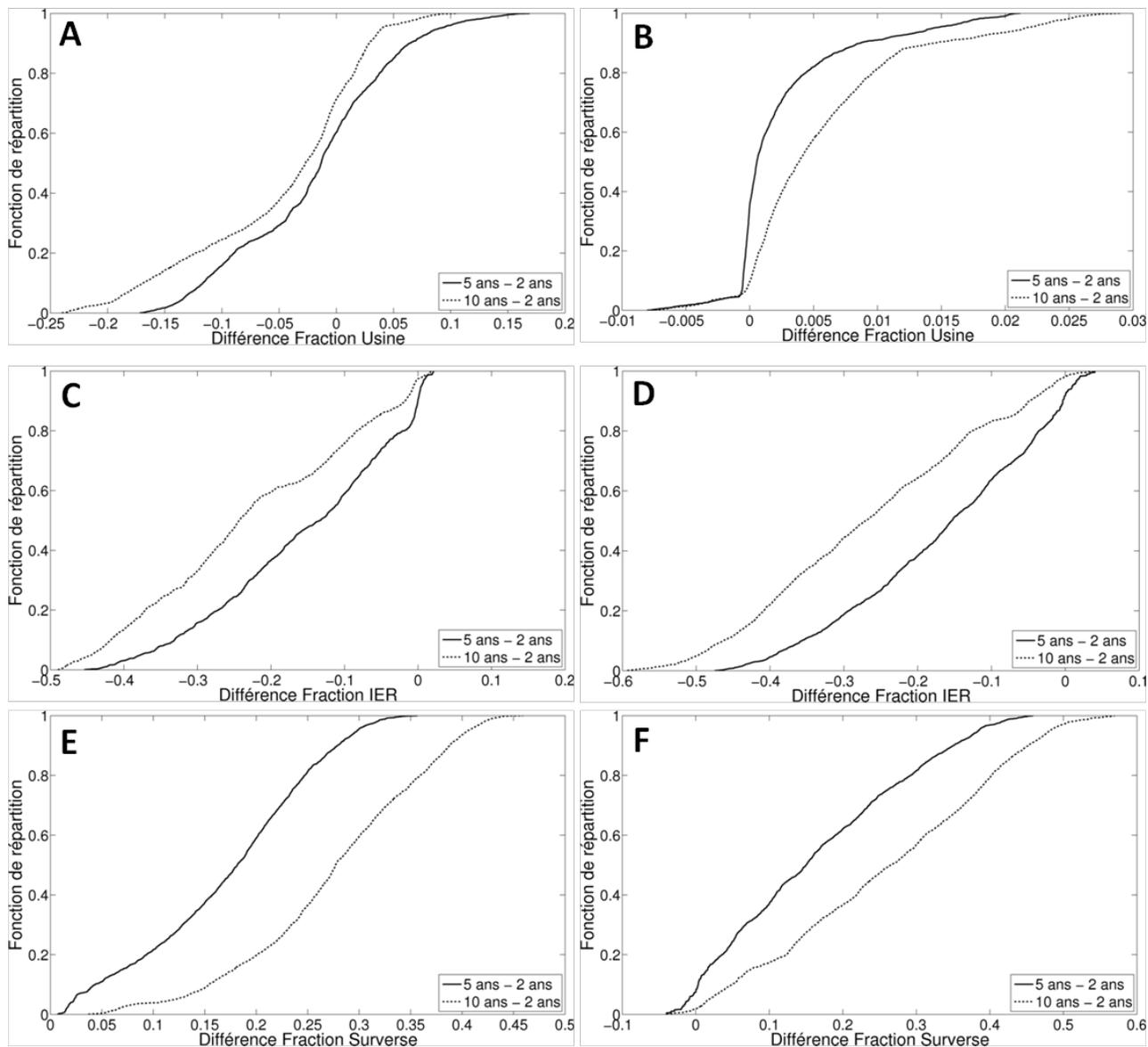


Figure 8.8 : Fonction de répartition des écarts entre période retour 5 ans et 2 ans (courbes continues) et entre période de retour 10 ans et 2 ans (courbes en pointillées) des fractions en volumes de surverses (A,B), en volumes infiltrés (C,D) et en volumes acheminés à l'usine (E,F) pour les secteurs C (colonne de gauche; A,C,E) et B (colonne de droite; B,D,F) en fonction des différentes périodes de retour.

On constate que la fraction rejetée en surverse augmente lorsque la période de retour augmente pour ces deux secteurs (Figure 8.7A,B) alors que les fractions infiltrées diminuent. Les fractions infiltrées sont globalement plus élevées pour le secteur B que pour le secteur C ce qui peut s'expliquer notamment par la plus grande imperméabilité du secteur C (54 %) par rapport au secteur B (44 %). De même la plus grande fraction de SIIC pour le secteur B contribue à augmenter la fraction infiltrée pour ce secteur. Le total des surfaces perméables et des SIIC représente 62 % de la surface totale pour le secteur B alors qu'il est de 52 % pour le secteur C. Cette différence entre ces rapports n'est pas uniquement liée à l'occupation du territoire, qui est majoritairement résidentielle dans les deux cas, mais également à la contribution importante des toits plats dont les eaux de ruissellement sont acheminées directement vers le réseau d'égouts. Ainsi pour le secteur C, les toits plats représentent 14,8 % des surfaces imperméables et se trouvent en grand nombre dans les zones résidentielles alors que pour le secteur B, ils ne représentent que 2,3 % des surfaces imperméables.

Pour les périodes de retour 5 et 10 ans un déplacement vers des valeurs plus faibles de la fraction infiltrée s'observe dans le cas du secteur C (Figure 8.7). Pour ces deux périodes de retour, on observe respectivement dans 13 et 7 % des cas des fractions infiltration/rétention inférieures à 0,5 pour ce secteur. Pour le secteur B les valeurs correspondantes sont de 33 et 20 % ce qui suggère que, pour la période de retour 2 ans, les surfaces perméables ne sont pas complètement saturées et qu'une partie appréciable des volumes de pluie supplémentaires peut être infiltrée. La situation est différente pour les périodes de retours 5 et 10 ans puisque dans ces cas les surfaces perméables risquent d'être saturées et leur capacité résiduel d'infiltration être nettement moindres et, conséquemment, en climat futur, l'augmentation des volumes de pluie résulte en une hausse beaucoup moins importante des volumes d'infiltration. Cette capacité d'infiltrer les volumes de pluie supplémentaires est cependant nettement moins marquée pour le secteur de C où le ratio SP/ST est moindre que pour le secteur B.

La période de retour affecte relativement peu la fraction acheminée à l'usine pour ces deux secteurs. Dans le cas du secteur C, déjà pour la période de retour 2 ans, 70 % des cas présente des fractions acheminées à l'usine inférieures à 0,25. Les nombres correspondant pour la période de retour 5 et 10 ans sont de 18 et 2 % respectivement. Les capacités limitées des débits admissibles à l'usine de traitement, particulièrement

pour le secteur B, se traduisent essentiellement par la redirection d'une fraction importante des volumes de pluie supplémentaires vers le milieu récepteur sous forme de surverse et ce même pour la période de retour 2 ans. On constate que, globalement, la fraction des volumes supplémentaires de pluie sous forme de surverse augmente au détriment de la fraction infiltrée lorsque la période de retour augmente et ce, quels que soient les jeux de paramètres considérés (Figure 8.8). Ce résultat s'explique par la réduction des capacités d'infiltration lorsque les hauteurs de pluie augmentent et par l'incapacité d'acheminer des volumes d'eau supplémentaires à l'usine. Cette augmentation de la fraction en volume de surverse est plus marquée pour le secteur B vraisemblablement à cause de la faible possibilité de rediriger une partie des volumes vers l'usine (Figure 8.7).

8.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

La situation en matière de performance hydrauliques est totalement différente pour les secteurs B et C (Figure 8.9). D'abord, le nombre de nœuds critiques est beaucoup moins élevé en général pour le secteur C que le secteur B (Figure 8.9A,B) et ce même lorsqu'on le compare au nombre total de nœuds (C : 394 nœuds et B : 579 nœuds). Si on considère, par exemple, la médiane pour la période de retour 5 ans en climat historique, exprimée en fonction du nombre total de nœuds on obtient un ratio de nœuds critiques de 12 et 40 % pour les secteurs de C et B respectivement.

De plus, la variation du nombre de nœuds critiques entre climat futur et historique est beaucoup plus élevée pour le secteur B et ce quelle que soit la période de retour (Figure 8.9C,D). En effet, il y a en moyenne 68 nœuds critiques supplémentaires (11,7 % du nombre total de nœuds) pour la période de retour 2 ans entre climat futur et historique comparativement à 20 pour le secteur C (5,1 % du nombre total de nœuds). L'impact d'une augmentation des hauteurs de pluie se traduira par une augmentation beaucoup plus importante de l'étendue des zones à risque pour le secteur B que pour le secteur C.

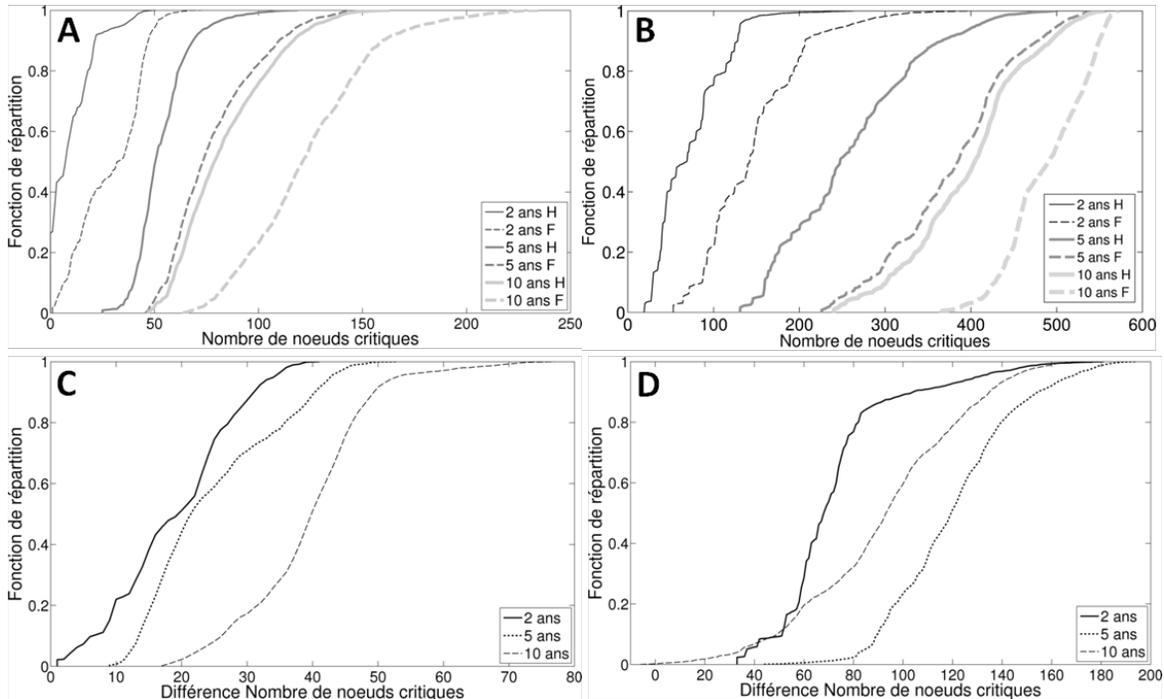


Figure 8.9 : Indicateur Nombre de nœuds critiques (A,B) et variations du nombre de nœuds critiques entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour.

Concernant le secteur C, les augmentations moyennes du nombre de nœuds critiques les plus importantes sont observées pour la période de retour 10 ans (Figure 8.9C). Elles représentent 10,2 % du nombre total de nœuds, soit le double de la valeur obtenue pour la période de retour 2 ans. Pour le secteur B, les impacts sont plus importants pour la période de retour 5 ans (Figure 8.8D). L'augmentation moyenne du nombre de nœuds critiques pour cette période de retour est de 120, soit 20,7 % du nombre total de nœuds comparativement à 94 pour la période de retour 10 ans (16,2 % du nombre total de nœuds). L'augmentation des étendues des zones à risque est donc plus marquée lors du passage de la période de retour 2 ans à la période de retour 5 ans dans le cas du secteur B et lors du passage de la période de retour 5 ans à 10 ans pour le secteur C.

Toujours pour le secteur B, on remarque des variations négatives dans quelques cas pour la période de retour 10 ans (Figure 8.8D), c'est-à-dire une diminution du nombre de nœuds critiques pour certains jeux de paramètres pour la période de retour 10 ans. Ce

résultat semble a priori contre-intuitif. Après un examen plus attentif des jeux de paramètres correspondant, il appert qu'ils ont en commun des coefficients de Manning pour les conduites et des pertes par dépression élevés ainsi que des capacités d'infiltration faibles. Les apports au réseau sont, dans ce cas, très importants, l'écoulement en conduite retardé et les hydrogrammes laminés. Le nombre de cas de ce type demeure marginal et reste dans les limites des erreurs numériques.

8.2.3. Indicateur Moyenne des dépassements maximaux du seuil critique

La moyenne des dépassements maximaux est également moins élevée, de façon globale, pour le secteur C (Figure 8.10). Si l'on considère toujours la médiane, pour la période de retour 5 ans en climat historique, on constate que pour le secteur C, la moyenne des dépassements est de l'ordre de 60 cm alors qu'elle est d'un peu plus de 80 cm pour le secteur B. Un examen plus attentif des résultats montre que, pour le secteur B, considérant le jeu de paramètres médian, pour 50 % des nœuds où le seuil critique est dépassé, la ligne piézométrique se trouve à moins de 10 cm de la surface du sol pour la période de retour 5 ans.

En ce qui concerne la différence de la moyenne des dépassements maximaux en climat historique et futur, les valeurs les plus élevées sont observées pour le secteur C (Figure 8.10C,D). Ainsi, tel que mentionné précédemment, le nombre de nœuds critiques est, en général, pour le secteur C et pour une période de retour donnée moindre mais l'impact d'une augmentation de l'intensité des pluies sur la moyenne des dépassements du seuil critique y est plus important. L'impact d'une augmentation des précipitations entraînent donc, en premier lieu, une hausse des intensités des surcharges pour le secteur C et une augmentation de l'étendue des zones de surcharge pour le secteur B.

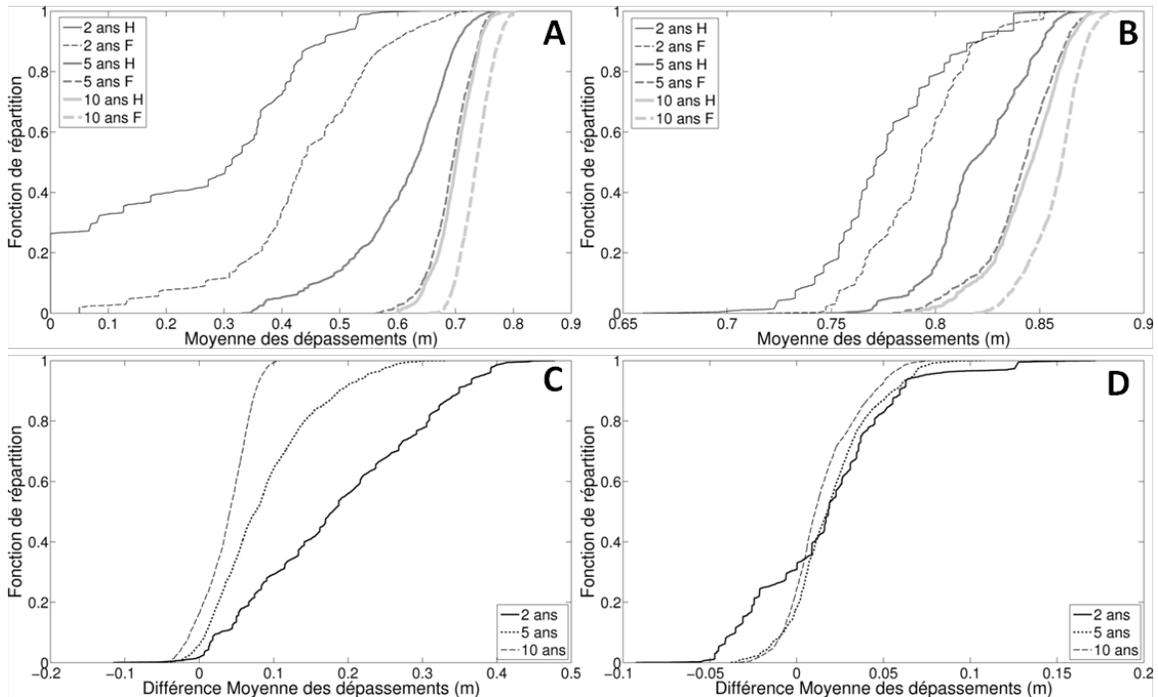


Figure 8.10 : 10 Moyenne des dépassements maximums (A,B) et variations de la moyenne des dépassements maximums entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour.

Pour les deux secteurs, des valeurs négatives s'observent pour la différence de la moyenne des dépassements maximums (Figure 8.9C,D). Cette situation s'explique notamment par l'impossibilité dans la représentation SWMM actuelle d'acheminer les eaux de ruissellement provenant d'un sous-bassin de drainage vers plusieurs nœuds. Ainsi, un sous-bassin de drainage fortement imperméabilisé générera des volumes de ruissellement importants qui seront acheminés au même nœud. La conduite en aval de ce nœud entre alors en charge et des dépassements importants du seuil critique sont observés à ces nœuds. Lorsque l'intensité de l'événement de pluie augmente, le nombre de nœuds où le seuil est dépassé augmente également mais l'ampleur des dépassements est moindre entraînant une réduction de la moyenne des dépassements. Il faut garder en mémoire que le dépassement maximum à un nœud est de 0,9 m de la surface du sol.

8.2.4. Indicateur Inondation

Même si, à la lumière des indicateurs hydrauliques précédents, la situation semble beaucoup plus problématique pour le secteur B, les volumes d'inondations pour ce secteur demeurent largement inférieurs à ceux du secteur C pour la période de retour 2 ans tant en climat historique que futur (Figure 8.11A,B). Pour le secteur C, certaines zones sont hautement problématiques alors que les autres ne présentent pas de problèmes hydrauliques particuliers. Les zones très problématiques font en sorte que, même pour un événement de période de retour 2 ans, des volumes importants d'eau sont expulsés du réseau.

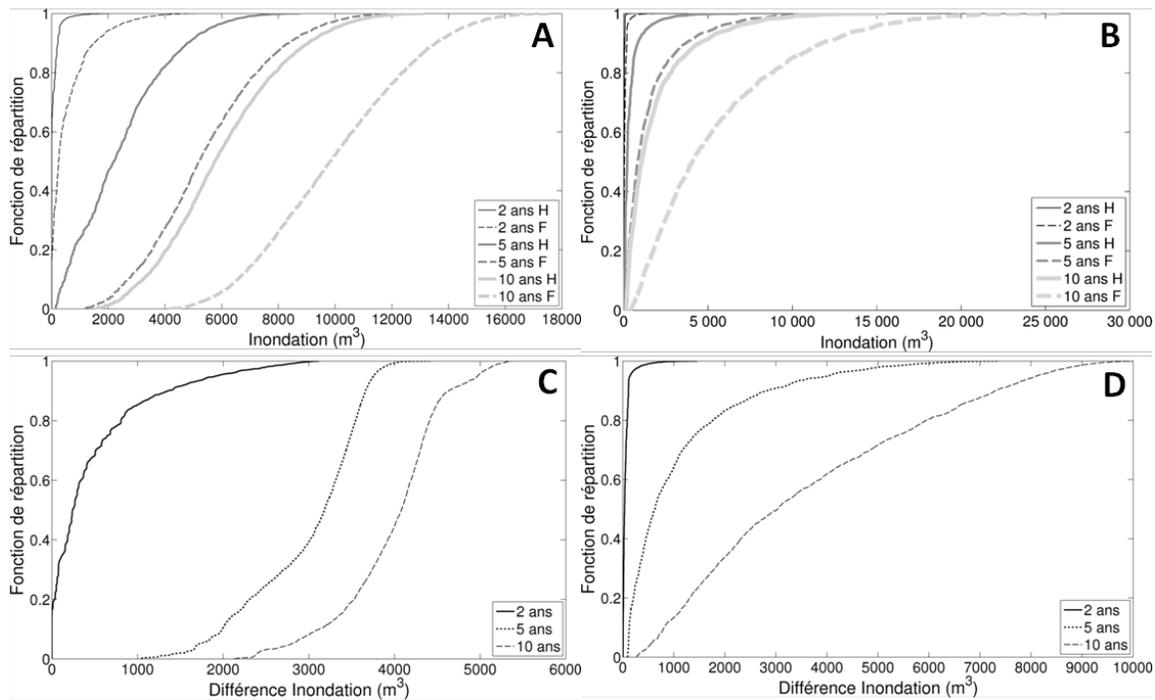


Figure 8.11 : Volumes d'inondations (A,B) et variations des volumes d'inondations entre climat futur et historique (C,D) pour le secteur C (A,C) et B (B,D) en fonction des différentes périodes de retour.

Pour le secteur B, aucune zone spécifique n'est problématique en matière d'inondation et/ou de refoulements contrairement au secteur C. L'ensemble du territoire est affecté par des dépassements importants du seuil critique (mises en charge importantes) qui n'atteignent toutefois pas la surface du sol. On peut dès lors supposer qu'un événement pluvieux plus intense pourra entraîner des inondations à plusieurs endroits du secteur ce qui n'est toutefois pas le cas pour la période de retour 2 ans en climat futur. Par contre, les volumes d'inondations pour la période de retour 5 ans en climat futur augmentent sensiblement atteignant des valeurs semblables au secteur C pour certains jeux de paramètres (Figure 8.11C,D). Finalement, pour la période de retour 10 ans en climat futur, une hausse importante des volumes d'inondations s'observe où les valeurs maximales vont bien au-delà de celles du secteur C. Il est important toutefois de mentionner que les volumes d'inondations pour le secteur B sont plus sensibles à la paramétrisation (423 à 25 818 m³) comparativement au secteur C (4 216 à 17 671 m³) et que la valeur médiane demeure sensiblement plus petite (4 052 et 9 837 m³ respectivement).

Des épisodes de refoulements et/ou d'inondations survenus au cours des années 1990 pour le secteur C ont montré qu'il s'agissait d'un réseau problématique. Une augmentation de l'intensité de la pluie en climat futur pour ce secteur engendre certes une augmentation générale du nombre de nœuds critiques (augmentation de l'étendue des zones à risque) mais l'augmentation des volumes d'inondations est beaucoup plus importante. L'étendue des surcharges n'est pas très grande mais les zones où elles surviennent sont susceptibles de générer des inondations conséquentes. Pour le secteur B, le niveau de service est adéquat en climat historique mais les augmentations du nombre de nœuds critiques suggèrent qu'une modification du régime de pluie pourrait diminuer le niveau de service notamment pour les périodes de retour 5 et 10 ans. On note d'ailleurs des différences importantes des volumes d'inondations pour un même jeu de paramètres pour ces deux périodes de retour (Figure 8.11D).

8.2.5. Synthèse des résultats

En résumé :

- Dans des conditions d'infiltration très favorables, il semble possible d'obtenir des fractions de volumes infiltrés et rétention de surface de plus de 60 % en climat futur pour des secteurs comme le secteur B majoritairement résidentiels avec des SIT qui comptent pour environ 50 % des ST; cette fraction peut atteindre 50 % dans le cas du secteur C.
- Pour la période de retour 2 ans, la majorité des jeux de paramètres permettent d'obtenir des fractions de volumes infiltrés et de rétention de surface d'au moins 50 % des cas pour les deux secteurs considérés.
- Les fractions de volumes infiltrées et de rétention de surface diminuent rapidement pour les deux secteurs pour les périodes de retour 5 ans et 10 ans où la majorité des valeurs se situent sous les 20 % pour la période de retour 10 ans, démontrant ainsi le potentiel limité des capacités d'infiltration lorsque les événements sont trop intenses.
- La fraction acheminée à l'usine est relativement peu affectée par la période de retour et demeure la plus faible, notamment pour le secteur B, et ce en raison du seuil imposé au débit admissible à l'usine.
- La fraction en volume de surverse augmente de façon marquée avec la période de retour puisque les contraintes associées aux capacités d'infiltration et de l'usine limitent les volumes pouvant être acheminés à ces composantes du bilan hydrologique pour les périodes de retour plus élevées.
- L'étendue et l'ampleur des surcharges pour le secteur C sont moins importantes que pour le secteur B mais les volumes d'inondations sont plus élevés pour le secteur C. Le secteur C présente donc certaines zones critiques sujettes à des problèmes d'inondations.

- Le niveau de service du secteur C est inadéquat en climat historique et les augmentations des précipitations feront en sorte de diminuer encore davantage ce niveau de service en climat futur ce qui conduira à une augmentation sensible des risques d'inondations.
- Le secteur B offre un niveau de service adéquat en climat historique puisque le risque d'inondations demeure faible. Toutefois, l'ampleur et l'étendue des surcharges laissent croire que la situation pourrait s'aggraver en climat futur, notamment pour la période de retour 10 ans.

8.3. Secteurs desservis par des réseaux pluviaux (A, D, E et F)

Les secteurs suivants sont considérés dans la présente section : A, D, E et F. Tous ces secteurs sont drainés par des réseaux pluviaux (voir Chapitre 5 pour une description détaillée de ces secteurs).

8.3.1. Répartition des volumes supplémentaires de pluie

La Figure 8.12 présente les fonctions de répartition des fractions du volume supplémentaire de pluie en climat futur acheminé au milieu récepteur pour différentes périodes de retour. Les SIT ont une incidence importante sur la répartition des volumes supplémentaires de pluie en climat futur. Les secteurs E et F sont les secteurs comptant les plus grands pourcentages de surfaces perméables (72 et 85 % respectivement) et présentent les fractions acheminées au milieu récepteur globalement les plus faibles (Figure 8.12C,D). Soixante et onze (71) et 75 % des jeux de paramètres présentent des valeurs inférieures à 25 % pour la période de retour 2 ans pour ces deux secteurs. Pour les secteurs A et D, pour lesquels les SIT représentent 38 et 51 % des surfaces totales respectivement, même les conditions les plus favorables à l'infiltration et à la rétention de surface ne permettent pas d'obtenir des fractions rejetées au milieu récepteur aussi faibles. Pour le secteur D, une proportion importante des jeux de paramètres (un peu plus de 40 %) conduisent à des fractions rejetées au milieu récepteur supérieures aux totaux des fractions de volumes infiltrés et de rétention de surface pour la période de retour 2 ans (Figure 8.12B).

Pour les périodes de retour 5 et 10 ans, seul le secteur D montre une augmentation des fractions rejetées au milieu récepteur dans les conditions d'infiltration les plus favorables par rapport à la période de retour 2 ans (Figure 8.12B). Les autres secteurs ne montrent pas d'augmentation de la fraction rejetée en milieu récepteur indiquant que, dans les meilleures conditions d'infiltration, les surfaces perméables et les capacités d'infiltration sont suffisantes pour permettre de maintenir cette fraction à son niveau historique.

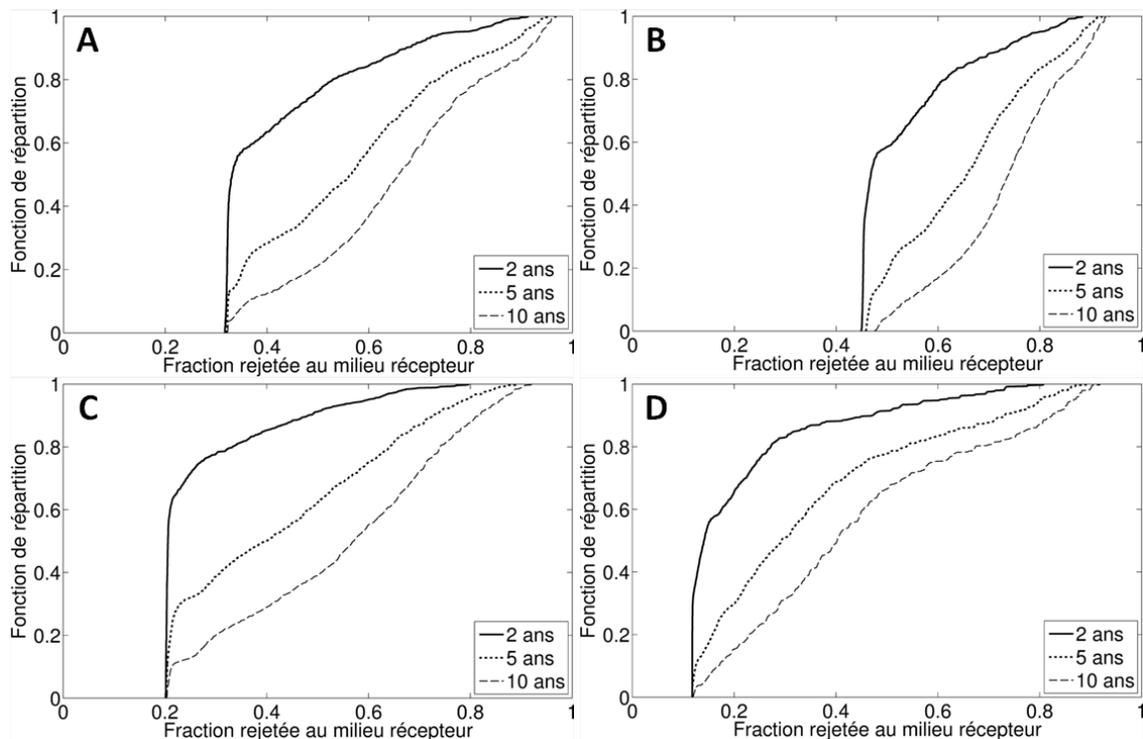


Figure 8.12 : Fonction de répartition de la fraction de la pluie supplémentaire en climat futur acheminée au milieu récepteur en fonction des différentes périodes de retour pour les secteurs : A) A ; B) D ; C) E et D) F.

Pour le secteur F, même pour la période de retour 10 ans, la majorité des jeux de paramètres (67 %) conduisent à des fractions infiltrées et de rétention de surface supérieures aux fractions rejetées au milieu récepteur (Figure 8.12D). Ce résultat évolue rapidement avec l'imperméabilisation du territoire. Ainsi, pour le secteur E, 40 % des jeux de paramètres conduisent à des fractions infiltrées/rétention de surface supérieures

aux fractions rejetées au milieu récepteur pour la période de retour 10 ans alors que cette fraction est de 5 % pour le secteur D, le plus imperméable de ces secteurs (Figure 8.12 A,C,D).

8.3.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Concernant plus spécifiquement la performance hydraulique, le nombre de nœuds critiques par rapport au nombre de nœuds total demeure, somme toute, relativement faible pour la période de retour 2 ans en climat historique et futur pour ces quatre secteurs (Figure 8.13). Pour les secteurs A, D et E, les médianes du nombre de nœuds critiques pour la période de retour 2 ans sont respectivement de 27, 57 et 47, soit 4,5 %, 8,4 % et 4,5 % du nombre total de nœuds de ces secteurs. Ces valeurs montrent que l'étendue des zones critiques demeure très faible. Pour le secteur F, il n'y a pas de nœuds critiques pour la période de retour 2 ans en climat historique pour 99,6 % des jeux de paramètres. Ce taux diminue à 91,4 % en climat futur avec un nombre maximum de nœuds critiques de 8, soit 9,2 % du nombre total de nœuds de ce secteur.

Les augmentations du nombre de nœuds critiques, pour un même jeu de paramètres et pour la période de retour 2 ans, sont similaires pour les secteurs A, D et E (Figure 8.13B,D,F). Les valeurs médianes pour chacun de ces réseaux sont respectivement de 16, 24 et 23 soit des augmentations comprises entre 2,2 et 3,5 % du nombre total de nœuds. Tel que mentionné précédemment, pour le secteur F, on observe aucune modification du nombre de nœuds critiques dans plus de 90 % des cas (Figure 8.13H).

De façon globale, le nombre de nœuds critiques augmente rapidement lorsqu'on passe de la période de retour 2 ans à la période de retour 5 ans, notamment pour le secteur D (Figure 8.13B,D,F,H). Dans ce dernier cas, la valeur médiane passe de 113 en climat historique à 196 en climat futur pour une augmentation relative de 73,5 % du nombre de nœuds critiques (Figure 8.13C,D). En climat futur, la valeur médiane correspond à une situation où le seuil a été dépassé pour près de 30 % du nombre total de nœuds. Pour la période de retour 10 ans, les plus fortes hausses sont observées pour le secteur A. Les valeurs médianes du nombre de nœuds critiques passent de 95 en climat historique à 187 en climat futur, soit une augmentation relative de 96,8 %. En climat futur, le nombre

de nœuds critiques représente également un peu plus de 30 % du nombre total de nœuds.

Le secteur A est globalement plus vulnérable que les autres secteurs lorsque la période de retour 10 ans est considérée. L'augmentation médiane du nombre de nœuds critiques dans ce cas est de 86, ce qui représente 14,4 % du nombre total de nœuds de ce secteur. Les valeurs correspondantes pour les autres secteurs sont de 70 (A), 63 (E) et 2 (F) soit 10,3 %, 6,1 % et 2,2 % du nombre total de nœuds.

Pour le secteur F, plusieurs combinaisons de paramètres ne conduisent à aucun nœud critique pour les périodes de retour 5 et 10 ans en climat historique et ce nombre augmente légèrement en climat futur (Figure 8.13G). Pour la période de retour 10 ans, la médiane se trouve à sept nœuds critiques en climat futur ce qui représente seulement 7,9 % du nombre total de nœuds de ce secteur.

Quelques valeurs négatives ont été obtenues pour le secteur F pour les périodes de retour 5 et 10 ans en ce qui concerne la différence du nombre de nœuds critiques entre climat historique et futur (Figure 8.13H). Les jeux de paramètres associés à ces résultats ont en commun un coefficient de Manning et des pertes par dépression élevées pour les surfaces imperméables. Ces cas demeurent toutefois marginaux et en deçà des erreurs numériques de modélisation.

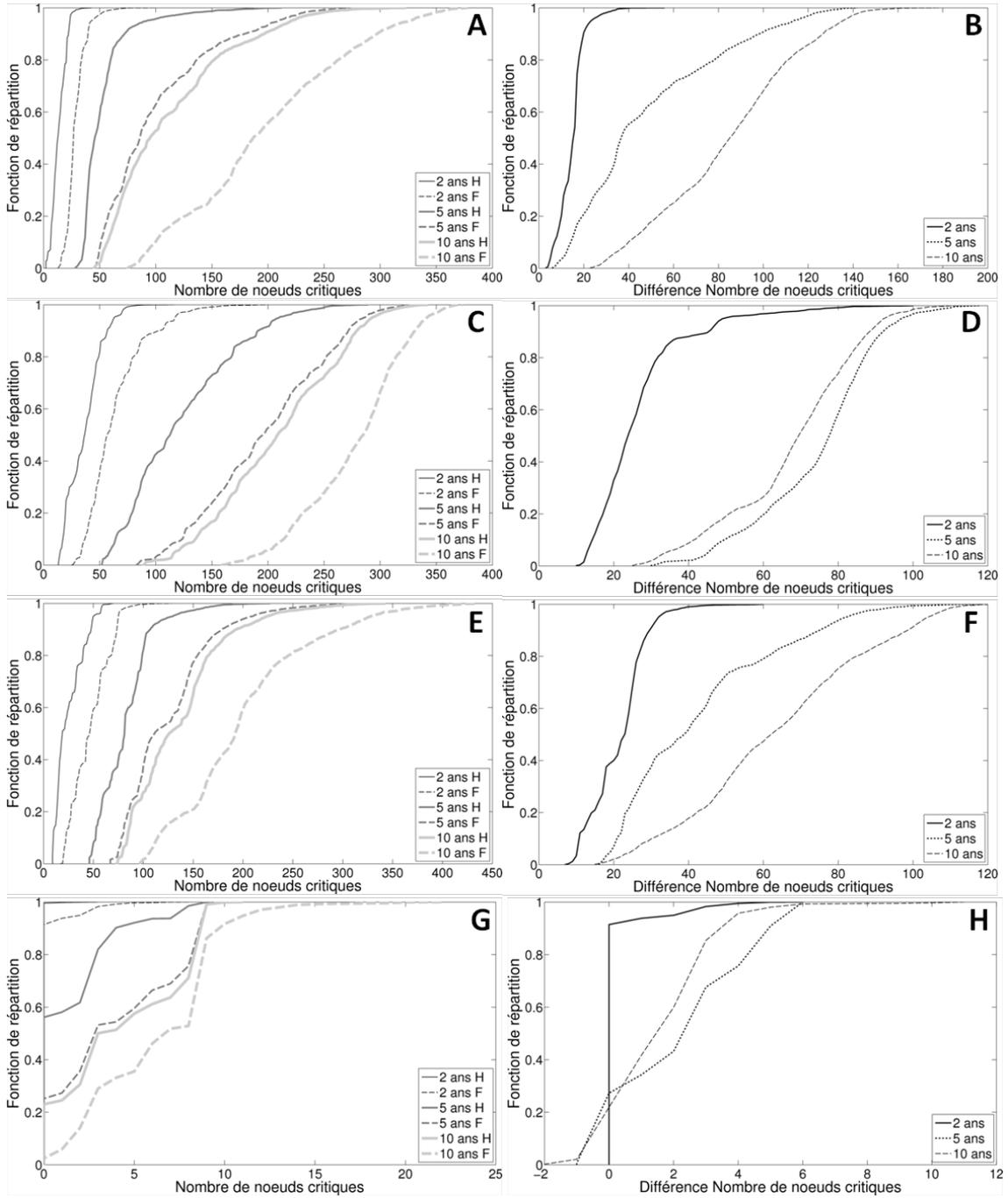


Figure 8.13 : Nombre de nœuds critiques (A,C,E,G) et variations du nombre de nœuds critiques entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D (C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour.

8.3.3. Indicateur Moyennes des dépassements maximaux du seuil critique

La Figure 8.14 présente l'ensemble des résultats pour les dépassements du seuil critique pour les quatre secteurs sous étude. Pour les secteurs A, D et E, les valeurs de dépassements les plus élevées sont observées pour certaines paramétrisations pour la période de retour 2 ans (partie droite des courbes des graphiques A, C et E de la Figure 8.14). Ceci s'explique par le fait que, notamment pour la période de retour 2 ans, en climat historique, le seuil critique est dépassé, sous certaines conditions à quelques nœuds mais l'amplitude des dépassements est dans ces cas très élevée. Dès que l'intensité de la pluie augmente, le seuil critique est atteint et légèrement dépassé à plusieurs autres nœuds faisant en sorte de diminuer la moyenne des dépassements. C'est ce qui explique par exemple que la fonction de répartition pour le secteur A pour la période de retour 2 ans en climat futur croise la courbe correspondante en climat historique (Figure 8.14A). Ainsi, pour certains jeux de paramètres, les dépassements moyens sont parfois plus faibles en climat futur (malgré une intensification de la pluie) comparativement au climat historique. Le même comportement s'observe d'ailleurs sur les graphiques des différences des moyennes des dépassements où des valeurs positives et négatives apparaissent (Figure 8.14 B,D,F).

Une diminution semblable des dépassements moyens avait également été observée pour les secteurs desservis par des réseaux unitaires (Figure 8.10) mais l'amplitude de cette diminution était, dans ces cas, nettement moins importante. Il semble donc que, même si le nombre de nœuds critiques augmente pour les réseaux unitaires et pluviaux (Figures 8.9 et 8.13), cela se traduit, dans le cas des réseaux unitaires, par l'apparition de plusieurs zones où le seuil critique est faiblement dépassé entraînant une diminution des dépassements moyens alors que dans le cas des réseaux pluviaux, les dépassements sont plus importants et entraînent, dans plusieurs cas, une augmentation plus marquée de l'amplitude des dépassements moyens.

La moyenne des dépassements maximaux est relativement similaire pour les secteurs A, D et E pour les différentes périodes de retour. Il faut toutefois considérer que pour une période de retour donnée, le nombre de nœuds critiques augmente dans tous les cas en climat futur comparativement au climat historique (Figure 8.13). Ainsi, pour le

réseau de drainage A, avec la période de retour 10 ans, en climat historique et futur, tous les nœuds ayant dépassés le seuil critique ont une valeur supérieure à 0,40 m. Toutefois, en climat historique pour un peu plus de 50 % des jeux de paramètres le nombre de nœuds critiques est supérieur à 95 alors que ce nombre atteint 187 en climat futur. Ainsi, le nombre de nœuds affichant une valeur inférieure 0,10 m de la surface du sol à presque doublé dans ce cas. Une situation semblable s'observe pour le secteur E où, pour un peu plus de 50 % des jeux de paramètres, le nombre de nœuds critiques est supérieur à 126 et 192 en climat historique et futur.

On constate par ailleurs un resserrement des fonctions de répartition autour des valeurs médianes lorsque la période de retour augmente pour tous les secteurs sauf F (Figure 8.14A,C,E). Ce resserrement traduit le fait que la dispersion des dépassements moyens diminue et que donc, l'influence des différents jeux de paramètres est moins déterminante.

En ce qui concerne le secteur D, les variations de la moyenne des dépassements sont relativement petites pour les périodes de retour 5 et 10 ans (Figure 8.14D). La majorité des jeux de paramètres, que ce soit en climat historique ou futur affiche, des résultats se trouvant entre 0,46 et 0,48 m (58,9 et 63,1 % respectivement; Figure 8.14C). Tout de même, il faut rappeler que le nombre moyen de nœuds critiques se trouvant à l'intérieur de ces marges a augmenté considérablement, surtout pour la période de retour 5 ans, passant de 137 en climat historique à 181 en climat futur soit une augmentation relative de 32,1 %. Ces résultats suggèrent que si la moyenne des dépassements demeure relativement inchangée, l'étendue des zones à risque augmentera sensiblement pour ce secteur en climat futur. Ce résultat vaut également pour les secteurs A et E.

Pour le secteur F, les moyennes des dépassements sont en général inférieures aux autres secteurs. Pour la période de retour 10 ans, la médiane de la moyenne des dépassements se trouve à 0,33 m (Figure 8.14G,H). Il est important de noter toutefois que la médiane du nombre de nœuds critiques pour cette même période de retour est de 7 soit moins de 8 % du nombre total de nœuds.

L'augmentation des pluies en climat futur augmentera sensiblement les risques de surcharge en réseau. L'étendue de zones à risque (plus de nœuds critiques)

augmentera de façon marquée de même que, dans une moindre mesure, l'amplitude des mises en charge (dépassements moyens plus importants).

8.3.4. Indicateur Inondation

La Figure 8.15 présente l'ensemble des résultats pour les volumes d'inondations. Le secteur A n'est pas problématique en matière d'inondations en climat historique et les changements climatiques n'ont pas d'impacts majeurs à cet égard. Avec les valeurs brutes et la période de retour 5 ans, on constate que la valeur médiane passe de 38 à 180 m³ ce qui ne représente que 0,03 et 0,12 % respectivement du volume de précipitation totale. De plus, ces volumes d'inondations proviennent essentiellement de certaines limites du modèle SWMM qui ne permet pas d'acheminer les eaux de ruissellement provenant d'un sous-bassin de drainage vers plus d'un nœud (Chapitre 8, section sur la moyenne des dépassements des réseaux unitaires). Pour plus de 90 % des jeux de paramètres, la différence des volumes d'inondations est inférieure à 500 m³.

Pour la période de retour 10 ans, la valeur médiane passe de 227 à 790 m³. Bien que l'augmentation relative puisse paraître importante (248 %), il ne s'agit pas d'une situation problématique puisque cela correspond à 0,5 % de la pluie totale. Pour plus de 70 % des jeux de paramètres, la différence entre le climat historique et futur est de moins de 1 000 m³. Il est intéressant de noter que pour certains jeux de paramètres, les volumes d'inondations pourraient augmenter rapidement pour la période de retour 10 ans en climat futur. Pour plus de 30 % des jeux de paramètres, les volumes d'inondation sont supérieurs à 1 500 m³.

Globalement, le secteur A se comporte comme le secteur B. Le nombre de nœuds critiques est important en climat historique pour les périodes de retour de 5 et 10 ans et augmente de façon importante, surtout avec la période de retour 10 ans, mais somme toute, les volumes d'inondations n'augmentent pas de façon marquée. On peut donc affirmer que l'étendue des zones à risque augmente suite à la mise en charge de plusieurs portions du réseau mais que les volumes d'eau expulsés du réseau demeurent modestes.

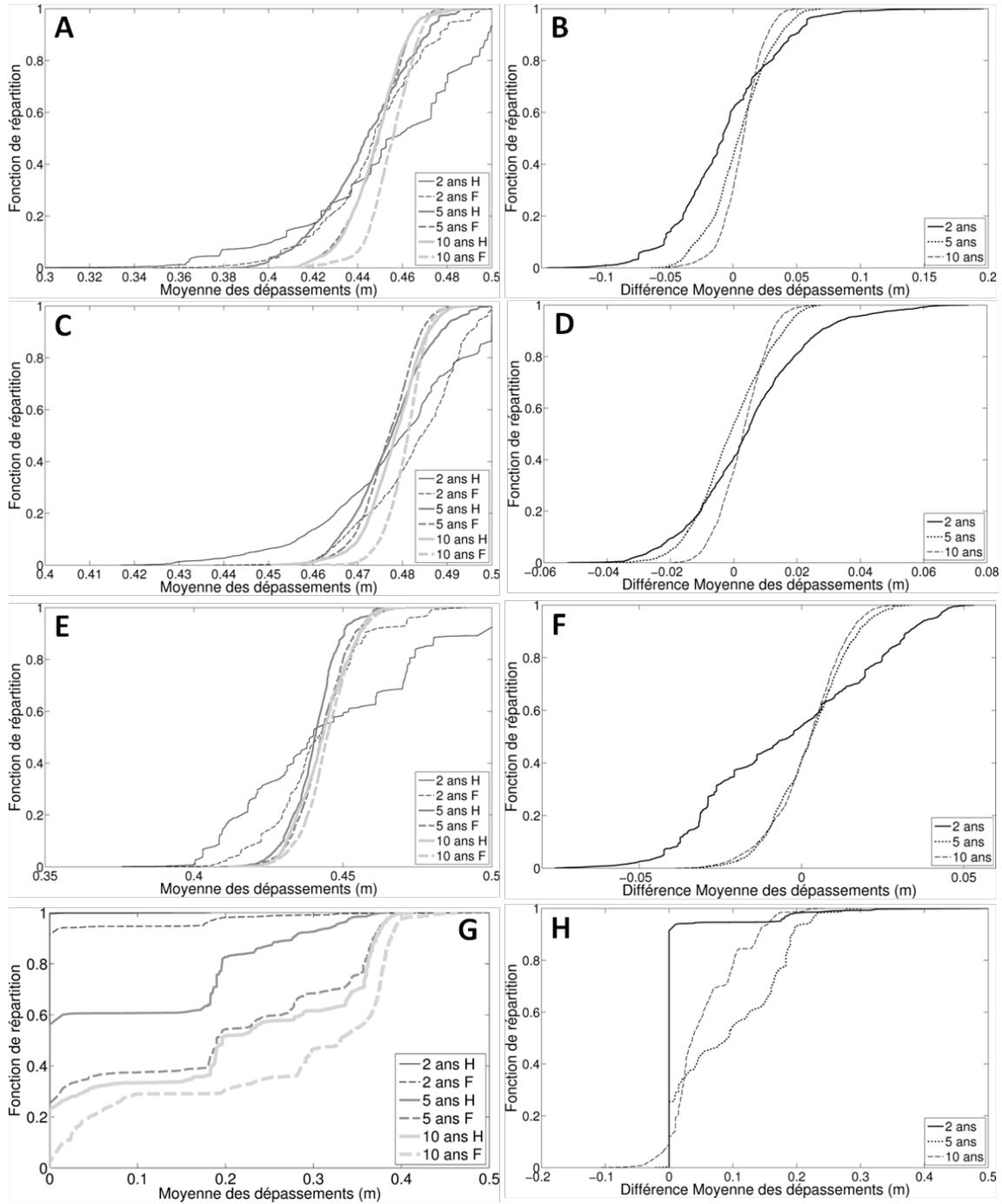


Figure 8.14 : Moyenne des dépassements maximaux du seuil critique (A,C,E,G) et variations de ces différences moyennes entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D (C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour.

Pour les secteurs D et E, les CC semblent avoir des conséquences plus importantes sur les volumes d'inondations. Pour le secteur D, considérant la période de retour 10 ans en climat futur, les volumes d'inondations sont supérieurs à 5 000 m³ pour une grande majorité des jeux de paramètres (91 %; Figure 8.15C). Toujours pour la période de retour 10 ans, la différence des volumes d'inondations, considérant un même jeu de paramètres, est supérieure à 4 000 m³ pour près de 45 % des jeux de paramètres (Figure 8.15D). Pour le secteur E, on remarque une très grande dispersion de ces valeurs pour la période de retour 10 ans, les volumes variant entre près de zéro et au-delà de 30 000 m³ indiquant une grande sensibilité à la paramétrisation utilisée (Figure 8.15F). Pour près de 50 % des jeux de paramètres, les volumes d'inondations avec la période de retour 10 ans sont supérieurs à 5 000 m³ en climat futur (Figure 8.15E). Des variations importantes des volumes d'inondations entre climat historique et futur sont observées pour un même jeu de paramètres, mais dans la majorité des cas (77 %) celles-ci sont inférieures à 5 000 m³.

Pour le secteur F, les volumes d'inondations sont pratiquement nuls pour la période de retour 2 ans tant en climat historique que futur. Même pour la période de retour 10 ans en climat futur, aucun volume d'inondation n'est généré pour plus de 40 % des jeux de paramètres. D'ailleurs, pour plus de 65 % des jeux de paramètres, la différence des volumes d'inondations pour un même jeu de paramètres est inférieure à 200 m³.

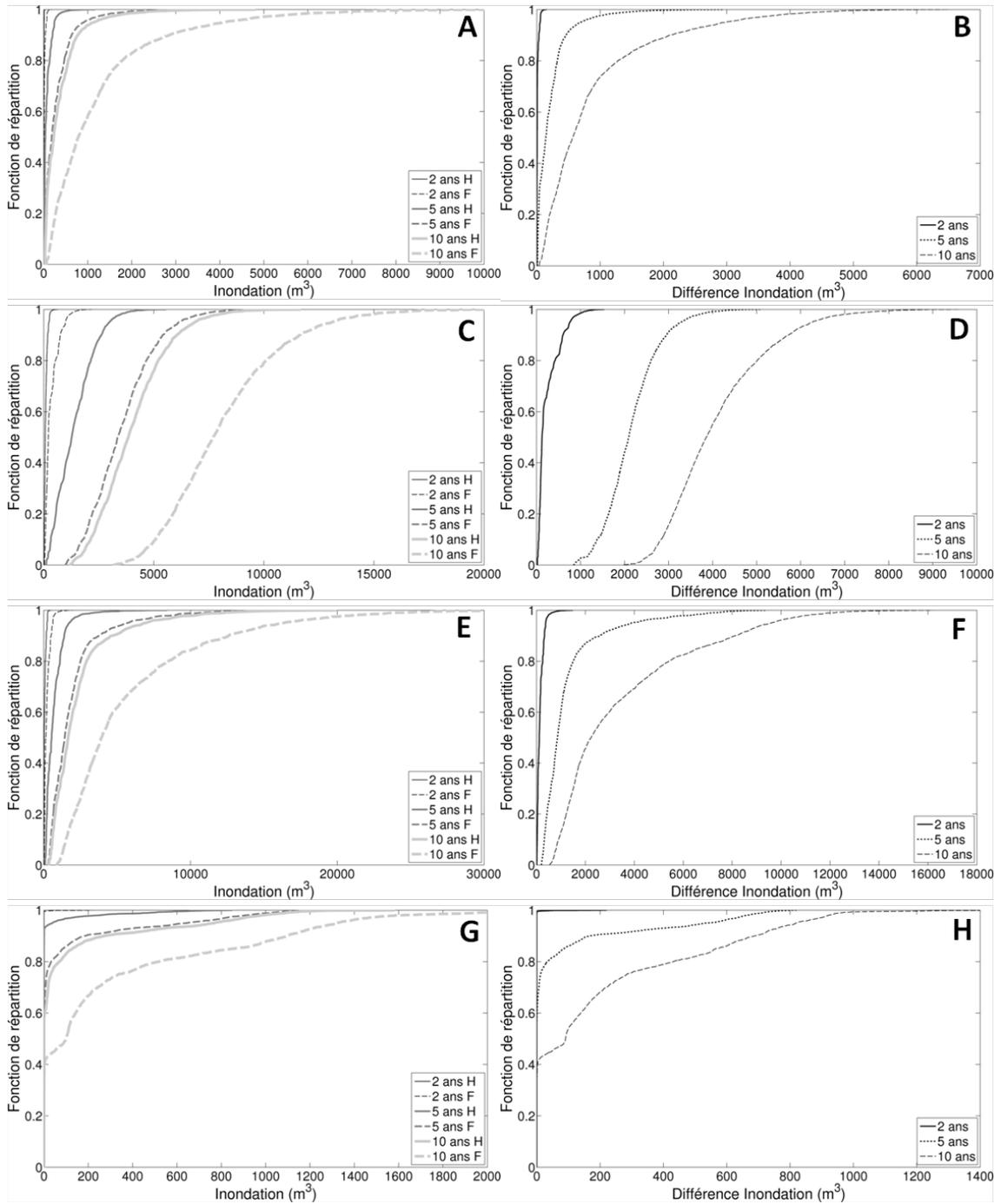


Figure 8.15 : Volumes d'inondations (A,C,E,G) et variations de ce volume entre climat futur et historique (B,D,F,H) pour les secteurs A (A,B), D (C,D), E (E,F) et F (G,H) en fonction des différentes périodes de retour.

8.3.5. Synthèse des résultats

Les principaux constats émanant des analyses précédentes sont les suivants.

- Le taux d'imperméabilisation joue un rôle crucial sur la répartition des volumes supplémentaires de pluie entre les différentes composantes du bilan hydrologique urbain en climat futur. Ainsi les fractions associées au ruissellement sont plus élevées pour les secteurs plus imperméabilisés.
- Les résultats pour la fraction des volumes supplémentaires de pluie acheminés au milieu récepteur sont semblables pour le secteur D desservi par un réseau d'égout pluvial (Figure 8.12) et les deux secteurs C et B drainés par des réseaux unitaires. Il s'agit des trois secteurs comptant les fractions de surfaces imperméables les plus élevées (51, 54 et 44 % respectivement).
- Alors que pour les secteurs plus imperméabilisés il est difficile d'obtenir un indicateur infiltration/rétention de surface supérieur à 60 %, ce dernier peut atteindre plus de 80 % pour les secteurs avec de grandes superficies forestières (E et F).
- Le nombre de nœuds critiques et la variation de ce nombre pour un même jeu de paramètres demeurent faibles pour la période de retour 2 ans et ce pour les quatre secteurs sous étude. Des hausses importantes sont toutefois constatées pour le secteur D pour la période de retour 5 ans et le secteur A pour la période de retour 10 ans.
- Les variations des dépassements moyens maximaux du seuil critique entre climat historique et futur sont peu marquées pour les secteurs A, D et E. Ce résultat est toutefois à mettre en parallèle avec les augmentations marquées des nombres de nœuds critiques suggérant que les augmentations de précipitations auront des impacts importants sur l'étendue des zones à risque et, dans une moindre mesure, sur l'ampleur globale des dépassements des seuils critiques.
- L'augmentation des pluies en climat futur entraîne de façon générale des augmentations du nombre de nœuds critiques. Cette augmentation s'accompagne

pour certains secteurs, tel le secteur D, d'une augmentation importante des volumes d'inondations suggérant que certaines zones avoisinant certains nœuds critiques seront plus propices aux inondations. Dans le cas du secteur A, les volumes d'inondations restent modérés même en climat futur. Dans le cas du secteur E, les variations des volumes d'inondation sont fortement dépendantes de la paramétrisation et peuvent être importantes dans le cas de conditions défavorables. Les volumes d'inondation demeurent négligeables même en climat futur pour le secteur F.

- Le secteur D est celui où les risques d'inondations sont les plus importants de façon globale en climat historique et c'est ce même secteur où les impacts d'une hausse des intensités des pluies extrêmes aura les impacts les plus importants pour les risques d'inondation.

8.4. Impacts des CC sur le niveau de service des secteurs sous étude : synthèse globale

Le Tableau 8.1 présente une synthèse des conclusions quant à l'état actuel et à l'évolution en climat futur du niveau de service des secteurs sous étude. La classification proposée repose sur les indicateurs et les résultats présentés plus haut et est défini comme suit :

Adéquat : peu de mise en charge (étendue et amplitude) et faible volume d'inondation – risque d'inondations nul

Adéquat mais à risque : étendue plus importante des mises en charge (amplitude faible à modérée) et faible volume d'inondation – risque d'inondations en certains points du secteur

Inadéquat : étendue des mises en charge importante (amplitude modérée à élevée) et volume d'inondation significatif (sans être très importants) – risque important d'inondations en certains points du secteur

Fortement inadéquat : étendue et amplitude importantes des mises en charge et volumes d'inondations importants en plusieurs nœuds – risque très important d'inondations en plusieurs points du secteur

Le secteur le plus problématique en climat historique est le secteur C dont le niveau de service est déjà inadéquat pour la période de retour 5 ans (il est important de noter que le secteur C considéré dans le cadre de cette étude ne correspond pas au secteur dans son état actuel puisque des immenses bassins de rétention ont été installés au début des années 2000). Sans surprise ce secteur passe de la classe inadéquat à fortement inadéquat en climat futur.

Le secteur D est classé quant à lui dans la catégorie inadéquate pour la période de retour 10 ans indiquant que les risques d'inondations sont importants pour ce secteur en climat historique. Il convient de rappeler que ce secteur est imperméabilisé à plus de 50 % se classant au deuxième rang après le secteur C. Ce secteur voit son niveau de service diminuer sensiblement en climat futur pour devenir fortement inadéquat.

Trois secteurs sont classés comme adéquat mais à risque pour la période de retour 10 ans à savoir les secteurs A, B et E. Ces secteurs présentent certaines similarités en termes de surfaces imperméables (43, 38 et 28 % du secteur respectivement) et de fractions de surfaces imperméables sous forme de SIDC (87, 85 et 79 % respectivement). Le niveau de service en climat futur est classé comme inadéquat pour les trois secteurs en climat futur pour la période de retour 10 ans.

Enfin, le niveau de service du secteur F est classé comme adéquat tant en climat historique que futur.

Tableau 8.1 : Sommaire du niveau de service en termes de risques hydrauliques en climat historique et futur pour la période de retour indiquée.

Secteur	Période de retour (ans)	Niveau de service	
		Climat historique	Climat futur
A	10	Adéquat mais à risque	Inadéquat
B	10	Adéquat mais à risque	Inadéquat
C	5	Inadéquat	Fortement inadéquat
D	10	Inadéquat	Fortement inadéquat
E	10	Adéquat mais à risque	Inadéquat
F	10	Adéquat	Adéquat

CHAPITRE 9 : ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse visant à estimer la performance des secteurs sous étude en climat futur une fois que diverses mesures d'adaptation ont été mises en place. Plus spécifiquement, ces résultats visent à déterminer dans quelle mesure l'instauration de divers scénarios d'adaptation sur les secteurs à l'étude permet de récupérer des niveaux de service en climat futur comparables au niveau de service historique.

Diverses mesures d'adaptation (débranchement de gouttières, aménagements de systèmes de biorétention, redimensionnement de conduites et optimisation des ouvrages de rétention en place), décrites à la Section 9.1, ont été considérées. Plusieurs scénarios d'adaptation, combinant ces mesures en fonction des spécificités de chaque secteur et des contraintes techniques qu'impose la mise en place de ces mesures, ont été élaborés pour chacun des secteurs sous étude (Section 9.2). La comparaison des niveaux de service en climat futur et historique correspondant aux divers scénarios d'adaptation, exige de définir un ensemble d'indices. Ces indices sont décrits à la Section 9.3. Les résultats sont présentés secteur par secteur aux Sections 9.4 et 9.5, la première s'intéressant aux secteurs drainés par des réseaux unitaires, la seconde aux secteurs drainés par des réseaux pluviaux. Il convient de mentionner que les résultats présentés à ce chapitre sont obtenus en considérant une hausse des intensités de pluies extrêmes de 15 % (le Chapitre 11 aborde la question de la sensibilité aux changements climatiques).

9.1. Mesures d'adaptation aux CC

Différentes mesures ont été retenues dans le cadre de cette étude. Certaines de ces mesures sont connues et regroupées sous l'appellation de Pratiques de Gestion Optimales (PGO, *Best Management Practice* ou BMP en langue anglaise; MDDEP, 2010; Ice, 2004; Schneider et McCuen, 2006; Cheng *et al.* 2009; Gallo *et al.* 2012). Ces mesures visent notamment à réduire les apports au réseau, à améliorer les conditions d'infiltration, à améliorer la qualité des eaux de ruissellement ou encore à favoriser des

conditions hydrologiques proches, ou du moins le plus proche possible, de celles prévalant avant le développement urbain. D'autres appellations sont également utilisées pour décrire ces approches telles *Low Impact Development* (LID, Dietz, 2007; Ahiablame *et al.* 2012) ou *Stormwater Control Measure* (SCM, Davis *et al.* 2012; Hunt *et al.* 2012). Il existe par ailleurs une littérature très abondante sur le sujet (voir Mailhot *et al.* 2008a,b pour une revue de littérature et une bibliographie plus complète sur le sujet). Certaines mesures ont été appliquées à tous les secteurs à l'étude alors que d'autres dépendent de caractéristiques spécifiques à chaque secteur. Le Tableau 9.1 identifie les mesures d'adaptation retenues pour chacun des secteurs à l'étude. Les prochaines sections décriront plus en détail chacune de ces mesures.

Tableau 9.1 : Mesures d'adaptation retenues pour chacun des secteurs à l'étude

Mesure d'adaptation	Secteur				
	C	B	A	D	E
Débranchement de gouttières	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Système de biorétention	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Redimensionnement de conduite	Non	Non	Non	Oui	Oui
Optimisation de bassin de rétention	Non	Non	Non	Non	Oui

9.1.1. Débranchement de gouttières

Il existe plusieurs configurations possibles pour l'évacuation des eaux de ruissellement des toits (Ville de Thetford Mines, 2012). Certaines configurations font en sorte que l'ensemble de ces eaux se retrouvent dans le réseau. Considérant que les toits représentent une fraction très importante des surfaces imperméables d'un secteur résidentiel (23 à 36 % pour les secteurs à l'étude), on comprend que les volumes acheminés au réseau peuvent être importants. Le débranchement de gouttière consiste en diverses mesures visant à rediriger les eaux de ruissellement des toits vers des aménagements ou simplement des surfaces gazonnées afin de favoriser leur infiltration et donc de réduire les volumes acheminés au réseau (Ville de Thetford-Mines, 2012).

Le débranchement de gouttières (DG) est une pratique de plus en plus utilisée par les municipalités du Québec. Parmi les villes ayant mis en place des programmes de DG, on compte notamment Québec, Sherbrooke et Thetford Mines (Ville de Thetford Mines, 2012; Ville de Québec, 2007; Ville de Sherbrooke, 2007). D'autres villes, telles Montréal et Lévis, tentent de sensibiliser les citoyens sur la nécessité de débrancher les gouttières (Ville de Montréal, 2012; Ville de Lévis, 2010).

La littérature scientifique compte cependant peu d'études qui se sont intéressées à évaluer le potentiel des programmes de DG pour réduire les apports au réseau d'égouts. Parmi les études recensées, mentionnons celle de Kaufman et Wurtz (1997) qui ont évalué l'impact d'un programme de DG sur les débits d'eau acheminés à l'usine de traitement pour un secteur majoritairement résidentiel de 16,8 km². Ces auteurs ont observé une diminution allant de 25 à 62 % du débit moyen en temps de pluie pour des événements pluvieux de 6 à 25,4 mm. Plus récemment, Muller et Thompson (2009) ont évalué les performances du DG sur six terrains résidentiels à Madison (Wisconsin, États-Unis) afin d'appliquer ces résultats à un modèle d'infiltration. Ces auteurs mettent en évidence l'utilité des zones gazonnées pour recevoir des eaux de ruissellement provenant de zones imperméables afin de réduire les volumes totaux de ruissellement.

Le DG a été intégré dans les modélisations en faisant varier les fractions de SIIC qui représentent la proportion de surfaces imperméables dont les eaux de ruissellement sont dirigées vers les surfaces perméables (voir Section 4.4). Afin d'évaluer l'impact qu'un programme de DG peut avoir sur la fraction de SIIC, les expériences des villes des secteurs E et F, en matière de DG, ont été utilisées. Avant l'instauration des programmes de DG effectués par les villes des secteurs E et F, les intervenants municipaux avaient établis que 44 et 45 % respectivement des toits des maisons étaient indirectement connectés au réseau d'égouts (SIIC). Dès lors, nous avons considéré que 45 % de la superficie totale des toits en pente en secteur résidentiel correspondait à des SIIC (voir Section 4.4). Quelques années après la mise en place des programmes de DG, de nouvelles visites de terrain ont été réalisées et ont permis d'établir, pour le secteur E, que 71 % des toits des maisons étaient indirectement connectés au réseau d'égouts alors que pour le secteur F, cette valeur était de 70 %. Dès lors, pour représenter les programmes de DG pour chacun des secteurs à l'étude, les SIIC ont été ajustées afin que 70 % de la superficie totale des toits en pente en secteur résidentiel

soit déconnectée après la mise en place du programme. Les enquêtes réalisées pour les villes des secteurs E et F nous laissent penser que ces valeurs sont représentatives des valeurs des secteurs résidentiels au Québec et de l'efficacité que l'on peut escompter d'un programme de DG. Le Tableau 9.2 dresse un bilan des résultats des programmes de DG pour les villes des secteurs E et F, ainsi que les valeurs retenues pour la modélisation.

Tableau 9.2 : Pourcentage de SIIC et de SIDC avant et après la mise en place des programmes de DG pour les villes des secteurs E et F ainsi que les valeurs retenues pour la modélisation avant et après la mise en place d'un programme de DG

Type de surface imperméable	E ¹		F ¹		Modélisation ²	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
SIIC (%)	45	71	44	70	45	70
SIDC (%)	55	29	56	30	55	30

¹Les pourcentages indiqués pour les villes sont exprimés en fonction du nombre de maisons

²Les pourcentages indiqués pour la modélisation sont exprimés en fonction de la superficie totale des toits des maisons en pente en milieu résidentiel

9.1.2. Systèmes de biorétention

Les types d'aménagements conçus pour réduire les apports au réseau de drainage sont nombreux : pavés perméables et poreux (Roseen *et al.*, 2012; Scholz et Grabowiecki, 2007), tranchées d'infiltration (Chahar *et al.*, 2012), toits verts (Morgan, 2013; Trottier 2008), fossés végétales (Ingvertsen *et al.*, 2012a,b), *etc.* Parmi ces mesures, on trouve les systèmes de biorétention conçus pour capter les eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables, retenir les polluants contenus dans les eaux de ruissellement et favoriser l'infiltration afin de réduire les apports au réseau de drainage au profit de la recharge des eaux souterraines (Roy-Poirier *et al.*, 2010; Davis *et al.*, 2009).

Les systèmes de biorétention (BIO) ont été privilégiés dans le cadre de ce projet. La première raison justifiant ce choix est la littérature abondante sur le sujet, littérature qui met en évidence les performances de ce type d'aménagements tant en matière de réduction des volumes de ruissellement et des débits de pointe (Asleson *et al.*, 2009; Li

et al., 2009; Davis, 2008) que de réduction des charges polluantes contenues dans les eaux de ruissellement (DeBusk et Wynn, 2011; Trowsdale et Simcock, 2011). De plus, plusieurs études ont montré leur efficacité en climat nordique (Muthanna et al., 2007a,b,c; Blecken et al., 2010; Blecken et al., 2011). La deuxième raison est la capacité de ces systèmes à s'adapter à des configurations et des occupations de terrains diverses (PGC, 2007), surtout dans un contexte où aucune étude de faisabilité, quant à l'intégration de ces aménagements, n'a été effectuée dans le cadre de la présente étude.

Les systèmes de biorétention peuvent être conçus pour répondre à différents objectifs. Deux types de système ont été retenus à savoir les aménagements : 1) de filtration et recharge partielle des eaux souterraines (*filtration and partial recharge facility*, Figure 9.1A); 2) d'infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines (*infiltration, filtration and recharge facility*, Figure 9.1B).

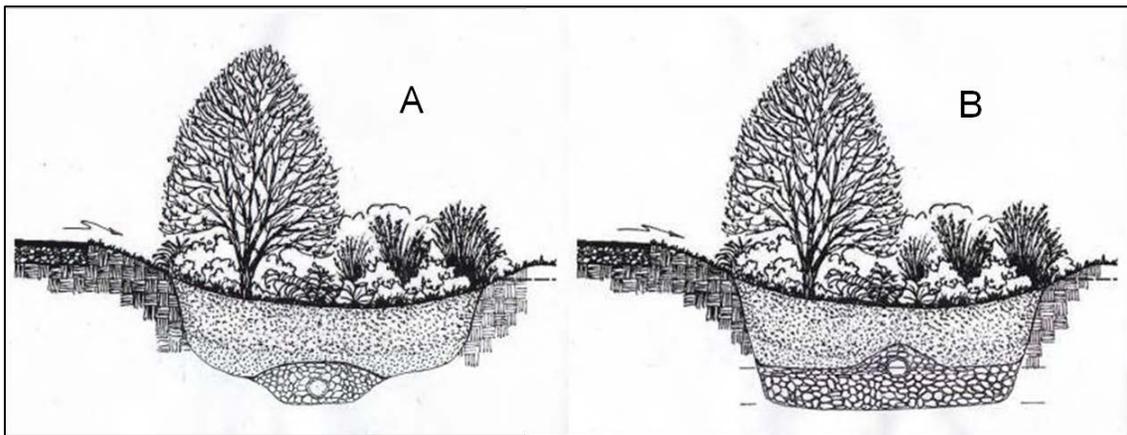


Figure 9.1 : Schéma de systèmes de biorétention selon PGC (2007) : A) système de biorétention à recharge partielle des eaux souterraines; B) système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines.

Le premier type, à recharge partielle des eaux souterraines, est approprié pour les secteurs où les capacités d'infiltration sont faibles. Il inclut un réservoir de gravier peu profond (0,15 m selon les indications de Carpenter et Hallam, 2010) et est muni d'une

conduite perforée qui permet d'acheminer une partie des eaux de ruissellement aux réseaux d'égouts une fois la filtration effectuée (Figure 9.1A). Ce type de drain est fortement suggéré par Davis *et al.* (2009) lorsque les capacités d'infiltration sont inférieures à 1,3 mm/h afin de retirer l'eau de l'aménagement avant le prochain événement pluvieux. Ainsi, ce système a été utilisé pour tous les secteurs excepté E où les capacités d'infiltration globales sont plus élevées (voir Section 4.5). Nous formulons donc l'hypothèse conservatrice qu'à l'échelle de l'aménagement, les capacités d'infiltration sont toujours en deçà de 1,3 mm/h pour les secteurs A, B, C et D.

Pour l'autre type d'aménagement, soit le système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines, utilisé avec le réseau de drainage E, le réservoir de gravier a une profondeur de 0,30 m (PGC, 2007) et comporte une conduite perforée située dans sa partie supérieure, favorisant ainsi l'infiltration et la recharge des eaux souterraines tout en permettant à l'aménagement d'être fonctionnel lorsque survient le prochain événement de pluie.

Les autres composantes des systèmes de biorétention sont communes aux deux types d'aménagement. D'abord un réservoir de surface de 0,25 m de profondeur. (les valeurs couramment suggérées se situent entre 0,15 et 0,30 m; Davis *et al.*, 2009) sous lequel se trouve un terreau organique d'une épaisseur de 1,0 m, soit la valeur maximale généralement suggérée (0,7 à 1,0 m. selon Davis *et al.*, 2009). Cette épaisseur de sol a été choisie afin de minimiser les risques de contaminations de la nappe phréatique surtout en l'absence d'information sur la hauteur réelle des eaux souterraines. Dans la modélisation, les caractéristiques du sol sont basées sur un loam sablonneux (Tableau 9.4) ce qui permet une vidange du réservoir de surface 24 à 48 heures après la fin de la pluie (MSSC, 2008; Atchison *et al.*, 2006). Selon Clar et Green (1993) et PGC (2007), ce sol convient bien aux systèmes de biorétention. La Figure 9.2 présente en détail les deux types de systèmes de biorétention alors que les Tableaux 9.3, 9.4 et 9.5 présentent les valeurs des différents paramètres associés aux systèmes de biorétention dans SWMM. Le lecteur est invité à consulter le Chapitre 7 de James *et al.* (2010) pour une description de ces caractéristiques.

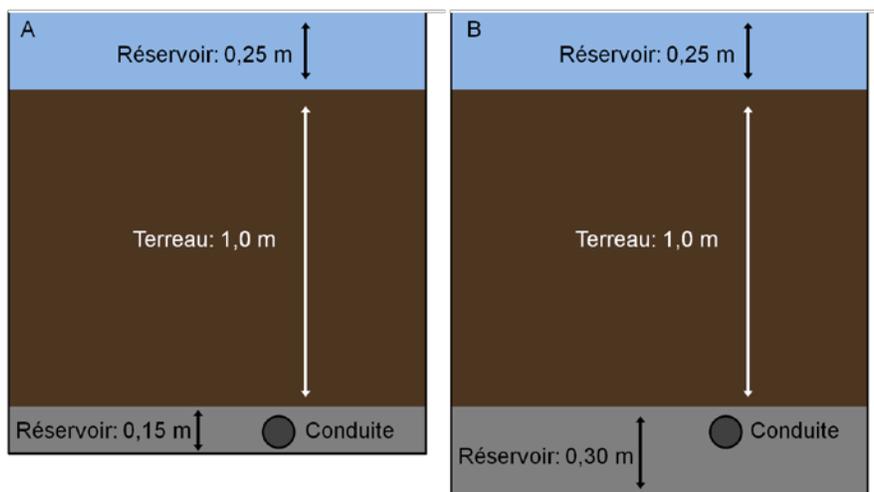


Figure 9.2 : Coupe longitudinale des systèmes de biorétention modélisés et caractéristiques associées : A) système de biorétention à recharge partielle des eaux souterraines; B) système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines.

Tableau 9.3 : Caractéristiques des réservoirs de surface des systèmes de biorétention modélisés dans SWMM (Chapitre 7 de James *et al.*, 2010)

Caractéristiques	Valeur
Profondeur (m)	0,25
Fraction du volume de végétation ¹	0

1. Valeur par défaut du modèle SWMM

Tableau 9.4 : Caractéristiques du terreau organique des systèmes de biorétention modélisés dans EPA SWMM

Caractéristiques	Valeur
Épaisseur (m)	1,0
Porosité	0,45
Capacité au champ	0,19
Point de flétrissement	0,085
Conductivité hydraulique (mm/h)	11
Pente de conductivité	10
Hauteur d'aspiration (mm)	110

Tableau 9.5 : Caractéristiques du drain des systèmes de biorétention modélisés dans SWMM

Caractéristiques	Système de biorétention à recharge partielle des eaux souterraines	Système de biorétention à infiltration, filtration et recharge des eaux souterraines
Zone de stockage (m)	0,15	0,30
Indice des vides	0,5	0,5
Conductivité hydraulique (mm/h)	1	3
Coefficient de drainage (mm/h)	2,38	1,50 ¹
Drain exponent	0,5	0.1 ¹
Hauteur du drain (m)	0,03	0,18

¹Vidange en moins de 72 heures

Les systèmes de biorétention ont été conçus pour contenir toutes les eaux de ruissellement d'un événement pluvieux générant 22 mm de pluie dans le cas des secteurs A, B, C et E et 26 mm pour le secteur D. Ces hauteurs d'eau sont basées sur des analyses présentées dans le guide du MDDEP (MDDEP, 2010) qui suggèrent que 90 % des événements pluvieux génèrent une hauteur d'eau inférieure à 22 mm à Montréal (station pluviométrique de Dorval, 1943-1992) et 26 mm à Québec (station pluviométrique de l'aéroport de Québec, 1961-1991). Ce critère de conception est un standard en matière de contrôle de la qualité des eaux de ruissellement au Québec (MDDEP, 2010; Fuamba *et al.*, 2010a,b). De plus, ce critère concorde avec d'autres sources voulant que les aménagements visant à réduire les apports au réseau d'égouts interceptent les 25 premiers millimètres de pluie (1 pouce, Hunt, 1999; Davis *et al.*, 2009) ou les eaux de ruissellement des événements pluvieux les plus fréquents (période de retour inférieure à deux ans, Graham *et al.*, 2004). Pour Montréal et Québec, la hauteur d'eau d'un événement pluvieux de période de retour deux ans et d'une durée d'une heure est de 22,3 et 21,9 mm respectivement (voir Section 6.2). Finalement, la durée de l'événement considérée pour le dimensionnement des aménagements est de six heures, ce qui correspond à la durée moyenne des événements pluvieux utilisés lors des mêmes analyses présentées dans le guide du MDDEP (2010).

9.1.3. Redimensionnement de conduites

Le redimensionnement de conduites (RC) a été envisagé comme dernière solution en matière de mesures d'adaptation pour certains réseaux de drainage. Plusieurs raisons expliquent pourquoi cette mesure d'adaptation n'a pas été considérée pour l'ensemble des secteurs. D'abord, il s'agit d'une solution exigeant des investissements importants lorsqu'on la compare à d'autres mesures d'adaptation (BPR, 2008). Ces coûts élevés nous ont incités à d'abord considérer d'autres solutions telles la réduction des apports au réseau de drainage. De plus, il peut être difficile de justifier le remplacement d'une conduite qui n'a pas atteint sa durée de vie utile.

Il est important de noter également que le redimensionnement de conduite permet certes d'améliorer les performances hydrauliques d'un réseau de drainage puisque l'évacuation des eaux de ruissellement est plus rapide, mais cela va à l'encontre des nouvelles approches de gestion des eaux pluviales qui s'attardent à la fois aux aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux de ruissellement (voir Ahiablame *et al.*, 2012; Chang, 2010; Dietz, 2007). Des analyses antérieures ont démontré, par exemple, que le redimensionnement de conduites augmentait les débits à l'exutoire résultant en une augmentation des volumes de surverse dans le cas de réseaux d'égouts unitaires (Bolduc, 2010). Évidemment ce type de mesure ne permet pas d'atténuer la dégradation écologique des cours d'eau en milieu urbain (Jacobson, 2011; Walsh *et al.*, 2005; Shuster *et al.*, 2005; Paul et Meyer, 2001), la contraction des argiles sèches (Silvestri, 2000; Silvestri *et al.* 1992) et la diminution du niveau des eaux souterraines (Erickson and Stefan 2009).

Dès lors, nous avons jugé que cette mesure d'adaptation ne devait être utilisée qu'en dernier recours lorsque que, même après la mise en place d'autres mesures d'adaptation, des problèmes hydrauliques importants et localisés persistaient et résultaient en des inondations. Ce genre de situation s'est présentée notamment lorsque l'écoulement des eaux en conduite se faisait d'une conduite de diamètre donné vers une conduite de diamètre inférieure.

9.1.4. Optimisation manuelle des bassins de rétention

Les bassins de rétention permettent de récolter de grands volumes d'eaux de façon temporaire soulageant les réseaux d'égouts et les milieux récepteurs en période de forte pluie. Ainsi, ils minimisent les risques d'inondations et/ou de refoulements d'égouts et l'érosion des milieux récepteur en régularisant les débits après l'événement pluvieux (Ville de Québec, 2013; 2012). Puisque l'optimisation manuelle des bassins de rétention n'a été retenue que pour le réseau de drainage E, cette mesure d'adaptation sera décrite en détail à la Section 9.2.5.1.2.

9.2. Scénarios d'adaptation retenus pour chaque secteur

À partir des mesures d'adaptation présentées à la section précédente, différents scénarios d'adaptation, combinant ces mesures, ont été créés pour chaque secteur. D'abord, chacune des mesures d'adaptation a été considérée individuellement et sa mise en place a fait l'objet d'un scénario d'adaptation à part entière. Ensuite, des combinaisons de ces mesures d'adaptation ont permis de créer d'autres scénarios d'adaptation. Ces combinaisons débutent, pour les secteurs A, B, C et D, par le DG, suivi des systèmes de biorétention et au besoin du redimensionnement de conduites. La situation est cependant différente pour le secteur E. En effet, un programme de DG a déjà été mis en place dans ce secteur. Cependant, afin de faciliter la comparaison avec les autres secteurs, la situation historique sans adaptation considère le secteur avant la mise en place du programme de DG. Les scénarios d'adaptation incluent donc le DG, l'optimisation manuelle des bassins de rétention déjà en place, l'ajout de systèmes de biorétention et le redimensionnement de conduites. Les prochaines sections présentent en détail chacun des scénarios d'adaptation pour chacun des secteurs.

9.2.1. Secteur A

Pour le réseau de drainage A, deux mesures d'adaptation ont été retenues. Il s'agit du DG et des systèmes de biorétention (BIO). La Figure 9.3 présente les scénarios d'adaptation considérés pour ce secteur.

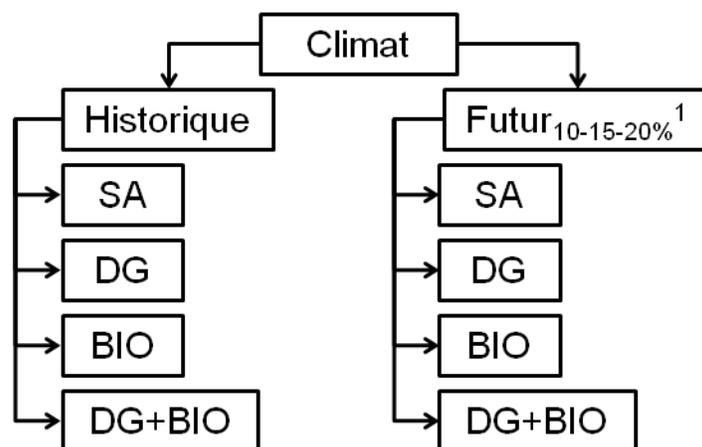


Figure 9.3 : Scénarios d'adaptation considérés pour le secteur A (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.

9.2.1.1. Débranchement de gouttières

Le secteur A comprend une grande zone industrielle, fortement imperméabilisée et pour laquelle, le débranchement de gouttière n'est pas considéré (voir Figure 5.1). Par ailleurs, la superficie totale des toits en pente ne représente que 6,4 % de la superficie totale du secteur bien que le secteur résidentiel occupe la moitié de la superficie totale de ce secteur. Il sera donc intéressant de voir si, dans une telle situation, la mise en place d'un programme de DG a des répercussions sur le niveau de service global. Au total, le scénario de DG permet de déconnecter un peu plus de 7 ha de SIDC par rapport au scénario sans adaptation. Le Tableau 9.6 montre comment les SIIC sont modifiées par rapport aux SIT sur l'ensemble du territoire suite à la mise en place du scénario de DG comparativement à la situation sans adaptation alors que la Figure 9.4 montre l'augmentation relative des SIIC pour chacun des sous-bassins de drainage.

Tableau 9.6 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur A

Débranchement de gouttières ¹	SIIC/SIT (%)
45% ²	11,7
70% ²	15,8

¹Basé sur la superficie totale des toits en pente des maisons en milieu résidentiel

²Selon les résultats obtenus par les villes des secteurs E et F suite à la réalisation de leur programme de DG

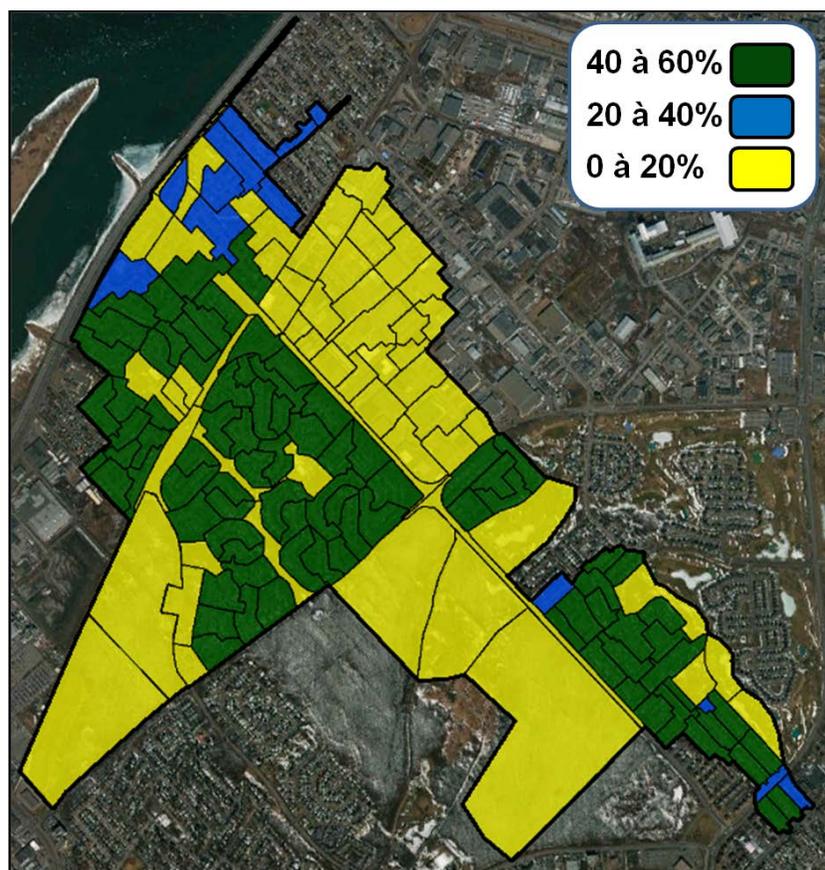


Figure 9.4 : Augmentations relatives des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur A

9.2.1.2. *Systèmes de biorétention*

Onze zones imperméables ont été retenues pour la mise en place de systèmes de biorétention sur le secteur A. Au total, 37 systèmes de biorétention, totalisant 0,30 ha, captent les eaux de ruissellement de 6,7 ha de surfaces imperméables (Tableau 9.7). La Figure 9.5 montre l'emplacement de chacune des zones imperméables drainées sur le territoire à l'étude. Il est important de noter que des systèmes de biorétention ont été mis en place dans le secteur industriel. Toutefois, les surfaces imperméables drainées correspondent toutes à des stationnements pour véhicules légers. Ainsi, aucune zone imperméable utilisée pour l'entreposage de matériaux divers ou le transport de véhicules

lourds n'a été considérée pour cette mesure d'adaptation. Pour les secteurs résidentiels et commerciaux, les surfaces drainées correspondent également à des aires de stationnement.

Tableau 9.7 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrées à la modélisation du secteur A dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.5 pour la localisation des zones imperméables).

Zone imperméable	Nombre systèmes biorétention	Superficie système biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)	Secteur
1	3	151	3 800	Résidentiel ¹
2	3	592	11 725	Industriel
3	3	371	7 949	Industriel
4	4	164	3 089	Industriel
5	2	151	3 246	Industriel
6	2	175	4 327	Industriel
7	2	128	2 704	Industriel
8	5	214	5 282	Institutionnel
9	5	496	10 055	Commercial
10	6	427	9 337	Commercial
11	2	201	5 300	Commercial
Total	37	3 070	66 814	

¹Résidences pour personnes âgées

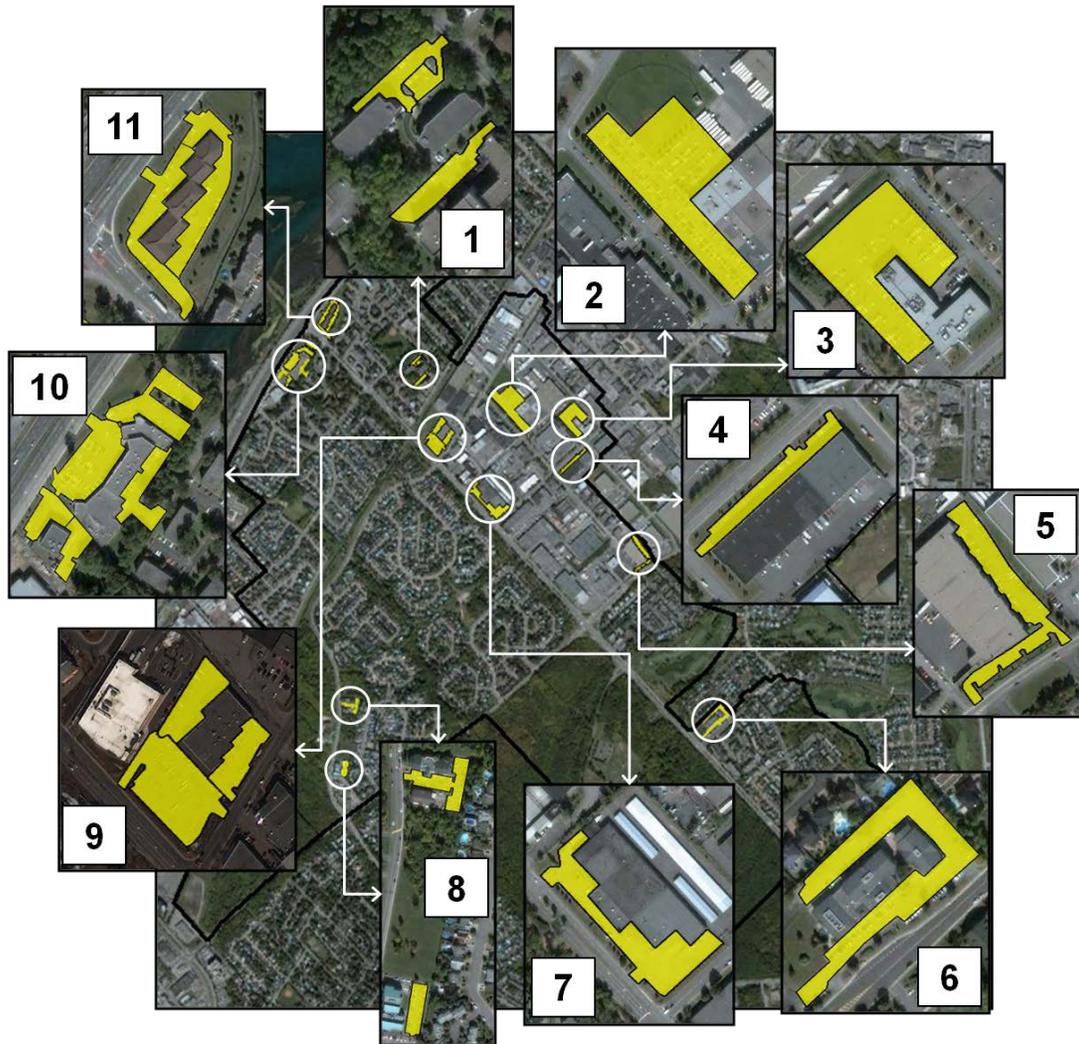


Figure 9.5 : Localisation des surfaces imperméables drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur A pour chacune des zones imperméables (voir Tableau 9.7).

9.2.2. Secteur B

Deux mesures d'adaptation ont été retenues pour le réseau de drainage B à savoir le DG et les systèmes de biorétention. La Figure 9.6 dresse la liste des scénarios d'adaptation considérés pour ce secteur.

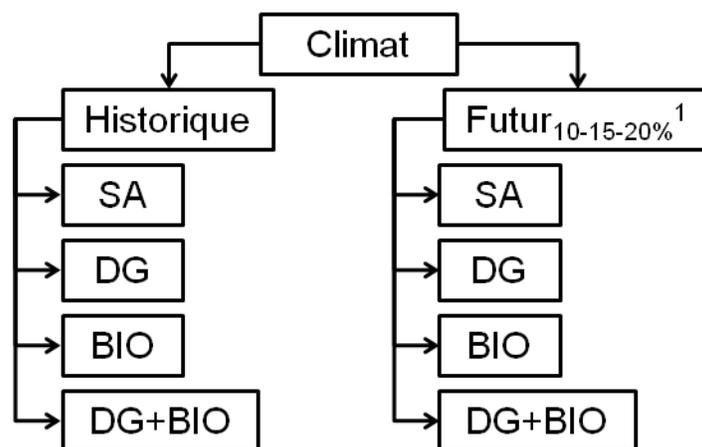


Figure 9.6 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur B (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.

9.2.2.1. Débranchement de gouttières

Le secteur B offre un potentiel intéressant en matière de DG puisqu'il est très largement résidentiel (76 % de l'occupation du territoire). La superficie totale de toit en pente par rapport à la superficie totale du territoire représente 9,9 % et le scénario de DG permet de déconnecter un peu moins de 8 ha (7,6 ha) de SIDC par rapport au scénario sans adaptation. Le Tableau 9.8 montre comment les SIIC évoluent par rapport aux SIT sur l'ensemble du territoire après la mise en place du scénario de DG comparativement à la situation sans adaptation. La Figure 9.7 montre l'augmentation relative des SIIC pour chacun des sous-bassins de drainage.

Tableau 9.8 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur B

Débranchement de gouttières ¹	SIIC/SIT (%)
45% ²	16,0
70% ²	21,6

¹Basé sur la superficie totale des toits en pente des maisons en milieu résidentiel

²Selon les résultats obtenus par les villes des secteurs E et F suite à la réalisation de leur programme de DG

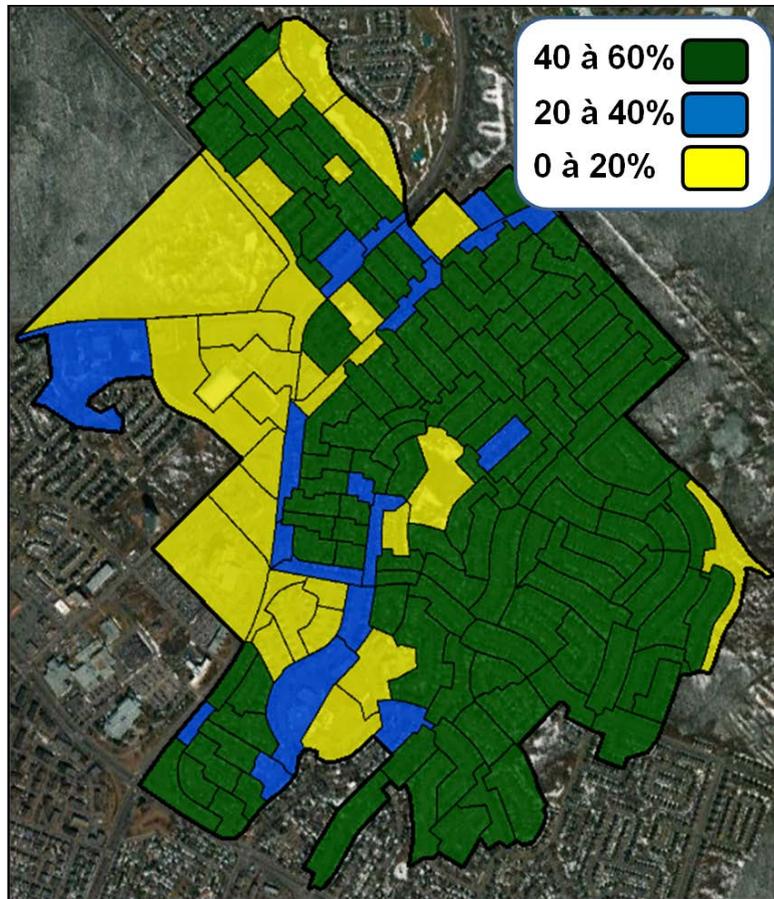


Figure 9.7 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur B

9.2.2.2. *Systèmes de biorétention*

Sept zones imperméables ont été retenues pour la mise en place de systèmes de biorétention pour le secteur B. Au total, 45 systèmes de biorétention, totalisant 0,30 ha, captent les eaux de ruissellement de 6,4 ha de surfaces imperméables (Tableau 9.9). La Figure 9.8 montre l'emplacement de chacune des zones imperméables drainées sur le territoire à l'étude. Les zones drainées correspondent à des aires de stationnements dans tous les cas.

Tableau 9.9 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur B dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.8 pour la localisation des zones imperméables)

Zone imperméable	Nombre système biorétention	Superficie systèmes biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)	Secteur
1	5	205	4 203	Résidentiel
2	3	108	2 305	Institutionnel
3	12	936	20 053	Institutionnel
4	7	364	7 698	Commercial
5	4	240	5 016	Commercial
6	11	973	20 717	Institutionnel
7	3	180	3 770	Commercial
Total	45	3 006	63 762	

9.2.3. Secteur C

Pour le secteur C, deux mesures d'adaptation ont été retenues, le DG et les systèmes de biorétention. Dans le cadre de travaux antérieurs le redimensionnement de conduites a été analysé comme mesure d'adaptation (Bolduc, 2010), mais ce type de mesure n'a pas été considéré dans le cadre de ce projet. La Figure 9.9 présente les scénarios d'adaptation considérés pour ce secteur.

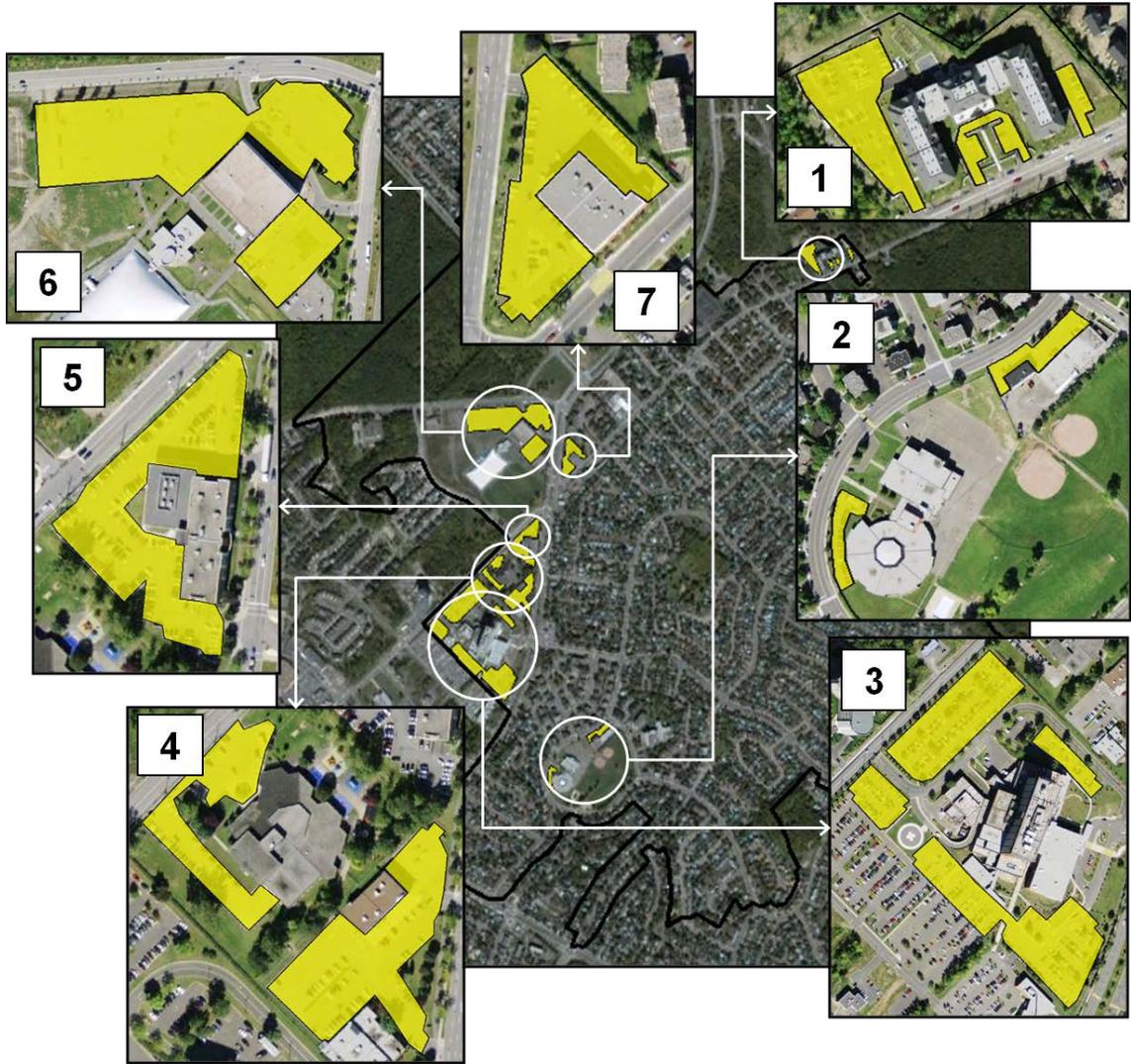


Figure 9.8 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le réseau de drainage B (voir Tableau 9.9)

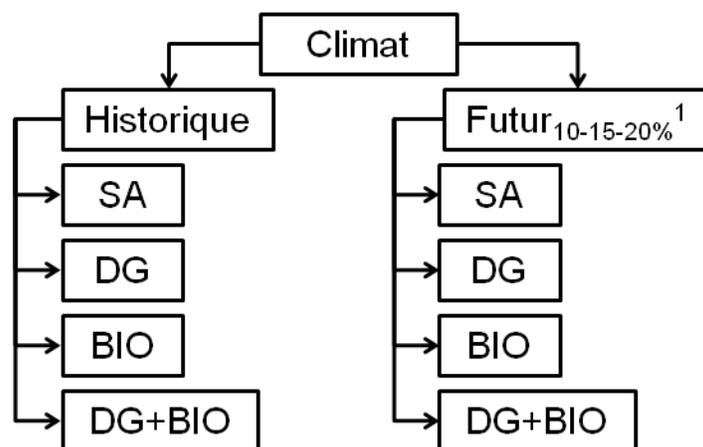


Figure 9.9 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur C (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO : systèmes de biorétention). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.

9.2.3.1. *Débranchement de gouttières*

Le secteur C, tout comme le secteur B, offre un potentiel intéressant en matière de débranchement de gouttières puisqu'il s'agit d'un secteur majoritairement résidentiel (75 % de l'occupation du territoire). Ainsi, la superficie totale de toits en pente est très grande (36,75 ha) et représente 11,15 % de la superficie totale du territoire (9,9 % pour le secteur B). Au total, le scénario de DG permet de déconnecter un peu plus de 9 ha (9,2 ha) de SIDC par rapport au scénario sans adaptation ce qui est environ un hectare de plus que le secteur B. Bien que le potentiel offert par le DG soit supérieur pour le secteur C que pour le secteur B, il faut noter que le niveau d'imperméabilisation des zones résidentielles est globalement plus élevé pour le secteur C (voir Section 5.3.1). Ainsi, les surfaces perméables qui reçoivent les eaux de ruissellement supplémentaires suite à la mise en place du programme de DG sont plus sollicitées ce qui peut entraîner une diminution de l'infiltration sur l'ensemble du territoire. Le Tableau 9.10 montre les modifications du rapport SIIC/SIT sur l'ensemble du territoire suite à la mise en place du scénario de DG alors que la Figure 9.10 permet d'apprécier la répartition spatiale des augmentations relatives des SIIC sur les différents sous-bassins de drainage.

Tableau 9.10 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur C

Débranchement de gouttières ¹	SIIC/SIT (%)
45% ²	11,7
70% ²	16,9

¹Basé sur la superficie totale des toits des maisons en pente en milieu résidentiel.

²Selon les résultats obtenus par les villes des secteurs E et F suite à la réalisation de leur programme de DG

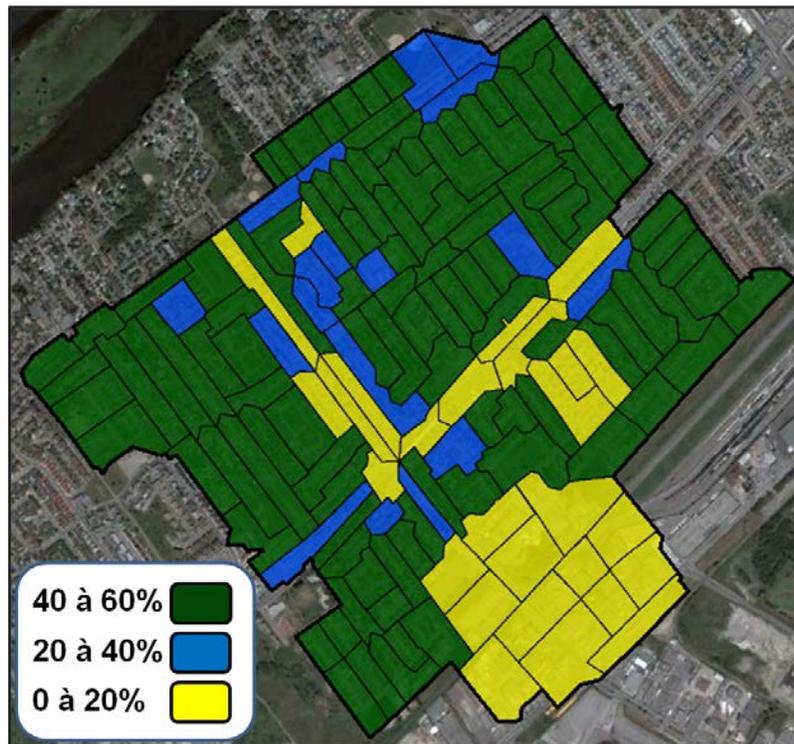


Figure 9.10 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur C

9.2.3.2. Systèmes de biorétention

Neuf zones imperméables ont été identifiées pour la mise en place de systèmes de biorétention pour le secteur C. Au total, ce sont 32 systèmes de biorétention, totalisant 0,27 ha, qui captent les eaux de ruissellement de 5,75 ha de surfaces imperméables (Tableau 9.11). La Figure 9.11 montre l'emplacement de chacune des zones

imperméables drainées par les systèmes de biorétention. Peu de systèmes de biorétention ont été intégrés dans le secteur industriel situé au sud du territoire. Les zones imperméables qui s'y trouvent correspondent essentiellement à des surfaces d'entreposage jugées inadéquates pour la mise en place de systèmes de biorétention.

Tableau 9.11 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur C dans le cadre des scénarios d'adaptation (voir Figure 9.11 pour la localisation des zones imperméables)

Zone imperméable	Nombre systèmes biorétention	Superficie système biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)	Secteur
1	7	538	11 504	Commercial
2	4	200	4 482	Institutionnel
3	4	333	6 380	Commercial
4	3	369	7 777	Industriel
5	3	519	11 157	Industriel
6	2	176	3 767	Industriel
7	3	306	6 588	Commercial
8	4	124	2 573	Commercial
9	2	146	3 306	Institutionnel
Total	32	2 711	57 534	

9.2.4. Secteur D

Trois mesures d'adaptation différentes ont été retenues pour le secteur D à savoir le débranchement de gouttières, les systèmes de biorétention et le redimensionnement de conduites. La Figure 9.12 présente ces scénarios d'adaptation. Deux scénarios ont été considérés pour les systèmes de biorétention (ces scénarios sont décrits à la section 9.2.4.1.2).

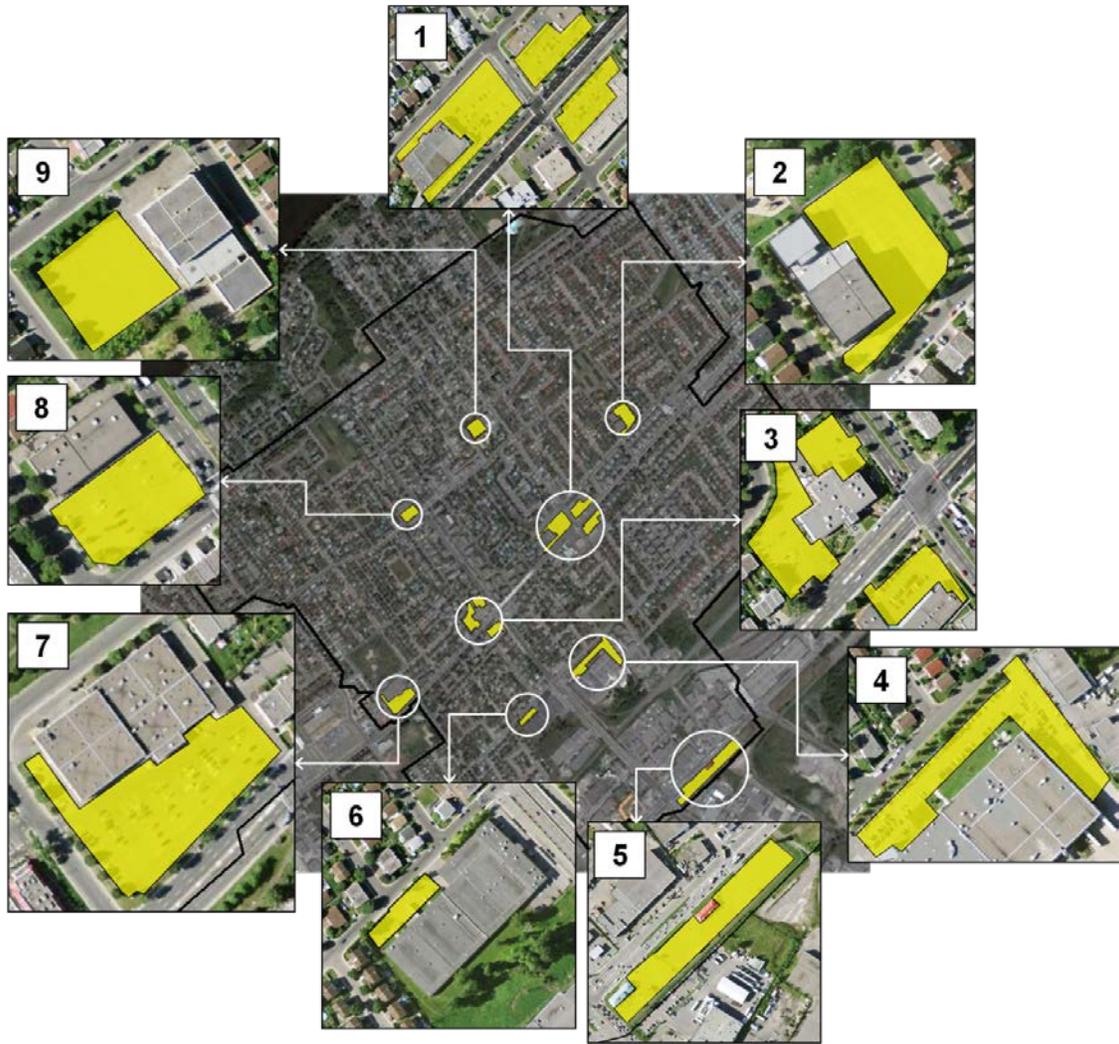


Figure 9.11 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur C (voir Tableau 9.11).

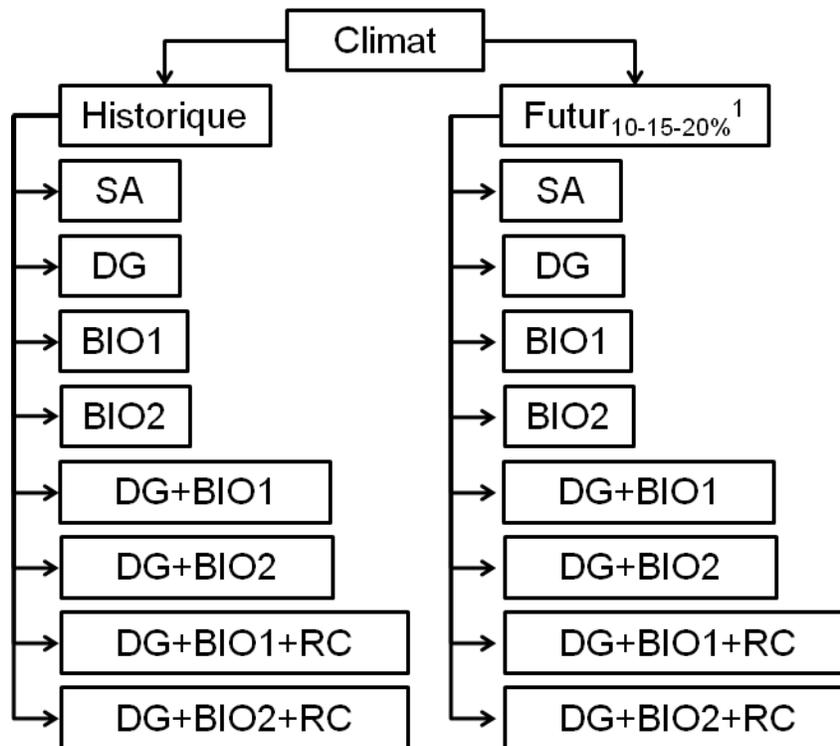


Figure 9.12 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur D (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BIO1, BIO2 : systèmes de biorétention 1 et 2; RC : redimensionnement de conduites. Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.

9.2.4.1. Débranchement de gouttières

Le secteur D est l'un des plus imperméables à l'étude. On y retrouve de grandes zones commerciales et industrielles où le débranchement de gouttières ne peut s'appliquer. La superficie totale des toits en pente représente 7,1 % de la surface du territoire ce qui se compare au secteur A (6,4 %). Au total, le scénario de DG permet de déconnecter un peu plus de 7 ha de SIDC. Le Tableau 9.12 montre les rapports SIIC/SIT avant et après mise en place du scénario de DG. La Figure 9.13 présente la carte des augmentations relatives des SIIC pour chacun des sous-bassins de drainage.

Tableau 9.12 : Proportion de SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG pour le secteur D.

Débranchement de gouttières ¹	SIIC/SIT (%)
45% ²	10,7
70% ²	13,6

¹Basé sur la superficie totale des toits des maisons en pente en milieu résidentiel.

²Selon les résultats obtenus par les villes des secteurs E et F suite à la réalisation de leur programme de DG.

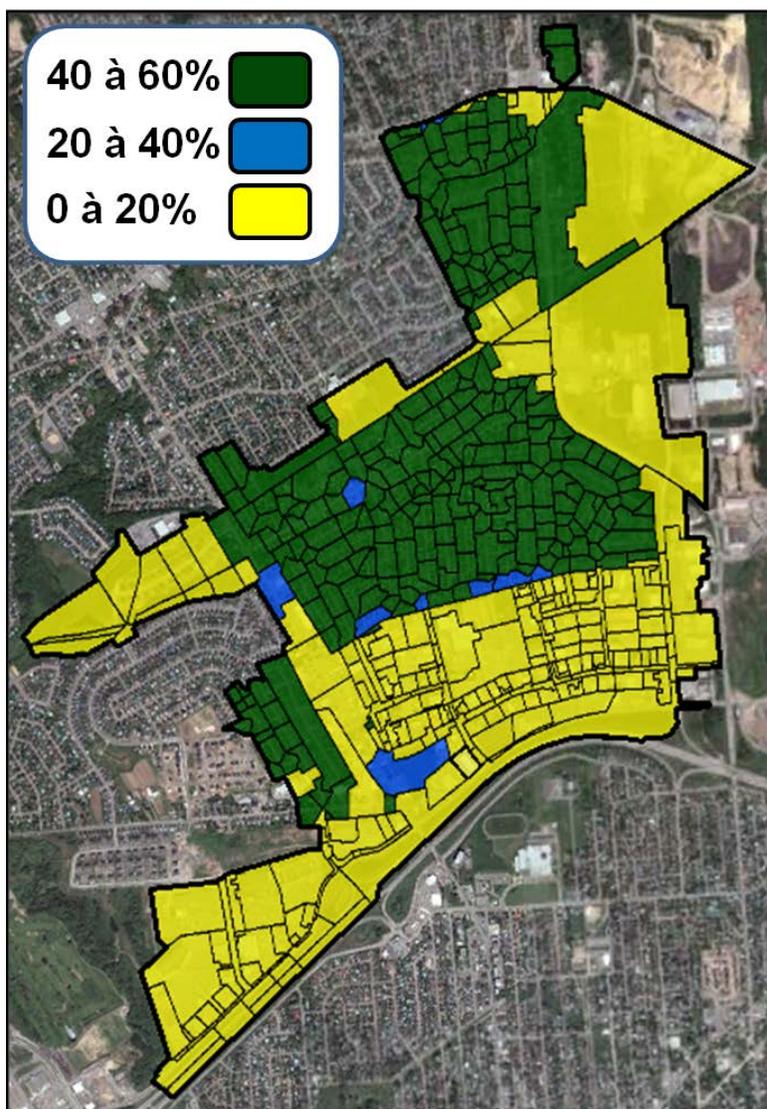


Figure 9.13 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur D.

9.2.4.2. Systèmes de biorétention

Deux scénarios incluant des systèmes de biorétention ont été créés pour le secteur D. Pour le premier scénario, appelé BIO1, des systèmes de biorétention ont été ajoutés sur l'ensemble du territoire excepté dans la grande zone commerciale située au sud du territoire (« Méga Centre ») (voir encadré de la Figure 9.15). Au total 21 systèmes de biorétention ont été mis en place et répartis selon sept zones où dominant les surfaces imperméables et correspondent à des aires de stationnements (Figure 9.14). La superficie totale des systèmes de biorétention est de 0,35 ha et ils drainent un total de 6,8 ha de surfaces imperméables (Tableau 9.13).

Tableau 9.13 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur D dans le cadre du scénario d'adaptation BIO1 (voir Figure 9.14).

Zone imperméable	Nombre systèmes biorétention	Superficie systèmes biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)	Secteur
1	3	1 229	25 202	Commercial
2	5	667	11 832	Institutionnel
3	2	362	7 249	Commercial
4	5	739	14 206	Commercial
5	2	109	2 036	Commercial
6	3	255	5 000	Commercial
7	1	157	2 853	Commercial
Total	21	3 518	68 378	



Figure 9.14 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention (scénario BIO1) pour le secteur D.

Le second scénario, appelé BIO2, considère également la grande zone imperméable nommée « Méga Centre » pour lequel aucun aménagement n'est considéré dans le cadre du scénario BIO1. Ainsi, plusieurs systèmes de biorétention ont été ajoutés dans cette zone en plus des systèmes de biorétention du scénario BIO1. Le scénario BIO2 comprend 24 systèmes de biorétention de plus que le scénario BIO1 pour un total de 45 (Figure 9.15). La superficie totale des systèmes de biorétention est d'un peu plus de 0,7 ha et draine les eaux de ruissellement de 14,5 ha de surfaces imperméables (Tableau 9.14).

L'examen de ces deux scénarios se justifie par la position très particulière de la zone commerciale qui se trouve dans la partie aval du secteur. De ce fait, il est pertinent de distinguer une implantation de systèmes de biorétention dans la zone résidentielle (BIO1) et dans les zones résidentielles et commerciales (BIO2).

Tableau 9.14 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur D dans le cadre du scénario d'adaptation BIO2 (voir Figure 9.15)

Zone imperméable	Nombre systèmes biorétention	Superficie système biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)
1	4	774	14 586
2	3	316	5 740
3	7	876	16 852
4	2	478	8 674
5	1	220	3 909
6	1	142	2 570
7	8	603	23 191
8	2	290	5 267
9	3	668	13 388
10	8	1 623	32 497
11	1	102	1 811
12	1	190	3 446
13	1	177	3 207
14	1	144	2 607
15	1	101	1 787
16	1	323	5 693
Total	45	7 027	145 225

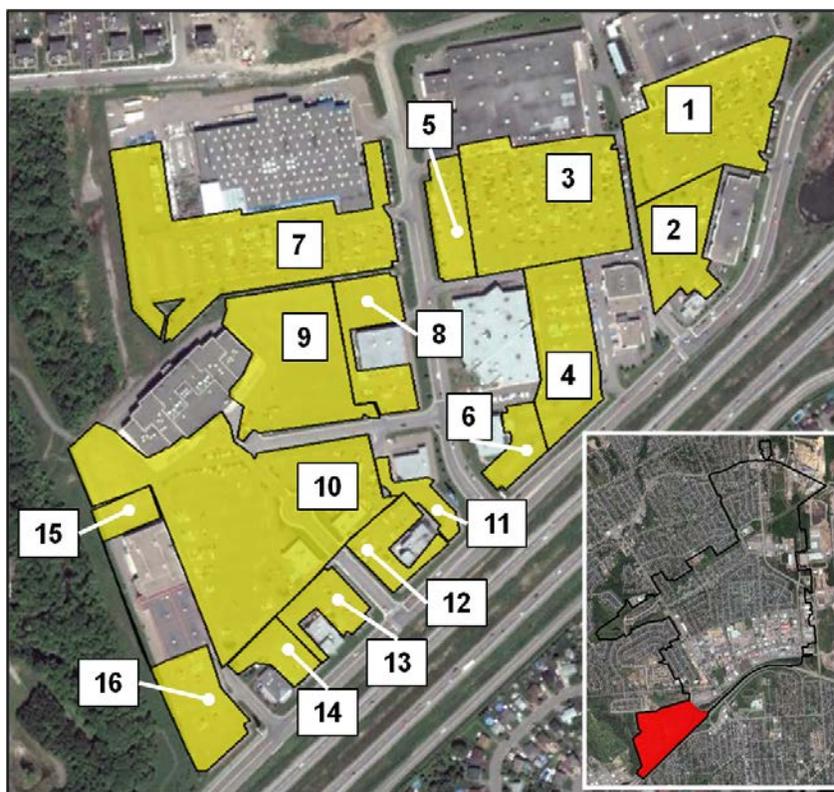


Figure 9.15 : Localisation des surfaces drainées par les systèmes de biorétention du scénario BIO2 de la zone commerciale « Méga Centre » localisée par la zone rouge de l'encadré pour le secteur D.

9.2.4.3. Redimensionnement de conduites

Un seul tronçon de conduites a été redimensionné dans le cadre du scénario de redimensionnement de conduites. Ce tronçon se situe sur la rue Adanac, à partir de la rue Fichet jusqu'à l'avenue du Semoir (Figure 9.16). Au total, 770 m de conduites de diamètre 1500 mm ont été remplacées par des conduites de 1800 mm. Ce tronçon a été choisi puisque les simulations montrent qu'il s'agit d'une zone présentant d'importantes mises en charge.

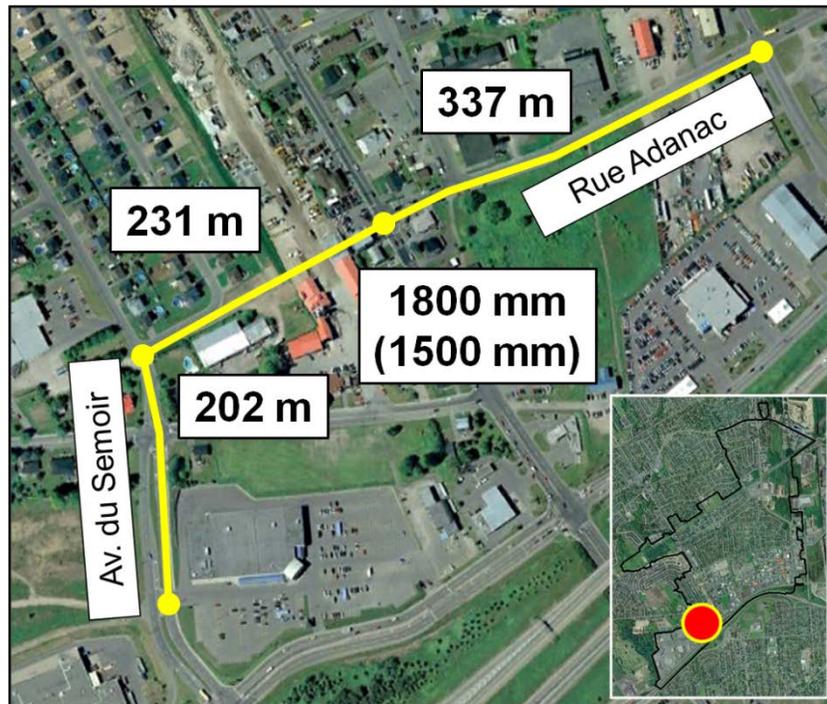


Figure 9.16 : Modifications apportées aux conduites du réseau du secteur D sur la rue Adanac et l'avenue du Semoir. Les chiffres entre parenthèses indiquent les diamètres avant redimensionnement. Le point rouge de l'encadré indique la position de ce sous-secteur.

9.2.5. Secteur E

Quatre mesures d'adaptation ont été retenues pour le secteur E à savoir le débranchement de gouttières, l'optimisation manuelle des bassins de rétention, l'ajout de systèmes de biorétention et le redimensionnement de conduites. A noter que le programme de DG est déjà en place mais a tout de même été considéré comme une mesure d'adaptation afin de simplifier la comparaison avec les autres secteurs. La Figure 9.17 présente ces scénarios d'adaptation.

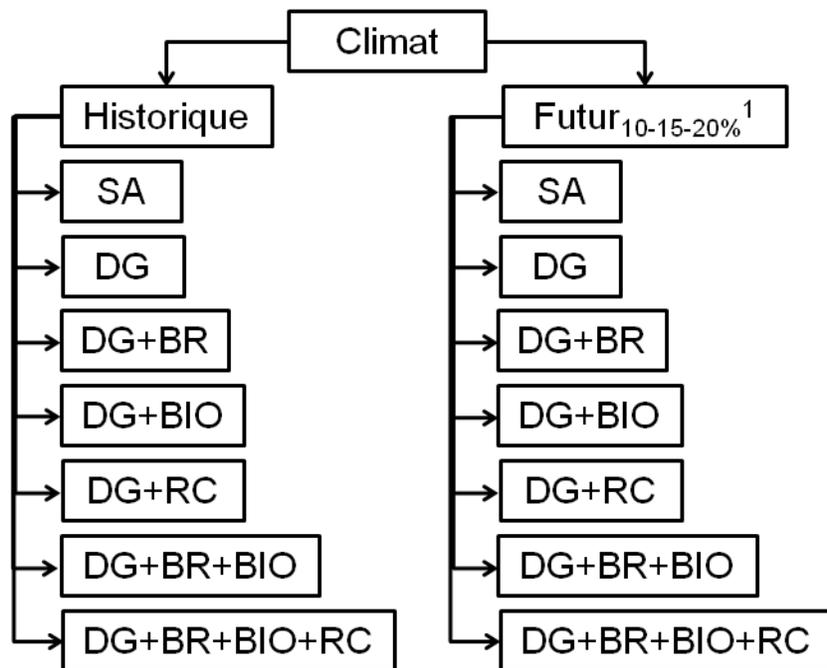


Figure 9.17 : Liste des scénarios d'adaptation considérés pour le secteur E (SA : sans adaptation; DG : débranchement de gouttières; BR : optimisation manuelle des bassins de rétention; BIO : systèmes de biorétention; RC : redimensionnement de conduites). Les augmentations des intensités de pluie en climat futur considérées sont de 10, 15 et 20 %.

9.2.5.1. Débranchement de gouttières

La ville du secteur E a mis en place un programme de DG au cours des dernières années. Le scénario simulé se base, tout comme les scénarios de DG des autres secteurs, sur les résultats des visites effectuées par les municipalités des secteurs E et F. Le Tableau 9.15 montre comment les SIIC évoluent par rapport aux SIT sur l'ensemble du territoire avec le scénario de DG comparativement à la situation sans débranchement de gouttières. La Figure 9.18 quant à elle affiche l'augmentation relative des SIIC pour chacun des sous-bassins de drainage avec débranchement de gouttières. A noter que l'analyse de ce scénario s'est effectué en comparant la situation en climat futur à la situation en climat historique sans mise en place du programme de DG.

Tableau 9.15 : Proportion des SIIC par rapport aux SIT suite à l'application du scénario de DG sur l'ensemble du réseau de drainage E

Débranchement de gouttières ¹	SIIC/SIT (%)
45% ²	21,2
70% ²	27,5

¹Basé sur la superficie totale des toits des maisons en pente en milieu résidentiel.

²Selon les résultats obtenus par les villes des secteurs E et F suite à la réalisation de leur programme de DG.

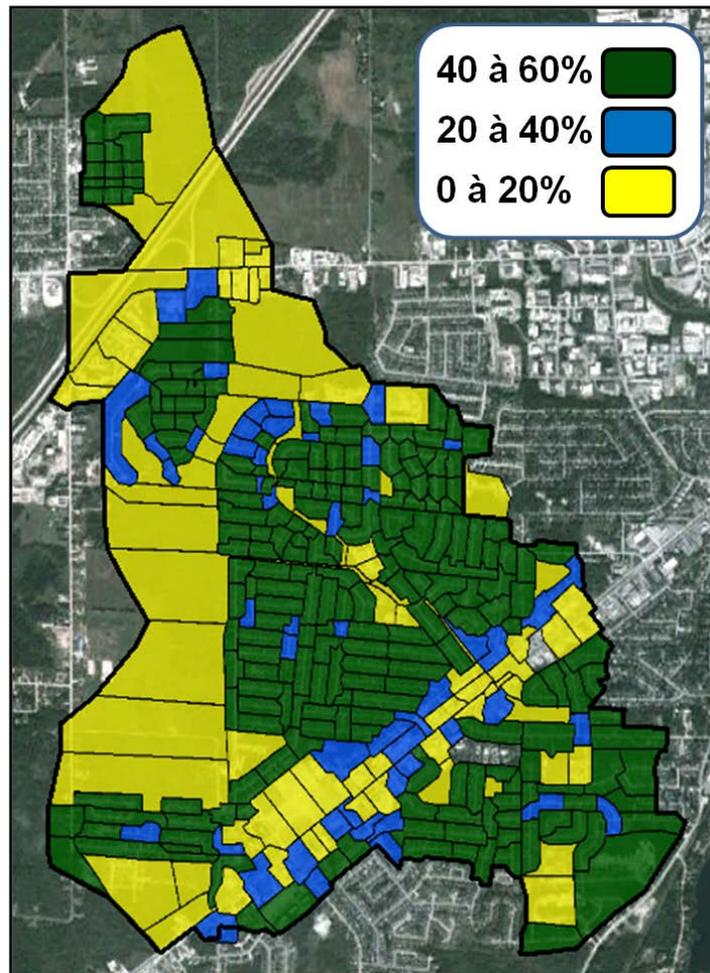


Figure 9.18 : Augmentation relative des SIIC pour chaque sous-bassin de drainage du secteur E suite à la mise en place du programme de DG.

9.2.5.2. Optimisation manuelle des bassins de rétention

Le secteur E comprend plusieurs bassins de rétention de grandes dimensions (voir Figure 5.24). Des simulations préliminaires ont permis de constater que les volumes de stockage de ces ouvrages n'étaient pas utilisés de façon optimale. Les structures de vidange de ces bassins ont été modifiées afin de maximiser l'utilisation des capacités disponibles en considérant une pluie SEA d'une heure de période de retour 20 ans en climat futur générant 46,8 mm de pluie. Il est important de noter que la période de retour utilisée pour la conception des bassins de rétention est de 25 ans (communication personnelle de Patrice Grondin) et que, pour une durée d'événement d'une heure, cela correspond à un événement de pluie d'environ 41 mm en climat historique. Une optimisation de ces ouvrages a donc été effectuée en fonction des conditions climatiques futures.

Les structures de vidanges actuelles correspondent à des conduites de capacité fixe. Dans le modèle, elles ont été remplacées par des ouvrages de type *Outlet* lesquels permettent de déterminer le débit de sortie en fonction de la hauteur d'eau dans le bassin de rétention ce qui s'apparente à une vanne régulatrice. Le Tableau 9.16 montre les changements survenus dans l'utilisation maximale du volume disponible et dans les débits à la sortie suite à l'optimisation manuelle des bassins de rétention. Un jeu de paramètre correspondant à des conditions médianes a été utilisé pour réaliser l'optimisation des bassins de rétention (voir Tableau 6.1).

Tableau 9.16 : Capacité maximale atteinte et débits de pointe à la sortie des bassins de rétention pour une pluie en climat futur de période de retour 20 ans du secteur E suite à la modification des structures de vidanges (voir Figure 5.24 pour une localisation des bassins)

Bassin de rétention	Capacité maximale		Débit de pointe	
	atteinte (%)		à la sortie (m ³ /sec)	
	Avant	Après	Avant	Après
PO-1	7	4	0,05	0,004
PO-2	68	79	0,38	0,33
PO-4	64	66	0,16	0,12
PO-5	100	90	0,13	0,28
PO-6	31	41	0,26	0,015
PO-8	1	1	0,29	0,29
PO-9	62	77	0,505	0,15
PO-10	46	90	0,18	0,01

Plusieurs critères devaient être respectés lors de l'optimisation des bassins de rétention :

1. L'utilisation maximale du volume du bassin de rétention ne doit pas dépasser 90 % pour la pluie de période de retour 20 ans en climat futur. Une marge de sécurité est ainsi maintenue dans le cas de situations plus contraignantes où, par exemple, les capacités d'infiltration sur l'ensemble du territoire sont plus faibles en raison d'une période de temps sec antérieure trop courte.
2. Le débit à la sortie des bassins de rétention ne doit pas dépasser 2 l/sec/ha pour une pluie de période de retour 2 ans en climat futur. Ce seuil est utilisé par la ville du secteur E lors de projet de développement (communication personnelle d'un intervenant de la ville en question).
3. Le débit à la sortie des bassins de rétention ne doit pas dépasser 10 l/sec/ha pour une pluie de période de retour 20 ans en climat futur. Les intervenants municipaux de la ville du secteur E utilisent ce seuil pour une pluie de période de retour 25 ans en climat historique (communication personnelle d'un intervenant de la ville en question). Ce seuil a été considéré pour la pluie de période de retour 20 ans en climat futur.

4. La vidange des bassins de rétention doit être complétée dans les 48 heures suivant la fin de l'événement de pluie.

Il est important de noter qu'il ne s'agit pas d'une optimisation automatique visant à évaluer toute l'étendue des possibilités afin de trouver les meilleures valeurs pour les débits de sortie permettant de respecter les critères fixés auparavant. Il s'agit d'une optimisation dite manuelle car les résultats ont été analysés après chaque simulation afin d'évaluer les modifications à effectuer pour la prochaine simulation et ce, jusqu'à ce que les critères fixés précédemment soient rencontrés.

L'optimisation manuelle a été réalisée en débutant avec le bassin de rétention le plus en amont sur le territoire (PO-6) puisque tous les bassins de rétention se trouvent sur l'axe du ruisseau et sont donc en quelque sorte connectés entre eux. Ensuite, pour chacun des bassins de rétention, des débits de sortie pour différentes hauteurs d'eau ont été déterminés. Ces débits de sortie ont alors été modifiés de façon à maximiser la rétention par rapport à la capacité totale de chacun des ouvrages sans toutefois que la vidange ne perdure plus de 48 heures ou que les débits de sortie dépassent les critères présentés précédemment pour les périodes de retour 2 et 20 ans.

Certaines particularités suite à l'optimisation manuelle des ouvrages de vidange des bassins de rétention nécessitent également d'être expliquées :

- Bassin PO-1 : En raison des diminutions des débits par les bassins de rétention situés en amont du bassin de rétention PO-1, moins d'eau entre dans ce bassin. La hauteur d'eau dans le ruisseau est donc moins élevée ce qui implique que le volume d'eau passant par le déversoir est moins important (voir Section 5.5.2).
- Bassin PO-5 : En climat historique, le bassin de rétention PO-5 déborde en raison de débits de sortie trop faibles. Dans ce cas-ci, les structures de vidanges ont été ajustées afin d'atteindre 90 % de la capacité maximale du bassin de rétention et ainsi éviter les débordements ce qui explique les résultats du Tableau 9.15 où la capacité maximale atteinte est inférieure et les débits de pointe supérieurs après optimisation des bassins de rétention.

- Bassin PO-6 : Le bassin de rétention PO-6 est actuellement surdimensionné considérant la surface qu'il draine. Ainsi, nous avons utilisé un débit de sortie qui nous permettait d'étirer la vidange du bassin de rétention sur les 48 heures fixées préalablement.
- Bassin PO-8 : Le bassin de rétention PO-8 est très particulier en ce sens que les eaux doivent déborder du ruisseau pour s'écouler dans la rue Viel avant d'atteindre le bassin de rétention. Il semble toutefois que le volume d'eau atteignant ce bassin de rétention est négligeable. Dès lors, les structures actuelles n'ont pas été modifiées.

La performance des bassins de rétention a également été évaluée avec une pluie de projet triangulaire de durée 24 heures. Il s'avère toutefois que la pluie d'une heure est plus contraignante et remplit davantage les bassins de rétention.

9.2.5.3. *Systèmes de biorétention*

Quatorze zones imperméables, situées en milieu commercial, ont été identifiées pour la mise en place de systèmes de biorétention sur le secteur E (Figure 9.19). Au total, ce sont 79 systèmes de biorétention, totalisant 0,59 ha et captant les eaux de ruissellement de 13,1 ha de surfaces imperméables qui ont été mis en place (Tableau 9.17). Tous les systèmes de biorétention se trouvent le long du boulevard Bourque, artère commerciale qui traverse tout le secteur au sud du territoire (visible sur la carte de la Figure 9.19). Bien que la zone 11 soit très grande, plus de 7,5 ha, il a été jugé réaliste d'y intégrer des systèmes de biorétention puisqu'un nouveau projet commercial devrait y voir le jour au cours de prochaines années.

Tableau 9.17 : Caractéristiques des systèmes de biorétention intégrés à la modélisation du secteur E dans le cadre des scénarios d'adaptation.

Zone imperméable	Nb systèmes biorétention	Superficie systèmes biorétention (m ²)	Superficie drainée (m ²)
1	4	375	8 049
2	3	122	2 626
3	1	89	1 989
4	1	134	2 939
5	8	371	8 192
6	6	270	5 891
7	1	115	2 555
8	1	73	1 570
9	3	273	6 696
10	4	212	5 389
11	37	3 394	75 673
12	3	201	3 362
13	6	227	5 060
14	1	31	693
Total	79	5 887	130 684

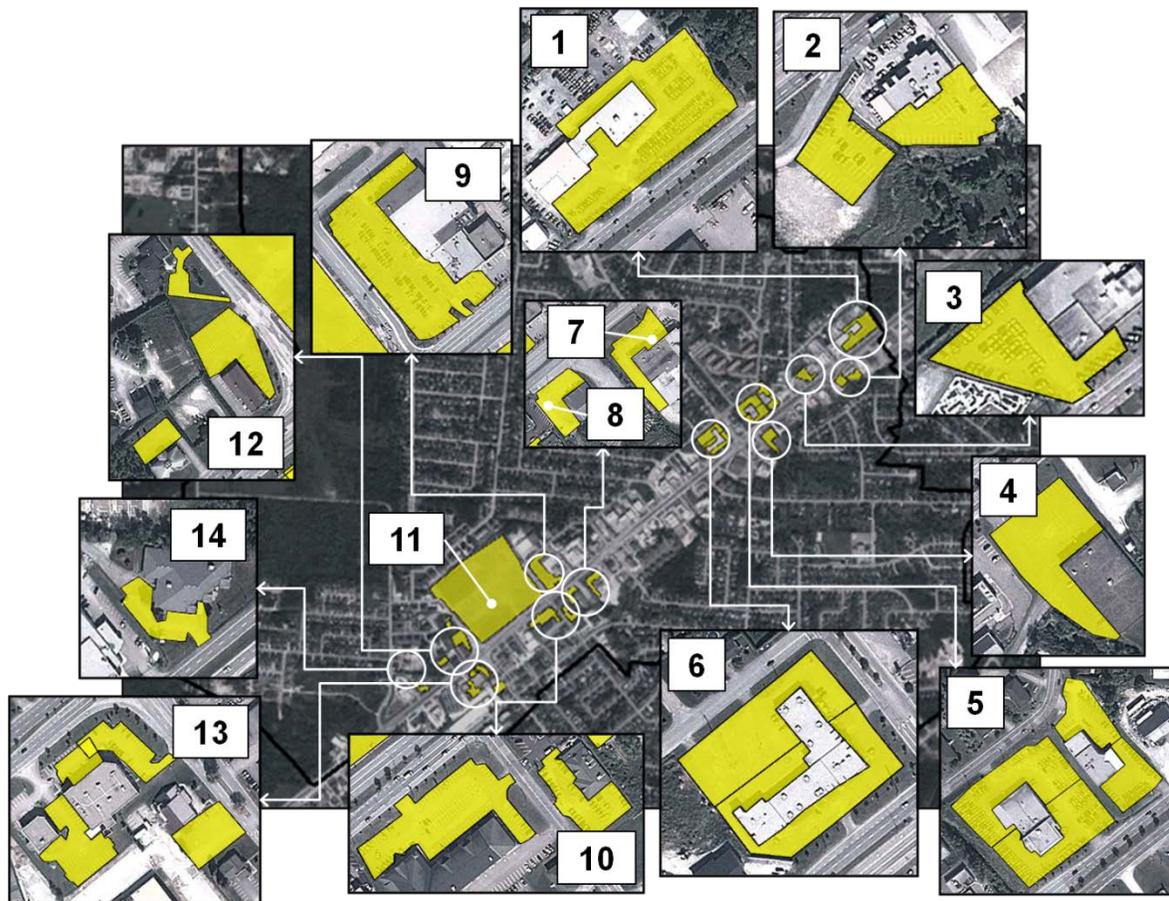


Figure 9.19 : Localisation des surfaces drainées par des systèmes de biorétention pour le secteur E.

9.2.5.4. Redimensionnement de conduites

Trois tronçons de conduites sont considérés pour le redimensionnement de conduites. Le premier, le plus important en termes de longueur, est le tronçon sous la rue Charlevoix. La configuration du réseau à cet endroit nécessite des modifications puisque les conduites y ont un diamètre de 900 mm alors que les conduites en amont ont un diamètre supérieur de 1050 mm. Les conduites du tronçon sous la rue Charlevoix d'une longueur de 333 m ont donc été redimensionnées à 1050 mm (Figure 9.20).



Figure 9.20 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous la rue Charlevoix dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux diamètres originaux alors que celles qui ne sont pas entre parenthèses correspondent aux valeurs après redimensionnement.

Le second cas de redimensionnement se trouve sur la rue de Gaspé, entre la rue Gibraltar et la limite sud-ouest de la zone d'étude. Certains problèmes surviennent dans cette zone lorsque la pluie de période de retour 10 ans en climat futur est considérée, majoritairement en raison du fait que l'on y retrouve plusieurs points bas. Ainsi, un peu moins de 800 m de conduites a été remplacé par des conduites de diamètre supérieur (Figure 9.21).

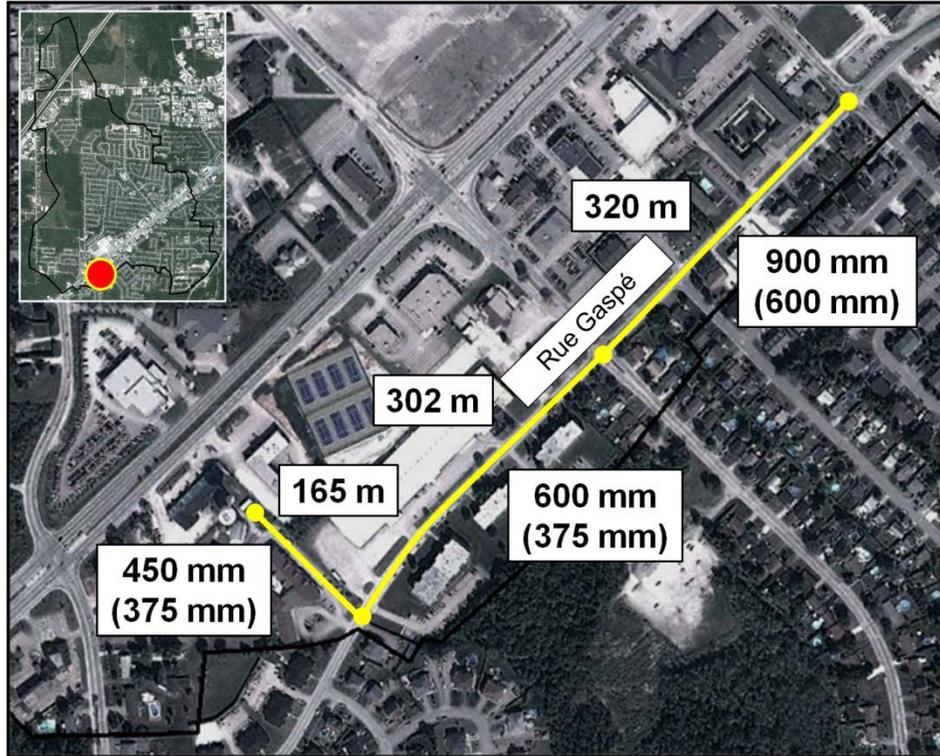


Figure 9.21 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous la rue Gaspé entre la rue Gibraltar et la limite sud-ouest de la zone d'étude dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux diamètres originaux alors que celles qui ne sont pas entre parenthèses correspondent aux valeurs après redimensionnement.

Un troisième cas de redimensionnement de conduite a été considéré. Celui-ci est situé le long du boulevard Bourque, entre le boulevard Mi-Vallon et la limite nord-est du secteur à l'étude où les eaux de ruissellement s'écoulent dans une suite de fossés et de ponceaux. En raison du taux élevé d'imperméabilisation de ce secteur, les volumes de ruissellement sont importants et quelques problématiques apparaissent avec la pluie de période de retour 10 ans en climat futur. Pour ces raisons, des conduites ont été ajoutées en remplacement des fossés. Au total, environ 600 mètres de conduites ont été modélisés (Figure 9.22). Le diamètre des conduites est de 600 mm en amont et augmente jusqu'à 900 mm avant d'arriver dans le ruisseau Mi-Vallon.

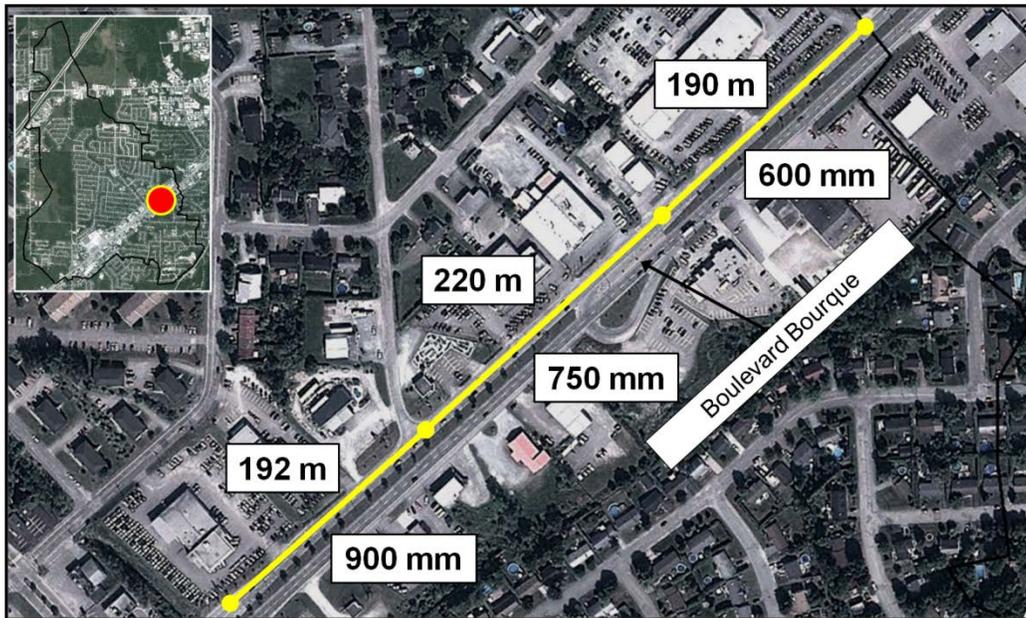


Figure 9.22 : Modifications apportées au tronçon du réseau sous le boulevard Bourque entre le boulevard Mi-Vallon et la limite nord-est de la zone d'étude dans le cadre du redimensionnement de conduites du secteur E. Le point rouge de l'encadré localise ce quartier dans le secteur E.

9.3. Indices de comparaison des niveaux de service en climat futur et historique

Un indice a été défini afin de comparer les niveaux de service en climat futur et historique offert par les différents scénarios d'adaptation. Soit $I_0^{(f)}$ la valeur de l'un des indicateurs I définis à la Section 6.3 (volume de surverse, nombre de nœuds critiques, etc.) en climat futur sans adaptation (l'indice 0 réfère à la situation où aucune mesure d'adaptation n'est considérée et la lettre « f » à futur), $I_0^{(h)}$ la valeur de ce même indicateur en climat historique sans adaptation (« h » pour historique) et enfin $I_j^{(f)}$ sa valeur en climat futur lorsque le scénario d'adaptation j est mis en place. L'indice d'adaptation $x_{I,j}$ pour l'indicateur I et le scénario d'adaptation j est défini par l'expression suivante :

$$x_{I,j} = 1 - \left(\frac{I_0^{(f)} - I_j^{(f)}}{I_0^{(f)} - I_0^{(h)}} \right) \quad (9.1)$$

L'indice adaptation permet donc de déterminer si le scénario d'adaptation considéré permet ou non, d'une part, d'améliorer le niveau de service en climat futur par rapport à la situation sans adaptation et, d'autre part, si ce scénario d'adaptation permet de récupérer en climat futur les niveaux de service en climat historique. Le Tableau 9.18 présente les différents cas de figures. En résumé, une valeur près de zéro de l'indice adaptation indique que la mise en place du scénario d'adaptation permet de récupérer en grande partie le niveau de service en climat historique alors qu'une valeur près de un indique que le scénario d'adaptation n'améliore pas le niveau de service en climat futur par rapport à la situation sans adaptation.

9.4. Secteurs desservis par des réseaux unitaires

La présente section regroupe l'ensemble des résultats pour les deux secteurs drainés par des réseaux unitaires B et C. Pour les indicateurs Surverse et Usine, seuls les résultats pour la période de retour 2 ans sont présentés puisque les scénarios d'adaptation considérés ont peu d'impacts pour les pluies de plus grandes périodes de retour (5 et 10 ans).

Il est important de noter que les résultats quant aux moyennes des dépassements maximaux ne sont pas présentés. Les résultats présentés à la Section 8.2.1 ont montré que pour certains jeux de paramètres, les dépassements moyens pouvaient être plus faibles en climat futur, sans scénario d'adaptation, comparativement au climat historique. En effet, en raison de l'augmentation de l'intensité de la pluie en climat futur, davantage de nœuds dépassent le seuil critique mais souvent avec une très faible ampleur ayant comme conséquence une diminution de la moyenne. À l'inverse, lorsqu'un scénario d'adaptation est ajouté, celui-ci peut diminuer le nombre de nœuds critiques où les dépassements du seuil sont de plus faibles amplitudes et ainsi augmenter la moyenne des dépassements maximaux au-delà des valeurs en climat historique et futur sans adaptation.

Tableau 9.18 : Domaines des valeurs possibles de l'indice adaptation, $x_{I,j}$, valeurs correspondantes des indicateurs de niveau de service et interprétation en termes des niveaux de service en climat futur par rapport au niveau de service historique et au niveau de service en climat futur sans adaptation

Valeurs de l'indice adaptation	Valeurs des indicateurs de niveau de service ¹	Interprétation
$x_{I,j} < 0$	$I_j^{(f)} < I_0^{(h)}$	Amélioration du niveau de service en climat futur après adaptation par rapport à la situation en climat historique
$x_{I,j} = 0$	$I_j^{(f)} = I_0^{(h)}$	Niveau de service en climat futur après adaptation égal au niveau de service en climat historique
$0 < x_{I,j} < 1$	$I_0^{(f)} < I_j^{(f)} < I_0^{(h)}$	Amélioration du niveau de service en climat futur après adaptation par rapport à la situation sans adaptation mais sans récupération des niveaux de service en climat historique
$x_{I,j} = 1$	$I_j^{(f)} = I_0^{(f)}$	Niveau de service en climat futur après adaptation égal au niveau de service en climat futur sans adaptation (impact nul du scénario d'adaptation)
$x_{I,j} > 1$	$I_j^{(f)} > I_0^{(f)}$	Détérioration du niveau de service en climat futur après adaptation par rapport à la situation sans adaptation

¹Les inégalités présentées et les interprétations données sont valables si une amélioration du niveau de service se traduit par une valeur de l'indicateur I plus faible. Dans le cas contraire, (amélioration du niveau de service se traduit par une augmentation de la valeur de l'indicateur), les fourchettes de valeurs de l'indice adaptation et les interprétations correspondantes demeurent inchangées mais les inégalités sont inversées.

9.4.1. Secteur C

Les trois scénarios d'adaptation retenus pour ce secteur sont l'ajout de systèmes de bio-rétention (BIO), le débranchement de gouttières (DG) et enfin une combinaison de ces deux types de mesures (voir Section 9.2.3 pour une description détaillée de ces scénarios).

9.4.1.1. Indicateurs Surverse et Usine

Les Figures 9.23 et 9.24 présentent les résultats des indices adaptation pour les indicateurs Surverse et Usine. Le scénario d'adaptation comprenant uniquement les systèmes de biorétention (BIO) est globalement moins performant que le scénario d'adaptation débranchement de gouttières (DG) tant pour l'indicateur Surverse que pour l'indicateur Usine. Il est important de mentionner toutefois que le scénario BIO draine les eaux de ruissellement provenant de 5,75 ha de surfaces imperméables alors qu'il est question d'un peu plus de 9 ha pour le scénario DG. La combinaison de ces deux mesures d'adaptation permet d'obtenir des rendements supérieurs aux mesures prises individuellement.

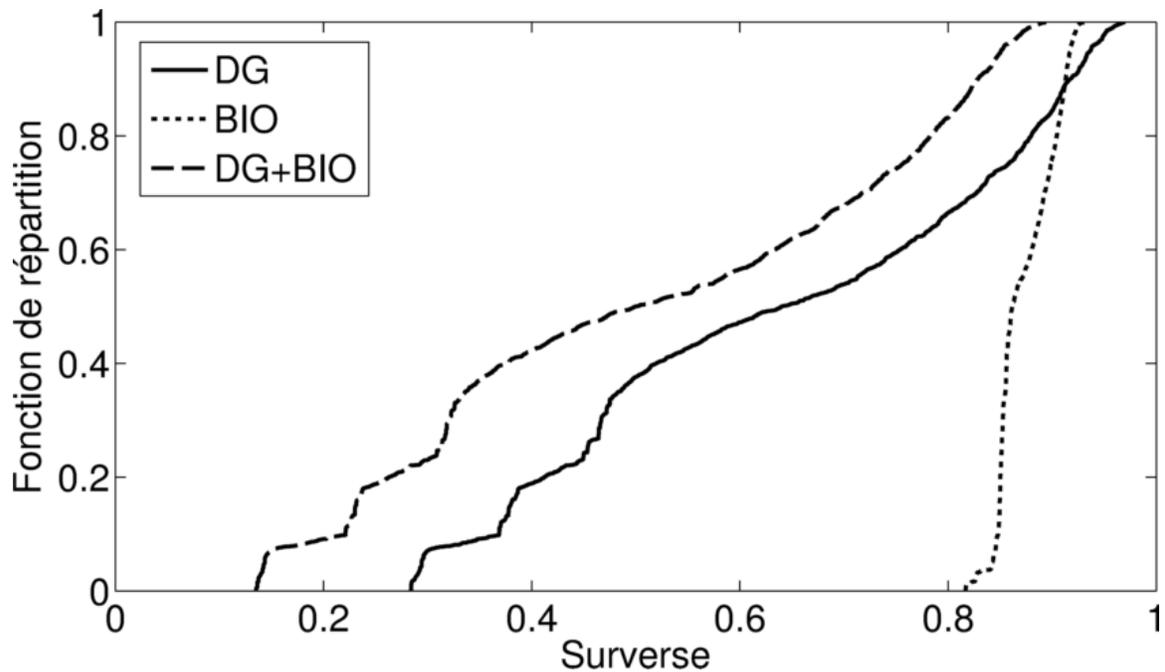


Figure 9.23 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Surverse pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.

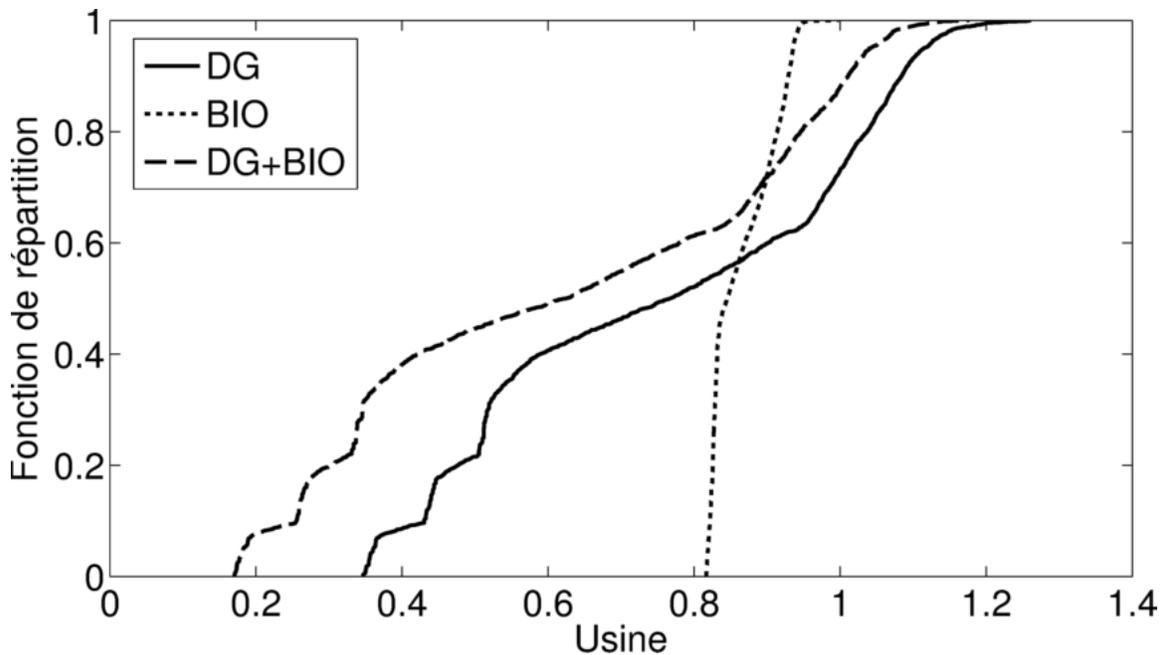


Figure 9.24 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Usine pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.

Les résultats obtenus avec le scénario d'adaptation BIO varient très peu en fonction des jeux de paramètres considérés (p. ex. pour l'indicateur Surverse l'indice varie de 0,82 à 0,92). Ceci s'explique par le fait que les valeurs des paramètres utilisés pour définir les systèmes de biorétention, par exemple les capacités d'infiltration, sont fixes. On estime en effet que la conception de ces ouvrages permet d'avoir un certain contrôle sur les paramètres clefs définissant leur performance. De plus, ils sont très peu affectés par les différents jeux de paramètres puisqu'ils drainent les eaux de ruissellement provenant de zones imperméables qui ne sont influencées que par les pertes par dépression et dans une moindre mesure par les capacités d'infiltration des zones perméables. Ainsi, la diminution des apports au réseau de drainage, engendrée par les systèmes de biorétention, est à peu près toujours la même. Les résultats du scénario d'adaptation DG sont, quant à eux, beaucoup plus dépendant de la paramétrisation, le potentiel du débranchement de gouttières étant essentiellement fonction des capacités d'infiltration des zones perméables vers lesquelles ces eaux de ruissellement sont redirigées. Ainsi, lorsque les capacités d'infiltration et les pertes par dépression des zones perméables

sont très limitées, l'ajout de systèmes de biorétention pourrait s'avérer plus intéressant que le débranchement de gouttières.

Les scénarios d'adaptation DG et BIO permettent, pour tous les jeux de paramètres, d'avoir des gains par rapport à la situation future sans adaptation en ce qui concerne les surverses (valeurs de l'indice compris entre 0 et 1). Toutefois, aucun d'eux ne permet de récupérer le niveau de service historique. Pour l'indicateur Usine, la situation est semblable, excepté pour le scénario DG où des valeurs supérieures à un sont possibles. Ces valeurs impliquent que, pour certains jeux de paramètres, il est possible d'augmenter les volumes acheminés à l'usine de traitement même si les volumes d'infiltration augmentent. L'écoulement de l'eau sur les surfaces perméables étant plus lent que sur les surfaces imperméables, il est possible que le débranchement de gouttières lamine les débits de ruissellement permettant d'acheminer un plus grand volume d'eau à l'usine.

9.4.1.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Concernant le nombre de nœuds critiques, le scénario d'adaptation DG permet une réduction plus importante du nombre de nœuds critiques que le scénario d'adaptation BIO pour la période de retour 2 ans (Figure 9.25). Deux raisons peuvent expliquer cette situation. D'abord, tel que mentionné précédemment, le scénario BIO implique une déconnection de superficies imperméables beaucoup moins importantes que pour le scénario DG. De plus, le DG touche tout le territoire et peut ainsi avoir des impacts sur un plus grand nombre de nœuds comparativement aux systèmes de biorétention qui sont des mesures localisées. La combinaison des deux mesures d'adaptation semble une option très intéressante. En effet, pour la valeur médiane, on obtient un indice d'adaptation inférieur à 0,3 alors que cette valeur est de près de 0,5 et de plus de 0,8 pour les scénarios DG et BIO pris individuellement (Figure 9.25).

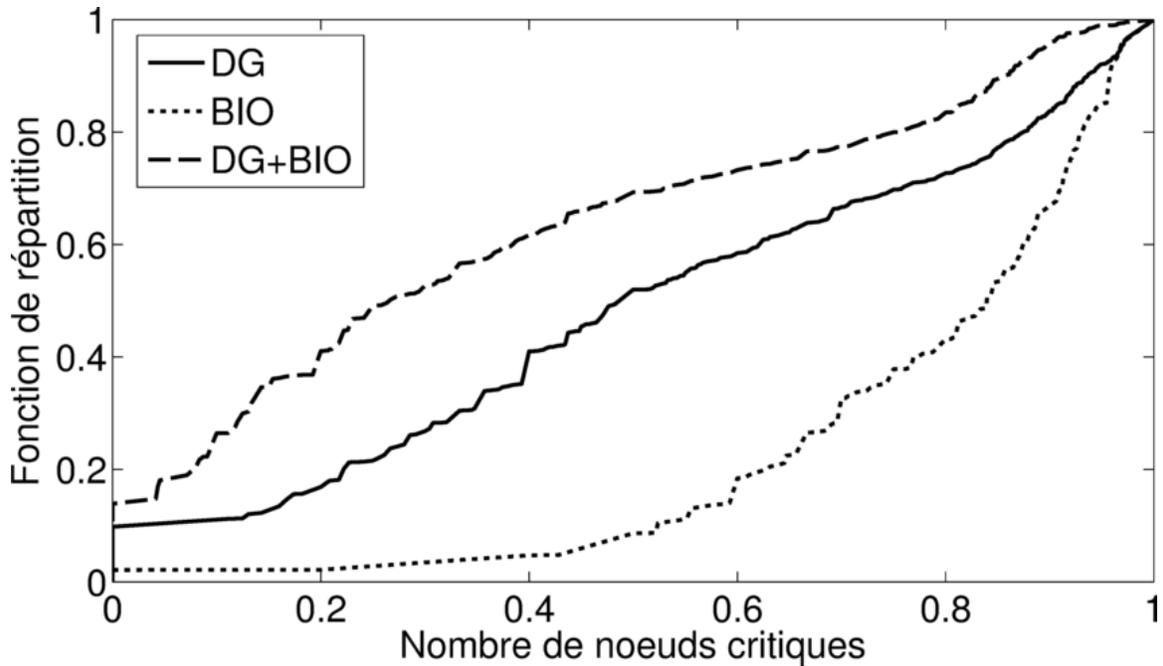


Figure 9.25 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nœuds critiques pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 2 ans.

Il est possible, pour quelques jeux de paramètres, après mise en place de ces trois scénarios d'adaptation, de récupérer les niveaux de service historiques. Bien que le nombre de jeux de paramètres soit négligeable pour le scénario BIO, il peut atteindre 10 % et même 15 % pour les scénarios DG et DG+BIO respectivement. Le scénario DG+BIO permet de se rapprocher des performances historiques pour plusieurs jeux de paramètres. En effet, environ 40 % des jeux de paramètres permettent d'obtenir un indice d'adaptation inférieure à 0,2 alors que moins de 20 % des jeux de paramètres permettent d'obtenir cette valeur avec le scénario DG. On peut voir l'impact important de ces scénarios sur le nombre de nœuds critiques pour les pluies de faibles intensités.

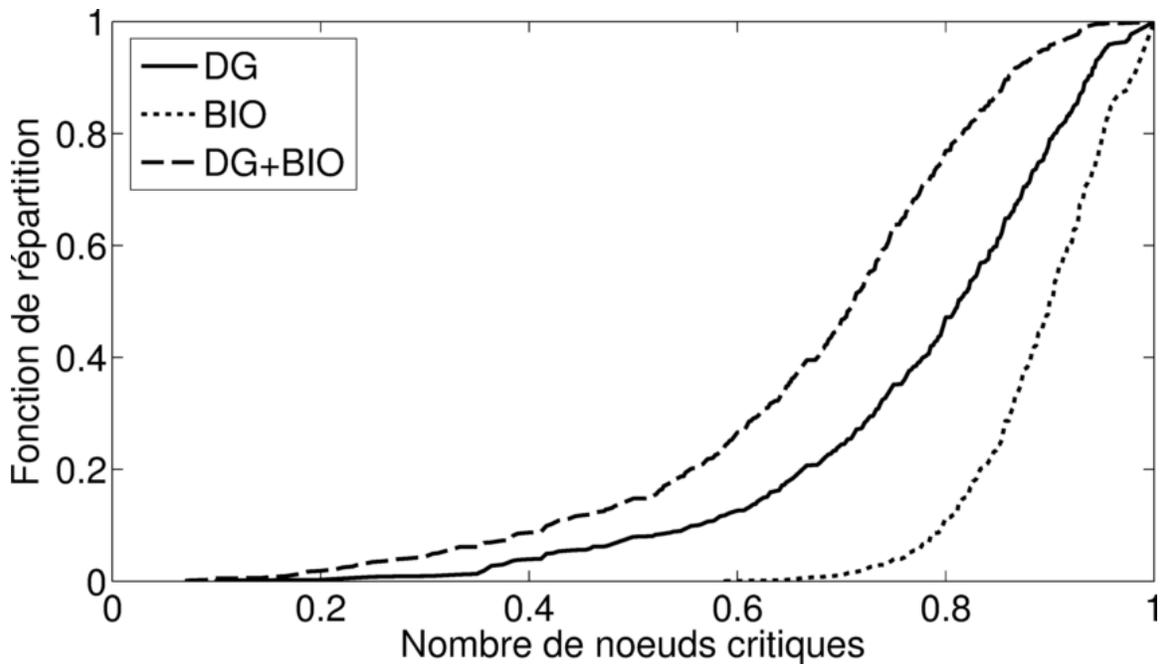


Figure 9.26 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nœuds critiques selon trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 5 ans.

Pour la période de retour 5 ans, on remarque à peu près le même patron que pour la période de retour 2 ans lorsque l'on compare les niveaux de service offerts par les différents scénarios d'adaptation (Figure 9.26). Ainsi, les systèmes de biorétention utilisés seuls sont moins performants que le DG et la combinaison des deux mesures d'adaptation est le scénario qui permet de se rapprocher le plus du niveau de service historique. Toutefois, le scénario DG+BIO peut sembler moins avantageux que pour la période de retour 2 ans. La valeur médiane de l'indice d'adaptation est de près de 0,7 pour le scénario DG+BIO alors qu'elle est d'un peu moins de 0,8 et 0,9 pour les scénarios DG et BIO respectivement. Ainsi, les écarts entre ces deux scénarios est beaucoup moins grand pour la période de retour 5 ans que pour la période de retour 2 ans. Il est tout de même intéressant, même si l'on sait que les gains des niveaux de service apportés par ces mesures s'amenuisent pour des événements de pluie plus extrêmes, de voir qu'elles contribuent tout de même à améliorer la situation pour des pluies de période de retour 5 ans.

Toujours en comparant les périodes de retour entre elles, on remarque que pour le scénario BIO, la variabilité des résultats est beaucoup moins importante pour la période de retour 5 ans que pour la période de retour 2 ans. Avec la période de retour 2 ans, le nombre de nœuds critiques pour certains jeux de paramètres est parfois très faible voire nul en climat historique pour certains jeux de paramètres. Le nombre de nœuds critiques peut légèrement augmenter en climat futur. Dans cette situation, le scénario BIO peut faire en sorte que l'indice adaptation soit très faible, voire nul en éliminant ces quelques nœuds critiques et parfois même tous les nœuds critiques. Toutefois, avec la période de retour 5 ans, le nombre de nœuds critiques augmente considérablement et il devient alors beaucoup plus difficile d'avoir un impact sur tous ces nœuds avec ce type de mesures d'adaptation.

Pour les scénarios d'adaptation incluant le DG, une légère diminution de la variabilité s'observe avec la période de retour 5 ans comparativement à la période de retour 2 ans. L'intensité de la pluie est beaucoup plus forte pour la période de retour 5 ans. En effet, pour l'indice adaptation, même les jeux de paramètres les plus favorables en matière d'infiltration ne sont pas en mesure de diminuer suffisamment les apports supplémentaires au réseau pour atteindre les mêmes valeurs qu'avec la période de retour 2 ans.

Pour les nœuds critiques, la figure pour la période de retour 10 ans n'a pas été ajoutée. Le patron des résultats est le même que pour la période de retour 5 ans excepté que, comme attendu, les valeurs sont décalées vers la droite, indiquant globalement une diminution de l'efficacité des mesures d'adaptation mises en place avec l'augmentation de la période de retour.

9.4.1.3. Indicateur Inondation

Pour l'indicateur Inondation, les figures pour les périodes de retour 2 et 10 ans ne sont pas présentées. Avec la période de retour 2 ans, pour plusieurs jeux de paramètres, la valeur de l'indicateur Inondation est nulle ou très près de zéro tant en climat historique que futur avec ou sans adaptation. Les valeurs de l'indice adaptation ne sont alors pas estimées. Pour la période de retour 10 ans, le patron des résultats est le même que pour la période de retour 5 ans, excepté que les valeurs sont décalées vers la droite

(valeurs plus près de 1 puisque l'impact des scénarios d'adaptation est moins grand). De plus, la période de retour 5 ans est plus intéressante puisqu'un événement pluvieux dont la période de retour a été estimée à 5 ans a déjà généré des inondations.

On peut distinguer deux cas de figures pour l'indicateur Inondation. Les résultats montrent que, pour près de 50 % des jeux de paramètres les valeurs pour l'indice adaptation sont relativement semblables pour les différents scénarios d'adaptation et varient entre 0,75 et 0,9 (Figure 9.27). Il semble donc que, dans certains cas, si les capacités d'infiltration des zones perméables sont faibles, des résultats similaires entre le DG et l'ajout de systèmes de biorétention seront obtenus. Ce constat est toujours valable même si le DG implique une diminution plus grande de SIDC et qu'il touche l'ensemble du territoire. Pour tous les autres jeux de paramètres, par contre, les scénarios incluant le DG offrent de bien meilleurs résultats. Ainsi, lorsque les capacités d'infiltration sont bonnes, le potentiel du DG pour réduire les inondations est intéressant alors qu'il demeure relativement modeste pour le scénario BIO.

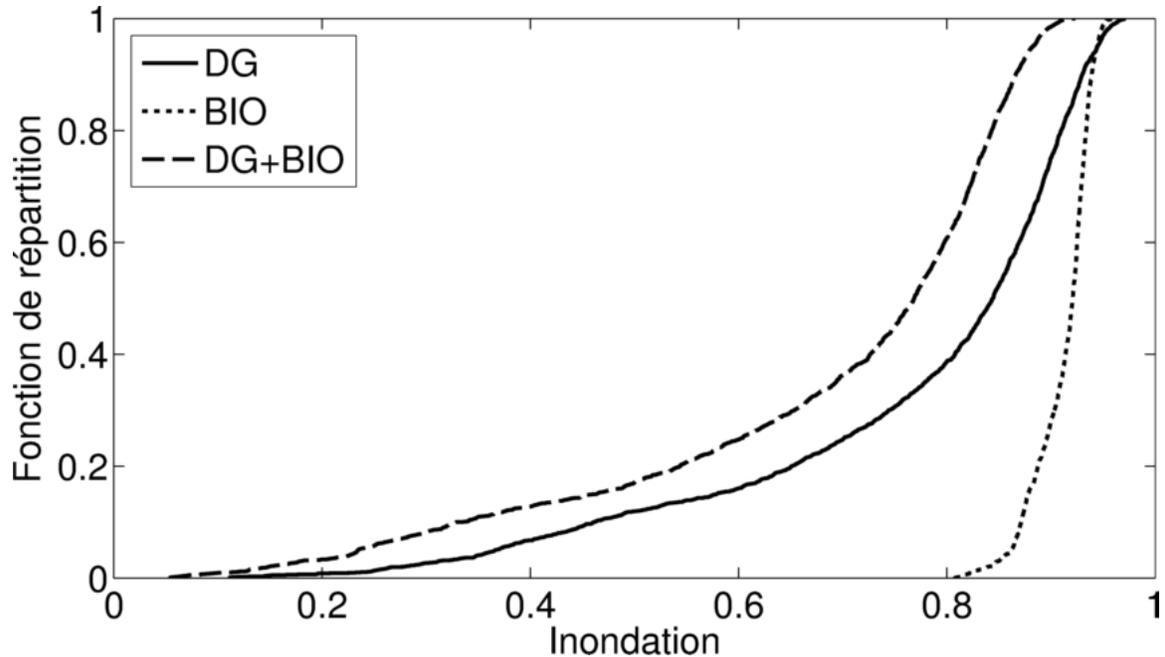


Figure 9.27 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage C et la période de retour 5 ans.

9.4.1.4. Synthèse des résultats pour le secteur C

Globalement, les résultats précédents montrent que :

- La mise en place des mesures d'adaptation permet d'améliorer le niveau de service en climat futur par rapport à la situation sans mesure d'adaptation. Les mesures permettent de réduire les volumes de surverses et les risques de mises en charge et d'inondations. Ces mesures sont d'autant plus efficaces que les événements de pluie considérés sont peu intenses et fréquents. Aucune des stratégies d'adaptation considérées ne permet toutefois de récupérer les niveaux de service historiques même pour la période de retour 2 ans, excepté pour certains jeux de paramètres pour le nombre de nœuds critiques lorsque la période de retour 2 ans est considérée.
- Le débranchement de gouttières offre de meilleurs résultats que l'ajout de systèmes de biorétention et ce pour l'ensemble des indicateurs considérés. Ceci s'explique par le fait que les superficies imperméables directement connectées impliquées dans le débranchement de gouttières soient plus importantes que celles relatives aux systèmes de biorétention. et par le fait qu'elles soient distribuées sur l'ensemble du territoire.
- Les résultats obtenus avec l'ajout de système de biorétention dépendent moins de la paramétrisation. Le fait que les valeurs des paramètres de conception pour ce type d'aménagement soient fixes explique cette situation. De plus, les systèmes de biorétention sont moins influencés par les différents jeux de paramètres, notamment explicable par le faible impact des paramètres d'infiltration sur les volumes d'eau qui y sont acheminés.
- Il est important de noter que le secteur de C est le secteur le plus problématique des cinq secteurs considérés puisque les risques de surcharges et d'inondations sont présents même pour la période de retour 5 ans. Les résultats montrent que, dans un tel cas, les impacts de la mise en place de mesures du type contrôle à la source (ici un programme de débranchement de gouttière et l'ajout de systèmes de biorétention) a un impact positif sur les risques d'inondations et de mise en charge. Cependant, la

seule mise en place de ces mesures ne permettra pas de récupérer les niveaux de service historiques.

9.4.2. Secteur B

Les trois scénarios d'adaptation retenus pour ce secteur sont l'ajout de systèmes de biorétention (BIO), le débranchement de gouttières (DG) et enfin une combinaison de ces deux types de mesures (voir Section 9.2.2 pour une description détaillée de ces scénarios).

9.4.2.1. Indicateurs Surverse et Usine

Pour le secteur B, contrairement au secteur C, le scénario BIO permet de récupérer des niveaux de service souvent comparables au scénario DG (Figures 9.28 et 9.29). Si les SIDC touchées par ces scénarios sont similaires pour le secteur B (7,6 ha pour le DG et 6,4 ha pour le scénario BIO), il en va tout autrement pour le secteur C où ces surfaces sont beaucoup plus importantes pour le scénario DG.

Pour l'indicateur Surverse, pour un peu plus de 40 % des jeux de paramètres, le scénario BIO permet d'atteindre des valeurs de l'indice adaptation inférieures à celles obtenues pour le scénario DG (à noter que le scénario BIO supplante le scénario DG lorsque les capacités d'infiltration des surfaces perméables du secteur sont peu favorables; Figure 9.28). La combinaison des deux mesures d'adaptation permet d'améliorer la situation de façon marquée par rapport à la situation où seulement l'une ou l'autre des mesures est mise en place. La valeur médiane de l'indice adaptation est inférieure à 0,5 dans ce cas alors qu'elle est supérieure à 0,7 pour le scénario DG.

Pour l'indicateur Surverse, on constate des valeurs de l'indice adaptation supérieures à un ce qui implique que plus d'eau a été dirigé en surverse après mise en place du programme de DG comparativement à la situation future sans adaptation et ce malgré la diminution des SIDC. Il est possible qu'en dirigeant davantage d'eau sur les surfaces perméables (ce que vise le programme de DG), les capacités d'infiltration de ces dernières diminuent plus rapidement et résultant en une diminution de la proportion d'eau infiltrée par rapport à la fraction d'eau ruisselée (cette hypothèse demanderait

toutefois à être davantage investiguée). Il est important de mentionner que cette situation demeure tout à fait marginale (elle survient seulement pour quelques jeux de paramètres correspondant à des capacités d'infiltration très faibles).

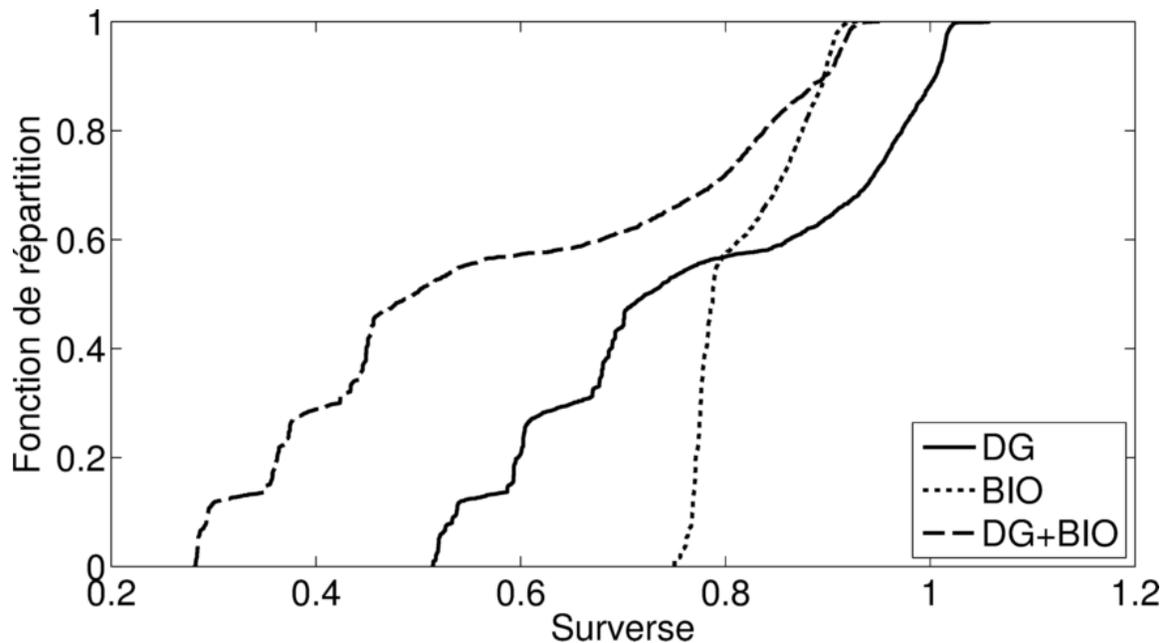


Figure 9.28 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Surverse pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 2 ans.

Pour l'indicateur Usine, une majorité de paramétrisation permet d'augmenter les volumes acheminés à l'usine par rapport à la situation sans adaptation (Figure 9.29). Le scénario DG donne toutefois des résultats plus variables comparativement au scénario BIO (indices adaptation allant de - 0,40 à 5,12 pour le scénario DG comparativement à 0,88 à 1,76 pour le scénario BIO). Les valeurs les plus extrêmes pour le DG ont été retirées pour avoir une meilleure représentation de l'ensemble des valeurs obtenues sur le graphique. Les résultats pour le secteur C montraient également une moins grande variabilité des indices adaptation pour les systèmes de biorétention, en raison de paramètres de conception fixes et de l'influence moins grande des jeux de paramètres sur les volumes d'eau qui y sont dirigés.

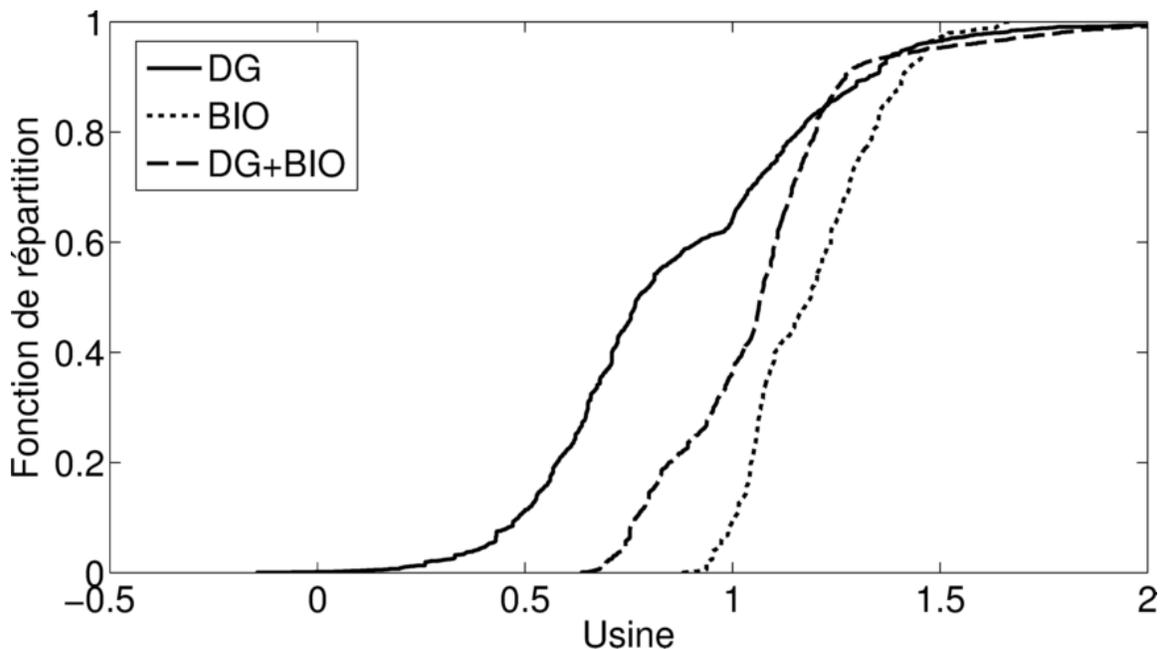


Figure 9.29 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Usine pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 2 ans.

Certaines valeurs de l'indice adaptation sont négatives pour le scénario DG, ce qui implique que moins d'eau a été dirigée à l'usine comparativement à la situation historique sans adaptation (Figure 9.29). Il faut voir que les variations enregistrées, bien que négatives, demeurent tout à fait négligeables (moins de 3 m^3). Toutefois, il est important de mentionner que pour le réseau de drainage B, les volumes d'eau acheminés à l'usine de traitement sont très petits en raison du seuil fixé à $0,13 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($DM_{\text{ax}}\text{TS}$, voir Section 5.2.2) au-delà duquel les eaux dirigées vers le collecteur sont déversées au milieu récepteur. Ainsi, pour la plus faible valeur de l'indice adaptation ($-0,25$), les volumes d'eau acheminés à l'usine n'ont diminué que de 15 m^3 et 3 m^3 par rapport à la situation future et historique sans adaptation respectivement. À l'inverse, pour l'indice adaptation le plus élevé ($5,66$), les volumes d'eau acheminés à l'usine n'ont diminué que de 857 m^3 et 1040 m^3 par rapport à la situation future et historique sans adaptation respectivement. Par rapport à la pluie totale, ce sont des augmentations de seulement $0,0016 \%$.

9.4.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Pour les nœuds critiques, seuls les résultats pour la période de retour 5 ans sont présentés. Les résultats pour la période de retour 10 ans sont très similaires à ceux de la période de retour 5 ans si ce n'est que les courbes sont décalées vers la droite.

Les résultats sont similaires au réseau de drainage C pour la période de retour 5 ans (Figure 9.30). Ainsi, les systèmes de biorétention utilisés seuls sont dans l'ensemble moins performants que le DG, et ce même si les SIDC touchées sont à peu près équivalentes. Il semble donc que, même si les superficies des SIDC en jeu sont similaires, le fait que le DG touche l'ensemble du territoire favorise une diminution plus élevée du nombre de nœuds critiques pour l'ensemble des jeux de paramètres considéré.

La combinaison des deux types de mesures d'adaptation conduit à la situation qui permet de se rapprocher le plus de la situation historique (Figure 9.30). Alors que les valeurs médianes de l'indice adaptation sont similaires pour les scénarios DG et BIO (rapport secteur B/secteur C de 0,76/0,81 et 0,89/0,90 pour DG et BIO respectivement), l'écart est plus grand avec le scénario DG+BIO (0,63/0,71 pour rapport secteur B/secteur C).

Globalement, le nombre de nœuds critiques diminue par rapport à la situation future sans adaptation quel que soit le jeu de paramètres. Cependant, aucun des scénarios d'adaptation ne permet de récupérer les niveaux de service historiques.

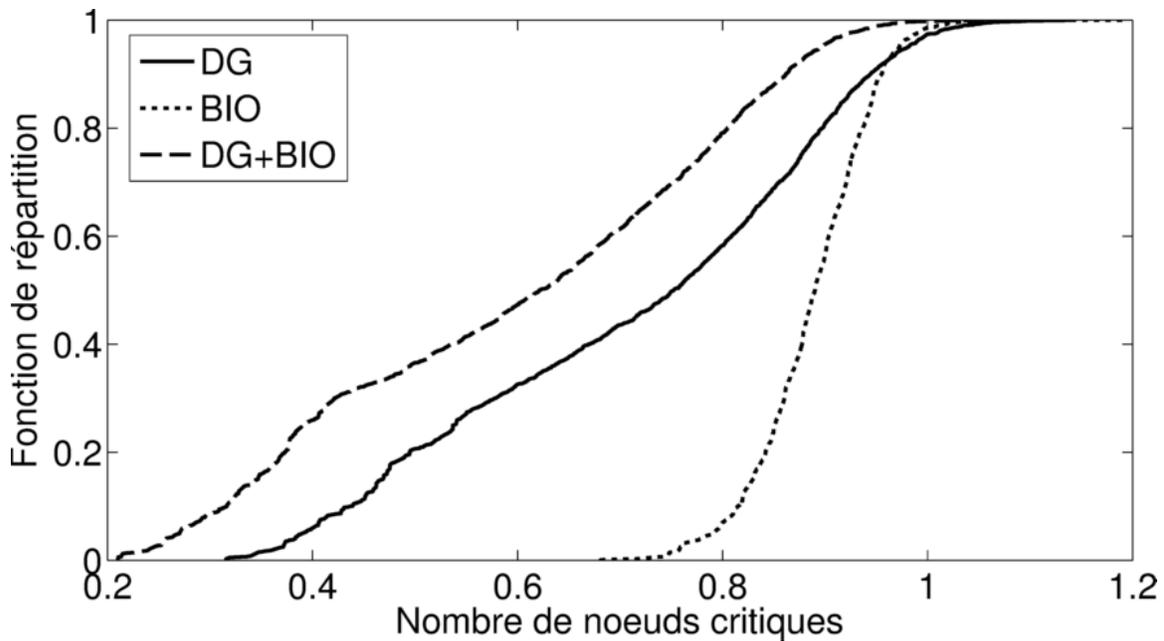


Figure 9.30 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour les trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage B et la période de retour 5 ans.

Finalement, pour tous les scénarios, l'indice adaptation est supérieur à un pour certains jeux de paramètres. Pour le scénario DG, ces jeux de paramètres sont généralement associés à des capacités d'infiltration initiales très faibles et à une diminution très rapide des capacités d'infiltration. L'hypothèse voulant qu'en dirigeant plus d'eau vers des surfaces perméables les capacités d'infiltration diminuent plus rapidement pourrait encore une fois expliquer ce phénomène. Il est intéressant de noter que ce ne sont pas les mêmes jeux de paramètres qui mènent à des valeurs supérieures à un pour le scénario d'adaptation BIO. Pour ce dernier, les valeurs des paramètres varient beaucoup d'un cas à l'autre. Il convient de noter que, dans ces cas, l'augmentation du nombre de nœuds en climat futur avec adaptation comparativement à la situation futur sans adaptation demeure très marginale (2,1 % du nombre de nœuds total).

9.4.2.3. Indicateur Inondation

La Figure 9.31 présente les résultats pour la période de retour 10 ans (les volumes d'inondations pour les périodes de retour 2 et 5 ans sont très faibles). Ces résultats sont

très similaires à ceux de l'indicateur Nombre de nœuds critiques et suggèrent que les scénarios d'adaptation proposés permettent une récupération partielle des niveaux de service historiques, variable selon la paramétrisation considérée, mais que dans aucun cas les niveaux de service historiques pourront être atteints par la seule mise en place de ces mesures. Il est à noter que les valeurs de l'indice adaptation supérieures à un pour le scénario DG proviennent, tout comme pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques, de jeux de paramètres où les capacités d'infiltration et les pertes par dépression sont les plus faibles.

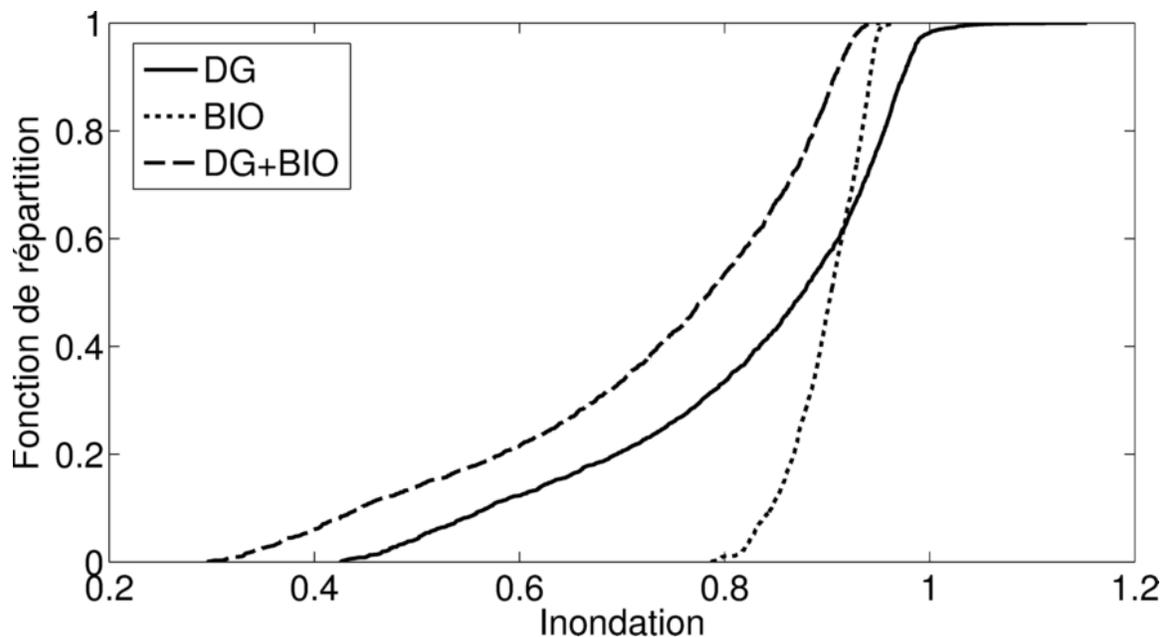


Figure 9.31 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur B et la période de retour 10 ans

9.4.2.4. Synthèse des résultats pour le secteur B

Globalement, les résultats précédents montrent que :

- La mise en place des mesures d'adaptation permet d'améliorer le niveau de service en climat futur comparativement à la situation sans mesure d'adaptation. Pour

plusieurs jeux de paramètres, il est possible de se rapprocher sensiblement des performances historiques, notamment pour l'indicateur Surverse et Nombre de nœuds critiques, même pour une période de retour de 5 ans pour ce dernier indicateur.

- Pour les scénarios DG et BIO, la diminution des SIDC est similaire mais les performances diffèrent selon l'indice de performance. Ainsi, en ce qui concerne les indicateurs Surverse et Usine, ces deux scénarios mènent à des valeurs d'indices d'adaptation semblables alors que pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques, le scénario DG est clairement plus favorable. Le fait que le DG s'applique plus uniformément sur l'ensemble du territoire (du moins pour les zones résidentielles) alors que la mise en place de systèmes de biorétention concerne des sites spécifiques peut expliquer en partie ce résultat.
- En matière de mise en charge et d'inondations et/ou de refoulements d'égouts, aucune zone spécifique n'est problématique pour le secteur B. Compte tenu de la topographie de ce secteur, l'ensemble du territoire semble plus vulnérable à une augmentation des intensités des pluies en climat futur. Dans un tel contexte, le DG (qui permet de réduire les apports au réseau sur de nombreux sous-bassins) a un impact notable particulièrement sur le nombre de nœuds critiques mais également sur les volumes d'inondations pour la période de retour 10 ans.

9.5. Secteurs desservis par des réseaux pluviaux

La présente section regroupe l'ensemble des résultats pour les trois secteurs drainés par des réseaux pluviaux à savoir les secteurs A, D et E. À noter que l'indicateur Infiltration-Évaporation-Rétention n'est pas présenté puisqu'il est directement lié à l'indicateur Ruissellement. Seules les périodes de retour 2 et 5 ans sont présentées pour cet indicateur puisque l'impact des scénarios d'adaptation est marginal pour la période 10 ans.

9.5.1. Secteur A

Les trois scénarios d'adaptation retenus pour ce secteur sont l'ajout de systèmes de biorétention (BIO), le débranchement de gouttières (DG) et enfin une combinaison de ces deux types de mesures (voir Section 9.2.1 pour une description détaillée de ces scénarios).

9.5.1.1. Indicateur Ruissellement

La Figure 9.32 présente les résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement. La comparaison des résultats des scénarios d'adaptation DG et BIO pris individuellement montre que les gains relatifs de ces deux scénarios en matière de récupération des niveaux de service historiques dépendent de la paramétrisation. Ce constat est d'autant plus remarquable que ces deux scénarios impliquent une déconnection de superficies imperméables du même ordre soit 7,2 ha et 6,7 ha pour DG et BIO respectivement.

Le scénario DG+BIO offre une performance globale plus intéressante quel que soit le jeu de paramètres considéré, comparativement aux scénarios DG et BIO pris individuellement. La valeur médiane de l'indice adaptation est de 0,52 pour ce scénario alors qu'elle est de 0,75 et 0,77 pour les scénarios DG et BIO respectivement. Quoi qu'il en soit, aucun de ces scénarios ne permet de diminuer les volumes de ruissellement en climat futur, tels qu'ils étaient en climat historique et ce même pour la période de retour 2 ans.

Pour un événement pluvieux plus intense (période de retour 5 ans; Figure 9.33), le scénario d'adaptation BIO est généralement plus performant que le scénario DG dont la performance dépend, comme toujours, fortement des conditions d'infiltration présentes sur le terrain. Pour près de 75 % des jeux de paramètres, les valeurs de l'indice adaptation sont plus faibles pour le scénario BIO.

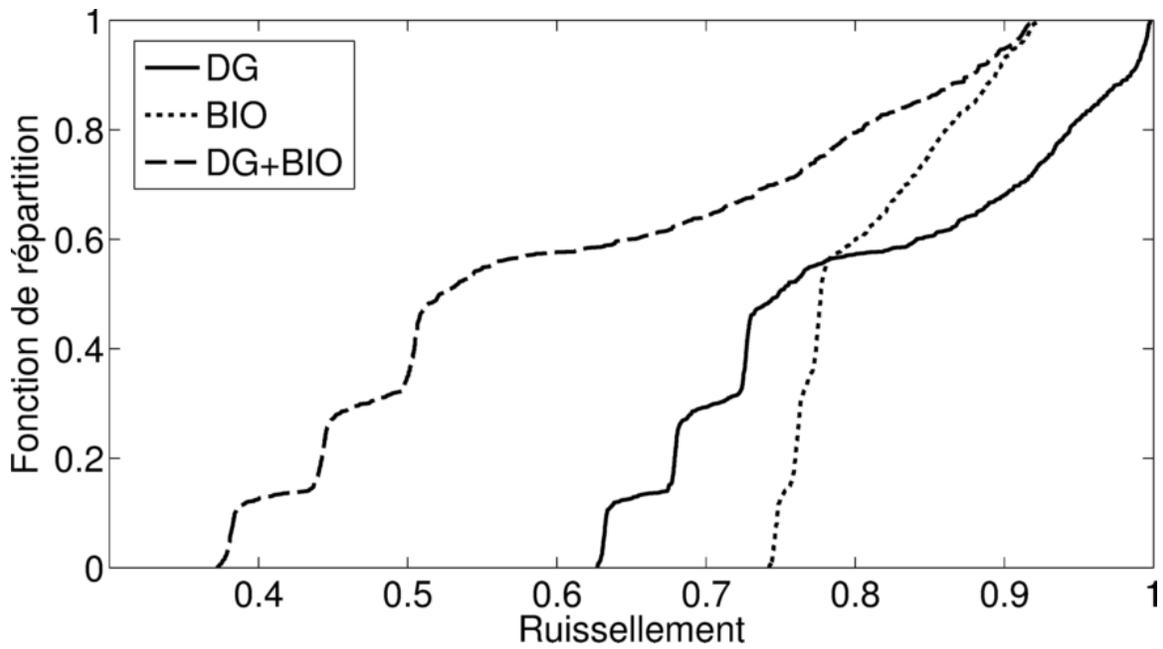


Figure 9.32 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Ruissellement pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 2 ans.

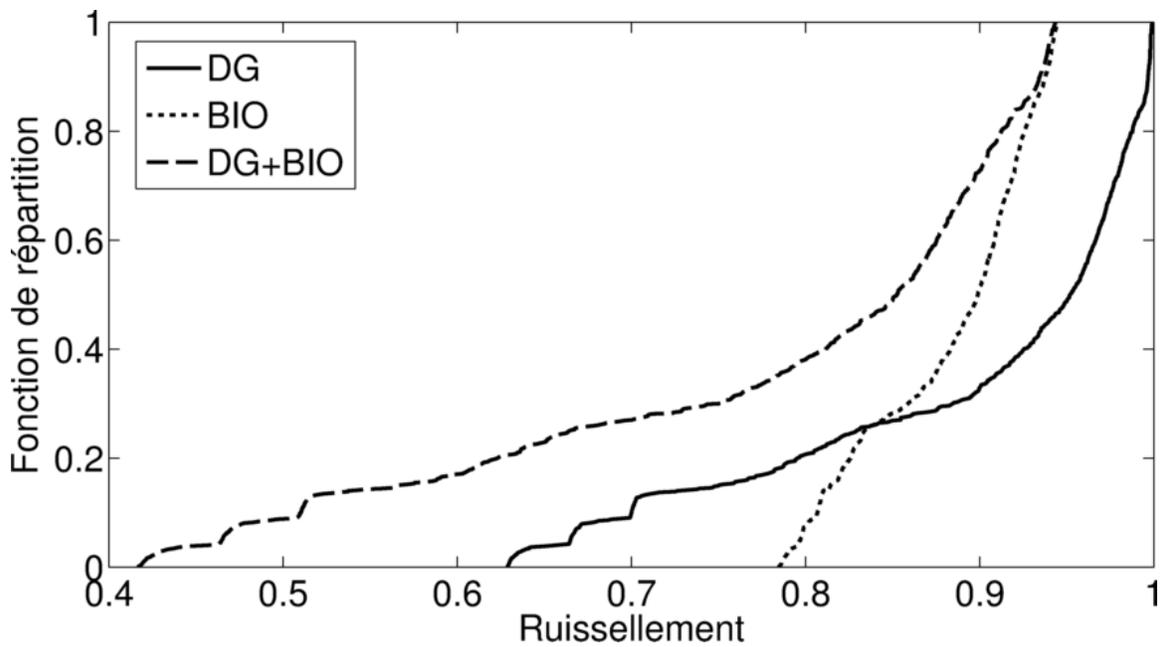


Figure 9.33 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Ruissellement pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 5 ans

Encore ici, le scénario DG+BIO est beaucoup plus performant que les scénarios BIO et DG pris individuellement. Le gain est toutefois moindre que dans le cas de la période de retour 2 ans.

Les valeurs des indices adaptation pour les périodes de retour 2 ou 5 ans se retrouvent dans le même intervalle. Par exemple, pour le scénario DG+BIO, les valeurs se situent globalement entre 0,40 et 0,90 peu importe la période de retour. On constate toutefois que les performances de ces scénarios d'adaptation sont moins probant pour la période de retour 5 ans. Toujours pour le scénario DG+BIO, pour près de 60 % des jeux de paramètres, il est possible d'obtenir une valeur inférieure à 0,60 alors que pour la période de retour 5 ans, ce taux diminue sous les 20 %.

9.5.1.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Seuls les résultats pour la période de retour 10 ans sont présentés dans ce qui suit. En effet, seuls les événements de pluie de période de retour 10 entraînent une détérioration du niveau de service en climat futur pour l'indice Nombre de nœuds critiques.

En matière de nombre de nœuds critiques, le DG donne des résultats largement supérieurs comparativement à l'ajout de systèmes de biorétention (Figure 9.34). La valeur médiane pour l'indice adaptation se trouve près de 0,7 pour le scénario DG alors qu'elle se trouve très près de un (0,95) pour le scénario BIO. Par ailleurs, pour ce scénario, 80 % des jeux de paramètres donnent un résultat supérieur à 0,85 ce veut dire que globalement, le scénario BIO a un très faible impact sur le nombre de nœuds critiques. Cela se remarque également avec le scénario DG+BIO où les valeurs de l'indice adaptation sont légèrement plus faibles que lorsque le DG est considéré seul.

Il est pertinent de rappeler que la distribution et la localisation spatiale sur le territoire des systèmes de biorétention joue un rôle important dans leur capacité à améliorer la situation en termes de mise en charge. Rappelons également que les surfaces de SIDC en cause par le DG et les systèmes de biorétention sont à peu près égales.

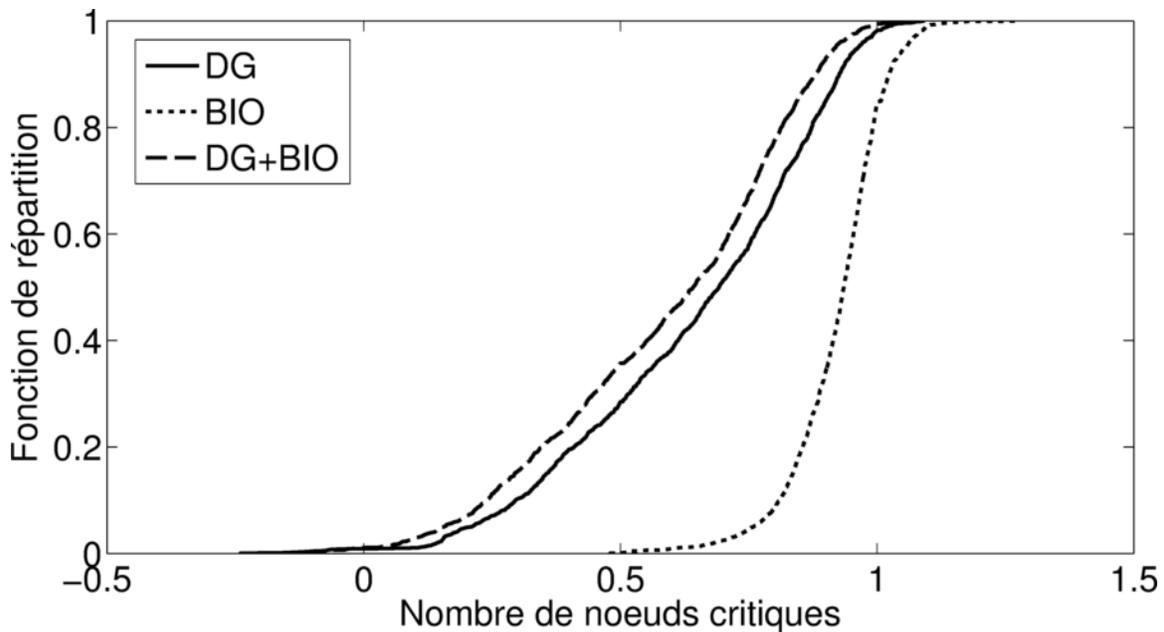


Figure 9.34 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques selon trois scénarios d'adaptation pour le réseau de drainage A et la période de retour 10 ans.

Les résultats pour les scénarios incluant le DG sont encore une fois fortement dépendants de la paramétrisation. Pour quelques jeux de paramètres, des valeurs inférieures à zéro et supérieures à un sont observées. Toutefois, les valeurs de l'indice adaptation sont supérieures à 0,5 (~70 % pour DG) dans une majorité des cas, et ne permette donc qu'une récupération très partielle des niveaux de service historiques en matière de nombre de nœuds critiques.

Concernant les valeurs plus élevées que un, pour les scénarios avec DG, la situation est la même que pour le secteur B et pourrait s'expliquer par une diminution très rapide des capacités d'infiltration des surfaces perméables après le réacheminement des volumes d'eau de ruissellement des toits. Pour le scénario BIO, ces valeurs proviennent de jeux de paramètres où la rétention de surface et les capacités d'infiltration sont élevées et où l'écoulement en conduite est retardé (coefficient de rugosité de Manning élevé). Aussi, ce sont des jeux de paramètres où le nombre de nœuds critiques est peu élevé tant en climat historique que futur, avec ou sans adaptation et constituent des cas tout à fait marginaux.

9.5.1.3. Indicateur Inondation

Les résultats pour la période de retour 10 ans sont présentés dans ce qui suit puisque les volumes d'inondations pour les autres périodes de retour sont négligeables, et ce tant en climat historique que futur.

La Figure 9.35 montre que le scénario DG est globalement plus performant comparativement au scénario BIO. La valeur médiane pour l'indice adaptation est approximativement égale à 0,82 et à 0,88 pour ces deux scénarios respectivement. Les gains de performance après mise en place de ces scénarios d'adaptation demeurent toutefois modestes.

Il est intéressant de noter dans ce cas que la dépendance à la paramétrisation des résultats pour les scénarios DG et BIO est semblable alors que généralement elle est beaucoup plus grande avec le scénario DG. Il est probable qu'avec la période de retour 10 ans, l'intensité de la pluie est telle que même les jeux de paramètres les plus favorables à l'infiltration ne constituent plus un réel enjeu. Cette variabilité était toutefois observée pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques avec la période de retour 10 ans, probablement en raison du fait que même des gains mineurs en termes de volumes infiltrés permettent de réduire sensiblement l'étendue des zones en charge.

La combinaison des mesures d'adaptation DG et BIO permet quant à elle de diminuer considérablement les volumes d'inondations comparativement à ces mesures prises individuellement, la valeur médiane étant légèrement inférieure à 0,70.

Ces mesures d'adaptation ne permettent toutefois pas de réduire les volumes d'inondations en climat futur à leur niveau en climat historique. Il est intéressant de noter que le scénario DG+BIO permet d'obtenir une réduction des volumes d'inondations non négligeables, ce qui peut avoir une incidence sur les volumes de conception des ouvrages pouvant être mis en place pour la gestion des événements les plus extrêmes.

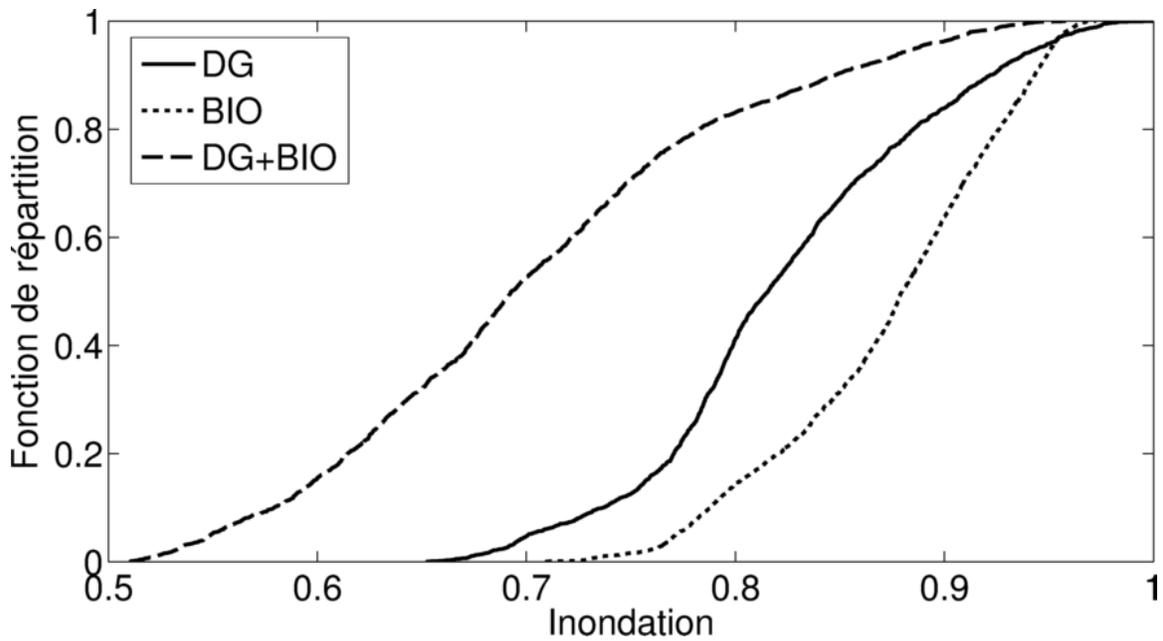


Figure 9.35 : Indice adaptation pour l'indicateur de performance Inondation pour les trois scénarios d'adaptation pour le secteur A et la période de retour 10 ans.

9.5.1.4. Synthèse des résultats pour le secteur A

Globalement, les résultats précédents montrent que :

- Les mesures d'adaptation permettent d'améliorer le niveau de service en climat futur par rapport à la situation sans adaptation. Elles réduisent les volumes de ruissellement, le nombre de nœuds critiques et les inondations. Globalement, aucune de ces mesures ne permet toutefois de retrouver le niveau de service historique.
- L'efficacité de ces mesures dépend largement de la période de retour. En ce qui concerne les volumes de ruissellement, une diminution importante du nombre de jeux de paramètres conduisant à une réduction d'au moins 50 % des volumes de ruissellement avec le scénario DG+BIO par rapport à la situation futur sans adaptation, s'observe entre les périodes de retour 2 et 5 ans.
- Le débranchement de gouttière et l'ajout de système de biorétention donnent des résultats similaires en matière de réduction des volumes de ruissellement pour la

période de retour 2 ans. Pour la période de retour 5 ans toutefois, les systèmes de biorétention semblent être plus performant. Il est important de rappeler que la réduction des SIDC est similaire pour ces deux types de mesures.

- Même si l'ajout de systèmes de biorétention donne de meilleurs résultats pour la période de retour 5 ans que le débranchement de gouttières, l'impact sur la diminution du nombre de nœuds critiques est beaucoup plus important pour le DG. L'impact plus local des systèmes de biorétention peut expliquer cette situation.

9.5.2. Secteur D

Les sept scénarios d'adaptation retenus pour ce secteur sont deux scénarios d'ajout de systèmes de biorétention (BIO1 et BIO2), le débranchement de gouttières (DG), les scénarios combinant débranchement de gouttières et systèmes de biorétention (DG+BIO1 et DG+BIO2) et les scénarios combinant ces deux derniers types de mesures et le redimensionnement de conduites (RC) à savoir les scénarios DG+BIO1+RC et DG+BIO2+RC (voir Section 9.2.4 pour une description détaillée de ces scénarios). Le scénario BIO1 considère l'implantation de systèmes de biorétention sur l'ensemble du territoire sans le secteur du Méga Centre alors que le scénario BIO2 intègre également l'implantation de systèmes de biorétention localisés dans le Méga Centre.

9.5.2.1. Indicateur Ruissellement

La Figure 9.36 présente les résultats pour l'indicateur Ruissellement et la période de retour 2 ans (les scénarios d'adaptation avec redimensionnement de conduites ne sont évidemment pas considérés dans ce qui suit puisqu'ils n'ont aucun impact sur les volumes de ruissellement). Le scénario DG a peu d'impact sur les volumes de ruissellement. Le secteur D est l'un des plus imperméabilisé parmi les secteurs sous étude et on y retrouve de grandes zones industrielles et commerciales où le DG n'a pu être mis en place. Ainsi, ces zones génèrent des volumes d'eau supplémentaires importants en climat futur et l'application du DG dans les secteurs résidentiels n'est pas suffisante pour réduire de façon notable et globale les volumes de ruissellement à l'échelle du secteur.

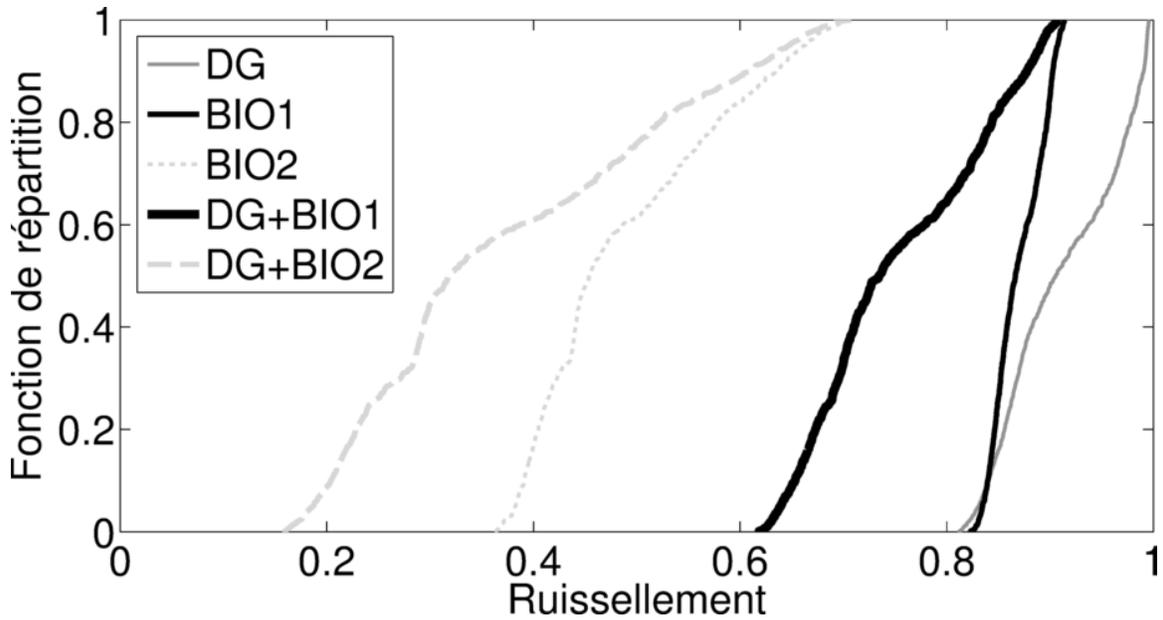


Figure 9.36 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour les cinq scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 2 ans.

Le scénario BIO1 présente des performances légèrement supérieures au scénario DG. Ces deux scénarios entraînent des réductions similaires des SIDC (DG : 7,3 ha; BIO1 : 6,8 ha) et ne permettent pas d'obtenir des valeurs de l'indice adaptation inférieures à 0,8.

Le scénario BIO2 se démarque des scénarios DG et BIO1. Il est important de mentionner que ce scénario permet de réduire les SIDC de 14,5 ha, une valeur supérieure à celle des aux scénarios DG et BIO1 combinés (14,2 ha). Pour un peu plus de 65 % des jeux de paramètres, ce scénario permet d'obtenir des valeurs de l'indice adaptation entre 0,4 et 0,6. Même si la réduction des SIDC est semblable entre les scénarios DG+BIO1 et BIO2, ce dernier est nettement plus avantageux pour réduire les volumes de ruissellement.

Lorsque le DG et le scénario BIO2 sont combinés, les résultats sont très intéressants. Pour un peu plus de 60 % des jeux de paramètres, la valeur de l'indice adaptation est inférieure à 0,40. La valeur médiane pour ce scénario est de 0,32 alors qu'elle est de 0,45 pour le scénario BIO2.

L'efficacité relative des différents scénarios demeure relativement semblable pour la période de retour 5 ans (Figure 9.37). Le scénario BIO1 est, pour la majorité des jeux de paramètres, plus performant pour réduire les volumes de ruissellement que le scénario DG. Quant au scénario BIO2, il se démarque nettement des scénarios DG, BIO1 et DG+BIO1 et la combinaison DG+BIO2 permet de réduire de façon notable les volumes de ruissellement, du moins pour certains jeux de paramètres.

On remarque encore une fois que les mesures d'adaptation considérées ont moins d'impact lorsque la période de retour augmente. Alors que les valeurs médianes de l'indice adaptation sont de 0,32 et 0,45 avec la période de retour 2 ans pour les scénarios DG+BIO2 et BIO2 respectivement, ces valeurs sont de 0,66 et 0,69 pour la période de retour 5 ans.

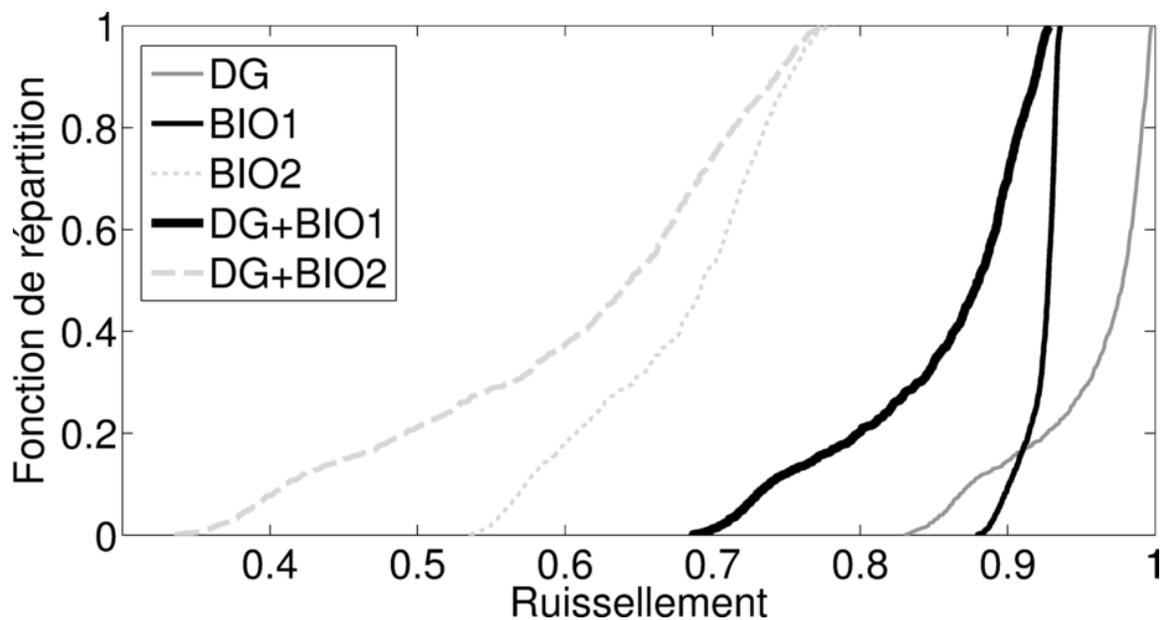


Figure 9.37 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour les cinq scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 5 ans.

9.5.2.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Pour cet indicateur, les résultats pour les périodes de retour 2 et 10 ans ne sont pas présentés pour ce secteur puisque la période de retour 5 ans est de loin la plus problématique.

Il est intéressant de noter d'abord que les scénarios BIO1 et BIO2, plus efficaces pour réduire les volumes de ruissellement comparativement au scénario DG, particulièrement le scénario BIO2, sont moins efficaces lorsqu'il est question du nombre de nœuds critiques (Figure 9.38). Différentes raisons peuvent expliquer cette situation. D'abord, le débranchement de gouttières touche l'ensemble du secteur résidentiel et peut donc avoir une influence sur un plus grand nombre de nœuds comparativement aux systèmes de biorétention qui touchent des zones commerciales et institutionnelles très localisées. De plus, pour le scénario BIO2 seulement, les systèmes de biorétention qui s'ajoutent se trouvent tous en aval du réseau de drainage juste avant l'exutoire vers la rivière. Ainsi, la diminution des apports engendrés par ces systèmes de biorétention touche une très courte section du réseau de conduites. Par conséquent, le nombre de nœuds pouvant être influencés par ces systèmes de biorétention est petit. Somme toute, le DG permet de réduire, parfois de manière importante, le nombre de nœuds critiques même pour la période de retour 5 ans. La valeur médiane de l'indice adaptation pour ce scénario est de 0,7.

Il peut paraître étonnant que le scénario BIO2 ne se démarque pas du scénario BIO1 en ce qui concerne la réduction du nombre de nœuds critiques malgré une surface totale de SIDC touchée par le scénario BIO2 plus de deux fois plus importante que celle du scénario BIO1. Il faut se rappeler toutefois que les systèmes de biorétention du scénario BIO2 sont localisés en aval du secteur. Cette situation s'observe également lorsque l'on compare les différentes paires de scénarios incluant les scénarios BIO1 et BIO2 (scénarios DG+BIO1 et DG+BIO2; scénarios DG+BIO1+RC et DG+BIO2+RC).

L'ajout des systèmes de biorétention au DG améliore légèrement la situation. La valeur médiane de l'indice adaptation est un peu supérieure à 0,6 comparativement à 0,7 pour le scénario DG.

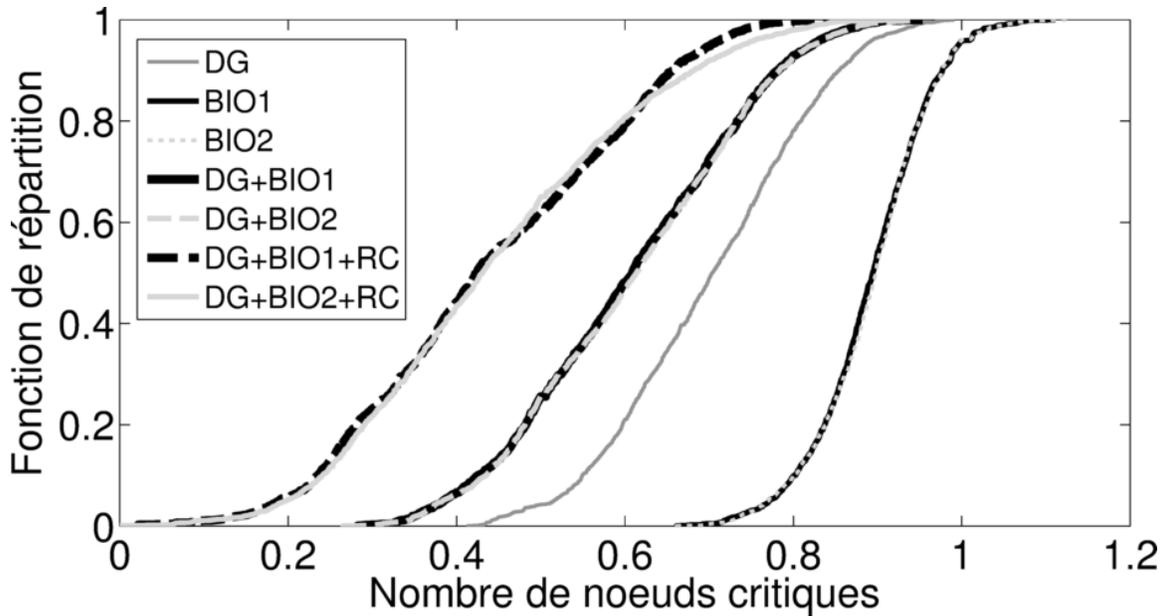


Figure 9.38 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour sept scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 5 ans.

Le redimensionnement de conduites a un effet marqué sur le nombre de nœuds critiques, même si un seul tronçon de conduites de 770 m a été redimensionné. Combiné aux scénarios DG et BIO1 ou BIO2, le redimensionnement de conduites permet d'obtenir une valeur pour l'indice adaptation inférieure à 0,4 pour 50 % des jeux de paramètres.

9.5.2.3. Indicateur Inondation

La Figure 9.39 présente les résultats pour l'indicateur Inondation pour la période de retour 10 ans (seulement la période de retour 10 ans est présentée dans ce qui suit). Les mesures d'adaptation visant à réduire les apports au réseau (DG et BIO) ont très peu d'impacts dans ce cas. Il faut noter que ce genre de mesure n'est généralement pas prévu pour gérer un événement pluvieux de période de retour 10 ans bien que des résultats probants aient été observées sur le secteur A pour cette même période de retour. La configuration du secteur D et la localisation des mesures d'adaptation associées au DG et aux systèmes de biorétention, peut expliquer en partie cette situation. Le secteur résidentiel se draine majoritairement vers le ruisseau Rouge, lequel

se trouve en amont de la seule zone problématique en matière d'inondations. Ainsi, le DG n'affecte pas cette zone. La même chose se produit avec le scénario BIO1 où plusieurs systèmes de biorétention n'ont pas d'influence sur les volumes d'eau acheminés vers cette zone problématique. Finalement, tous les systèmes de biorétention ajoutés avec le scénario BIO2 se trouvent en aval de la principale zone où se produisent les inondations.

Lorsque le redimensionnement de conduites s'ajoute aux autres mesures d'adaptation, des réductions notables des volumes d'inondations s'observent. Pour 40 % des jeux de paramètres, il est même possible de réduire les volumes d'inondations en climat futur par rapport à la situation historique. Il faut noter que le redimensionnement de conduites touche la zone la plus affectée par les problèmes de refoulements et d'inondations. Clairement le réseau connaît des problèmes hydrauliques locaux associés à un dimensionnement non adéquat du réseau.

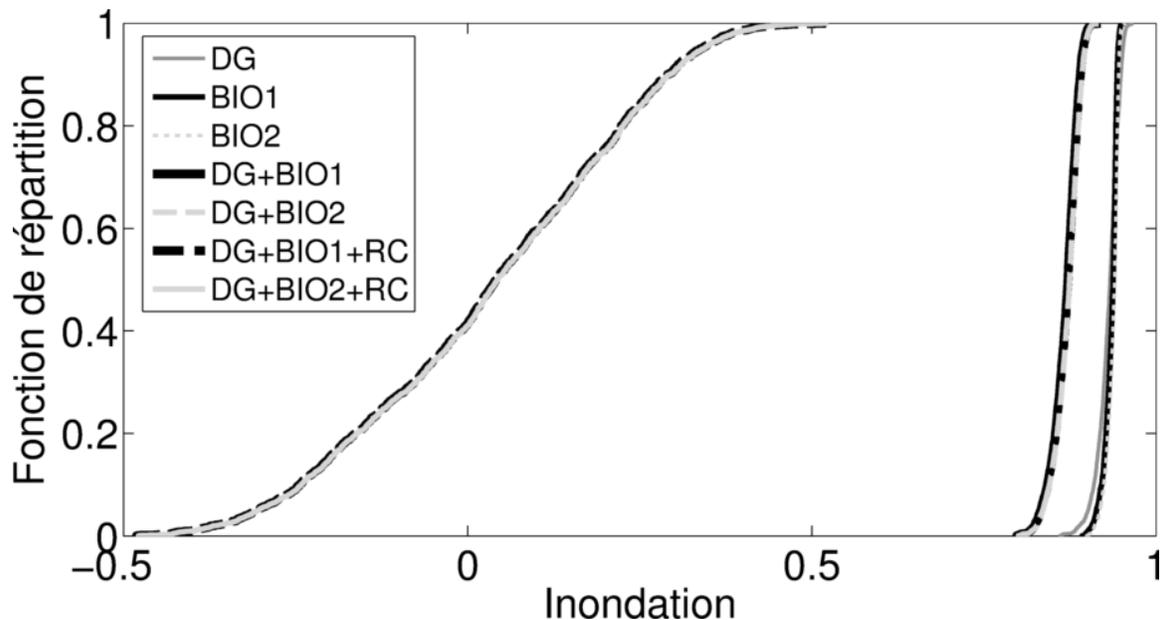


Figure 9.39 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Inondation pour sept scénarios d'adaptation pour le secteur D et la période de retour 10 ans.

9.5.2.4. Synthèse des résultats pour le secteur D

Globalement, les résultats précédents montrent que :

- Les mesures d'adaptation visant à réduire les apports au réseau (DG et BIO) permettent certes de réduire les volumes de ruissellement par rapport à la situation sans adaptation mais ne permettent pas de retrouver les niveaux de service historiques en climat futur tant pour l'indicateur Ruissellement, Nombre de nœuds critiques et qu'Inondation. Le redimensionnement de conduites pour sa part n'implique pas de diminution des volumes de ruissellement mais permet pour les indicateurs Nombre de nœuds critiques et Inondation d'améliorer sensiblement le niveau de service par rapport à la situation sans adaptation voire de retrouver et d'améliorer le niveau de service actuel dans certains cas.
- En raison de la forte présence de surfaces imperméables situées en zones industrielles et commerciales qui génèrent des volumes supplémentaires importants de ruissellement en climat futur, le DG a un très faible impact sur la réduction des volumes de ruissellement.
- Pour une diminution des SIDC équivalente, les systèmes de biorétention sont plus performants pour réduire les volumes de ruissellement que le débranchement de gouttières. Des valeurs de l'indice adaptation plus faibles pour les scénarios BIO1 et BIO2, comparativement aux scénarios DG et DG+BIO1 respectivement, sont observées. Cependant, le DG, de par son influence sur un plus grand nombre de nœuds, est clairement avantageux en matière de réduction du nombre de nœuds critiques.
- Une réduction des SIDC d'environ 7 ha semble loin d'être suffisante pour atteindre le niveau de service historique en climat futur. Même une réduction des SIDC d'un peu plus de 20 ha (DG+BIO2) ne suffit pas à atteindre le niveau de service historique bien qu'elle permette de s'en approcher sensiblement pour certains jeux de paramètres.
- Le redimensionnement de conduites s'avère être une mesure importante dans une perspective de réduction du nombre de nœuds critiques et majeure en ce qui

concerne la réduction des volumes d'inondations permettant, pour certains jeux de paramètres, de retrouver, voire d'améliorer le niveau de service en climat futur par rapport au niveau historique.

9.5.3. Secteur E

Six scénarios d'adaptation ont été considérés pour le secteur E : débranchement de gouttières (DG), systèmes de biorétention (BIO), mesures d'optimisation des bassins de rétention actuellement en place (BR), redimensionnement de conduites (RC) et les combinaisons BR+BIO et BR+BIO+RC. Bien que la ville du secteur E ait déjà mis en place un programme de débranchement de gouttières, les résultats présentés dans cette section utilisent pour fin de comparaison (indice adaptation) une situation historique sans adaptation où ce programme n'a pas été mis en place. Un tel choix facilite la comparaison avec les autres secteurs à l'étude. L'examen du scénario d'adaptation où le débranchement de gouttières est considéré permettra de voir les gains que la mise en place du programme a permis pour ce secteur en termes d'adaptation aux changements climatiques.

9.5.3.1. Indicateur Ruissellement

Les Figures 9.40 et 9.41 présentent les résultats pour l'indicateur Ruissellement pour les périodes de retour 2 et 5 ans respectivement. La première constatation concerne l'efficacité du débranchement de gouttières pour diminuer les volumes de ruissellement en climat futur. Il est important de rappeler que le scénario de débranchement de gouttières pour le réseau E est celui qui permet la diminution la plus importante des SIDC (12,2 ha). De plus, pour le réseau E, les capacités d'infiltration sont plus élevées que celles des autres réseaux compte tenu de la nature des sols de ce secteur (voir Section 4.5). Des valeurs de l'indice adaptation inférieures à 0,5 sont obtenues tant pour la période de retour 2 que 5 ans. La répartition des valeurs possible de cet indice diffère cependant puisque, pour la période de retour 2 ans, un peu plus de 60 % des jeux de paramètres donnent des valeurs égales ou inférieures à 0,60 alors qu'avec la période de retour 5 ans, 60 % des jeux de paramètres donnent une valeur égale ou supérieure à 0,76. Par contre, même avec la période de retour 2 ans, aucun jeu de paramètres ne permet de retrouver le niveau de service historique.

Les résultats obtenus lorsqu'on ajoute les systèmes de biorétention sont encore plus probants surtout pour la période de retour 2 ans où des valeurs de l'indice adaptation égales ou inférieures à 0,2 sont obtenus pour plus de la moitié des jeux de paramètres. Toujours pour cette période de retour, certains jeux de paramètres permettent d'obtenir des valeurs très près de 0 pour l'indice adaptation. Pour la période de retour 5 ans, l'impact de l'ajout de systèmes de biorétention au débranchement de gouttières est par contre beaucoup moins important. Il faut se rappeler que la conception des systèmes de biorétention repose sur la rétention complète d'un événement de période de retour 2 ans (voir Section 9.1.2).

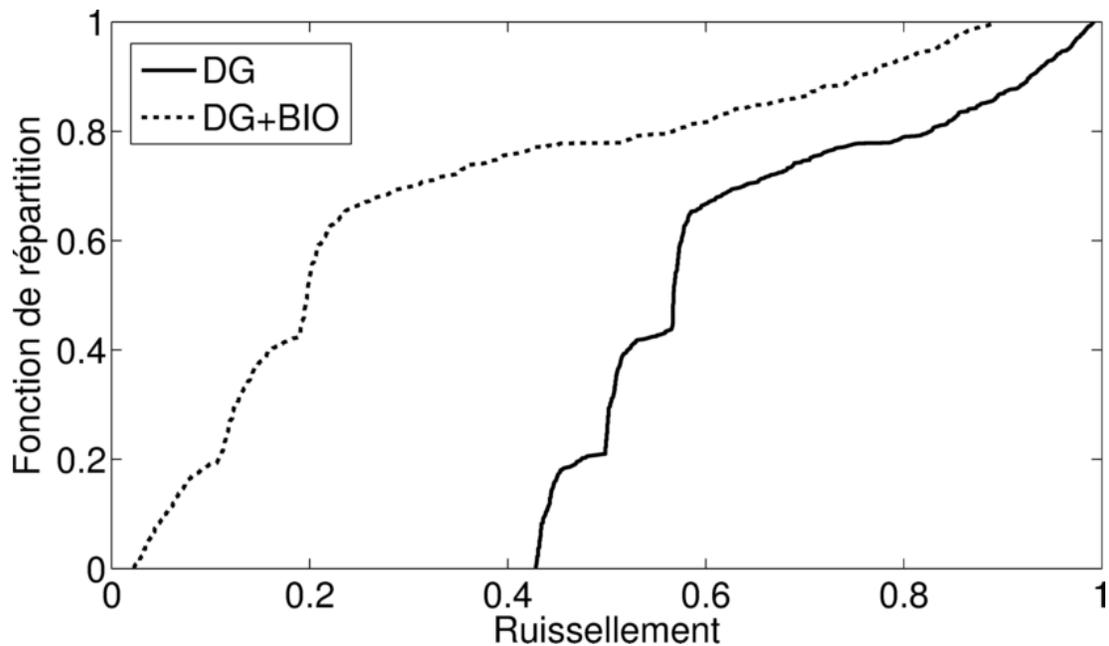


Figure 9.40 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour la période de retour 2 ans pour le secteur E.

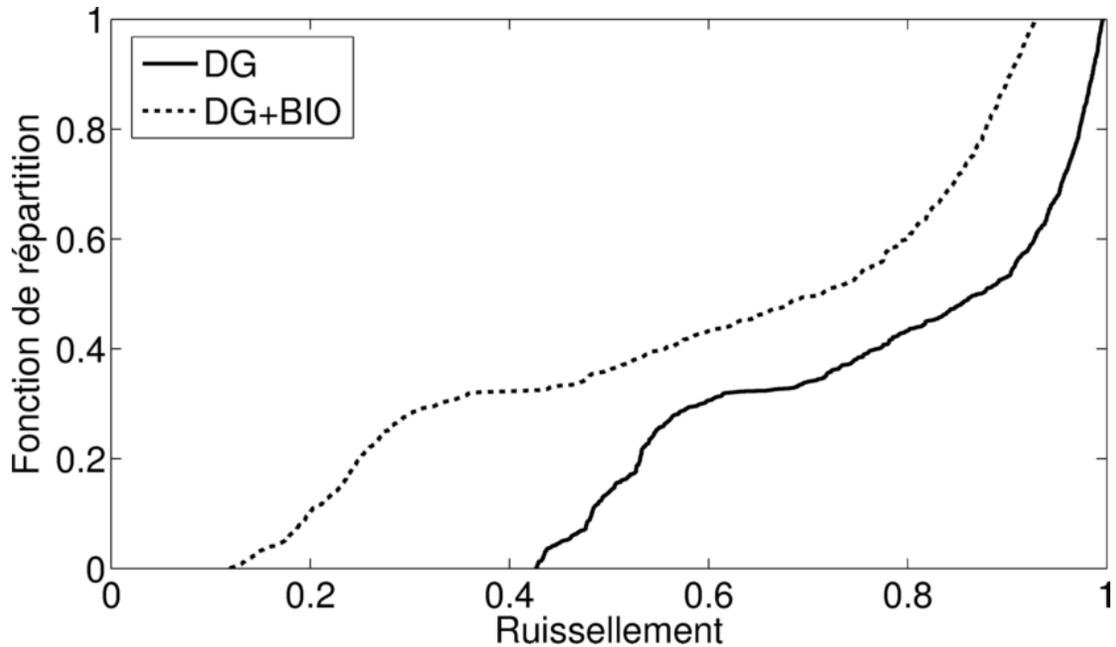


Figure 9.41 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Ruissellement pour la période de retour 5 ans pour le secteur E.

9.5.3.2. Indicateur Nombre de nœuds critiques

Les augmentations du nombre de nœuds critiques étant plus marquées pour la période de retour 10 ans, seuls les résultats pour cette période retour sont présentés (Figure 9.42). Encore une fois, on observe le potentiel intéressant du scénario DG pour le réseau E notamment en raison des capacités d'infiltration plus élevées pour ce secteur. Pour 36 % des jeux de paramètres, il est possible de diminuer l'augmentation du nombre de nœuds critiques en climat futur sans adaptation par rapport à la situation historique de plus de la moitié avec une période de retour 10 ans.

L'optimisation des bassins de rétention, ajoutée au scénario DG, n'a pas d'impact sur le nombre de nœuds critiques; de même lorsque l'on compare les résultats des scénarios DG+BIO et DG+BR+BIO (Figure 9.42). Les bassins de rétention se trouvent le long du ruisseau et ont donc un impact marginal sur les mises en charge dans le réseau de conduites.

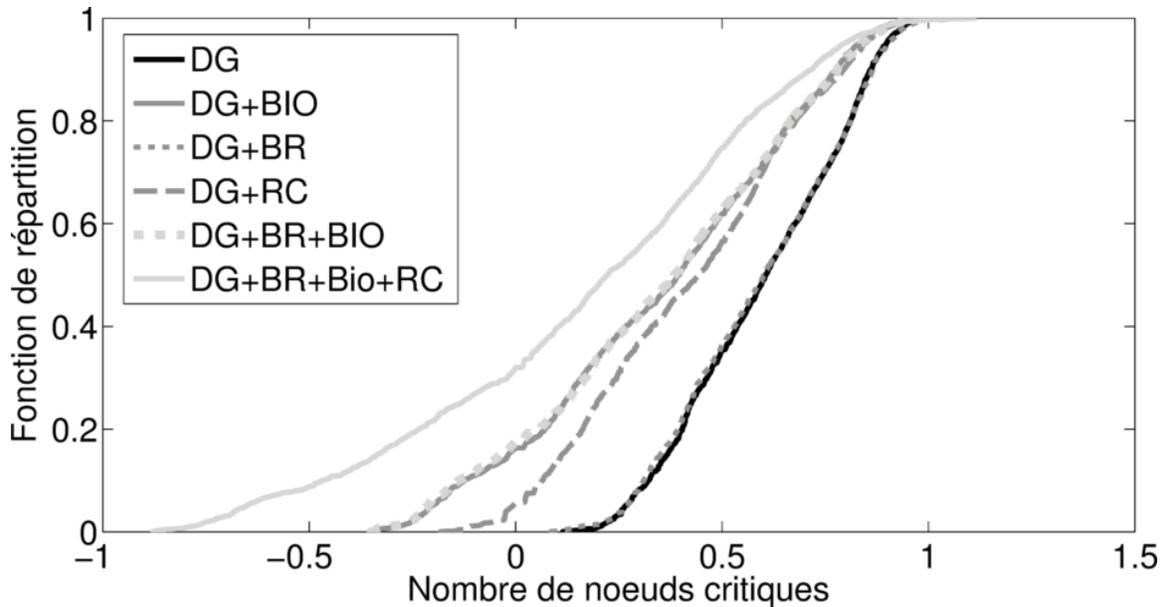


Figure 9.42 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Nombre de nœuds critiques pour le secteur E et la période de retour 10 ans.

Le redimensionnement de conduites (RC) et l'ajout de systèmes de biorétention au débranchement de gouttières permet de réduire de façon significative le nombre de nœuds critiques comparativement au débranchement de gouttières seul. La valeur médiane de l'indice adaptation pour le DG est de 0,60 et diminue à 0,44 et 0,40 avec le redimensionnement de conduites et l'ajout de systèmes de biorétention respectivement. Ainsi, pour les scénarios DG+BIO et DG+RC il est possible d'améliorer la situation par rapport au climat historique pour certains jeux de paramètres.

Lorsque le redimensionnement de conduites et les systèmes de biorétention sont ajoutés au débranchement de gouttières, une amélioration par rapport au climat historique s'observe pour près de 32 % des jeux de paramètres. Il est d'ailleurs possible de diminuer de moitié l'augmentation du nombre de nœuds critiques en climat futur sans adaptation comparativement au climat historique pour près de 80 % des jeux de paramètres.

9.5.3.3. Indicateur Inondation

L'impact du DG sur les volumes d'inondations est moins marqué que sur le nombre de nœuds critiques (Figure 9.43). La diminution des apports au réseau induite par le DG permet certes de diminuer les mises en charge sur l'ensemble du réseau mais ne suffit pas pour les zones très problématiques où la ligne piézométrique atteint la surface du sol. Une situation similaire a d'ailleurs été observée pour le secteur D.

Le redimensionnement de conduites et l'ajout de systèmes de biorétention au scénario DG ont un impact notable sur les volumes d'inondations, où pour une majorité de jeux de paramètres les valeurs de l'indice adaptation sont inférieures à 0,5. Certains jeux de paramètres permettent également d'améliorer la situation par rapport à la situation historique (indice adaptation inférieure à zéro). Alors que l'ajout de systèmes de biorétention semble plus efficace que le redimensionnement de conduites pour la diminution du nombre de nœuds critiques. Il en est tout autrement avec les volumes d'inondations où le redimensionnement de conduites est légèrement favorable.

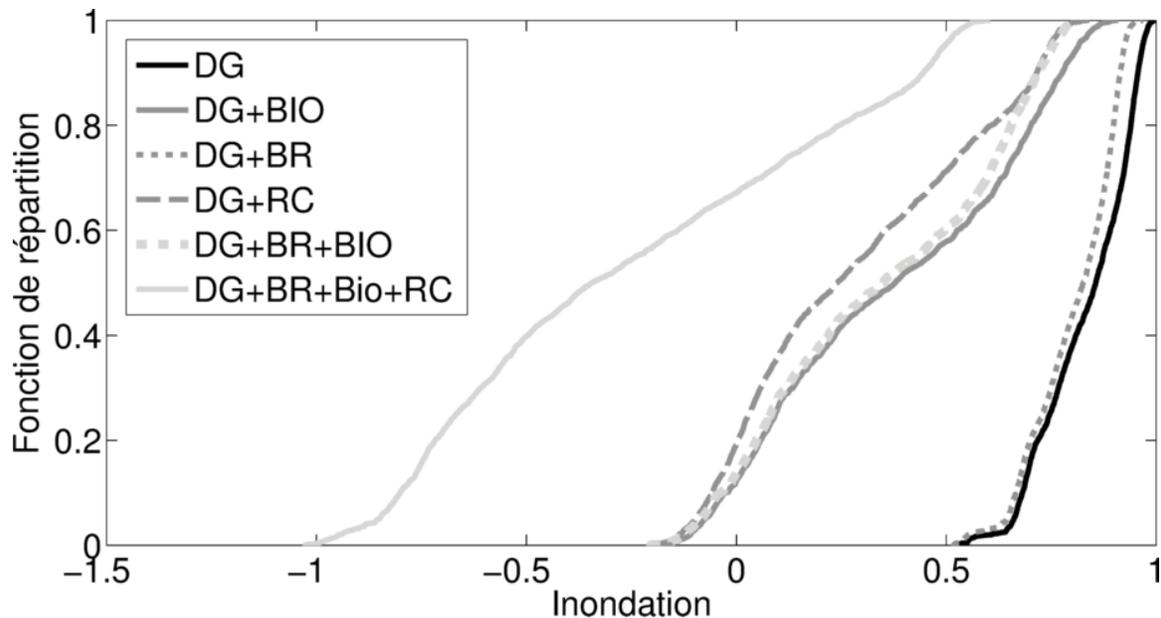


Figure 9.43 : Indice adaptation de l'indicateur de performance Inondation pour le secteur E et la période de retour 10 ans.

Les gains en matière de réduction du nombre de nœuds critiques étaient virtuellement nuls après optimisation des bassins de rétention et demeurent très modeste dans le cas des volumes d'inondations. Globalement, le scénario BR a un impact marginal tant sur l'étendue des zones de mise en charge que sur les risques d'inondations.

Le scénario combinant l'ensemble des mesures (DG+BR+BIO+RC) permet de diminuer considérablement les volumes d'inondations comparativement à la situation future sans adaptation et même par rapport à la situation historique. Pour 68 % des jeux de paramètres, des valeurs de l'indice adaptation égales ou inférieures à zéro sont observées. Même les scénarios les moins favorables en matière de capacité d'infiltration et de rétention de surface conduisent à des risques d'inondations comparables voire moindre en climat futur par rapport à la situation historique.

9.5.3.4. Synthèse des résultats pour le secteur E

Globalement, les résultats précédents montrent que :

- La mise en place du débranchement de gouttières et l'ajout de systèmes de biorétention permettent de réduire considérablement les volumes de ruissellement en climat futur comparativement à la situation sans adaptation. Aucun jeu de paramètres ne permet toutefois de retrouver les valeurs obtenues en climat historique.
- Le potentiel de diminution des apports au réseau de drainage, suite au débranchement de gouttières et à l'ajout de systèmes de biorétention, est très élevé pour la période de retour 2 ans mais diminue considérablement avec la période de retour 5 ans.
- En ce qui concerne le nombre de nœuds critiques et les volumes d'inondations, l'ajout de l'optimisation des bassins de rétention au débranchement de gouttières n'a que très peu d'impacts. L'ajout de systèmes de biorétention permet d'obtenir des valeurs pour l'indice adaptation plus faibles avec l'indicateur Nombre de nœuds critiques comparativement à l'ajout du redimensionnement de conduites. La situation inverse s'observe toutefois avec l'indicateur Inondation.

- L'ajout de systèmes de biorétention et/ou du redimensionnement de conduites au débranchement de gouttières, permet de retrouver le niveau de service historique en matière de nombre de nœuds critiques et d'inondations, voire de l'améliorer avec certains jeux de paramètres.

CHAPITRE 10 : COMPARAISON DES SECTEURS

Ce chapitre compare les résultats obtenus des différents secteurs, l'objectif étant de tenter d'établir des relations entre les impacts des changements climatiques et l'efficacité des mesures d'adaptation et certains paramètres clefs des secteurs sous étude. Seuls les scénarios ayant une incidence sur les volumes d'eau infiltrés (et donc des volumes acheminés au réseau) sont considérés. Il est en effet difficile de comparer les scénarios du type redimensionnement de conduites puisque leur efficacité dépend des configurations particulières de chaque réseau. Par souci de simplicité, seules les valeurs médianes des distributions présentées aux chapitres précédents sont considérées dans les analyses qui suivent.

Le chapitre est divisé en quatre sections. Une première section rappelle et compare les principales caractéristiques des secteurs sous étude (Section 10.1), une seconde s'intéresse aux impacts des CC sur les indicateurs de performance (Section 10.2), et enfin une troisième compare l'évolution des niveaux de service en climat futur des différents scénarios d'adaptation (Section 10.3). Une dernière section fait un résumé des principaux résultats (Section 10.4).

10.1. Caractéristiques des secteurs sous étude

Le Tableau 10.1 présente un résumé des caractéristiques des secteurs sous étude. La Figure 10.1 reprend ces caractéristiques pour les différents secteurs. On constate que les secteurs C et D se distinguent par leurs fractions plus importantes de surfaces imperméables (plus de 0,50 de ces secteurs est imperméables) et par leurs fractions plus importantes de surfaces imperméables sous forme de SIDC (plus de 0,88 ; Figure 10.1). A l'opposé, les secteurs E et F présentent les fractions SIDC/SIT les plus faibles et sont les secteurs les moins imperméabilisés.

Tableau 10.1 : Aires et fractions occupées par les différents types de surfaces pour les secteurs sous étude.

Types de surfaces	Secteurs					
	C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial	F Pluvial
ST* (ha)	329,6	308,0	446,0	415,6	698,2	738,3
SIT (ha)	176,4	136,5	171,2	213,3	193,6	107,9
SP** (ha)	153,3	171,5	274,8	202,3	504,6	630,4
SIIC (ha)	18,8	18,1	25,0	24,4	41,1	17,9
SIDC (ha)	157,6	118,4	146,2	189,0	152,5	90,0
Fractions						
SIT/ST	0,53	0,44	0,38	0,51	0,28	0,15
SP/ST	0,46	0,56	0,62	0,49	0,72	0,85
SIIC/SIT	0,11	0,13	0,15	0,11	0,21	0,17
SIDC/SIT	0,89	0,87	0,85	0,89	0,79	0,83
SIIC/ST	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02
SIDC/ST	0,48	0,38	0,33	0,46	0,22	0,12
(SP+SIIC)/ST	0,52	0,62	0,67	0,54	0,78	0,88

*Surface totale

**Surface perméable

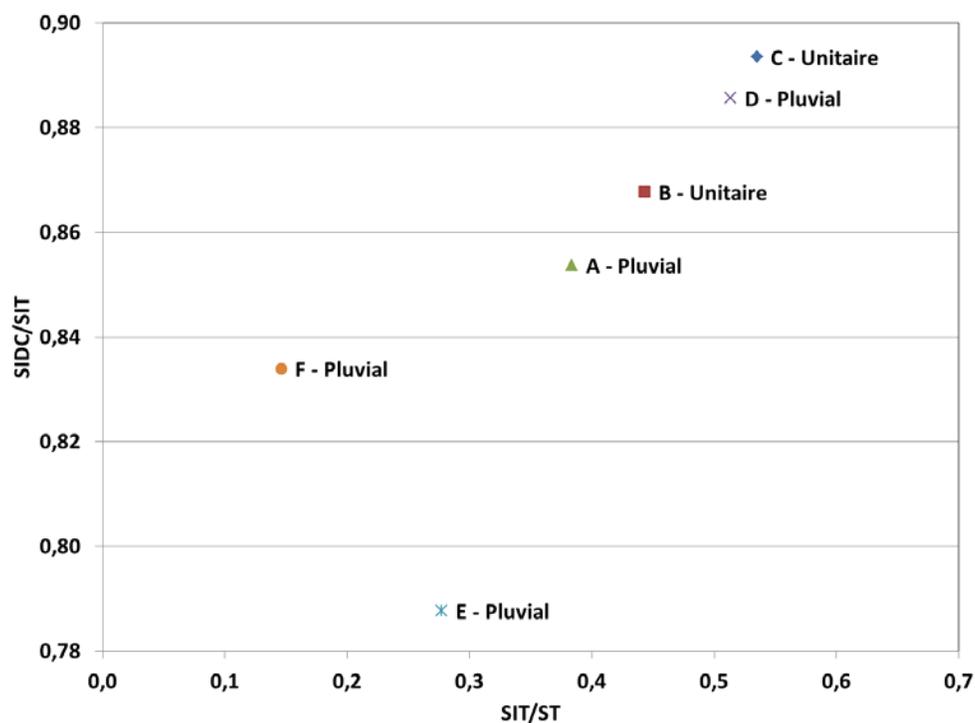


Figure 10.1 : Ratio SIDC/SIT en fonction du ratio SIT/ST pour les secteurs sous étude.

10.2. Impacts des changements climatiques

Le Tableau 10.2 présente un résumé des résultats pour les différents indicateurs alors que la Figure 10.2 présente les fractions du volume supplémentaire de pluie en climat futur infiltrées pour les différents secteurs en fonction du ratio SIDC/ST. Les régressions linéaires correspondantes sont également présentées avec les équations et les valeurs du R^2 . Ces résultats montrent une bonne corrélation entre la fraction de pluie infiltrée et le ratio SIDC/ST (des corrélations de qualité équivalente sont obtenues lorsque le ratio SIT/ST est utilisé comme variable indépendante). Ainsi, plus un secteur comporte une fraction de SIDC importante, moins il sera en mesure d'infiltrer les volumes supplémentaires de pluie en climat futur et plus les apports au réseau seront importants.

Tableau 10.2 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (période 2041-2070).

Indicateur	Période de retour (ans)	Secteur					
		C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial	F Pluvial
Fraction pluie supplémentaire infiltrée	2	0,45	0,60	0,66	0,52	0,78	0,84
	5	0,14	0,28	0,43	0,34	0,63	0,70
	10	0,08	0,19	0,37	0,25	0,44	0,59
Fraction pluie surverse/milieu récepteur ¹	2	0,36	0,35	0,33	0,47	0,22	0,14
	5	0,60	0,51	0,56	0,66	0,37	0,29
	10	0,70	0,44	0,66	0,74	0,56	0,40

¹La valeur correspond à la fraction de la pluie supplémentaire rejetée au milieu récepteur pour les réseaux pluviaux et à la fraction sous forme de surverse pour les réseaux unitaires.

Par ailleurs, la Figure 10.3 montre que, sans surprise, les fractions rejetées au milieu récepteur (réseaux pluviaux) ou en surverses (réseaux unitaires) augmentent en fonction du rapport SIDC/ST. Là encore les corrélations obtenues en considérant les différents secteurs sous étude sont relativement bonnes.

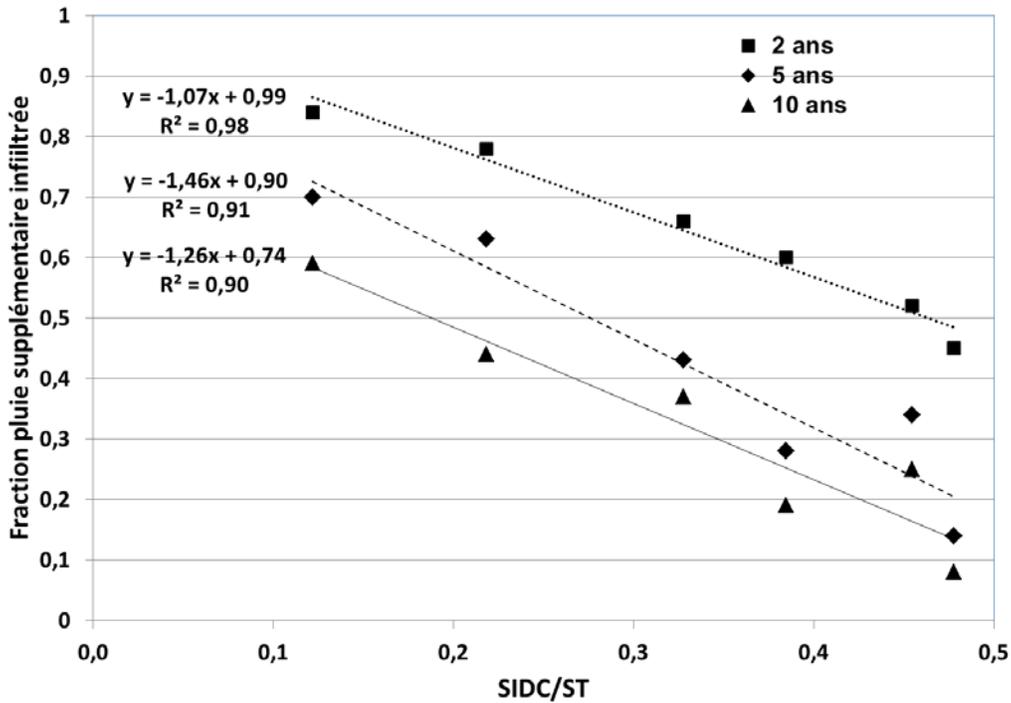


Figure 10.2 : Fraction de pluie supplémentaire infiltrée en fonction du ratio SIDC/ST pour différentes périodes de retour. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour chaque période de retour.

Ces résultats suggèrent que la donnée de la fraction SIDC d'un secteur quelconque peut permettre une première estimation des fractions des volumes supplémentaires de pluie infiltrées et ruisselées. Il faut toutefois réaliser que l'échantillon de secteurs utilisés pour établir ces corrélations demeure très modeste malgré la qualité des corrélations obtenues et qu'il y a lieu de s'interroger sur la représentativité de l'échantillon de secteurs considérés.

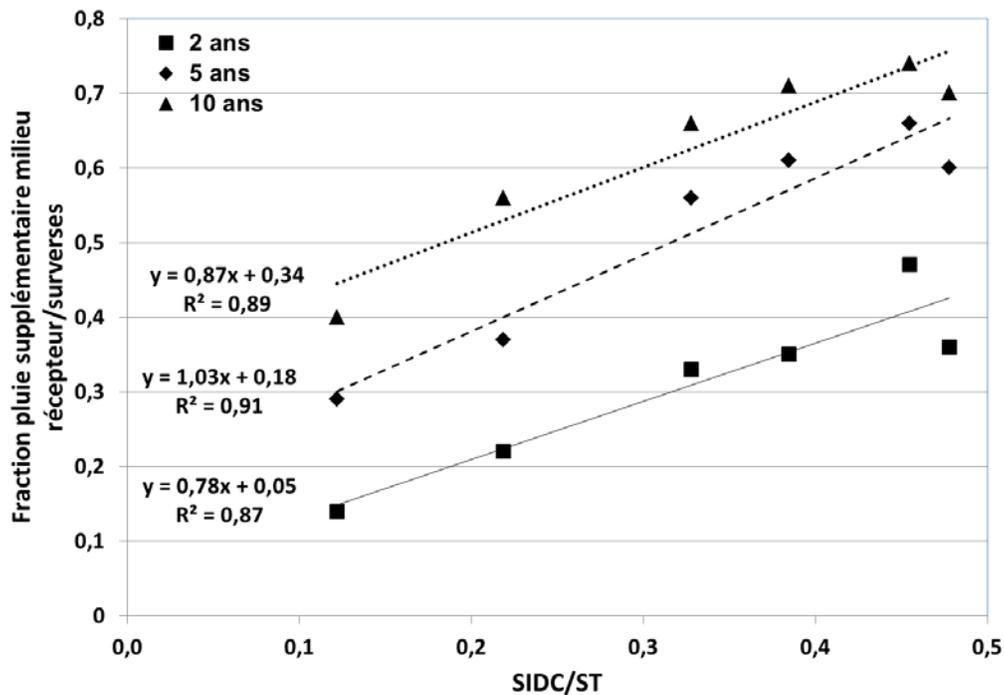


Figure 10.3 : Fraction de pluie supplémentaire rejetée en surverses (réseaux unitaires) ou au milieu récepteur (réseaux pluviaux) en fonction du ratio SIDC/ST pour différentes périodes de retour. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour chaque période de retour.

10.3. Adaptation aux changements climatiques

Le Tableau 10.3 présente les variations relatives de SIDC pour les cinq secteurs sous étude associées aux scénarios d'adaptation : débranchement de gouttières (DG), système de biorétention (BIO) et au scénario combinant ces deux types de mesures (DG+BIO). La variation relative des SIDC est utilisée dans ce qui suit afin de voir s'il existe des corrélations entre l'évolution des indices adaptation des différents indicateurs pour les différents secteurs et cette variation relative. L'hypothèse de base est que, malgré les disparités d'occupations du territoire et de réseaux, les variations relatives des SIDC obtenues suite à la mise en place de mesures de contrôle à la source demeurent un bon indicateur de la capacité de récupérer les niveaux historiques de différents indicateurs.

Tableau 10.3 : Variations relatives des SIDC ($\Delta SIDC / SIDC$) des différents scénarios d'adaptation considérés.

Scénario	Secteur				
	C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial
DG	0,058	0,064	0,049	0,024	0,078
BIO	0,036	0,054	0,046	0,036 - 0,077 ¹	0,095
DG+BIO	0,095	0,118	0,095	0,060 - 0,101 ²	0,173

¹La première valeur correspond au scénario BIO1 et la seconde au scénario BIO2.

²La première valeur correspond au scénario DG+BIO1 et la seconde au scénario DG+BIO2.

Les Tableaux 10.4, 10.5 et 10.6 présentent un résumé des résultats pour l'indice adaptation des indicateurs Ruissellement, Nombre de nœuds critiques et Inondation respectivement. A noter que les résultats pour les périodes de retour 2 et 5 ans sont considérés pour les indicateurs Ruissellement et Nombre de nœuds critiques et 5 et 10 ans pour l'indicateur Inondation.

Tableau 10.4 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 2 et 5 ans)

Période de retour (ans)	Scénario	Secteur				
		C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial
2	DG	0,64	0,72	0,75	0,91	0,57
	BIO	0,86	0,79	0,78	0,87 - 0,45 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,50	0,49	0,52	0,73 - 0,32 ²	0,20
5	DG	0,94	0,96	0,95	0,98	0,87
	BIO	0,93	0,90	0,90	0,93 - 0,60 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,87	0,86	0,85	0,88 - 0,64 ²	0,71

¹La première valeur correspond au scénario BIO1 et la seconde au scénario BIO2.

²La première valeur correspond au scénario DG+BIO1 et la seconde au scénario DG+BIO2.

³Le scénario BIO n'a pas été considéré pour le secteur E.

Tableau 10.5 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 2 et 5 ans)

Période de retour (ans)	Scénario	Secteur				
		C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial
2	DG	0,50	0,47	0,47	0,69	0,60
	BIO	0,84	0,91	0,80	0,89 - 0,89 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,27	0,39	0,39	0,60 - 0,60 ²	0,0
5	DG	0,81	0,75	0,47	0,70	0,60
	BIO	0,90	0,89	0,94	0,89 - 0,90 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,71	0,62	0,34	0,61 - 0,61 ²	-0,09

¹La première valeur correspond au scénario BIO1 et la seconde au scénario BIO2.

²La première valeur correspond au scénario DG+BIO1 et la seconde au scénario DG+BIO2.

³Le scénario BIO n'a pas été considéré pour le secteur E.

Tableau 10.6 : Résumé des résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Inondation pour les secteurs sous étude et les différents scénarios d'adaptation (périodes de retour 5 et 10 ans)

Période de retour (ans)	Scénario	Secteur				
		C Unitaire	B Unitaire	A Pluvial	D Pluvial	E Pluvial
5	DG	0,84	0,76	0,82	0,96	0,74
	BIO	0,92	0,87	0,82	0,94 - 0,94 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,77	0,61	0,64	0,88 - 0,88 ²	0,11
10	DG	0,90	0,88	0,82	0,93	0,86
	BIO	0,94	0,91	0,88	0,94 - 0,94 ¹	n.a. ³
	DG+BIO	0,84	0,79	0,69	0,90 - 0,87 ²	0,38

¹La première valeur correspond au scénario BIO1 et la seconde au scénario BIO2.

²La première valeur correspond au scénario DG+BIO1 et la seconde au scénario DG+BIO2.

³Le scénario BIO n'a pas été considéré pour le secteur E.

Le graphique de l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement est présenté à la Figure 10.4. On constate que l'efficacité de ces mesures pour la réduction de l'indice adaptation est très bonne puisque globalement elles permettent d'obtenir des indices de l'ordre de 0,5 pour des variations relatives des SIDC de l'ordre de 8 à 10 %. La relation entre l'indice adaptation et la réduction relative des SIDC pour la période de retour 2 ans est approximativement linéaire. Il faut rester prudent cependant pour les réductions relatives les plus grandes puisque l'échantillon de valeurs dans ce cas demeure petit.

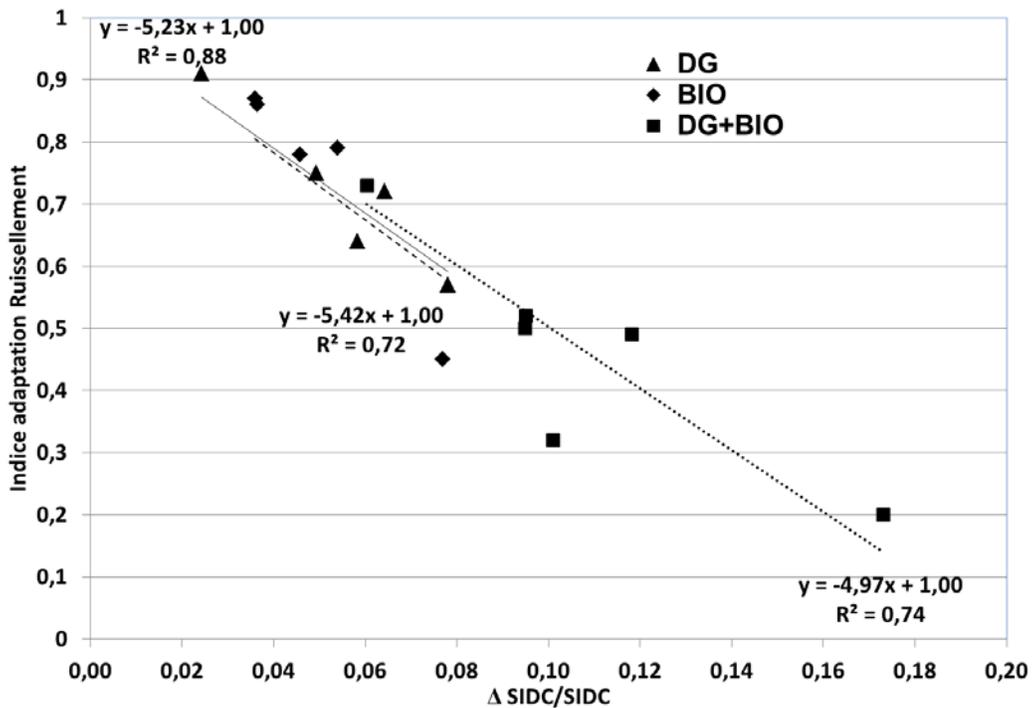


Figure 10.4 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 2 ans. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour les différents scénarios d'adaptation (les valeurs des ordonnées à l'origine ont été fixées à 1).

La capacité de ces mesures à récupérer les niveaux de service historiques s'amenuisent sensiblement lorsque la période de retour 5 ans est considérée (Figure 10.5). De plus, les résultats sont beaucoup plus variables selon les secteurs (plus grande dispersion des points et moins bonne corrélation).

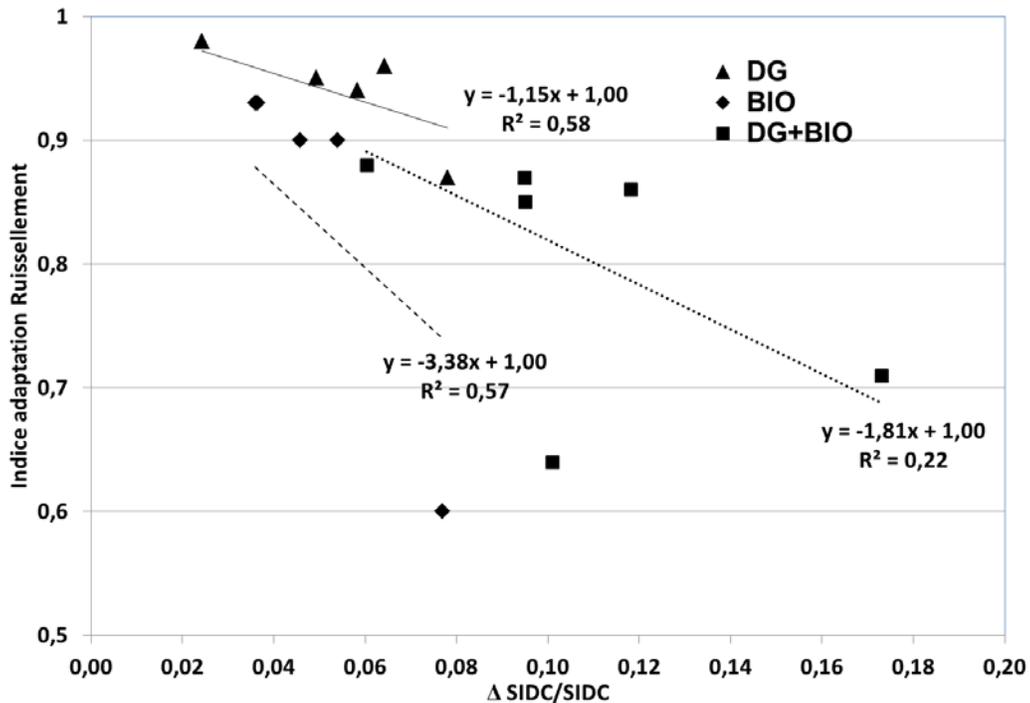


Figure 10.5 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans. Les droites correspondent aux régressions linéaires pour les différents scénarios d'adaptation (les valeurs des ordonnées à l'origine ont été fixées à 1).

La Figure 10.6 présente les résultats pour l'indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques pour la période de retour 2 ans. Seule la régression pour le scénario DG+BIO est présentée, les autres scénarios ne conduisant pas à des corrélations significatives. Le constat général ici est que l'impact de la mise en place de scénarios d'adaptation de type contrôle à la source demeure intéressant et permet de récupérer une partie du niveau de service historique et même le niveau de service historique dans un cas (secteur E). Globalement les scénarios BIO sont, pour une même réduction relative des SIDC, moins efficaces pour récupérer les niveaux de service historiques que les scénarios DG. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les systèmes de biorétention sont implantés en des sites spécifiques du territoire alors que les scénarios DG sont plus uniformément distribués (à tout le moins dans les zones résidentielles). De plus, la localisation de sites de biorétention en des sites près des exutoires des secteurs

limitent l'impact que ces derniers peuvent avoir en matière de mise en charge et nœuds critiques (c'est notamment le cas du scénario BIO2 pour le secteur D). Cependant, selon les résultats obtenus par simulation, l'efficacité de ce type de mesure s'amenuise lorsque l'on considère la période de retour 5 ans (Figure 10.7).

Concernant l'indicateur Inondation, la Figure 10.8 suggère un impact intéressant, quoique nettement insuffisant pour la grande majorité des secteurs, des mesures de type de contrôle à la source pour la période de retour 5 ans. Cet impact est encore réduit pour les pluies de période de retour 10 ans (Figure 10.9). Ces réductions sont toutefois intéressantes puisque leur mise en place entraîne une réduction des volumes d'eau à gérer par les autres mesures mieux à même de contrôler les risques d'inondations associés aux événements de pluie les plus intenses (p. ex. bassins de rétention, stockage en conduite).

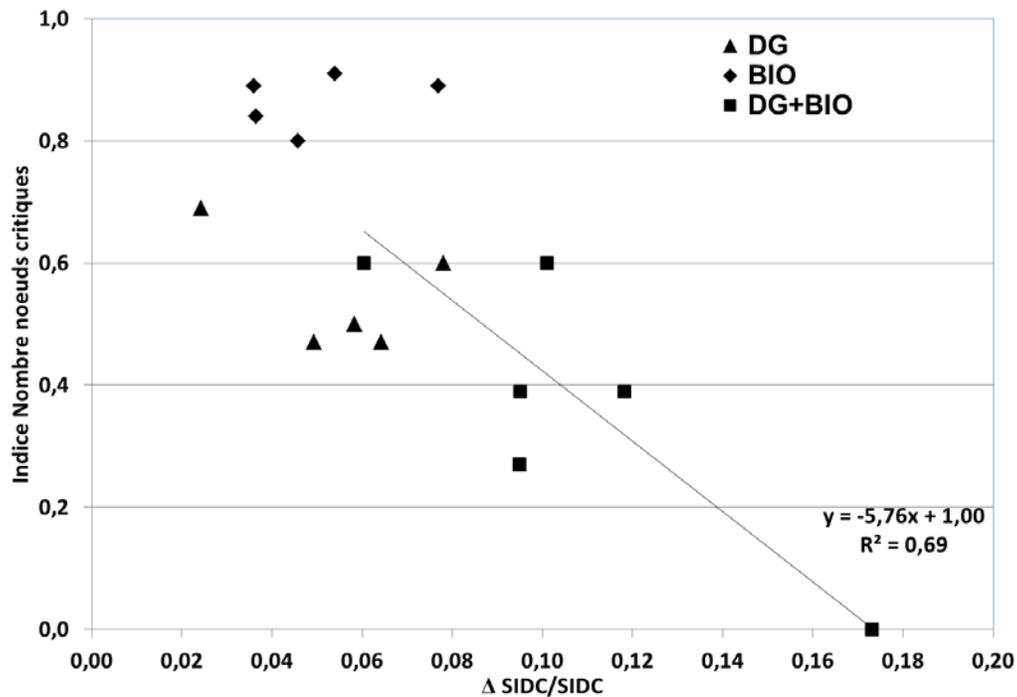


Figure 10.6 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 2 ans. La régression linéaire correspond au scénario d'adaptation DG+BIO (l'ordonnée à l'origine a été fixée à 1).

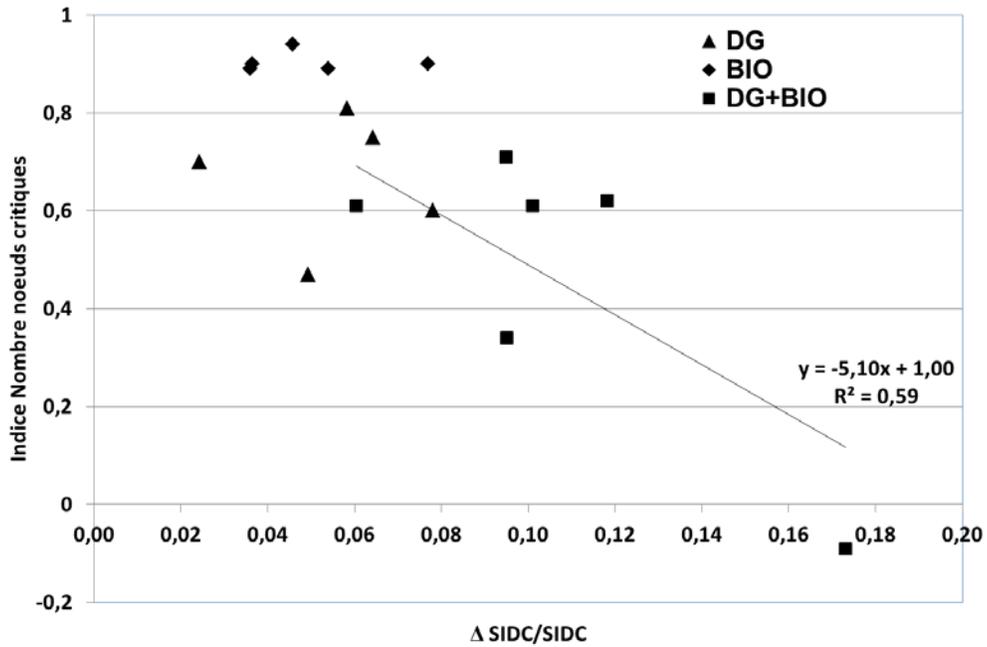


Figure 10.7 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans. La régression linéaire correspond au scénario d'adaptation DG+BIO (l'ordonnée à l'origine a été fixée à 1).

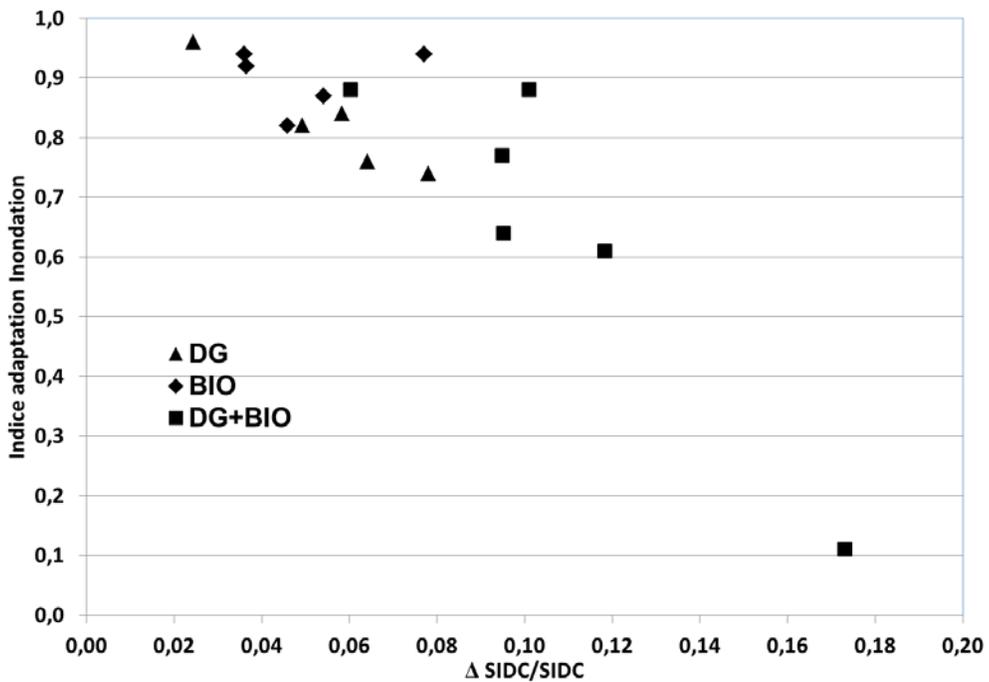


Figure 10.8 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 5 ans.

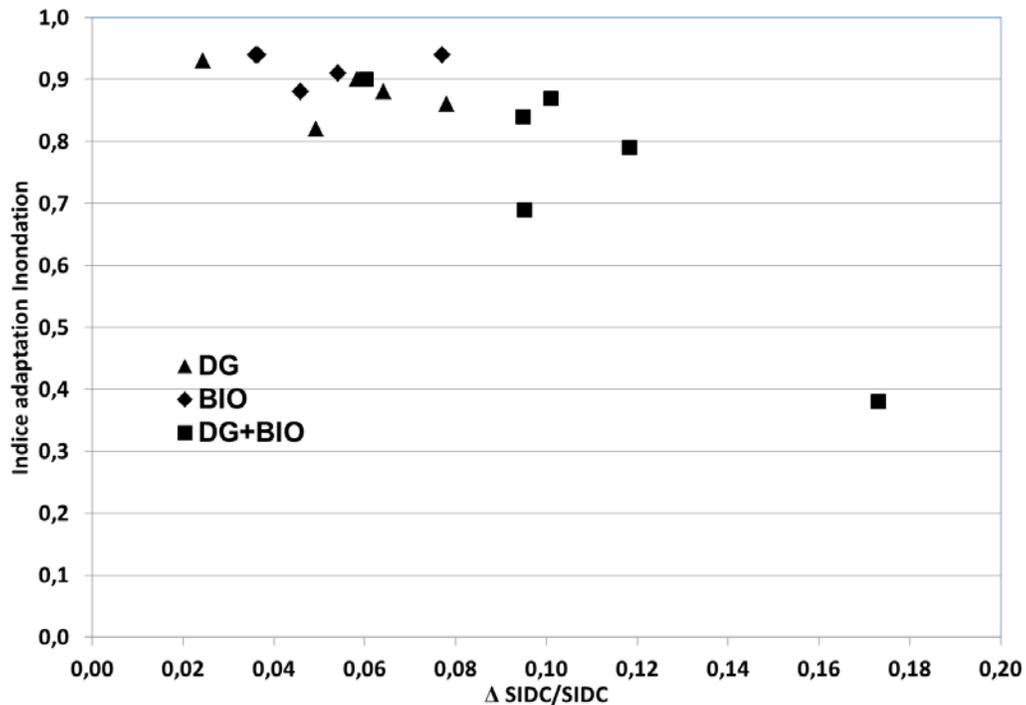


Figure 10.9 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la variation relative de SIDC pour la période de retour 10 ans.

10.4. Synthèse des principaux résultats

Les variations relatives de SIDC associées aux scénarios d'adaptation des secteurs sous étude sont pour la grande majorité inférieure à 0,1. De ce fait, les conclusions et constats rapportés dans ce chapitre ne sont valables et ne concernent que des variations relatives des SIDC de 10 % ou moins.

La comparaison des résultats des secteurs sous étude permet de dégager les conclusions et constats suivants :

- La fraction de SIDC est un bon indicateur du niveau général de vulnérabilité aux changements climatiques d'un secteur. En effet, les résultats de l'étude montrent que plus un secteur comporte une fraction de SIDC importante moins il sera en mesure d'infiltrer les volumes supplémentaires de pluie et plus les apports au

réseau seront importants. L'établissement du niveau de service en climat futur peut être évalué en considérant cette information et le niveau de service du réseau en climat historique. Ainsi, un réseau offrant un niveau de service inadéquat ou près de l'être en climat historique et comportant une fraction importante de SIDC risque de voir son niveau de service devenir problématique en climat futur.

- Pour la période de retour 2 ans, l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement des scénarios de types DG et BIO (et leur combinaison) est bien corrélé à la variation relative des SIDC ($\Delta\text{SIDC}/\text{SIDC}$ où ΔSIDC correspond à la variation de SIDC associée au scénario d'adaptation considéré) pour les secteurs étudiés. Ainsi, globalement une réduction relative de 10 % des SIDC permet de ramener l'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement à 0,5 (intervalle de 0,4 à 0,6). La mise en place de ces mesures permet donc une récupération substantielle du niveau de service historique mais ne permet pas à elle seule une récupération complète pour la période de retour 2 ans (qui correspond aux pluies les moins intenses donc celles pour lesquelles ce type de mesure est le plus efficace). La corrélation devient beaucoup moins nette lorsque l'on considère la période de retour 5 ans et l'efficacité de ce type de mesure est de beaucoup inférieure dans ce cas. De façon générale, une réduction de SIDC de 10 % conduit à un indice adaptation de l'indicateur Ruissellement entre 0,80 et 0,95. De plus, pour une réduction relative de SIDC équivalente, la diminution de l'indice adaptation est moindre dans le cas des scénarios DG. Ce résultat est essentiellement attribuable à la plus faible capacité d'infiltration des zones perméables des secteurs par rapport à la capacité d'infiltration des aménagements de biorétention.
- Pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques (qui, rappelons-le, est lié à l'étendue des zones à risque de refoulement et d'inondation), la corrélation entre variation relative des SIDC et indice adaptation se dégrade sensiblement même pour la période de retour 2 ans. Un tel résultat ne saurait surprendre puisque la réduction des apports au réseau aura des conséquences très diverses d'un réseau à l'autre puisqu'elle dépendra fortement des configurations, des diverses

particularités de ces réseaux et de la position des sites et des sous-bassins où les mesures sont mises en place. Somme toute, les résultats montrent que, malgré des réseaux très divers, la réduction des apports (paramétrée par la réduction relative des SIDC) conduit à une amélioration de la situation en matière de nombre de nœuds critiques. Grosso modo, sur la base des secteurs modélisés, une réduction de 10 % des SIDC permet d'obtenir un indice adaptation de l'ordre de 0,4 à 0,6 pour la période de retour 2 ans. Encore une fois, la capacité d'adaptation offerte par ce type de mesures s'amenuise lorsque la période de retour augmente. Ainsi pour la période de retour 5 ans, l'indice adaptation escompté pour une réduction de 10 % des SIDC sera de l'ordre de 0,6 à 0,8 (certains secteurs présentent de meilleures performances mais demeurent marginaux).

- Pour l'indicateur Inondation, tout comme pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques, l'effet global d'une réduction des apports dépendra de particularités locales des réseaux (configurations et caractéristiques) et des conditions particulières d'implantation (position du site et du sous-bassin d'implantation, conditions locales d'infiltration, etc.). Les résultats suggèrent qu'une réduction de 10 % des SIDC conduira à un indice adaptation de l'indicateur Inondation compris entre 0,6 et 0,9 pour la période de retour 5 ans alors que les valeurs correspondantes seront comprises entre 0,70 et 0,95 pour la période de retour 10 ans.

Tableau 10.7 : Intervalles de valeurs de l'indice adaptation selon les différents indicateurs et périodes de retour pour une réduction de 10 % des SIDC.

Indicateur	Période de retour (ans)	Fourchette de valeurs de l'indice adaptation
Ruissellement	2	0,40 - 0,60
	5	0,80 - 0,95
Nombre de nœuds critiques	2	0,40 - 0,60
	5	0,60 - 0,80
Inondation	5	0,60 - 0,90
	10	0,70 - 0,95

CHAPITRE 11 : SENSIBILITÉ AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES

Les chapitres précédents ont présentés les résultats des analyses d'impact et d'adaptation de secteurs urbains lorsqu'une augmentation de 15 % des intensités des pluies est considérée pour l'horizon 2040-2070. Cette hausse est basée sur les analyses des séries des pluies maximales annuelles produites par les modèles climatiques (Mailhot *et al.* 2008a,b ; Mailhot *et al.* 2012). Ces projections demeurent toutefois incertaines et pourront évoluer en fonction des avancées dans le domaine de la modélisation climatique et des connaissances en sciences du climat. Il est donc pertinent dans un tel contexte d'estimer dans quelle mesure les conclusions et constats précédents sont sensibles à ces projections. Le présent chapitre entend examiner cette question. Afin de couvrir une plage plausible d'augmentation des précipitations à l'horizon 2040-2070, les simulations des secteurs ont été reprises en considérant des hausses de 10 et 20 %. Des analyses similaires à celles réalisées aux chapitres précédents, utilisant les mêmes indices et indicateurs, ont été effectuées, analyses dont un résumé des principaux résultats est présenté dans ce qui suit. Un examen préliminaire des résultats obtenus montre par ailleurs que la variation des intensités de pluie entraîne un déplacement en bloc des fonctions de répartition des valeurs des différents indicateurs et indices. Dès lors, afin de simplifier l'analyse, seul le jeu de paramètre de référence (ou médian) est considéré (voir Tableau 6.1).

Le chapitre est divisé en trois sections. Une première section (Section 11.1) reprend essentiellement les analyses de la Section 10.1 et étudie la sensibilité des résultats obtenus quant à la répartition des volumes supplémentaires de pluie en fonction des hausses de précipitations considérées. La deuxième section examine la sensibilité des niveaux de service en climat futur obtenus par les différents scénarios d'adaptation aux hausses des précipitations (Section 11.2). Une dernière section fait un résumé des principaux résultats (Section 11.3).

11.1. Sensibilité des fractions infiltrées et rejetées en surverse ou au milieu récepteur

Les Tableaux 11.1 et 11.2 présentent un résumé des résultats pour les différents indicateurs alors que la Figure 11.1 présente les fractions du volume supplémentaire de pluie en climat futur sous forme de surverse ou d'eau rejeté au milieu récepteur pour les différents secteurs en fonction des hausses des précipitations considérées.

Tableau 11.1 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (fraction pluie infiltrée).

Période de retour (ans)	Hausse des précipitations (%)	Secteur					
		C Unitaire	B Unitaire	A ¹ Pluvial	D Pluvial	E ² Pluvial	F ¹ Pluvial
2	10	0,48	0,61	0,67	0,51		0,85
	15	0,45	0,60	0,66	0,52	0,78	0,84
	20	0,41	0,58	0,65	0,50		0,83
5	10	0,16	0,30		0,32		
	15	0,14	0,28	0,67	0,34	0,63	0,70
	20	0,14	0,26		0,31		

¹La période de retour 5 ans n'a pas été simulée pour les secteurs A et F pour les hausses de 10 et 20 %.

²Les hausses de 10 et 20 % n'ont pas été simulées pour le secteur E.

Tableau 11.2 : Résumé des résultats sur l'analyse des impacts des changements climatiques pour les secteurs sous étude (fraction pluie surverse/milieu récepteur³).

Période de retour (ans)	Hausse des précipitations (%)	Secteur					
		C Unitaire	B Unitaire	A ¹ Pluvial	D Pluvial	E ² Pluvial	F ¹ Pluvial
2	10	0,35	0,35	0,32	0,48		0,13
	15	0,36	0,35	0,33	0,47	0,63	0,14
	20	0,37	0,36	0,34	0,50		0,15
5	10	0,58	0,51		0,68		
	15	0,60	0,51	0,56	0,66	0,37	0,29
	20	0,62	0,50		0,69		

¹La période de retour 5 ans n'a pas été simulée pour les secteurs A et F pour les hausses de 10 et 20 %.

²Les hausses de 10 et 20 % n'ont pas été simulées pour le secteur E.

³La valeur correspond à la fraction de la pluie supplémentaire rejetée au milieu récepteur pour les réseaux pluviaux et à la fraction sous forme de surverse pour les réseaux unitaires.

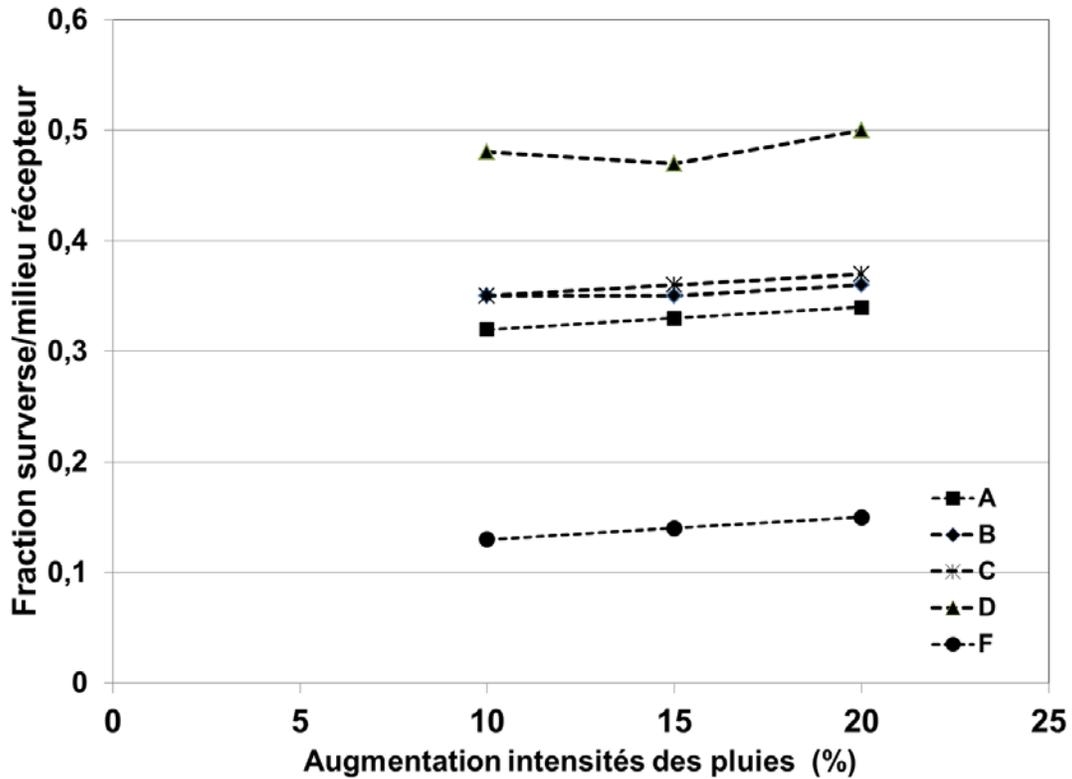


Figure 11.1 : Fraction de pluie supplémentaire en volume de surverse ou acheminée au milieu récepteur en fonction de l'augmentation des intensités de pluie pour la période de retour 2 ans.

Le graphique de la Figure 11.1 montre très clairement que la fraction de pluie supplémentaire rejetée (et conséquemment la fraction infiltrée) est peu sensible aux augmentations d'intensités de pluie pour la gamme de valeurs entre 10 et 20 %. Un résultat similaire est obtenu pour la période de retour 5 ans. Essentiellement, ce résultat montre que le volume d'eau rejeté en surverse et au milieu récepteur pour les secteurs sous étude est simplement proportionnelle au volume de pluie supplémentaire généré en climat futur pour des hausses comprises entre 10 et 20 % et les périodes de retour 2 et 5 ans.

11.2. Sensibilité des indices adaptation des différents indicateurs

Seuls les scénarios offrant les meilleures opportunités d'adaptation sont considérés. Le Tableau 11.3 présente la liste des scénarios d'adaptation retenus pour chaque secteur. Les Tableaux 11.4, 11.5 et 11.6 présentent par ailleurs les valeurs des indices adaptation des différents secteurs pour les scénarios sélectionnés en fonction des hausses des intensités des pluies en climat futur pour les indicateurs Ruissellement, Nombre de nœuds critiques et Inondation respectivement.

Tableau 11.3 : Scénarios d'adaptation retenus pour l'analyse de sensibilité aux hausses des intensités des précipitations

Secteur	Scénarios d'adaptation
C - Unitaire	DG+ BIO
B - Unitaire	DG
A - Pluvial	DG+ BIO
D - Pluvial	DG+ BIO1+ RC
E - Pluvial	DG

Tableau 11.4 : Indice adaptation pour l'indicateur Ruissellement en fonction des hausses des précipitations en climat futur (période de retour 2 et 5 ans).

Secteur – scénarios d'adaptation	Période de retour (ans)	Hausse des précipitations en climat futur		
		10%	15%	20%
C - DG+ BIO	2	0,28	0,60	0,75
	5	0,83	0,89	0,92
B - DG	2	0,48	0,71	0,84
	5	0,95	0,97	0,98
A - DG+ BIO	2	0,24	0,51	0,67
	5	0,78	0,86	0,90
D - DG+ BIO1+ RC	2	0,54	0,74	0,79
	5	0,66	0,89	0,90
E - DG	2	0,30	0,51	0,62
	5	0,78	0,89	0,94

Tableau 11.5 : Indice adaptation pour l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction des hausses des précipitations en climat futur (période de retour 2 et 5 ans).

Secteur – scénarios d'adaptation	Période de retour (ans)	Hausse des précipitations en climat futur		
		10%	15%	20%
C - DG+ BIO	2	-0,20	0,39	0,41
	5	0,79	0,70	0,74
B - DG	2	0,22	0,38	0,53
	5	0,66	0,75	0,91
A - DG+ BIO	2	-0,22	0,00	0,20
	5	0,40	0,46	0,50
D - DG+ BIO1+ RC	2	-0,07	0,17	0,41
	5	0,00	0,41	0,58
E - DG	2	0,25	0,24	0,49
	5	0,52	0,63	0,68

Tableau 11.6 : Indice adaptation pour l'indicateur Inondation (période de retour 5 ans) en fonction des hausses des précipitations en climat futur

Secteur – scénarios d'adaptation	Hausse des précipitations en climat futur		
	10%	15%	20%
C - DG+ BIO	0,67	0,81	0,83
B - DG	0,59	0,72	0,79
A - DG+ BIO	0,62	0,63	0,66
D - DG+ BIO1+ RC	-0,27	-0,05	0,10
E - DG	0,64	0,76	0,84

Les Figures 11.2 et 11.3 reprennent les résultats du Tableau 11.4 sous forme graphique. Comme attendu, l'indice adaptation dans ce cas diminue lorsque la hausse appréhendée est plus faible et augmente lorsque la hausse est plus élevée, le comportement des différents secteurs/scénarios d'adaptation étant relativement similaire. La sensibilité aux hausses appréhendées est beaucoup plus grande pour la période de retour 2 ans. A noter qu'aucun de ces scénarios ne permet de récupérer le niveau de service historique même pour une hausse des précipitations de 10 %.

Pour l'indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques, les résultats sont plus variables d'un secteur à un autre mais globalement on observe une réduction de

l'indice adaptation lorsque les hausses de précipitations sont plus importantes (Figures 11.4 et 11.5). Les scénarios d'adaptation permettent même pour trois secteurs (A, C et D) d'améliorer le niveau de service pour des hausses de 10 % par rapport à la situation historique. Il est intéressant de constater l'impact majeur que le redimensionnement de conduite a sur le secteur D puisque le nombre de nœuds critiques dans ce cas revient aux valeurs historiques pour les hausses de 10 %.

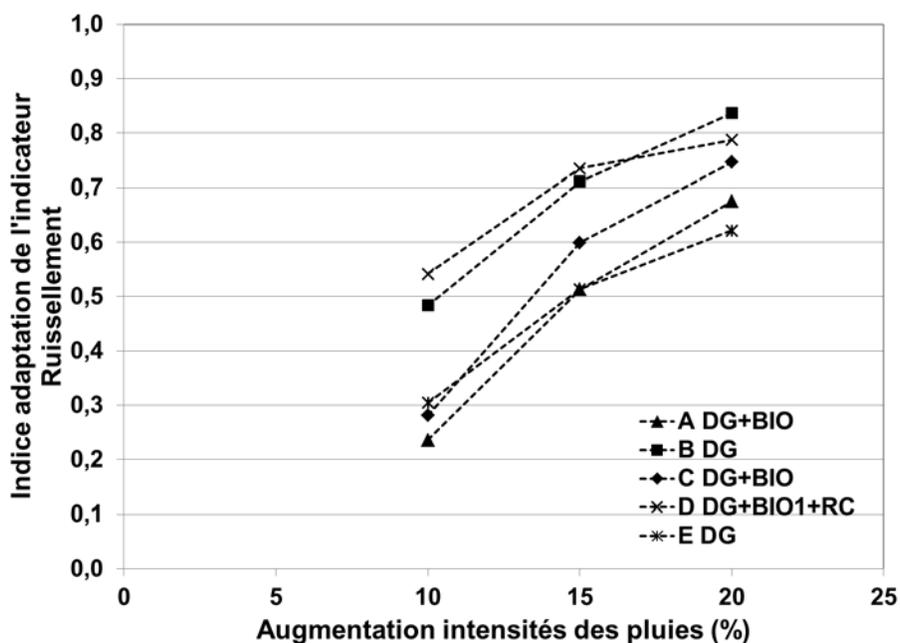


Figure 11.2 : Indice adaptation de l'indicateur Ruisselement en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 2 ans).

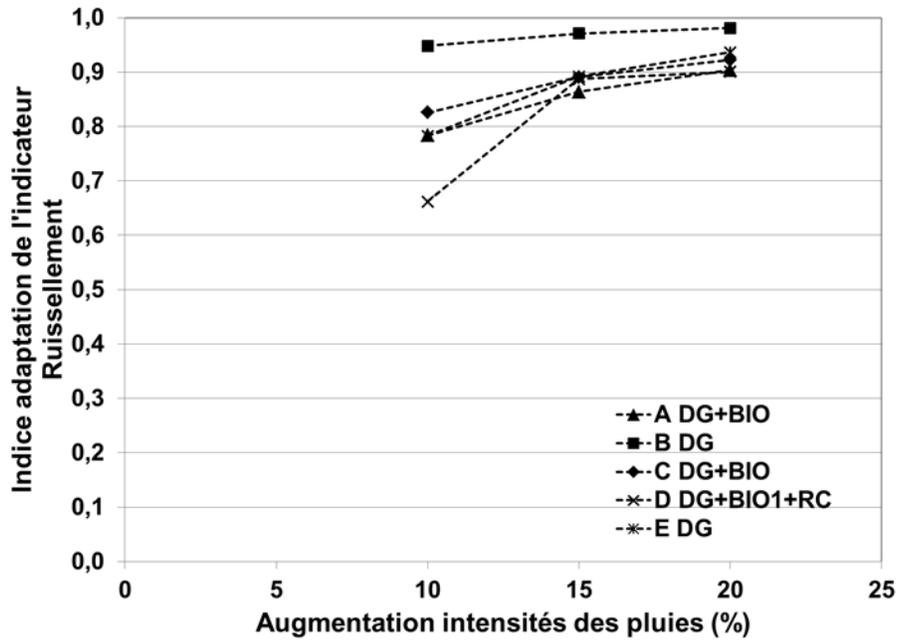


Figure 11.3 : Indice adaptation de l'indicateur Ruissellement en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).

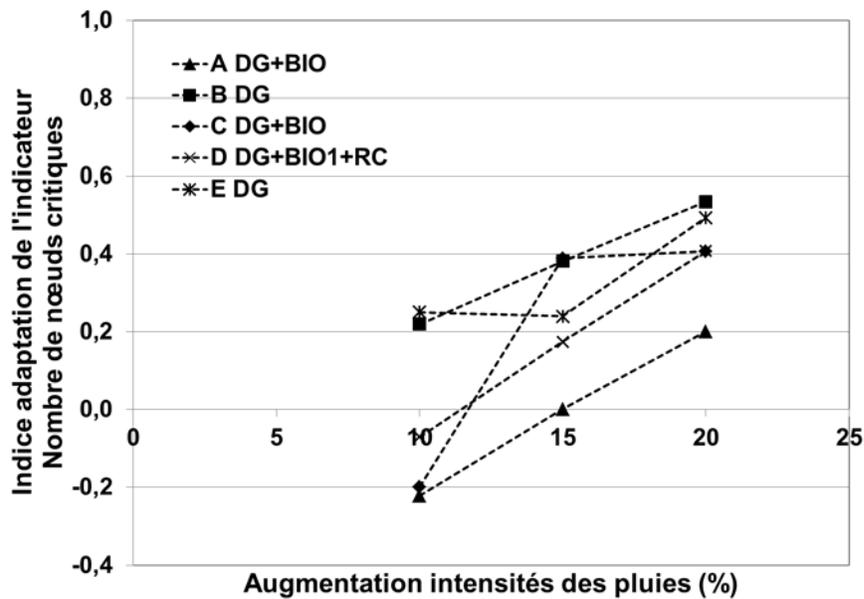


Figure 11.4 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 2 ans).

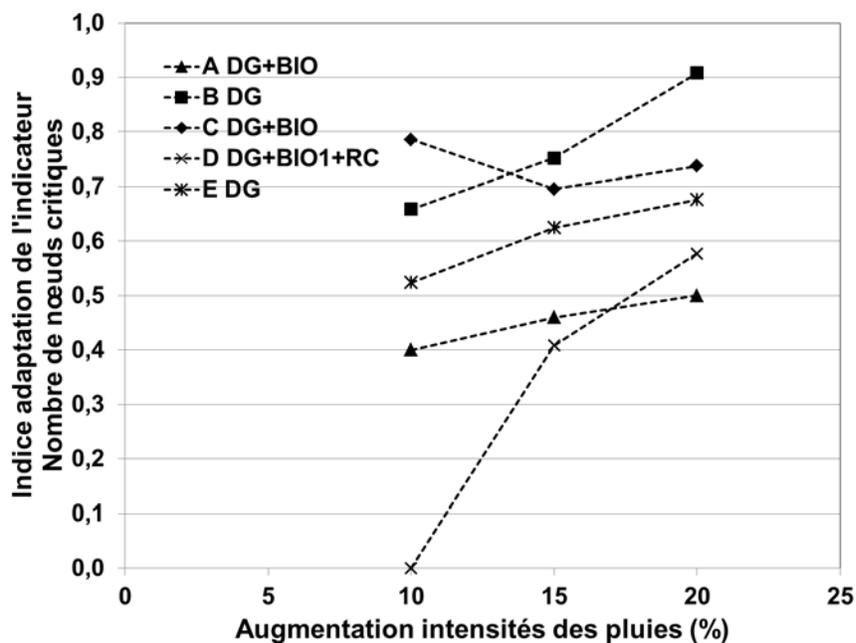


Figure 11.5 : Indice adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).

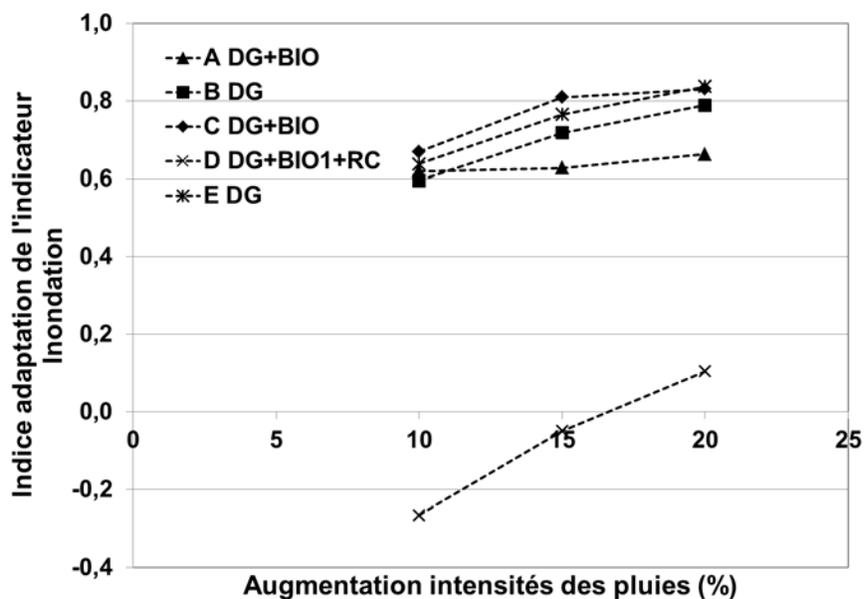


Figure 11.6 : Indice adaptation de l'indicateur Inondation en fonction de la hausse des intensités de précipitations pour les scénarios d'adaptation retenus de chaque secteur (période de retour 5 ans).

Un constat similaire s'applique à l'indicateur Inondation pour lequel le secteur D fait figure de mouton noir avec une récupération des niveaux de service historiques pour des hausses de 10 et 15 % pour la période de retour 5 ans. La sensibilité de l'indice adaptation pour les autres secteurs reste petite avec des indices variant *grosso modo* de 0,6 pour une hausse de 10 % à 0,8 pour une hausse de 20 %.

11.3. Synthèse des principaux résultats

La sensibilité des différents indices et indicateurs aux hausses appréhendées des précipitations à l'horizon 2040-2070 reste globalement très variable selon le secteur et le scénario d'adaptation considéré. Les résultats précédents permettent de dégager les conclusions et constats suivants :

- Pour les secteurs retenus, la fraction des volumes d'eau rejetée au milieu récepteur ou rejetée sous forme de surverse est approximativement constante pour la gamme d'augmentation comprise entre 10 et 20 % ce qui veut dire que ces volumes doubleront essentiellement pour une hausse de 20 % par rapport à la situation pour une hausse de 10 %.
- L'indice adaptation de l'indicateur Ruissellement varie presque linéairement pour des hausses des précipitations entre 10 et 20 % avec une augmentation légèrement moindre entre 15 et 20 % par rapport à l'augmentation entre 10 et 20 %. Cet effet s'explique par la réduction de la capacité d'infiltration lorsque les intensités des précipitations augmentent. Les variations enregistrées de l'indice adaptation pour la période de retour 2 ans pour des hausses de précipitations allant de 10 % et 20 % vont de 0,25 (secteur D) à 0,47 (secteur C), les autres secteurs enregistrant des variations intermédiaires (0,32 pour E, 0,35 pour B et 0,44 pour A). Les variations observées pour la période de retour 5 ans sont significativement inférieures (0,03 à 0,24).
- La sensibilité des indices adaptation de l'indicateur Nombre de nœuds critiques varie passablement selon le secteur et le scénario d'adaptation. Trois

combinaisons secteurs/scénarios d'adaptation voient leur niveau de service revenir au niveau historique pour la période de retour 2 ans et des hausses de 10 %.

- Pour l'indicateur Inondation, seule la période de retour 5 ans a été considérée. La sensibilité des niveaux de service de cet indicateur varie peu en fonction de la hausse des précipitations sauf pour le secteur D, qui, il faut le rappeler, est le seul secteur, avec le secteur E, comportant une mesure d'adaptation de type redimensionnement de conduite. Il s'agit d'ailleurs du seul secteur où les niveaux de service historiques sont récupérés pour des hausses de 10 et 15 % des précipitations.

Afin de permettre une comparaison globale des sensibilités des différents secteurs/scénarios d'adaptation aux hausses des précipitations, le Tableau 11.7 présente le classement des secteurs/scénarios d'adaptation selon la sensibilité de la réponse des différents indices adaptation. L'intensité de la sensibilité est simplement estimée en faisant la différence des indices obtenus pour des hausses de 20 et 10 %. Les résultats pour un indicateur et une période de retour donnée sont ensuite classés, le secteur le plus sensible correspondant à la variation la plus importante. L'examen du Tableau 11.7 montre que le secteur D se classe comme le plus sensible pour trois des cinq indicateurs/périodes de retour et le deuxième plus sensible pour une autre combinaison indicateur/période de retour. Par ailleurs, ce secteur est celui pour lequel le scénario d'adaptation est le plus efficace pour les indicateurs Nombre de nœuds critiques et Inondation. Cette efficacité a une contrepartie à savoir une plus grande sensibilité aux hausses de précipitations. En effet, une mesure inefficace à rétablir les niveaux de service historiques pour des hausses modérées des précipitations le restera si ces hausses sont plus élevées.

Tableau 11.7 : Classement des secteurs/scénarios d'adaptation du plus sensible au moins sensible selon les différents indicateurs et les différentes périodes de retour.

Indicateur	Période de retour (ans)	Plus sensible → Moins sensible				
Ruissellement	2	C	A	B	E	D
	5	D	E	A	C	B
Nombre de nœuds critiques	2	C	D	A	B	E
	5	D	B	E	A	C
Inondation	5	D	E	B	C	A

CHAPITRE 12 : VOLET ANALYSE ÉCONOMIQUE

La proposition initiale du projet comportait un volet portant sur l'analyse économique. Essentiellement cet axe de recherche avait pour objectif principal de traduire en termes économiques, les impacts des CC tels qu'estimés dans les autres axes de recherche du projet à travers le développement d'une méthodologie pour l'estimation du coût des dommages causés par la sous-capacité potentielle des systèmes en place à traiter et à évacuer les eaux pluviales en climat futur.

La section 12.1 reprend le sommaire exécutif du rapport *Gestion des eaux pluviales dans le contexte des changements climatiques - Volet analyse économique* rédigé par la firme AECOM. Le lecteur qui souhaite avoir plus de détails est invité à consulter ce rapport (AECOM .2013).

12.1. Sommaire exécutif du rapport AECOM

Contexte

En 2009, un groupe de recherche à l'INRS-ETE, en partenariat avec le Consortium de recherche Ouranos, débutait le projet de gestion des eaux pluviales dans le contexte des changements climatiques. Le projet vise à évaluer les impacts des changements aux régimes pluvieux sur les infrastructures de gestion des eaux pluviales dans divers secteurs urbains existants à l'horizon 2041 - 2061 et à élaborer des scénarios d'adaptation pouvant répondre à cette problématique. AECOM a été mandatée par Ouranos pour réaliser une analyse avantages-coûts de ces scénarios ainsi que d'un scénario sans projet (statu quo) dans un secteur donné. Ces scénarios ont été analysés pour deux projections climatiques, soit une augmentation de l'intensité de la pluie de 15 % et une augmentation de 20 %. L'horizon de l'étude est de 50 ans, débutant en 2010. L'année de référence de l'étude, 2010, correspond à la date de la base des données de la ville du secteur E utilisée dans le cadre de cette étude.

Le secteur d'étude, de 717 hectares (7,17 km²) de largeur, comporte environ 3 580 unités (résidences, commerces, entreprises, et institutions) dans environ 3 110 bâtiments principaux, soit environ 8 % des bâtiments de la ville. Les unités résidentielles avaient une valeur moyenne d'environ 190 000 \$ en 2010. Le secteur d'étude comprenait environ 7 700 personnes en 2006 (Statistique Canada 2006). Le réseau de drainage du secteur d'étude est composé généralement d'un système d'égout séparé, avec des instances d'un système d'égout pseudo-séparatif.

Les scénarios analysés sont les suivants. Le statu quo ne comporte aucune mesure d'amélioration du réseau de drainage pluvial à l'horizon de l'étude. Le scénario d'adaptation 1 vise le débranchement des gouttières qui connectent les toits en pente directement au réseau de drainage pluvial. Il a été estimé que 12,45 ha de toits en pente d'environ 1 245 maisons unifamiliales dans le secteur d'étude peuvent être ciblés par cette mesure. Le scénario 2 comporte d'abord les mesures du scénario 1. À ces mesures s'ajoute celle visant l'optimisation du fonctionnement de sept bassins de rétention par l'installation des vannes à flotteur à l'exutoire de ces bassins. Le scénario 3 comporte toutes les mesures des scénarios 1 et 2. À ces mesures s'ajoute la construction de 18 cellules de biorétention dans le secteur d'étude. Elles permettent le stockage temporaire et l'infiltration de l'eau de ruissellement pour ainsi réduire le volume et le débit d'eau acheminé vers le réseau de drainage. Le scénario 4 comporte toutes les mesures des scénarios 1 à 3. À ces mesures s'ajoute le redimensionnement de quatre tronçons de conduites du réseau de drainage pluvial afin d'optimiser l'écoulement de l'eau de ruissellement.

Méthodologie et résultats

Pour réaliser une AAC, les coûts de ces scénarios d'adaptation ainsi que les avantages qu'ils génèrent ont été évalués.

Évaluation des coûts

Les coûts des scénarios d'adaptation comprennent principalement les coûts d'immobilisation et les coûts d'entretien. Ils sont présentés au Tableau 1, et sont répartis sur trois ans à partir de 2010.

Tableau 1. Coûts de réalisation des scénarios d'adaptation (en \$ constants de 2010)

	Scénario d'adaptation			
	1	2	3	4
Coûts d'implantation (\$)	134 500	449 500	3 355 800	5 846 850
Coûts d'entretien annuel (\$)	-	-	183 700	183 700

Évaluation des avantages

Les avantages des scénarios d'adaptation sont en fait des dommages évités grâce à l'implantation des scénarios d'adaptation. Ils sont représentés par la formule conceptuelle suivante :

Avantages (scénario d'adaptation) = dommages évités (scénario d'adaptation)

= dommages (avec scénario d'adaptation) – dommages (sans scénario, c.a.d. statu quo)

Il faut donc évaluer les dommages propres à chaque scénario d'adaptation, ainsi que ceux du scénario de statu quo. Ensuite, la différence entre les dommages des scénarios d'adaptation et ceux du scénario de statu quo constituent les avantages de ces scénarios.

Les types de dommages causés par des inondations et des surverses sont catégorisés d'abord en tant que directs ou indirects. Les dommages directs résultent du contact direct entre l'eau d'inondation et les personnes, les bâtiments, les objets et l'environnement. Les dommages indirects sont induits par les dommages directs, et comprennent la perturbation des activités commerciales, la diminution de la consommation, le détournement de la circulation et le coût des services d'urgence.

Ensuite, les dommages sont catégorisés comme tangibles s'ils sont mesurables en termes monétaires, ou intangibles s'ils ne le sont pas.

Les dommages considérés dans cette étude sont présentés au Tableau 2. Trois sources de données ont été utilisées pour les évaluer, soit (1) une base de données SIG du secteur d'étude, (2) une enquête téléphonique auprès des résidents et des commerces du secteur d'étude et (3) des rencontres avec des experts en sinistres.

Généralement, pour quantifier les dommages des scénarios dans un contexte des changements climatiques, l'utilisation d'une méthodologie basée sur l'**évaluation des risques** est recommandée. Elle devrait, en principe, être utilisée pour l'évaluation de l'ensemble des dommages cités au Tableau 2. Toutefois, à cause d'un manque de données et des difficultés méthodologiques reliés à l'évaluation de nombreux dommages, la méthodologie d'évaluation des risques utilisée dans le cadre de cette étude a pu traiter seulement les dommages sur *les bâtiments et leurs contenus*. L'évaluation des autres dommages a été réalisée de façon quantitative et qualitative.

Évaluation des risques sur les bâtiments et leurs contenus

Le risque est le produit de l'interaction entre un danger et des vulnérabilités. Le danger (« *hazard* ») est le phénomène physique qui peut causer des impacts. Il se produit dans le secteur d'étude avec une certaine probabilité de récurrence annuelle.

La vulnérabilité est une fonction de :

- la possibilité des éléments (les êtres humains, les biens, les infrastructures, les processus socio-économiques, ainsi que le milieu naturel) d'être affectés par le danger (« *exposure* »); et,
- des dommages causés aux éléments affectés (« *consequence* »).

Tableau 2. Dommages considérés dans l'étude

Types de dommages	Type	Méthode d'évaluation
Dommages aux bâtiments et leurs contenus	Direct, tangible	Éval. des risques
Dommages aux infrastructures publiques	Direct, tangible	Quantitative
Investissements additionnels pour nettoyer la municipalité	Indirect, tangible	Quantitative
Accidents des voitures et blessures des piétons	Direct, tangible	Qualitative
Frais additionnels pour se reloger temporairement en cas d'inondation	Indirect, tangible	Qualitative
Perte de revenu pour les commerces, entreprises et industries	Indirect, tangible	Qualitative
Perte de revenu pour les employés des commerces, entreprises et industries affectés	Indirect, tangible	Qualitative
Augmentation du stress et de l'insécurité et détérioration de la qualité de vie	Indirect, tangible	Qualitative

Le danger dans le contexte de cette étude provient du débordement d'eau du réseau de drainage. En effet, lors d'un évènement de pluie, le réseau de drainage peut perdre sa capacité d'acheminer toutes les eaux de ruissellement qu'il reçoit vers les milieux récepteurs. Les eaux peuvent déborder du réseau à plusieurs points dans le secteur d'étude, produisant ensuite des inondations urbaines dans une zone locale (sous-bassin) autour de ces points. Les sous-bassins manifestant un danger d'inondation sont nommés des *sous-bassins en danger*. Le nombre de sous-bassins en danger dépend de l'intensité de l'évènement pluvial, ainsi que des mesures mises en place par les différents scénarios d'adaptation. Le portrait des sous-bassins en danger lié à chaque scénario a été évalué à l'aide du modèle hydrologique et hydraulique SWMM 5.0 et du SIG.

La vulnérabilité du secteur d'étude au danger lié au débordement du réseau de drainage a été évaluée. Généralement, la possibilité des bâtiments d'être affecté par les eaux d'inondation devrait être évaluée à l'aide d'un modèle hydraulique d'écoulement de l'eau en combinaison avec un modèle topographique du secteur d'étude. Ces modèles permettent l'identification précise de l'étendue de l'inondation, ainsi que les bâtiments affectés. Toutefois, cette étude n'a pas pu utiliser de tels modèles, car les ressources et les efforts nécessaires à l'emploi de ces modèles dépassent ceux disponibles à la présente étude.

Pour combler cette lacune, les bâtiments affectés dans les sous-bassins en danger ont été choisis en sélectionnant un échantillon de tous les bâtiments dans les sous-bassins en danger. La taille de l'échantillon de bâtiments a été calibrée en utilisant les données de réclamation des dommages fournis par les experts en sinistre. Les bâtiments faisant partie de l'échantillon ont été choisis de façon aléatoire.

Ensuite, les dommages aux bâtiments affectés et leurs contenus sont estimés à 5 % de la valeur d'immeuble en 2010. Lorsque cette dernière n'était pas disponible, une valeur de 9 000 \$ par bâtiment résidentiel et 25 000 \$ par bâtiment non résidentiel a été attribuée. Ces hypothèses proviennent des résultats de l'enquête téléphonique en combinaison avec des avis des experts en sinistres rencontrés.

La somme des coûts des dommages de l'ensemble des bâtiments affectés constitue le coût des dommages, ou le risque d'inondation, du scénario à l'étude. Ils sont présentés au Tableau 3.

Tableau 3. Risque par scénario exprimé en coût des dommages et en pourcentage d'augmentation par rapport au statu quo

Scénario climatique	Statu quo	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Climat historique (\$)	10 490 (100 %)	s/o	s/o	s/o	s/o
Projection 15% (\$)	21 980 (210 %)	21 350 (204 %)	21 200 (202 %)	16 540 (158 %)	12 480 (119 %)
Projection 20% (\$)	27 160 (259 %)	25 720 (245 %)	25 330 (242 %)	20 590 (196 %)	15 950 (152 %)

(%) augmentation par rapport au risque du scénario de statu quo, climat historique.

Le risque annuel en climat historique est évalué à 10 490 \$. À l'horizon de l'étude, ce risque augmentera à 21 980 \$ (210 % augmentation) par année pour la projection 15 %, et à 27 160 \$ (259 % augmentation) par année pour la projection 20 %. L'augmentation de l'intensité des pluies entre la projection 15 % et celle de 20 % engendra une hausse des risques à l'ordre de 3 000 à 5 000 \$ par année. Le risque est diminué relativement peu par les scénarios d'adaptation 1 et 2 comparés aux scénarios 3 et 4. Les gains du scénario 4 permettent au niveau de risque de se rapprocher de la situation du statu quo en climat historique. Enfin, les mesures d'adaptation réduiront plus le risque si le climat futur est plus sévère.

Les différences entre les risques des scénarios d'adaptation et du scénario de statu quo en climat futur constituent les avantages des scénarios d'adaptation. Les avantages sur 50 ans liés à la réduction des dommages aux bâtiments et à leurs contenus sont présentés dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4. Avantages des scénarios d'adaptation (réduction des dommages aux bâtiments et à leurs contenus en \$ constants de 2010)

Somme sur 50 ans	Scénario d'adaptation			
	1	2	3	4
Projection 15 % Réduction des dommages (\$)	15 640	19 390	135 940	237 410
Projection 20 % Réduction des dommages (\$)	36 050	45 690	164 380	280 360

Évaluation quantitative et qualitative des autres dommages

Une évaluation quantitative et qualitative des autres dommages qui n'ont pas pu être évalués selon la méthodologie d'évaluation des risques est décrite ci-dessous.

Dommages sur les infrastructures publiques et investissements additionnels pour nettoyer la municipalité – La Ville détient un fonds d'urgence pour régler les problèmes d'urgence pouvant se produire sur le territoire de la ville durant ou suite aux événements pluviaux. Par exemple, ce fonds peut être utilisé pour débloquer ou nettoyer les puisards, les ponceaux ou les conduites. Ce fonds peut être également utilisé pour nettoyer les rues et les terrains municipaux des débris. Il est estimé que les dommages causés aux infrastructures publiques augmenteront à cause des changements climatiques, mais ils peuvent être atténués grâce à l'implantation des scénarios d'adaptation. Pour représenter ces tendances, le taux d'augmentation annuelle du fonds d'urgence a été estimé à 1 % pour le scénario de statu quo. Les taux d'augmentation liés aux scénarios d'adaptation sont plus faibles, allant de 0,8 % pour le scénario 1 jusqu'à 0,2 % pour le scénario 4. Notons que ces taux sont arbitraires et aucune hypothèse n'est faite sur l'effet des projections climatiques sur ces taux. Les économies annuelles du fonds d'urgence sur l'horizon de l'étude représentent ainsi la réduction des dommages aux infrastructures publiques grâce aux scénarios d'adaptation. Ces économies sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5. Avantages des scénarios d'adaptation (réduction des dommages aux infrastructures publiques en \$ constants de 2010)

Somme sur 50 ans	Scénario d'adaptation			
	1	2	3	4
Réduction des dommages (\$)	37 900	73 400	106 660	137 830

Accidents des voitures et blessures des piétons - il est supposé qu'il y a eu très peu ou pas d'accidents de voiture associés au débordement du réseau de drainage. Le débordement d'eau du réseau de drainage n'arrive pas généralement comme une crue subite, mais plutôt de façon graduelle autour des points de débordement. Le détournement de la circulation des voitures autour des lieux inondés est plus probable que les accidents. Aucune donnée n'est toutefois disponible sur le coût lié au détournement de la circulation.

Frais additionnels pour reloger temporairement les résidents en cas d'inondation - très peu d'incidence de relogement se produit dans le cadre de cette étude, car l'inondation par l'eau de pluie est généralement « propre ». Aucun coût n'a alors été attribué à cet impact. Les frais pour le relogement temporaire des résidents suivant une inondation se produisent plus souvent dans le cas de refoulement des eaux domestiques puisqu'il présente des dangers pour la santé humaine.

Perte de revenus pour les commerces, entreprises, industries et employés - aucune donnée n'est disponible pour évaluer cet impact. Ces dommages sont considérés de façon implicite lors de l'évaluation des dommages aux bâtiments dans la méthodologie d'évaluation des risques.

Augmentation du stress et de l'insécurité et détérioration de la qualité de vie - cet impact est indirect et intangible à cause de la difficulté à établir des liens clairs entre le stress psychologique et les inondations urbaines. Toutefois, depuis les années 2000, le quartier n'est généralement pas un quartier à risque et les impacts de cette nature sont probablement minimes. Selon les représentants consultés, très peu, voire aucune

réclamation n'est faite pour les visites au psychologue à cause des inondations par les évènements de pluie.

Résultats de l'analyse avantages-coûts

Un projet est économiquement rentable si ses avantages sont plus importants que ses coûts. Les résultats de l'AAC de la présente étude sont présentés au Tableau 6. Tel qu'indiqué, aucun scénario d'adaptation du système de drainage pluvial n'est économiquement rentable.

Tableau 6. Résultats de l'analyse avantages-coûts des scénarios d'adaptation

VAN 4 %, Horizon 50 ans	Scénario d'adaptation			
	1	2	3	4
Coûts des scénarios d'adaptation				
Total des coûts (\$)	94 650	397 690	7 087 790	9 484 260
Projection 15 %				
Total des avantages (\$)	15 830	27 430	73 080	113 580
Avantages nets (\$)	78 810	370 250	7 014 710	9 370 680
Ratio A/C	0.167	0.069	0.010	0.012
Projection 20 %				
Total des avantages (\$)	22 090	35 500	81 800	126 750
Avantages nets (\$)	72 560	362 190	7 005 990	9 357 510
Ratio A/C	0.233	0.089	0.012	0.013

Quatre analyses de sensibilité ont été réalisées pour évaluer la robustesse des résultats de l'AAC. Compte tenu de la faible rentabilité économique des scénarios d'adaptation, la variation des paramètres de sensibilité sera faite de façon à améliorer les résultats seulement.

- Analyse 1 : Diminution du taux d'actualisation (2 %)
- Analyse 2 : Augmentation de la proportion des bâtiments affectés (2x)
- Analyse 3 : Augmentation du coût des dommages (2x)
- Analyse 4 : Augmentation de la proportion des bâtiments affectés (2x) et du coût des dommages (2x)

Aucune analyse de sensibilité ne rend les scénarios d'adaptation économiquement rentables.

Conclusions

L'étude économique a démontré qu'aucun scénario d'adaptation n'est économiquement rentable dans le secteur d'étude. Elle a toutefois démontré que cette rentabilité économique s'améliore à mesure que le climat futur se détériore. Ceci est dû au fait que les dommages dans le secteur d'étude doivent être plus importants avant que les avantages des scénarios d'adaptation puissent justifier économiquement leurs coûts. Malgré cette faible performance, elle a également démontré que le scénario de débranchement des gouttières (scénario 1) atteint la meilleure rentabilité économique, suivi par le scénario d'optimisation des bassins de rétention (scénario 2), le scénario de redimensionnement des conduites (scénario 4) et enfin le scénario de construction des cellules de biorétention (scénario 3).

Deux constats ressortent de la présente étude. D'abord, le secteur d'étude est très peu à risque d'inondation urbaine liée au débordement du réseau de drainage. En effet, le secteur comporte des bâtiments de valeurs relativement faibles, ce qui restreint le coût des dommages. De plus, la Ville a construit de nombreux bassins de rétention dans le secteur d'étude à la fin des années 1990, réduisant ainsi sa vulnérabilité de façon importante. Deuxièmement, les coûts des mesures d'adaptation sont trop importants compte tenu des réductions de risques probables. Les résultats de cette analyse pourraient être substantiellement différents dans une zone plus à risque avec des bâtiments de plus grandes valeurs où des bassins de rétention n'auraient pas déjà été mis en place.

Il faut souligner que les dommages qui ont pu être évalués dans cette étude étaient restreints. Elles relèvent surtout les dommages directs et tangibles aux bâtiments, à leurs contenus, ainsi qu'aux infrastructures publiques. La plupart des dommages indirects, tels que la perturbation des activités économiques à l'extérieur du secteur d'étude, n'ont pu être quantifiés à cause de l'envergure d'un tel exercice. De plus, les dommages sur les milieux environnementaux, dont l'érosion des berges et les impacts sur le milieu souterrain, ne sont pas inclus dans la présente étude à cause des difficultés d'évaluer ces impacts.

CHAPITRE 13 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La hausse des températures à l'échelle planétaire, induite par l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, entrainera des modifications des régimes de pluie de plusieurs régions du monde. En effet, une atmosphère plus chaude peut contenir plus d'humidité et est dès lors plus susceptible de générer des épisodes de pluie extrêmes. À ce titre, les projections climatiques actuellement disponibles pour le Canada suggèrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluie extrêmes au cours des prochaines décennies.

Une modification des régimes pluviométriques risque d'avoir des impacts majeurs en matière de gestion des eaux en milieu urbain puisque les infrastructures et systèmes en place ont été conçus à partir des séries de pluie historique. Cette conception reposant sur l'hypothèse d'un climat stationnaire, le niveau de service et de risque ainsi établi est supposé représentatif et valable du niveau de service de l'ouvrage pendant toute sa durée de vie utile. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes se traduira dans un tel contexte par une diminution du niveau effectif de service et aura pour conséquence des dépassements plus fréquents et de plus forte amplitude de la capacité des ouvrages en place. De façon plus concrète, une diminution du niveau de service signifie une augmentation de la fréquence et de l'étendue des inondations et des refoulements d'égouts.

Les enjeux et les défis face à une telle situation sont importants. Tout d'abord qu'en est-il de la vulnérabilité actuelle des systèmes en place ? Dans quelle mesure les hausses projetées des précipitations en climat futur risquent-elles d'augmenter la vulnérabilité des villes face aux événements de pluie extrême et d'entraîner une diminution du niveau de service actuel ? Quelles mesures peuvent être envisagées pour maintenir, ou à tout le moins, améliorer le niveau de service en climat futur, notamment dans le cas de secteurs déjà bâtis ? Certes une révision des critères de conception s'impose mais considérant la durée de vie utile d'une grande majorité des systèmes et ouvrages déjà en place, il importe d'examiner d'autres mesures.

C'est dans un tel contexte que le projet *Gestion des eaux pluviales et changements climatiques* financé dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements

climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada a été réalisé. Ce projet visait deux objectifs principaux : 1) évaluer les impacts des changements climatiques sur les niveaux de service de différents secteurs urbains existants en matière d'évacuation des eaux pluviales; et 2) évaluer le potentiel de diverses mesures d'adaptation afin de maintenir un niveau de service équivalent au niveau de service historique en climat futur. Six secteurs ont ainsi été retenus, deux drainés par un réseau unitaire (secteurs B et C) et quatre par des réseaux séparés (secteurs A, D, E et F). À noter que le secteur C avait déjà été considéré dans le cadre de travaux précédents. Il a été intégré à la présente étude puisqu'un seul réseau unitaire était disponible (B).

Le projet s'articulait autour de cinq axes de recherche : A. Projections climatiques (Chapitre 3); B. Modélisation hydrologique (Chapitres 4 et 5); C. Simulation hydrologique (Chapitres 6, 7 et 8); D. Analyse économique (Chapitre 12); E. Adaptation aux CC (Chapitres 9, 10, 11). Les paragraphes suivants reprennent ces axes de recherche, en rappellent les grands éléments de la méthodologie et présentent un résumé des principales conclusions.

Le premier axe de recherche du projet (A. Projections climatiques) avait comme objectif de développer des scénarios de projections climatiques : 1) des pluies extrêmes; 2) des événements de pluies; et 3) des pluies hivernales. Ces types d'événement météorologique ont été identifiés comme pouvant jouer un rôle important pour la gestion des eaux pluviales en climat futur.

Pour les pluies extrêmes, l'utilisation des séries du *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCAPP) combinant différents modèles globaux et régionaux du climat, a permis de développer des projections de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour l'horizon 2041-2070. Une telle approche, de type multi-modèles, permet une évaluation (encore sommaire) des différentes incertitudes associées aux projections climatiques. Ces travaux ont permis d'établir que les hausses des intensités des pluies extrêmes pour les périodes de retour de 2 à 10 ans seraient de 10 à 20 % supérieures pour les durées de l'ordre de une à quelques heures.

Les événements de pluie ont d'abord été analysés à partir des séries horaires de précipitations aux stations d'Environnement Canada comptant plus de dix ans de données valides (total de 434 stations). Seule la période de mai à octobre est considérée, les pluviomètres n'étant pas en fonction durant la période hivernale. Un événement de pluie est défini comme une succession de pluie horaire de 0,3 mm ou plus précédée et suivie d'au moins une heure où le total de pluie enregistré est de moins de 0,3 mm. Chaque événement de pluie est caractérisé par : 1) sa hauteur totale ; 2) sa durée ; 3) son intensité moyenne ; 4) son intensité maximale; 5) la durée de la période sèche antérieure (durée inter-événements). Une analyse préliminaire des tendances historiques de ces caractéristiques a été complétée. Elle suggère que, globalement, de l'ordre de 75 % des stations présentent des tendances significatives (seuil de 95%) à la hausse des médianes des distributions annuelles des hauteurs des événements et des distributions annuelles des intensités maximales sur une heure des événements de pluie et de 82 % pour les médianes des distributions annuelles des intensités moyennes des événements de pluie. Peu de stations présentent par ailleurs de tendances sur les durées des événements. Il faut toutefois rester très prudent face à ces résultats. En effet, un examen plus attentif des séries horaires de précipitations a permis de constater que plusieurs de ces séries présentent des ruptures dans les seuils de détection. Ainsi une série à une station pourra, par exemple, présenter des valeurs minimales non nulles (assimilables au seuil de détection de l'appareil) de 0,3 mm jusqu'à une année donnée et ensuite voir cette valeur diminuer à 0,2 mm, voire 0,1 mm. Cette rupture implique que la signification d'une heure sans pluie évolue dans le temps et pourrait être due à un changement d'appareil, à un changement d'observateur ou encore à un changement du protocole de mesure. Plusieurs des tendances détectées sur les caractéristiques des événements de pluie pourraient donc être factices et être la conséquence de ces inhomogénéités dans les séries. Un travail complémentaire est en cours afin d'éliminer les séries qui présentent de telles ruptures. Une classification des événements en fonction de leurs durées a également permis de montrer la nette dominance d'événement de courtes durées (trois heures et moins) pendant les mois d'été. Enfin, le travail d'analyse des séries du MRCC n'a pu être complété dans le cadre des travaux présentés dans ce rapport. Ce travail se poursuit actuellement.

Les pluies hivernales sont définies comme des pluies survenant pendant les mois d'hiver (janvier et février). Ce type d'événement météorologique peut résulter en des accumulations importantes d'eau dans les rues (l'écoulement de l'eau vers les puisards étant difficile à cause de la neige) voire en des inondations (sous-sols des maisons). Advenant une hausse globale des températures, il semble logique de penser que ce type d'événement météorologique sera plus susceptible de se produire en climat futur. Ce travail visait d'abord à analyser les tendances historiques pour le sud du Québec. Une méthodologie développée dans le cadre de travaux antérieurs a été reprise. Quatre indicateurs ont été définis et estimés : 1) la hauteur totale de pluie hivernale (mm) ; 2) la hauteur moyenne journalière (mm/jour; correspond au total de pluie hivernale divisé par nombre de jour avec données) ; 3) la hauteur maximale journalière (mm) ; et 4) le nombre de jours avec pluie. Cent trente-trois (133) stations localisées au Québec, comptant plus de 50 années de données journalières de précipitations (pluie et neige) et couvrant à des degrés divers la période 1900-2011 ont été analysées. Le nombre de jours avec pluie est l'indicateur présentant le plus grand pourcentage de tendances à la hausse (37 % des stations). Les indicateurs hauteur totale et hauteur moyenne journalière présentent des tendances significatives à la hausse (seuil de 95%) pour respectivement 26 et 29 % des stations. Enfin, une tendance à la hausse de l'intensité maximale journalière est détectée pour 16 % des stations. Il appert donc qu'effectivement le sud du Québec a connu au cours des dernières décennies une hausse du nombre de jours, de la hauteur totale annuelle, de la hauteur moyenne journalière de pluie hivernale et, dans une moindre mesure, une hausse des intensités maximales de pluie en période hivernale.

Le développement des projections pour les pluies hivernales en climat futur a été réalisé à partir de sept simulations du NARCAPP. Une comparaison avec les séries observées a d'abord été complétée. Cette dernière a permis de vérifier que, globalement, malgré une variabilité des résultats d'une simulation à une autre, les séries simulées reproduisent relativement bien le nombre de jours avec pluie, une majorité de simulations sous-estime la hauteur totale de pluie hivernale et les hauteurs maximales de pluie. La comparaison des indicateurs pour les périodes 2041-2070 et 1960-2000 montrent qu'une majorité de simulations suggère des hausses du nombre de jours avec pluies (de un à trois jours en moyenne), de la hauteur totale de pluie hivernale (de 5 à

10 mm) et de la hauteur maximale de pluie journalière (de 2 à 4 mm). Ces résultats montrent nettement que la fréquence et l'intensité des pluies hivernales augmentera très nettement en climat futur.

Le deuxième axe de recherche du projet (B. Modélisation hydrologique) avait comme principal objectif la mise en place du modèle hydrologique sur les secteurs sélectionnés. Le modèle SWMM version 5 a été utilisé pour la modélisation des six secteurs sous étude. Ce choix repose essentiellement sur des raisons pratiques puisque la très grande majorité des municipalités participant à l'étude utilisait déjà des versions de ce modèle hydrologique. Une représentation SWMM initiale de chacun des secteurs a été fournie par les municipalités participantes au projet. Des modifications ont toutefois été apportées à la plupart d'entre elles, le plus souvent afin d'affiner la résolution spatiale et améliorer le niveau des détails de ces représentations et permettre de répondre aux différents objectifs du projet. À terme ce travail a permis le développement des représentations SWMM de chacun des secteurs.

Le troisième axe de recherche du projet (C. Simulation hydrologique) avait comme objectifs de préciser le protocole de simulations, les indicateurs de performances utilisés pour caractériser le niveau de service et les pluies à utiliser. Une fois le protocole de simulation défini, une évaluation des impacts des changements climatiques (sans adaptation) a été réalisée pour les secteurs sous étude. Des travaux portant spécifiquement sur les impacts des CC sur les déversements de réseaux unitaires (DRU) ont également été complétés dans le cadre de cet axe de recherche.

Même si chacun de ces secteurs avait, en principe, fait l'objet d'une campagne de mesure afin de caler les représentations SWMM originellement développés par les municipalités et les consultants, il a été impossible d'accéder à ces données et donc de caler les nouvelles représentations SWMM développées dans le cadre de ce projet. Afin de pouvoir apprécier la variété des réponses hydrologiques possibles, des intervalles de valeurs plausibles, établies à partir d'une revue de littérature, ont été définis pour les sept principaux paramètres associés à l'infiltration, à l'écoulement et aux pertes par dépressions. Ainsi, pour chaque simulation, 2 187 jeux de paramètres (trois valeurs par paramètre pour 3^7 combinaisons possibles) ont été considérés.

Une pluie de conception de type SEA de durée une heure a été considérée et majorée de 15 % pour représenter les pluies de la période 2041-2070. Trois périodes de retour ont été retenues pour fin d'analyse à savoir 2, 5 et 10 ans. La période de retour 2 ans entend représenter le cas des pluies plus fréquentes (même si la plus grande partie du volume annuel de pluie est générée par des pluies de plus faible période de retour) alors que la période de retour 10 ans correspond aux pluies plus extrêmes susceptibles de causer des problèmes de refoulements.

En ce qui concerne les impacts des CC sur le bilan hydrologique, le volume d'eau supplémentaire généré par l'augmentation de l'intensité de la pluie en climat futur a été subdivisé en fonction des différentes composantes du bilan hydrologique. Dans le cas des secteurs drainés par des réseaux unitaires trois composantes ont été considérées : infiltration/rétention de surface, surverse et usine. Dans le cas des secteurs drainés par des réseaux pluviaux, deux composantes ont été définies : infiltration/rétention de surface et milieu récepteur. Afin de caractériser l'intensité des mises en charge, deux indicateurs sont également définis. Le premier est basé sur le nombre de nœuds pour lesquels la ligne piézométrique dépasse un seuil critique (indicateur Nombre de nœuds critiques) et un autre basé sur la valeur moyenne des dépassements maximums de ce seuil (sur toute la durée de la simulation) aux nœuds où le seuil est dépassé (indicateur Moyenne des dépassements maximums aux nœuds). Si le premier indicateur est représentatif de l'étendue des zones de mise en charge, le deuxième fournit quant à lui de l'information sur l'ampleur des mises en charge. Un dernier indicateur a finalement été défini qui correspond au volume d'eau expulsé des différents nœuds du réseau lors d'une simulation. Cette situation survient lorsque la ligne piézométrique dépasse la surface du sol. Cet indicateur fournit une information indirecte sur le potentiel (ou le risque) d'inondation. Il faut bien comprendre que, compte tenu de la représentation des réseaux et des limites du modèle, ce volume ne saurait être assimilé aux volumes d'inondation qui effectivement couvriront les zones à risque.

Les résultats montrent que, pour la période de retour 2 ans, les volumes d'infiltration provenant du volume supplémentaire d'eau en climat futur sont supérieurs aux volumes de ruissellement. Avec des conditions d'infiltration favorables, plus de 80 % du volume d'eau supplémentaire s'infiltré pour les secteurs les plus perméables (E et F) alors qu'avec les secteurs les plus imperméables (C et D), ce volume d'eau se divise en parts

égales entre le ruissellement et l'infiltration. Toutefois, pour tous les secteurs, même les plus perméables, on remarque une diminution importante des fractions de volumes infiltrés avec les périodes de retour 5 et 10 ans montrant ainsi que, pour de tels événements, la capacité d'infiltration des zones perméables de ces secteurs diminuent très rapidement.

Pour les secteurs drainés par des réseaux unitaires (B et C), la fraction d'eau supplémentaire acheminée à l'usine est peu élevée et varie très peu avec la période de retour notamment en raison des faibles capacités des structures acheminant les eaux vers les usines. Conséquemment, les volumes de surverse augmentent de façon marquée et ce d'autant plus que la période de retour augmente en raison des saturations progressives des zones perméables.

Pour ce qui est de l'étendue des mises en charge et des risques d'inondation (indicateurs Nombre de nœuds critiques et Inondation), les situations diffèrent d'un réseau à l'autre. Pour le secteur C, l'augmentation du nombre de nœuds critiques en climat futur, quoiqu'importante, reste de loin inférieure à l'augmentation pour le secteur B. Toutefois, les risques d'inondations pour le secteur C sont très importants tant en climat historique que futur comparativement au secteur B. De façon générale, l'augmentation de l'intensité de la pluie en climat futur provoque une croissance du nombre de nœuds critiques pour tous les secteurs. Pour certains secteurs, cela s'accompagne d'une hausse importante des volumes d'inondations (C et D) alors que pour d'autres (A et B) les volumes d'inondations en climat futur restent modérés.

Les débordements des réseaux d'égouts unitaires (DRU) représentent un enjeu environnemental de premier plan. Face à cette situation, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a élaboré la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales dont le principal objectif est de définir des normes de performance des ouvrages et infrastructures en place afin de mieux protéger la santé humaine et l'environnement à l'échelle nationale. Concernant plus spécifiquement les DRU, cette stratégie vise à inciter les municipalités à maintenir la fréquence des DRU au niveau historique malgré les développements urbains à venir. La mise en place de cette stratégie posera d'importants défis aux municipalités québécoises et sera sans conteste un enjeu majeur et un sujet de débat dans les

années à venir. Il paraît donc important de s'interroger sur le devenir des DRU dans un contexte de climat en évolution. L'objectif des travaux réalisés dans le cadre du projet était d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la fréquence et la durée des DRU, ces deux caractéristiques étant celles pour lesquelles des données sont disponibles.

Les données de DRU (occurrence et durée) de 30 ouvrages de surverse (ODS), répartis sur le territoire de 16 municipalités du Québec, ont été utilisées pour fin d'analyse. En recoupant ces données aux données de précipitations provenant de stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS, il a été possible d'associer les épisodes de DRU à un événement de pluie susceptible de l'avoir causé. La relation entre les DRU (fréquence et durée) et les caractéristiques de la pluie (hauteur de pluie, durée, intensité, etc.) a permis le développement d'un modèle probabiliste. Ce modèle permet, sur la base d'une série horaire de précipitation, de déterminer la probabilité d'occurrence d'un DRU et dans l'éventualité où il y a DRU, sa durée.

Ce modèle a par la suite été utilisé pour développer des projections sur l'évolution future de la fréquence et de la durée des DRU aux différents ODS sous étude. Les séries de précipitations simulées par le Modèle Régional Canadien (MRCC; simulations aet et aev) pour la région du sud du Québec ont servies de données d'entrée aux modèles probabilistes des DRU. Une comparaison des résultats pour les périodes futures (période 2071-2100) et historiques (période 1961-1990) montre qu'à l'échelle annuelle (période de mai à octobre) et pour l'ensemble des ODS, les variations de la fréquence annuelle des DRU sont faibles (près de 80 % des ODS présentent des variations comprises entre -5 % et 5 %) et non significatives. De même pour les variations des durées des DRU qui est moyenne de 4 % sur tous les ODS. A noter que les simulations aet et aev conduisent à des résultats très similaires.

L'examen des variations mensuelles révèle toutefois un autre portrait. Si les variations à l'échelle annuelle restent faibles, les variations à l'échelle mensuelle sont beaucoup plus marquées. Ainsi, pour les mois de juillet et août la fréquence moyenne des DRU pour l'ensemble des ODS diminuera d'environ 12 % alors qu'elle restera relativement inchangée pour les mois de juin, septembre et octobre. Quant au mois de mai, la fréquence des DRU augmenterait d'environ 12 %. Des résultats semblables sont

obtenus pour la durée avec des diminutions des durées totales des DRU pour les mois de juillet (-17 %) et août (-12 %), des augmentations pour les mois de mai (+23 %), septembre (+22 %) et octobre (+21 %) et peu de changement pour juin. On assiste donc à une redistribution des DRU à l'échelle intra-annuelle. Même si cette redistribution n'affecte pas les moyennes annuelles, on ne doit pas conclure pour autant qu'elle ne sera pas sans conséquence sur les milieux récepteurs. En effet, l'impact effectif des surverses dépend pour une part de la vulnérabilité du milieu récepteur au moment où elles surviennent. Ainsi une augmentation de la fréquence des DRU pendant un mois où le milieu est plus vulnérable pourra avoir des conséquences néfastes.

Le quatrième axe de recherche du projet (D. Volet économique) portait sur l'analyse économique et a fait l'objet d'un rapport distinct (AECOM, 2013) produit par la firme AECOM à qui ce mandat a été confié. L'objectif principal de ces travaux consistait à déterminer si les coûts de l'adaptation au CC se traduisaient par des gains économiques supérieurs en termes de réduction des dommages (analyse coût/bénéfice des mesures d'adaptation proposées). Compte tenu des contraintes liées à la disponibilité et à l'accès aux données économiques (p. ex. coûts des dommages), seul le secteur E a pu être étudié. Quatre scénarios ont été retenus. Un premier correspond au scénario de débranchement des gouttières (DG). Un second considère en sus du débranchement de gouttière, l'optimisation du fonctionnement de sept bassins de rétention (BR). Le troisième scénario inclut les mesures des deux premiers scénarios à laquelle s'ajoute la construction de 18 cellules de biorétention dans le secteur d'étude (BIO). Enfin le quatrième scénario intègre les mesures des trois premiers scénarios de même que le redimensionnement de quatre tronçons de conduites du réseau. L'évaluation des avantages de chaque scénario d'adaptation se fait en mettant en balance les coûts des dommages que la mise en place de ce scénario permet d'éviter et les coûts des dommages dans le cas où aucune mesure d'adaptation n'est mise en place. Ces avantages sont ensuite comparés aux coûts de mise en place de chaque scénario d'adaptation. Un scénario sera d'autant plus intéressants économiquement que les avantages qu'ils procurent sont supérieurs aux investissements qu'ils exigent.

L'étude économique révèle : 1) que le secteur est peu vulnérable et que le niveau historique de dommages est faible; 2) qu'aucun des scénarios d'adaptation proposé n'est économiquement rentable pour ce secteur ; et 3) que le scénario de

débranchement des gouttières (scénario 1) est le plus avantageux, suivi par le scénario d'optimisation des bassins de rétention (scénario 2), le scénario de redimensionnement des conduites (scénario 4) et enfin le scénario de construction des cellules de biorétention (scénario 3). Il convient de noter toutefois que les dommages considérés dans cette étude sont des dommages directs (bâtiments, infrastructures) et n'incluent pas les dommages indirects (p. ex. perturbation des activités économiques), les dommages et co-bénéfices environnementaux (p. ex. érosion des berges, détérioration des milieux récepteurs), par ailleurs très difficiles à évaluer.

Le cinquième axe de recherche du projet (E. Adaptation aux CC) visait à construire différents scénarios d'adaptation aux CC pour chacun des secteurs sous étude et à évaluer dans quelle mesure ces scénarios permettaient d'améliorer le niveau de service en climat futur et comment ce niveau de service se compare au niveau de service en climat historique. Les indicateurs utilisés pour établir ces niveaux de service sont les mêmes que ceux utilisés lors de l'étude sur les impacts des CC.

Les scénarios d'adaptation retenus se composent des mesures suivantes : 1) mise en place d'un programme de débranchement de gouttière (DG) ; 2) mise en place de système de biorétention (BIO) ; 3) redimensionnement de conduites (RC) ; 4) optimisation des bassins de rétention existants (BR). Les mesures de types DG et BIO visent essentiellement à rediriger les eaux de ruissellement vers des zones perméables où elles pourront être partiellement infiltrées. En termes de surfaces imperméables, ces mesures ont pour effet de transformer des surfaces imperméables directement connectées (SIDC) en surfaces imperméables indirectement connectées (SIIC).

Les scénarios d'adaptation retenus pour chacun des secteurs sont : Secteur C : DG, BIO, DG+BIO; Secteur B : DG, BIO, DG+BIO; Secteur A : DG, BIO, DG+BIO; Secteur D : DG, BIO1, BIO2, DG+BIO1, DG+BIO2, DG+BIO1+RC, DG+BIO2+RC; Secteur E : DG, DG+BIO, DG+BR, DG+RC, DG+BR+BIO, DG+BR+BIO+RC. Les sites d'implantation des diverses mesures ont été établis en fonction de l'occupation du territoire et des espaces disponibles en respectant un certain nombre de contraintes de conception (p. ex. pour le rapport entre les surfaces drainées par un système de biorétention et la surface de ce système). Ainsi le nombre de systèmes mis en place et le total des surfaces concernées varie d'un secteur à l'autre, de même que les SIDC

totales impliquées. Pour le redimensionnement de conduites, ce type de mesure a été sélectionné dans le cas de problèmes hydrauliques évidents survenant lorsque, par exemple, le diamètre des conduites diminuait d'amont en aval.

L'indice adaptation a été défini afin de permettre une comparaison des indicateurs en climat futur avec adaptation avec les valeurs en climat historique. Une valeur de cet indice près de zéro signifie que la valeur de l'indicateur en climat futur après adaptation est égale à la valeur en climat historique et que donc le niveau de service historique a été recouvert. Une valeur près de un signifie que la valeur de l'indicateur en climat futur après adaptation est à la valeur en climat futur sans adaptation et que donc le scénario d'adaptation n'améliore pas le niveau de service en climat futur par rapport à la situation sans adaptation. Enfin une valeur comprise entre 0 et 1 indique que le scénario d'adaptation améliore le niveau de service par rapport à la situation sans adaptation et permet de récupérer partiellement le niveau de service historique.

Bien que les résultats varient selon les secteurs et les scénarios d'adaptation envisagés, quelques grands constats se dégagent :

- Concernant les impacts des CC sur les niveaux de service des secteurs sous étude, on assiste à un accroissement (à des degrés divers) de la vulnérabilité des secteurs et des réseaux dans un contexte de CC. Les CC entraînent une baisse généralisée des niveaux de service (risque accru d'inondation tant en terme d'étendue des zones à risque que d'amplitude des inondations et des refoulements en réseau). La vulnérabilité d'un secteur est d'autant plus grande que ce secteur comporte une fraction importante de SIDC et qu'il offre un niveau de service problématique en climat historique.
- Bien que la mise en place du débranchement de gouttière et l'ajout de systèmes de biorétention permettent de réduire (à des degrés divers) les volumes de ruissellement en climat futur comparativement à la situation sans adaptation, aucun des scénarios d'adaptation simulés ne permet de retrouver les volumes de ruissellement obtenus en climat historique. De même aucun des scénarios d'adaptation examinés ne permet, même dans les conditions d'infiltration les plus favorables, de ramener les volumes

de surverses ou les volumes rejetés au milieu récepteur au niveau historique et ce même pour la période de retour 2 ans.

- Les scénarios d'adaptation de types DG et BIO ont des effets très divers sur l'étendue des mises en charge (indicateur Nombre de nœuds critiques). Dans tous les cas, l'étendue des zones de mise en charge diminue suggérant une diminution des risques liés aux refoulements en réseau. Selon les résultats de la présente étude, ce type de mesure ne permet toutefois pas à lui seul de rétablir les niveaux de service historique. De plus, leur efficacité dépend des capacités d'infiltration des zones perméables.
- L'efficacité des mesures de contrôle à la source sur les risques d'inondations et de refoulement dépendent de plusieurs facteurs locaux (configurations des réseaux, particularités hydrauliques locales) et aussi des endroits et sous-bassins où sont implantés les aménagements. Dans le cas présent, ces sites ont été déterminés non en fonction de l'impact sur les refoulements ou inondations mais en fonction de critères liés à l'occupation du territoire.
- Le redimensionnement de conduite est la mesure qui a le plus d'impact sur les mises en charge et les inondations. Dans le cas présent, il faut comprendre que ces mesures répondent à des problématiques locales précises que les simulations hydrauliques des réseaux en question ont rapidement mis en évidence. La mise en place de ce type de mesure demeure toutefois discutable dans le cas de réseaux ne présentant pas de problèmes hydrauliques majeurs. Les résultats obtenus montrent que l'adaptation aux CC exige d'abord de régler tout problème causant des déficiences hydrauliques majeures.
- Si les mesures de contrôle présentent un attrait certain et sont en quelque sorte des incontournables pour qui veut améliorer la performance d'un réseau, la présente étude suggère, dans les limites des hypothèses et des modèles utilisés, qu'elles ne peuvent à elles seules permettre une adaptation adéquate des systèmes existants aux CC particulièrement pour les événements de pluie les plus intenses. D'autres mesures telles que l'ajout de capacité de rétention sont à envisager ou encore toute mesure qui permettrait d'éliminer tout dysfonctionnement hydraulique.

Il ne faut pas oublier que l'exercice précédent demeure théorique. Ainsi les conditions d'infiltration des aménagements de biorétention sont optimales et correspondent aux conditions prévalent lors de la mise en fonction de ces aménagements. Les performances obtenues sont donc optimales dans une certaine mesure et pourraient se dégrader avec le temps selon l'entretien qui en est fait. Ceci soulève plusieurs questions relativement à l'entretien et à l'efficacité à long terme des systèmes de biorétention (et de tous les systèmes de ce type) tels que les problèmes de colmatage, de performance en conditions hivernales (sel de déglçage, épandage de sable) et de l'importance de l'entretien.

A la lumière des résultats et des conclusions de cette étude, quelles réponses peuvent être apportées aux questions suivantes :

1) Qu'en est-il de la vulnérabilité actuelle des systèmes en place ? Dans quelle mesure les hausses projetées des précipitations en climat futur risquent-elles d'augmenter la vulnérabilité des villes face aux événements de pluie extrême et d'entraîner une diminution du niveau de service actuel ?

D'abord, il importe de préciser que la vulnérabilité des secteurs sous étude a été évaluée en comparant divers indices caractérisant les niveaux de service en climat actuel et futur. Une diminution sensible de ce niveau de service signifie que le secteur en question est vulnérable aux modifications des régimes pluviométriques associées aux CC.

L'analyse des secteurs sous étude a permis de montrer, sans surprise, que la vulnérabilité aux CC est essentiellement conditionnée par le niveau de service en climat actuel. Un secteur pour lequel les risques d'inondation et de surcharge sont importants en climat historique sera susceptible de voir ces problèmes exacerbés dans un contexte de changements climatiques. L'étude de ces secteurs a également permis de montrer que la fraction de surface imperméable directement connectée (SIDC) par rapport à la surface totale est à considérer lorsque l'on veut évaluer la vulnérabilité d'un secteur puisque les volumes supplémentaires de ruissellement et d'infiltration pour les secteurs sous étude sont relativement bien corrélés à ces valeurs. Ainsi un secteur comportant une fraction plus importante de SIDC sera plus sensible à une augmentation des pluies

intenses et, ce faisant, connaîtra une augmentation conséquente des risques de refoulement et d'inondation. Si ce même secteur est déjà problématique en climat historique, il le sera encore davantage en climat futur. Il faut toutefois réaliser que l'échantillon de secteurs utilisés pour établir ces corrélations demeure faible et qu'il y a lieu de s'interroger sur la représentativité de l'échantillon de secteurs considérés.

En résumé, de façon globale, deux éléments déterminent la vulnérabilité d'un secteur face aux CC : 1) son niveau de service en climat historique et ;2) la fraction de SIDC. Il est important de noter que les problèmes hydrauliques du système actuel (p. ex. mauvaise séquence de diamètres, contraintes hydrauliques, obstruction dans le réseau par suite d'accumulation de sédiments, intrusion de racines) doivent être identifiés et réglés avant de songer à des mesures d'adaptation proprement dites.

2) Quelles mesures peuvent être envisagées pour maintenir, ou à tout le moins, améliorer le niveau de service en climat futur, notamment dans le cas de secteurs déjà bâtis ?

Certes une révision des critères de conception s'impose (comme le suggère le Guide de gestion des eaux pluviales à la Section 2.5), mais, considérant la durée de vie utile d'une grande majorité des systèmes et ouvrages déjà en place, il importe d'examiner d'autres mesures pour les systèmes déjà en place. L'adaptation aux CC, et donc le maintien voire l'amélioration du niveau de service dans un contexte de CC, passe par les étapes suivantes :

a. Identification des défaillances actuelles (p. ex. hydrauliques), optimisation des systèmes en place (p. ex. bassins de rétention) et mise en place de mesures afin de maximiser le niveau de service actuel : toute amélioration du niveau de service en climat actuel se traduit par une amélioration du niveau de service en climat futur. L'adaptation au CC passe donc obligatoirement par un examen diagnostique complet de la performance du réseau en climat historique. Ainsi, dans le cas des secteurs sous étude, des problèmes hydrauliques ponctuels ont été identifiés dans deux secteurs. Le redimensionnement de certaines conduites dans ces deux cas a permis d'accroître sensiblement le niveau de service.

b. Mise en place d'un programme de débranchement de gouttières (DG) : dans le cas de secteurs comportant des apports importants provenant des eaux de ruissellement des toits, la mise en place d'un programme de DG est une mesure à considérer sérieusement. Plusieurs municipalités du Québec (p. ex. ville des secteurs E et F) ont d'ailleurs mis en place de tels programmes au cours des dernières années. Certes sa mise en place comporte de très nombreux défis et les résultats peuvent varier énormément selon les conditions locales et la participation des citoyens. Cependant, une telle mesure peut avoir une incidence importante sur les volumes rejetés au milieu récepteur tels que le suggèrent les résultats de la présente étude. La réduction relative de la fraction de SIDC induite par le programme de DG est un bon indicateur du potentiel offert par ce type de mesure.

c. Mise en place de PGO : la réduction des apports au réseau peut également être réalisée par la mise en place de PGO dont l'objectif premier est de favoriser une plus grande infiltration des eaux de ruissellement provenant des surfaces imperméables. L'étude a montré que ce type de mesure sera d'autant plus efficace que les aménagements seront disséminés sur le territoire. Les zones commerciales et industrielles doivent être privilégiées dans un premier temps puisque l'on y retrouve de très grandes surfaces imperméables (p. ex. stationnement). Ce type de mesure reste encore peu valorisé au Québec. En effet, pour plusieurs intervenants du monde municipal l'efficacité à long terme de ce type de mesure reste à démontrer dans des conditions climatiques similaires à celles du Québec. La multiplication d'essais pilotes pourrait permettre sans doute de vaincre cette résistance et de favoriser l'implantation à grande échelle de ce type de mesure. La réduction relative de la fraction de SIDC induite par la mise en place PGO serait, selon les résultats de la présente étude, un bon indicateur du potentiel offert par ce type de mesure.

d. Augmentation de la capacité de rétention : si les mesures précédentes s'avèrent intéressantes pour les pluies de plus faibles périodes de retour (2 ans et moins), leur efficacité à gérer les pluies plus extrêmes diminuent rapidement en fonction de l'intensité de ces dernières. L'analyse des secteurs sous étude a en effet montré que la mise en place à grandes échelles de mesures de réduction des apports (DG et PGO) ne permet pas de récupérer les niveaux de service en climat historique lorsque les pluies intenses augmentent de 10 à 20 %. D'autres mesures, visant essentiellement à augmenter les

capacités de rétention, doivent donc être envisagées. Il est important de souligner que l'implantation préalable de PGO et d'un programme DG réduirait les volumes de rétention supplémentaires à ajouter.

Les principales limites de la présente étude, qui en définissent la portée et l'applicabilité à plus grande échelle, sont décrites aux paragraphes suivants. Certaines perspectives quant aux travaux futurs à réaliser afin d'améliorer la portée de la présente étude sont également évoquées :

- Les projections climatiques utilisées dans le cadre de la présente étude (p. ex. majoration de 10 à 20 % des pluies maximales annuelles à l'horizon 2041-2070) sont issues des versions les plus récentes des modèles régionaux et globaux du climat (séries du NARCCAP, MRCC). Ces modèles intègrent les connaissances les plus récentes en matière de science du climat. Ils sont toutefois appelés à évoluer notamment à travers une amélioration de la résolution spatio-temporelle et de la représentation des processus à petites échelles. Même s'il serait étonnant que les projections climatiques à venir diffèrent diamétralement de celles actuellement disponibles, il faut être conscient que ces projections comportent des incertitudes parfois importantes comme par exemple pour les projections sur les extrêmes de précipitations. Les projections actuelles pourraient par exemple sous-estimer les valeurs effectives en climat futur. Une source d'incertitude importante provient de la variabilité interne (ou naturelle) du climat. Plusieurs auteurs ont montré l'importance de cette variabilité et suggèrent que les projections climatiques actuelles explorent insuffisamment la variabilité interne (Hawkins et Sutton, 2009, 2011; Deser et al., 2012).

- Le modèle SWMM utilisé dans cette étude est le modèle hydrologique urbain le plus couramment utilisé au Québec. Ce modèle, comme tout modèle, demeure une représentation approximative du système réel, utile certes, mais dont les résultats sont entachés de possibles incertitudes et dont la représentation de certains processus peut s'avérer inexacte dans une certaine mesure. Ainsi, la représentation des systèmes de biorétention dans SWMM demeure approximative et néglige plusieurs processus. Il n'est pas dit cependant qu'une représentation plus fine des processus en jeu permettrait d'améliorer les résultats à l'échelle d'un sous bassin.

- Faute d'avoir accès aux données ayant servis à calibrer le modèle SWMM aux différents secteurs et puisque la résolution spatiale des représentations spatiales des secteurs a dû être affinée, il n'a pas été possible de procéder à un calage des modèles pour chaque secteur. Conséquemment des fourchettes plausibles de valeurs des paramètres ont été définies, des simulations réalisées pour chacun de ces jeux de paramètres et les conclusions tirées en analysant l'ensemble de ces résultats. Cette approche a permis de bien circonscrire la sensibilité des conclusions aux jeux de paramètres choisis. Toutefois, l'absence de données mesurées (p. ex. débits en différents points du réseau et données de pluie associées) n'a pas permis de valider l'approche et de voir dans quelle mesure la situation simulée reproduit la situation observée.
- Les résultats des applications aux différents secteurs montrent l'importance des conditions et configurations locales en termes d'impacts et d'adaptation aux changements climatiques. Même si la présente étude peut prétendre explorer une diversité de secteurs plus importante que bon nombre d'études antérieures, il demeure que chaque secteur présente une occupation du territoire et une configuration de réseau unique qui rende toute extrapolation délicate. L'étude a tout de même permis de montrer que les résultats sur les différents secteurs sont cohérents et que certains paramètres clefs jouent un rôle de premier plan dans la réponse hydrologique et l'adaptabilité aux CC.
- Les événements de pluie considérés dans la présente étude sont associés à des périodes de retour de 2 à 10 ans. Ces pluies présentent donc un caractère extrême et ne représentent pas les pluies plus fréquentes de plus faibles intensités. La présente étude ne considère donc pas le spectre complet des événements de pluie à gérer par les systèmes en place. Les pluies de plus faibles intensités jouent souvent un rôle de premier plan dans les épisodes de déversement de réseaux unitaires. Ainsi, ne considérer que des pluies intenses implique que le rôle des PGO est sous-valorisé puisque ces ouvrages sont plus efficaces pour la gestion des pluies de plus faibles intensités. La mise en place de ce type de mesures permettrait incidemment de diminuer les fréquences des surverses, enjeu actuel majeur pour de nombreuses municipalités dans le contexte de la mise en place de la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales. A ce titre, l'utilisation de chroniques de pluies

historiques (p. ex. pluies sur plusieurs années au pas de temps de 5 minutes) permettrait d'explorer diverses conditions hydrologiques et d'évaluer les fréquences et les volumes des rejets au milieu récepteur (réseaux unitaire ou pluvial). L'évaluation des impacts en climat futur exige toutefois de développer des projections climatiques de ces chroniques, un défi dans le contexte actuel des résolutions spatio-temporelles des modèles climatiques. Une telle approche ouvrirait la porte à l'examen de scénarios où les PGO seraient utilisés afin de réduire les volumes rejetés au milieu récepteur. La présente étude a tout de même permis de montrer que les PGO avaient un impact non négligeables dans la gestion des pluies de périodes de retour 2 et 5 ans.

- L'étude s'est limitée au volet quantitatif des eaux pluviales. En effet, la qualité des eaux pluviales n'a pas été considérée. La modélisation de la qualité des eaux pluviales demeure encore aujourd'hui très approximative expliquant en partie ce choix. Cependant, de nombreux auteurs ont souligné l'importance de considérer à la fois les volets quantitatifs et qualitatifs compte tenu des impacts majeurs sur les milieux récepteurs (voir p. ex. Marsalek et Chocat, 2002). A notre connaissance, peu d'études se sont encore intéressées aux impacts des CC sur la qualité des eaux pluviales. La mise en place de PGO végétalisés est une option intéressante dans un tel contexte puisque ce type de système permet d'améliorer la qualité des eaux acheminés au réseau et réduit les charges rejetées au milieu récepteur.
- Le Guide de gestions des eaux pluviales suggère à la section 2.5 de revoir les critères de conception des ouvrages de gestion des eaux pluviales. Évidemment, cette recommandation est pertinente pour la conception de nouveaux ouvrages et une majoration globale recommandée est de l'ordre de 15 %. La présente étude s'est intéressée au cas de secteurs déjà bâtis et a permis de fournir des éléments permettant d'estimer les impacts potentiels des CC et de suggérer des avenues pour la mise en place de mesure d'adaptation. Une mise à jour éventuelle du Guide devrait intégrer les approches et résultats de la présente étude afin que l'ensemble de la communauté puisse en bénéficier.
- Il serait important d'augmenter le nombre de secteurs urbains analysés. La procédure proposée pourrait être appliquée à d'autres secteurs urbains permettant ainsi d'accroître la diversité de secteur considéré et de voir dans quelle mesure les

conclusions et résultats issues de la présente étude demeurent valables pour d'autres secteurs.

- Une analyse plus détaillée et à plus fine échelle d'un secteur est à considérer. Cette analyse devrait comprendre une campagne de mesures à grandes échelles (pluies, débits) de plusieurs sites. Une telle campagne devrait s'échelonner sur plusieurs années afin de pouvoir échantillonner des conditions hydrologiques diverses. La modélisation SWMM pourrait bénéficier de ce type de campagne, d'une part en permettant de caler le modèle et de le tester en mode validation, mais aussi afin d'identifier de possibles déficiences dans la représentation de certains processus.
- Le développement des PGO au Québec passe par la mise en place de différents sites pilotes. Afin de montrer l'efficacité de ce type de mesure, des campagnes de suivi de ces sites doivent être mise en place sur plusieurs années. Ces sites pilotes permettraient par ailleurs d'adapter ces systèmes aux conditions spécifiques du Québec et d'identifier des éléments clés afin d'en optimiser la performance à long terme. Parallèlement, un travail de modélisation des PGO devrait être entrepris et alimenté par les données terrains.

CHAPITRE 14 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AECOM (2013). Gestion des eaux pluviales dans le contexte des changements climatiques - Volet analyse économique, Rapport final 60244990, 45 p.

Ahiablame L.M., Engel B.A., Chaubey I. (2012). Effectiveness of low impact development practices : Literature review and suggestion for future research. *Water Air Soil Pollut.*, 223(7), 4253-4273. Doi : 10.1007/s11270-012-1189-2.

Amaguchi H., Kawamura A., Olsson J., Takasaki T. (2012). Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. *J. Hydrol.*, 420-421 : 205-215. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2011.12.003.

Arnbjerg-Nielsen L. (2011). Past, present, future design of urban drainage systems with focus on Danish experiences. *Water Sci. Technol.*, 63(3) : 527-535. Doi : 10.2166/wst.2011.253.

ASCE et WEF (1969). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems. American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation, Reports of Engineering Practice, No. 77, New York, NY and Water Environment Federation, Manual of Practice No. FD-20, Alexandria, VA, 724 p.

Asleson B.C., Nestingen R.S., Gulliver J.S., Hozalski R.M., Nieber J.L. (2009). Performance assessment of rain gardens. *J. Am. Water Resour. As.*, 45(4), 1019-1031. Doi : 10.1111/j.1752-1688.2009.00344.x.

Atchison D., Potter K., Severson L. (2006). Design guidelines for stormwater bioretention facilities. University of Wisconsin-Madison, Civil & Environmental Engineering, Water resources institute, 33 p.

Auer A.H. (1974). The Rain Versus Snow Threshold Temperatures. *Weatherwise*, April, p. 67.

Bentley (2012). SewerGEMS : Urban Sanitary and Combined Sewer Modeling. Product data sheet, 2 p.

- Berggren K., Olofsson M., Viklander M., Svensson G., Gustafsson A.-M. (2012). Hydraulic impacts on urban drainage systems due to changes in rainfall caused by climatic change. *J. Hydrol. Eng.*, 17 (1): 92-98. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000406.
- Berne A., Delrieu G., Creutin J. D., Oblet C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *J. Hydrol.*, 299(3-4) : 166-179. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2004.08.002.
- Blecken G.T., Marsalek J., Viklander M. (2011). Laboratory study of stormwater biofiltration in low temperatures: Total and dissolved metal removals and fates. *Water Air Soil Poll.*, 219 (1-4), 303-317. Doi : 10.1007/s11270-010-0708-2.
- Blecken G.T., Zinger Y., Deletic A., Fletcher T.D., Hedstrom A., Viklander M. (2010). Laboratory study on stormwater biofiltration nutrient and sediment removal in cold temperatures. *J. Hydrol.*, 394 (3-4), 507-514. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2010.10.010.
- Bolduc S. (2010). Gestion des eaux pluviales et adaptation aux changements climatiques : le cas d'un secteur de la Ville de Montréal. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, 135 p.
- Boucher I. (2010). La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable, ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 118 p.
- BPR (2008). Évaluation des coûts unitaires des mesures d'adaptation aux changements climatiques en drainage urbain. Ville de Montréal, CSOB828 (60ET), 68 p.
- Bracken L.J., Cox N.J., Shannon J. (2008). The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrol. Process.*, 22(5) : 683-696.

- Brière F.G., (2006). Distribution et collecte des eaux, Deuxième édition, revue et corrigée, Presses internationales Polytechnique, 401 p.
- Butler D., Davies J.W. (2006). Urban drainage. Second Edition, Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York, 543 p.
- Cann D.B., Lajoie D. (1943). Étude des sols des comtés de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton, dans la province de Québec. Publication 742, Bulletin technique 45, Dominion du Canada - Ministère de l'agriculture, 69 p.
- Carpenter D.D., Hallam L. (2010). Influence of planting soil mix characteristics on bioretention cell design and performance. J. Hydrol. Eng.-ASCE, 15(6), SI, 404-416. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000131.
- Caya D., Laprise R. (1999). A Semi-Implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM, Mon. Wea. Rev., 127, 341-362.
- Chahar B.R., Graillet D., Gaur S. (2012). Storm water management through infiltration trenches. J. Irrig. Drain. E.-ASCE, 138(3), 274-281. Doi : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000408.
- Chang N.B. (2010). Hydrological connections between low-impacts development, watershed best management practices and sustainable development. J. Hydrol. Eng., 15 (SI 6) : 384-385. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000236.
- Chen C. T., Knutson T. (2008). On the verification and comparison of extreme rainfall indices from climate models. J. Climat., 21(7) : 1605-1621. Doi : 10.1175/2007jcli1494.1.
- Chen M., Shyamprasad S., Heineman M., Carter C.S. (2008). Representation of non-directly connected impervious area in SWMM runoff modeling. Reliable Modeling of Urban Water Systems, Monograph 16, James, Irvine, McBean, Pitt, Wright, Eds. Chapter 18, 295-307.

- Cheng M.-W., Zhen J.X., Shoemaker L. (2009). BMP decision support system for evaluating stormwater management alternatives. *Front. Environ. Sci. Engin. China*, 3(4), 453-463. Doi : 10.1007/s11783-009-0153-x.
- Chow V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, 680 p.
- Clar M.L., Green R. (1993). *Design manual for use of bioretention in stormwater management*. Dept. of Environmental Resources, Prince George's County, Md.
- Coles S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*, Springer series in statistics. Springer-Verlag, London, UK, 208 p.
- Crawford N.H., Linsley R.K. (1966). *Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV*, Technical Report No. 39, Department of civil engineering, Stanford University, California, 210 p.
- CSA (2012). *Development, interpretation, and use of rainfall intensity-duration-frequency (IDF) information: Guideline for Canadian water resources practitioners*, Canadian Standards Association, 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada, 190 p.
- D'Aoust S., Julien L., Comeau A, (2012). CSO control in a changing climate: A practical approach to planning & design. *Journal of New England Water Environment Association* 46(1): 39-48.
- Davis A.P. (2008). Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *J. Hydrol. Eng.-ASCE*, 13(2), 90-95. Doi : 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(90).
- Davis A.P., Hunt W.F., Traver R.G., Clar M. (2009). Bioretention technology: overview of current practice and future needs. *J. Env. Eng. Div.-ASCE*, 135(3), 109-117. Doi : 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109).
- Davis A.P., Traver R.G., Hunt W.F., Lee R., Brown R.A., Olszewski J.M. (2012). Hydrologic performance of bioretention storm-water control measure. *J. Hydrol. Eng.-ASCE*, 17(5); 604-614. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000467.

- de Elía R., Côté H. (2010). Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorol. Z.*, 19(4) : 325-339. Doi : 10.1127/0941- 2948/2010/0469.
- DeBusk K.M., Wynn T.M. (2011). Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation. *J. Env. Eng. Div.-ASCE*, 137(9), 800-808. Doi : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388
- Denault C., Millar R.G., Lence B.J. (2006). Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment. *J. Am. Water Resour. As.*, 42(3) : 685-697. Doi : 10.1111/j.1752-1688.2006.tb.040485.x.
- Deser C., Phillips A., Bourdette V., Teng H. (2012). Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Clim. Dynam.*, 38(3-4) : 527-546. Doi : 10.1007/s00382-010-0977-x.
- Dessai S., Hulme M., Lempert R., Pielke R. Jr (2009). Do we need better predictions to adapt to a changing climate? *EOS*, 90(13):111-112. Doi : 10.1029/2009EO130003.
- Dietz M. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water Air Soil Pollut.*, 186 (1-4), 351-363. Doi : 10.1007/s11270-007-9484-z.
- Dubé J.-C., Camiré R. (1996). Étude pédologique du comté de Frontenac. Centre de recherche et d'expérimentation en sols, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 194 p.
- Dunkerley D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrol. Process.*, 22(26) : 5024–5036. Doi : 10.1002/hyp.7122.
- Easterling D. R., Diaz H. F., Douglas A. V., Hogg W. D., Kunkel K. E., Rogers J. C., Wilkinson J. F. (1999). Long-term observations for monitoring extremes in the Americas. *Climatic Change*, 42(1) : 285-308.

- Ehret U., Zehe E., Wulfmeyer V., Warrach-Sagi K., Liebert J. (2012). Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 16(9) : 3391-3404. Doi : 10.5194/hess-16-3391-2012.
- Engman E.T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *J. Irrig. Drain. E.-ASCE*, 112(1) : 39-53.
- EPA (2008). Combined Sewer Overflows Demographics, Environmental Protection Agency. <http://cfpub.epa.gov/npdes/cso/demo.cfm> (Consulté le 26 octobre 2012).
- EPA (2006). BMP Modeling concepts and simulation. United States Environmental Protection Agency, Office of research and development, Washington, DC, 20460, EPA/600/R-06/033, 148 p.
- Erickson T.O., Stefan H.G. (2009). Natural Groundwater Recharge Response to Urbanization: Vermillion River Watershed, Minnesota. *J. Water Res. Pl.-ASCE* 135 (6), 512-520. Doi : 10.1061/(asce)0733-9496(2009)135:6(512).
- Flato G.M., Boer G.J., Lee W.G., McFarlane N.A., Ramsden D., Reader M.C., Weaver A.J. (2000). The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. *Clim. Dynam.*, 16:451-467.
- Forsee W.J., Ahmad S. (2011). Evaluating urban storm-water infrastructure design in response to projected climate change. *J. Hydrol. Ing.*, 16(11) : 865-873. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000383.
- Fortier C. (2013). Impact des changements climatiques sur les débordements des réseaux d'égouts unitaires. Mémoire de maîtrise, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, 122 p.
- Fowler H. J., Ekstrom M., Blenkinsop S., Smith A. P. (2007). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res-Amos.*, 112, D18104. Doi : 10.1029/2007JD008619.

- Freni G., Mannina G., Viviani G. (2010). The influence of rainfall time resolution for urban water quality modeling. *Water Sci. Technol.*, 61(9) : 2381-2390. Doi : 10.2166/wst.2010.162.
- Fuamba M., Walliser T., Daynou M., Rousselle J., Rivard G. (2010b). Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : Une étude de cas pour le Québec. *Rev. Can. Génie Civ.*, 37, 224-335. Doi : 10.1139/L09-146.
- Fuamba M., Walliser T., Daynou M., Rousselle J., Rivard G. (2010a). Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : Application des propositions d'action publique au Québec. *Rev. Can. Génie Civ.*, 37, 209-223. Doi : 10.1139/L09-147.
- Furlow J., Johnson T., Bierwagen B. (2007). A Screening Assessment of the Potential Impacts of Climate Change on Combined Sewer Overflow (CS) Mitigation in the Great Lakes and New England Regions. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Global Change Research Program, Washington. 28 p.
- Gallo C., Moore A., Wywrot J. (2012). Comparing the adaptability of infiltration based BMPs to various U.S. regions. *Landscape Urban Plan.*, 106(4), 326-335. Doi : 10.1016/j.landurbplan.2012.04.004.
- Galloway G.E. (2011). If stationarity is dead, what do we do now? *J. Am. Water Resour. As.*, 47(3) : 563-570. Doi : 10.1111/j.1752-1688.2011.00550.x.
- Gironas J., Roesner L.A., Davis J. (2009). Stormwater management model: Application manual. United States Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, EPA/600/R-09/077, 179 p.
- Graham P., Maclean L., Medina D., Patwardhan A., Vasarhelyi G. (2004). The role of water balance modelling in the transition to low impact development. *Water Qual. Res. J. Can.*, 39(4), 331-342.

- Groleau A., Mailhot A., Talbot G. (2007). Trend analysis of winter rainfall over Southern Quebec and New Brunswick (Canada). *Atmos. Ocean*, 45(3) : 153-162. Doi : 10.3137/ao.450303.
- Grum M., Jørgensen A.T., Johansen R.M., Linde J.J. (2006). The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulations. *Water Sci. Technol.*, 54 (6-7) : 9-15. Doi : 10.2166/wst.2006.592.
- Guo Y. (2006). Updating rainfall IDF relationships to maintain urban drainage design standards. *J. Hydrol. Eng.*, 11 (5) : 506-509. Doi : 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:5(506).
- Hagedorn R., Doblas-Reyes F.J., Palmer T.N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. – I. Basic concepts. *Tellus* 57A : 219–233.
- Hand W. H., Fox N. I., Collier C. G. (2004). A study of twentieth-century extreme rainfall events in the United Kingdom with implications for forecasting. *Meteorol. Appl.*, 11(1) : 15-31. Doi : 10.1017/s1350482703001117.
- Hawkins E., Sutton R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 90(8) : 1095-1107. Doi : 10.1175/2009bams2607.1.
- He J., Valeo C., Bouchart F.J.-C. (2006). Enhancing urban infrastructure investment planning practices for a changing climate. *Water Sci. Technol.*, 53 (10) : 13-20. Doi : 10.2166/wst.2006.292.
- Helsel D.R., Hirsch R.M. (2002). *Statistical methods in water resources*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 510 p.
- Hogg W.D. (1982). Distribution of rainfall with time: Design considerations. In proceedings of the Chapman Conference on Rainfall Rates, Urbana, Ill, 27–29 April 1982, American Geophysical Union, Washington, D.C.

- Hogg W.D. (1980). Time distribution of short duration storm rainfall in Canada. In Proceedings of the Canadian Hydrology Symposium, Toronto, Ontario National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, p. 53–63.
- Hollander M., Wolfe D.A. (1999). Nonparametric Statistical Methods, 2e edition. John Wiley & Sons, Inc. : Hoboken, USA; 787 p.
- Hosking J.R.M., Wallis J.R. (1997). Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 224.
- Huber W.C., Dickinson R.E. (1988). Storm water management model. Version 4, User's manual, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 569 p.
- Huber W.C. (2001). New options for overland flow routing in SWMM. Urban drainage modelling. Presented at ASCE-EWRI World Water and Environmental Congress, Orlando, Florida, May 20-24, 2001.
- Hunt W.F., Davis A.P., Traver R.G. (2012). Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. J. Env. Eng. Div.-ASCE, 138(6); 698-707. Doi : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000504.
- Hunt W.F. (1999). Designing rain gardens (Bio-retention areas). Urban Waterways, NC State University, A&T State university, 12 p.
- Ice G. (2004). History of Innovative Best Management Practice Development and its Role in Addressing Water Quality Limited Waterbodies. J. Env. Eng. Div.-ASCE, 130(6), 684-689. Doi : 10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:6(684).
- Infrastructure Canada (2006). Adapting infrastructure to climate change in Canada's cities and communities - A literature review. Research & Analysis Division, Infrastructure Canada, 21 p.

- Ingvertsen S.T., Cederkvist K, Jensen M.B., Magid J. (2012b). Assessment of existing roadside swales with engineered filter soil : II Treatment efficiency and in situ mobilization in soils columns. *J. Environ. Qual.*, 41(6), 1970-1981. Doi : 10.2134/jeq2012.0116.
- Ingvertsen S.T., Cederkvist K. Régent Y., Sommer H., Magid J., Jensen M.B. (2012a). Assessment of existing roadside swales with engineered filter soil : I. Characterization and life time expectancy. *J. Environ. Qual.*, 41(6), 1960-1969. Doi : 10.2134/jeq2011.0318.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policy Makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Geneva, Switzerland, 18 p.
- Jacobson C.R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *J. Environ. Manage.*, 92(2011), 1438-1448. Doi : 10.1016/j.jenvman.2011.01.018.
- James W., Rossman L.E., James W.R.C. (2010). *User's guide to SWMM5*. 13th Edition, CHI Press Publication, 905 p.
- Jung I.-W., Chang H., Moradkhani H. (2011). Quantifying uncertainty in urban flooding analysis considering hydro-climatic projection and urban development effects. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 15(2) : 617-633. Doi : 10.5194/hess-15-617-2011.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Wollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. (2002). NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *B. Am. Meteorol. So.*, 82 : 1631–1643.
- Karamouz M., Hosseinpour A., Nazif S. (2011). Improvement of urban drainage system performance under climate change impact: Case Study. *J. Hydrol. Eng.*, 16(5), 395-412. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000317.

- Kaufman M.M., Wurtz M. (1997). Hydraulic and economic benefits of downspout diversion. *J. Am. Water. Resour. As.*, 33(2), 491-497. Doi : 10.1111/j.1752-1688.1997.tb03527.x.
- Kendall M.G. (1955). Rank correlation methods. Charles Griffin and Company, Second Edition, London. 196 p.
- Kessler R. (2011). Stormwater strategies; cities prepare aging infrastructure for climate change. *Environ. Health Perspect.*, 199(12), A514-A519.
- Kienzle S.W. (2008). A new temperature based method to separate rain and snow. *Hydrol. Process.*, 22(26) : 5067-5085. Doi : 10.1002/hyp.7131.
- Kleidorfer M., Möderl M., Sitzenfrei R., Urich C., Rauch W. (2009). A case independent approach on the impact of climate change effects on combined sewer system performance. *Water Sci. Technol.*, 60(6), 1555-1564. Doi : 10.2166/wst.2009.520.
- Kovacs A., Clement A. (2009). Impacts of the climate change on runoff and diffuse phosphorus load to Lake Balaton (Hungary). *Water Sci. Technol.*, 59(3) : 417-423. Doi : 10.2166/wst.2009.883.
- Laflamme G., Rompré M., Carrier D., Ouellet L. (1989). Étude pédologique du comté de Mégantic. Division de pédologie, Services de recherche en sols, 152 p.
- Lajoie P., Baril R. (1956). Les sols de l'île de Montréal, de l'île de Jésus et de l'île Bizard dans la province de Québec. Service des fermes expérimentales, Ministère de l'Agriculture du Canada et Division des sols, Ministère de l'Agriculture de Québec, 89 p.
- Laprise R. (2008). Regional climate modelling. *J. Comput. Physics.*, 227(7) : 3641-3666. Doi : 10.1016/j.jcp.2006.10.024.

- Lemmen D.S., Warren F.J., Lacroix J., Bush E. (2008). From Impacts to Adaptation: Canada in a changing climate 2007, Government of Canada, Ottawa (Ontario), 448 p.
- LFUCG (2005). Stormwater manual, Chapter 5: Hydrology, Lexington-Fayette Urban County Government, Kentucky, USA, 19 p.
- Li H., Sharkey L.J., Hunt W.F., Davis A.P. (2009). Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland. *J. Hydrol. Eng.-ASCE*, 14(4), SI, 407-415. Doi : 10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(407).
- Lucas-Picher P., Caya D., de Elía R., Laprise R. (2008). Investigation of regional climate models' internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain. *Clim. Dynam.*, 31(7-8) : 927-940. Doi : 10.1007/s00382-008-0384-8.
- Maidment D.R. (1992). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- Mailhot A., Beaugregard I., Talbot G., Caya D., Biner S. (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *Int. J. Climatol.*, 32(8) : 1151-1163. Doi : 10.1002/joc.2343.
- Mailhot A., Bolduc S., Duchesne S., Villeneuve J.-P. (2008a). Adaptation aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec : Revue de littérature et analyse critique des mesures de contrôle à la source. Rapport de recherche No R-972, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 137 p.
- Mailhot A., Duchesne S. (2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136(2) : 201-208. Doi : 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000023.

- Mailhot A., Duchesne S., Caya D., Talbot G. (2007). Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydrol.*, 347(1-2) : 197-210. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2007.09.019.
- Mailhot A., Duchesne S., Larrivée C., Pelletier G., Bolduc S., Rondeau F., Kingumbi A., Talbot G. (2008b). Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. Rapport de recherche No R-920, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 158 p.
- Mailhot A., Duchesne S., Rivard G., Nantel E., Caya D., Villeneuve J.-P. (2006). Climate change impacts on the performance of urban drainage systems for Southern Quebec. EIC Climate Change Technology Conference, May 9-12, 2006, Ottawa, Ontario, Canada.
- Mailhot A., Kingumbi A., Talbot G., Poulin A. (2010). Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada. *J. Hydrol.*, 388 : 173-185. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2010.04.038.
- Mailhot A., Talbot G. (2011b). Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome II – Résultats. Rapport de recherche No R-1260, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 281 p.
- Mailhot A., Talbot G. (2011a). Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome I – Données et méthodes. Rapport de recherche No R-1259, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 60 p.
- MAMROT (2000). Programme de suivi des ouvrages de surverses. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Direction des infrastructures, Québec, 10 p.

- Mann H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13:245–259.
- Marsalek J., Chocat B. (2002). International report: Stormwater management. *Wat. Sci. & Technol.* 46(6-7) : 1-17.
- Martin A., Nolin M.C. (1991b). Étude pédologique du comté de Chambly (Québec); description et classification des séries de sols, Volume 2. Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Contribution no. 89-26, Direction de la recherche, Agriculture Canada, 151 p.
- Martin A., Nolin M.C. (1991a). Étude pédologique du comté de Chambly (Québec); description et interprétation des unités cartographiques, Volume 1. Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Contribution no. 89-26, Direction de la recherche, Agriculture Canada, 380 p.
- McCuen R.H. (1989). *Hydrologic analysis and design*, Second Edition, Pearson Education, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 833 p.
- MDDEP (2010). *Guide de gestion des eaux pluviales. Stratégies d'aménagement, principes de conception et de pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage urbain.* Ministère de Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, Canada.
- Mearns L.O., Arritt R., Biner S., Bukovsky M.S., McGinnis S., Sain S., Caya D., Correia J. Jr., Flory D., Gutowski W., Takle E.S., Jones R., Leung R., Moufouma-Okia W., McDaniel L., Nunes A.M.B., Qian Y., Roads J., Sloan L., Snyder M. (2012). The North American Regional Climate Change Assessment Program Overview of Phase I Results. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 93(9) : 1337-1362.
- Mearns L.O., Gutowski W.J., Jones R., Leung L-Y., McGinnis S., Nunes A.M.B., Qian Y. (2009). A regional climate change assessment program for North America. *EOS*, 90 : 311–312.
- Mekis E., Hogg W.D. (1999). Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series. *Atmosphere-Ocean*, 37(1) : 53–85.

- Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319(5863) : 573-574. Doi : 10.1126/science.1151915.
- Min S.K., Zhang X.B., Zwiers F.W., Hegerl G.C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470 (7334) : 376-379. Doi : 10.1038/nature09763.
- Monette A., Sushama L., Khaliq M.N., Laprise R., Roy R. (2012). Projected changes to precipitation extremes for northeast Canadian watershed using a multi-RCM ensemble. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 117(D13106). Doi : 10.1029/2012JD017543.
- Moreira J. (2010). Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2009. Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Gouvernement du Québec, 198 p.
- Morgan S., Celik S., Retzlaff W. (2013). Green roof storm-water runoff quantity and quality. *J. Env. Eng. Div.-ASCE*, 139(4), 471-478. Doi : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589.
- MSSC (2008). Minnesota stormwater manual. Version 2. January 2008, Minnesota pollution control agency, 885 p.
- Muller G.D., Thompson A.M. (2009). The ability of urban residential lawns to disconnect impervious area from municipal sewer systems. *J. Am. Water. Resour. As.*, 45(5); 1116-1126. Doi : 10.1111/j.1752-1688.2009.00347.x.
- Musgrave G.W. (1955). How much water enters the soils? *USDA Yearbook*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, p.151-159.
- Music B., Caya D. (2007). Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydromet.*, 8(5) : 969-988. Doi : 10.1175/jhm627.1.

- Muthanna T.M., Viklander M., Blecken G., Thorolfsson S.T. (2007). Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. *Water Res.*, 41 (18), 4061-4072. Doi : 10.1016/j.watres.2007.05.040.
- Muthanna T.M., Viklander M., Gjesdahl N., Thorolfsson S.T. (2007). Heavy metal removal in cold climate bioretention. *Water Air Soil. Pollut.*, 183 (1-4), 391-402. Doi : 10.1007/s11270-007-9387-z.
- Muthanna T.M., Viklander M., Thorolfsson S.T. (2007). Seasonal climatic effects on the hydrology of a rain garden. *Hydrol. Process.*, 22 (11), 1640-1649. Doi : 10.1002/hyp.6732.
- Nakicenovic N., Swart S., *et al.* (2000). IPCC special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p 599.
- Nguyen V.T.V., Desramaut N., Nguyen T.D. (2009). Estimation of urban design storms in consideration of GCM-based climate change scenarios. *Water and Urban Development Paradigms - Towards an integration of engineering, design and management approaches. Proceedings of the International Urban Water Conference, Heverlee, Belgium, 15-19 September 2008, CRC Press Taylor & Francis Group, p. 347-356.*
- Nie L., Lindholm O., Lindholm G., Syversen E. (2009). Impacts of climate change on urban drainage systems – a case study in Fredrikstad, Norway. *Urban Water J.*, 6(4) : 323-332. Doi : 10.1080/15730620802600924.
- Niemczynowicz J. (1989). Impact of the greenhouse-effect on sewerage systems – Lund case study. *Hydrolog. Sci. J.*, 34(6) : 651-666.
- Nolin M.C. (1985). Étude pédologique du comté de Chambly. Équipe pédologique fédérale, Agriculture Canada, 165 p.
- ODOT (2005). Hydraulics manual, Oregon Department of Transportation, Highway division, Engineering and Asset Management Unit, Geo-environmental section.

- Olsson J., Amaguchi H., Alsterhag E., Daverhog M., Adrian P.-E., Kawamura A. (2013). Adaptation to climate change impacts on urban storm water: a case study in Arvika, Sweden. *Climatic Change*, 116(2) : 231-247. Doi : 10.1007/s10584-012-0480-y.
- Olsson J., Berggren K., Olofsson M., Viklander M. (2009). Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmos. Res.*, 92(3) : 364-375. Doi : 10.1016/j.atmosres.2009.01.015.
- Osborn T.J., Hulme M. (1997). Development of a relationship between station and grid box rainday frequencies for climate model validation. *J. Climat.*, 10 : 1885–1908.
- Ouellet G., Rompré M. (1998). Étude pédologique du comté de Wolfe. Centre de recherche et d'expérimentation en sols, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 97 p.
- Ouranos (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Consortium Ouranos, Montréal, 128 p.
- Papa F., Guo Y., Thoman G.W. (2004). Urban drainage infrastructure planning and management with a changing climate. In: *Proceedings of the 57th Canadian Water Resources Association Annual Congress - Water and Climate Change: Knowledge for Better Adaptation*, Montréal, Québec, Juin 16-18, 2004, 6 p.
- Passerat J., Ouattara N.K., Mouchel J.-M., Vincent R., Servais P. (2011). Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Res.*, 45(2) : 893-903. Doi : 10.1016/j.watres.2010.09.024.
- Patz J.A., Vavrus S.J., Uejio C.K., McLellan S.L. (2008). Climate Change and Waterborne Disease Risk in the Great Lakes Region of the U.S. *Am. J. Prev. Med.*, 35(5) : 451-458. Doi : 10.1016/j.amepre.2008.08.026.

- Paul. M.J., Meyer J.L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 32, 333-365. Doi : 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040.
- Pelletier G., Anctil F., Filion M. (2009). Characterization of one-hour rainfall temporal patterns using a Kohonen neural network – The case study of Quebec City. *Can. J. Civil Eng.*, 36 (6) : 980-990. Doi : 10.1139/L09-027.
- PGC (2007). Bioretention manual. Environmental services division, Department of environmental resources, The Prince George's County, Maryland, 206 p. http://www.princegeorgescountymd.gov/Government/AgencyIndex/DER/ESG/Bioretention/pdf/Bioretention%20Manual_2009%20Version.pdf (Consulté le 10/16/2012).
- Pitt R., Lantrip J., Harrison R. (1999). Infiltration through disturbed urban soils and compost-amended soil effects on runoff quality and quantity. Order No. 7C-R369-NTSX, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-00/016, 244 p.
- Plummer D.A., Caya D., Frigon A., Côté H., Giguère M., Paquin D., Biner S., Harvey R., de Elía R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Climat.*, 19(13) : 3112-3132.
- Pyke C., Warren M.P., Johnson T., LaGro J. Jr., Scharfenberg J., Groth P., Freed R., Schroeer W., Main E. (2011). Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape Urban Plan.*, 103 (2) : 166-173. Doi : 10.1016/j.landurbplan.2011.07.006.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soil data. *J. Hydraul. Eng.*, 109 : 62-70.

- Riechel M., Matzinger A., Rouault P., Schroeder K., Sonnenberg H., Pawlowsky-Reusing E., Leszinski M. (2010). Application of stormwater impact assessment guidelines for urban lowland rivers—the challenge of distinction between background and stormwater impacts. 7e Conférence Internationale Novatech 2010. Lyon, France, 27 juin 2010.
- Robbins P., Birkenholtz T. (2003). Turfgrass revolution: measuring the expansion of the American lawn. *Land Use Policy*, 20 : 181-194. Doi : 10.1016/S0264-8377(03)00006-1.
- Rompré M., Gagnon M. (2001). Étude pédologique: La région de Québec (Secteur Sainte-Foy et Valcartier). Institut de recherche et développement en agroenvironnement, 73 p.
- Roseen R.M., Ballestero T.P., Houle J.J., Briggs J.F., Houle K.M. (2012). Water quality and hydrologique performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate. *J. Environ.Eng.*, 138(1), 81-89. Doi : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000459.
- Rossman L.A. (2009). Storm water management model : User's manual version 5.0. United States Environmental Protection Agency (USEPA), EPA/600/R-05/040, Cincinnati, OH, 276 p.
- Roy-Poirier A., Champagne P., Filion Y. (2010). Review of bioretention system research and design : Past, present, and futur. *J. Environ Eng.-ASCE*, 136(9) : 878-889. Doi : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227.
- Salas J.D., Rajagopalan B., Saito L., Brown C. (2012). Special section on climate change and water resources: Climate nonstationarity and water resources management. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 138 : 385-388. Doi : 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000279.
- Schall J.D., Richardson E.V., Morris J.L. (2008). Introduction to Highway Hydraulics: Hydraulic Design Series No. 4, Fourth Edition, FHWA-NHI-08-90 (HDS-4), National Technical Information Service. 204 p.

- SCHL (2008). Les pelouses à faible entretien. Société canadienne d'hypothèques et de logement. http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/ampa/ampa_004.cfm (Consulté le 18/02/2013).
- Schneider L.E., McCuen R.H. (2006). Assessing the hydrologic performance of best management practices. *J. Hydrol. Eng.-ASCE*, 11(3), 278-281. Doi : 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:3(278).
- Scholz M., Grabowiecki P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Build. Environ.*, 42(11), 3830-3836. Doi : 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
- Schroeder K., Riechel M., Matzinger A., Rouault P., Sonnenberg H., Pawlowsky-Reusing E., Gnirss R. (2011). Evaluation of effectiveness of combined sewer overflow control measures by operational data. *Water Sci. Technol.*, 63(2) : 325-330. Doi: 10.2166/wst.2011.058.
- Scinocca J.F., McFarlane N.A., Lazare M., Li J., Plummer D. (2008). Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 8 : 7055-7074.
- Semadeni-Davies A., Hernebring C., Svensson G., Gustafsson L.G. (2008). The impacts of climate change and urbanization on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *J. Hydrol.*, 350(1-2) :100-113. Doi : 10.1016/j.jhydrol.2007.05.028.
- Sen P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.*, 63 : 1379–1389.
- Shaw S.B., Walter M.T. (2012). Using comparative analysis to teach about the future nonstationarity in future flood predictions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16 : 1269-1279. Doi : 10.5194/hess-16-1269-2012
- Shuster W.D., Bonta J., Thurston H., Warnemuende E., Smith D.R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water J.*, 2(4), 263-275. Doi : 10.1080/15730620500386529.

- Sierra Legal (2006). The Great Lakes sewage report card, Toronto. (www.sierralegal.org.).
- Silvestri V. (2000). Performance of shallow foundations on clay deposits in Montreal Island. *Can. Geotech. J.* 37 (1), 218-237. Doi : 10.1139/cgj-37-1-218.
- Silvestri V., Soulie M., Lafleur J., Sarkis G., Bekkouche N. (1992). Foudation problems in Champlain clays during droughts .2. case-histories. *Can. Geotech. J.* 29 (2), 169-187.
- Skotnicki M., Sowinski M. (2009). A Comparative Study of Approaches for Hydraulic Width Determination of Sub-Catchments in Urban Stormwater Model. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia, 1-5 September 2009, 12 p.
- Sun Y., Solomon S., Dai A., Portmann R.W. (2007). How often will it rain? *J. Climate* 20(19) : 4801-4818. Doi : 10.1175/jcli4263.1.
- Tholin A.L., Keifer C.J. (1959). Hydrology of urban runoff. *Transaction ASCE*, Paper No. 3061, Vol. 125 : 1308-1355.
- Tillinghast E.D., Hunt W.F., Jenning G.D., D'Arconte P. (2012). Increasing stream geomorphic stability using stormwater control measures in a densely urbanized watershed. *J. Hydrol., Eng.-ASCE*, 17 (12) : 1381-1388. Doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000577
- Trenberth K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change, *Climate Res.*, 47(1-2) : 123-138. Doi : 10.3354/cr00953.
- Trenberth K.E., Dai A.G., Rasmussen, R.M., Parsons, D.B. (2003). The changing character of precipitation. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 84(9) : 1205-1217. Doi : 10.1175/bams-84-9-1205.

- Trottier A. (2008). Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel. Étude de cas : UQAM, Centre d'écologie urbaine de Montréal, Groupe de recherche d'intérêt public de l'UQAM, 80p.
- Trowsdale S.A., Simcock R. (2011). Urban stormwater treatment using bioretention. J. Hydrol., 397(3-4), 167-174. Doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.023.
- UDFCD (2008). Urban storm drainage: criteria manual. Volume 1 à 3, Urban drainage and flood control district, Denver, CO, 1447 p.
- USDA (1986). Urban hydrology for small watersheds. TR-55, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 164 p.
- Viessman W.J. (1966). The hydrology of small impervious areas. Water Resour. Res., 2(3) : 405-412.
- Viessman W.J., Knapp J.W., Lewis G.L., Harbaugh T.E. (1977). Introduction to hydrology. Second Edition, Prentice Hall, Professional Technical, 760 p.
- Ville de Lévis (2010). L'ÉVIS'informe : Une gouttière connectée aux égouts : C'EST INTERDIT. Journal municipal de la Ville de Lévis, Volume IX – Numéro V, Juillet 2010, www.ville.levis.qc.ca.
- Ville de Montréal (2012). Récupérer l'eau de pluie. 2p. (ville.montreal.qc.ca/eaudemontreal).
- Ville de Québec (2013). http://www.ville.quebec.qc.ca/environnement/urbanisation/bassin_retention.asp [x](#) (Consulté le 25/07/2013).
- Ville de Québec (2012). Guide d'aménagement de bassins de rétention des eaux pluviales. Division du design de l'architecture et du patrimoine, Ville de Québec, 23 p.

- Ville de Québec (2007). Ensemble contre les refoulements! Programme de contrôle des eaux pluviales. Québec, Arrondissement de Limoilou, 4 p.
- Ville de Sherbrooke (2007). Vos gouttières sont-elles conformes à la réglementation en vigueur? Service des infrastructures urbaines et de l'environnement, Sherbrooke, 2 p.
- Ville de Thetford Mines (2012). Débranchement des gouttières : Vos gouttières sont-elles conformes à la réglementation en vigueur?
<http://www.ville.thetfordmines.qc.ca/info.php?noPage=130> (Consulté le 10/16/2012).
- Walsh C.J., Roy A.H., Feminella J.W., Cottingham P.D., Groffman P.M., Morgan R.P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 24(3), 706-723. Doi : 10.1899/0887-3593(2005)024/[0706 :TUSSCK/]2.0.CO;2.
- Wanielista M.P. (1978). Stormwater management quantity and quality. *Ann Arbor Science*, 383 p.
- Waters D., Watt W.E., Marsalek J., Anderson B.C. (2003). Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change. *J. Environ. Plann. Man.*, 46(5) : 755-770. Doi : 10.1080/0964056032000138472.
- Watt W.E., Chow K.C.A., Hogg W.D., Lathem K.W. (1986). A 1-h urban design storm for Canada. *Can. J. Civil Eng.*, 13 : 293-300.
- Watt W.E., Waters D., McLean R. (2003). Climate change and urban stormwater infrastructure in Canada: Context and case studies. Toronto-Niagara Region study report and working paper series, Waterloo, Ontario (Report 2003-1), 27 p.
- Woolhiser D.A. (1975). Simulation of unsteady overland flow. Chapter 12, Unsteady flow in open channels, Vol. II, K. Mahmood et V. Yevjevich, Eds., Water Resources Publication, Fort Collins, CO.

Zwiers F.W., Kharin V.V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *J. Climate*, 11(9): 2200-2222.
Doi : 10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2.

Annexe 1 : Proposition initiale du projet

1. Titre du projet: Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

2. Équipe de travail

2.1 Responsable du projet :

Alain Mailhot – Professeur chercheur – INRS-ETE

2.2 Membres de l'équipe :

Sophie Duchesne – Professeur chercheur INRS-ETE; Caroline Larrivée – Ouranos; Diane Chaumont – Ouranos; Geneviève Pelletier – Université Laval; représentants des villes partenaires; Alain Bourque – Ouranos

Les chercheurs membres de l'équipe de réalisation du présent projet ont eu l'occasion de **collaborer** dans le cadre de travaux antérieurs et possèdent donc des expertises complémentaires en plus d'avoir fait montre d'une synergie constructive. Il est par ailleurs prévu que chaque ville partenaire désigne un représentant qui agira à titre de conseiller technique au sein de l'équipe de réalisation. Ses tâches consisteront notamment à assister l'équipe de recherche dans la mise en place de la modélisation hydrologique pour les secteurs désignés de sa ville, à participer aux discussions entourant la sélection des mesures d'adaptation et plus généralement à participer aux travaux d'analyse des différents résultats. Les villes-partenaires restent à identifier et leur sélection devra répondre à certains critères. En fait, ces villes devront : 1) avoir déjà procédé à la mise en place et au calage d'un modèle hydrologique pour certains secteurs de leur municipalité; 2) présenter une variété de secteurs urbains typiques des secteurs généralement rencontrés au Québec; et, évidemment, 3) être disposées à participer au projet, c'est-à-dire à rendre disponibles aux membres de l'équipe les données et résultats de la modélisation hydrologique et à déléguer un représentant technique sur le projet qui pourra y consacrer quelques jours par mois, selon les besoins.

2.3 Parties intéressées :

Ordre des Ingénieurs du Québec, CERIU, Ministère des Affaires Municipales et des Régions, autres villes. À noter que les contacts avec ces différents organismes restent à établir. D'autres intervenants pourront éventuellement s'ajouter à cette liste (par exemple représentants des domaines de l'urbanisme) l'objectif est d'avoir une représentativité la plus large possible des intervenants du secteur.

3 Contexte et problématique

Les projections climatiques actuellement disponibles suggèrent que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES), résultat de l'activité humaine, aura une incidence importante sur plusieurs variables climatiques (IPCC, 2007). Ainsi, la modification du mouvement des masses d'air, causée par leur réchauffement, combinée aux changements du taux d'humidité de l'air, provoqueront des modifications significatives des régimes pluvieux dans plusieurs régions. Selon les projections actuelles, la pluviométrie annuelle moyenne à l'échelle du Canada augmenterait en climat futur (Lemmen et al., 2008). Ces augmentations évolueront selon un gradient nord-sud avec des hausses plus marquées pour les régions nordiques pouvant aller jusqu'à 40 à 50 % pour l'extrême nord à l'horizon 2080. Les hausses dans les régions de l'extrême sud se situeraient davantage au niveau de 0 à 10 %. Déjà les observations au cours du XXe siècle laissent entrevoir une modification des distributions spatiale et temporelle des précipitations (de très nombreuses études se sont intéressées à analyser les tendances passées en matière de précipitations moyennes; voir par exemple Groisman et al., 2005, Tebaldi et al., 2006; Groisman et al., 1999; pour le Canada, voir Vincent et Mekis, 2005 et Zhang et al., 2000).

Les experts du climat s'entendent toutefois pour affirmer que l'amplitude des événements de précipitations extrêmes devrait subir des variations plus importantes que les moyennes (mensuelles ou saisonnières; voir par exemple Emori et Brown, 2005). Plusieurs études où sont analysés les résultats de simulations de modèles globaux et régionaux du climat supportent cette hypothèse (voir par exemple IPCC, 2007 et plus spécifiquement Alexander et Arblaster, 2008; Meehl et al., 2007; Meehl et al., 2006; Frei

et al., 2006; Boo et al., 2006; Grum et al., 2006; Tebaldi et al., 2006; Fowler et al., 2005; Zwiers et Kharin, 1998). L'ampleur et la nature exacte des changements futurs des extrêmes à l'échelle locale restent toutefois à quantifier. Par ailleurs, plusieurs sources d'incertitudes sont à considérer lors de l'analyse des résultats issus de modèles du climat que ce soit les incertitudes : 1) sur les conditions initiales; 2) sur les scénarios d'émission des GES; 3) sur les paramètres des modèles; et 4) sur les modèles eux-mêmes (Stainforth et al., 2005; Hagedorn et al., 2005; Fowler et al., 2007; Tebaldi et Knutti, 2007). L'estimation et la prise en compte de ces différentes sources d'incertitudes s'avèrent de plus en plus importantes, non seulement par souci de rigueur scientifique, mais aussi, comme le soulignent Stainforth et al. (2007a,b), dans un contexte de communication des résultats aux décideurs et au public. Ces auteurs plaident en effet pour une approche où les incertitudes sont clairement présentées et les limites des modèles clairement identifiées et mises en évidence dans un contexte d'analyse des impacts et de sélection des mesures d'adaptation à mettre en place.

Une modification du régime d'occurrence des précipitations en climat futur pourra affecter le niveau de performance des ouvrages et infrastructures de gestion des eaux pluviales (Mailhot et al., 2006a, 2007b). Quatre types d'événements sont à considérer dans ce contexte : 1) les événements de pluie intense; 2) les événements fréquents de période de retour de 2 ans et moins; 3) les événements de pluie hivernale; et 4) les périodes de fonte printanière.

D'abord, une modification des probabilités d'occurrence des pluies intenses risque d'accroître les risques de refoulement et d'inondation en milieu urbain puisque le dimensionnement des ouvrages/infrastructures déjà en place repose sur l'analyse statistique des événements pluvieux passés. Or ces événements risquent de ne plus être représentatifs du climat futur. Une révision des critères de conception s'impose dans un tel contexte de même que la mise en place de mesures visant à mieux contrôler ce type d'événements.

Par ailleurs, une portion importante des réseaux d'égout des grands centres urbains au Canada est de type unitaire, c'est-à-dire que ces réseaux reçoivent à la fois des eaux usées et pluviales. En période de pluie, les débits acheminés à ces réseaux dépassent souvent leur capacité de transport, de stockage et/ou de traitement, ce qui engendre des

débordements vers le milieu récepteur. Les débordements de réseaux d'égout unitaires ainsi générés sont reconnus comme une source importante de dégradation de la qualité des cours d'eau en milieu urbain (Field et Pitt, 1990; Walsh et al., 2005). Les événements pluvieux causant de tels débordements surviennent généralement plusieurs fois par année et ne peuvent être qualifiés d'extrêmes ni même d'intenses. Une modification des probabilités d'occurrence de ce type d'événements risque d'avoir des conséquences néfastes sur la qualité des milieux récepteurs, leurs écosystèmes et plus généralement, sur la géomorphologie de ces cours d'eau (CNRC 2005).

Si les pluies d'été, généralement intenses et de courtes durées, et les pluies automnales, de moindre intensité mais de plus longue durée, peuvent s'avérer critiques en matière de gestion des eaux pluviales en milieu urbain, il ne faut pas négliger pour autant les pluies hivernales. En hiver, le ruissellement et l'évacuation des eaux sont souvent gênés par la présence de neige et/ou de glace au sol ou sur les puisards d'égout, pouvant ainsi entraîner des accumulations importantes d'eau dans les rues. Dans des cas plus extrêmes, lorsque la pluie s'accompagne d'une hausse marquée des températures, un dégel des cours d'eau et la formation d'embâcles peuvent entraîner l'inondation de certains secteurs urbains. Groleau et al. (2007) ont réalisé une analyse des tendances historiques de quatre indices liés aux pluies hivernales qui montrent que plus du tiers des stations analysées, toutes localisées dans la partie sud du Québec, présentaient une tendance à la hausse de la probabilité d'occurrence des pluies hivernales (janvier et février). Ces résultats sont cohérents avec le constat maintes fois rapporté d'une augmentation des températures moyennes à la fin du XXe siècle, augmentation qui favoriserait, en période hivernale pour certaines régions, l'apparition de précipitations liquides au détriment des précipitations solides. L'évolution future des probabilités d'occurrence de tels événements et de leurs impacts demeurent toutefois peu documentée.

Enfin, les désagréments causés par le dégel printanier sont de divers ordres : dégel des cours d'eau et formation d'embâcles, accumulation d'eau en divers secteurs urbains, etc. Évidemment, la rapidité des épisodes de fonte est déterminante dans ce cas (Semadeni-Davies, 2003). Les CC pourront modifier les conditions de fonte (par exemple taux de fonte, quantité de neige accumulée, occurrence de pluie en même temps que la fonte, etc.).

Les diverses modifications des conditions futures de pluviométrie auront nécessairement des impacts sur le niveau de performance des infrastructures de gestion des eaux pluviales, c'est-à-dire sur la probabilité de dépassement de capacité des réseaux et ouvrages (inondation et/ou refoulement) ainsi que sur la fréquence des débordements vers le milieu récepteur. Les coûts économiques, sociaux et humains associés aux inondations/refoulements en milieu urbain sont considérables. À titre d'exemple, Environnement Canada (2007) estime que, pour quatre grands bassins versants de l'Ontario, le nombre total des réclamations liées à des dommages causés par les eaux pluviales pourrait s'accroître d'environ 13 %, 20 % et 30 % pour les périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100 respectivement. L'ampleur, la nature et la fréquence de ces épisodes dépendent non seulement de la pluviométrie, mais également des caractéristiques spécifiques de chaque réseau (densité, types d'ouvrage, etc.) et des surfaces urbaines drainées (occupation du territoire, surfaces plus ou moins imperméables, etc.). L'évaluation du niveau de performance des infrastructures de gestion des eaux pluviales ne peut donc s'effectuer de façon globale, mais doit plutôt procéder par études spécifiques de systèmes réels présentant différentes configurations. Les résultats de telles études serviront directement à l'identification des mesures d'adaptation à mettre en place afin de maintenir le niveau de service et à évaluer la performance de ces aménagements dans un climat en évolution.

L'adaptation aux CC pose un défi tant technique, économique qu'organisationnel à nos sociétés. Les mesures d'adaptation à mettre en place doivent répondre à des objectifs précis de maintien du niveau de performance des systèmes en place, et ce, pour tous les types d'événements pluvieux (CNRC, 2005).

Revue de littérature

La très grande majorité des travaux publiés à ce jour ont porté sur : 1) l'analyse des résultats de simulations climatiques et le développement de scénarios de projections des précipitations intenses (voir par exemple Zweirs et Kharin, 1998; Ekström et al., 2005; Frei et al. 2006; Tebaldi et al. 2006; Grum et al. 2006; Fowler et al. 2007; Mailhot et al. 2007); et 2) l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages en place (Kije Sipi, 2001; Mailhot et al., 2006b; He et al., 2006; Semadeni-Davies et al., 2008a; Papa et al., 2004; Ashley et al., 2005).

De manière générale, les travaux visant à évaluer l'impact des CC sur le drainage urbain sont relativement récents, à l'exception de ceux, précurseurs, de Niemczynowicz (1989). Toutes les études d'impact recensées utilisent divers scénarios de projections futures des intensités pluvieuses comme données d'entrée à un modèle de simulation hydrologique/hydraulique des réseaux de drainage urbain (soit un modèle simple, telle la méthode rationnelle, ou plus complexes, telles SWMM ou MOUSE) en vue d'estimer les conséquences de ces augmentations sur les débits en réseau et les volumes de ruissellement. Les études d'impact des CC en milieu urbain se sont surtout intéressées, jusqu'à maintenant, à l'évaluation des risques d'inondation suite à des crues (comme par exemple dans Minnery et Smith, 1996 et Environnement Canada, 2007) ou aux impacts des CC sur l'approvisionnement en eau potable, plutôt qu'aux problèmes de drainage des eaux pluviales (Semadeni-Davies et al., 2008a). Les paragraphes suivants font état de quelques études canadiennes sur le sujet.

Une étude, réalisée par Kije Sipi (2001), a montré que le débit de pointe à l'exutoire d'un petit réseau de drainage urbain du sud du Québec (Hull) augmenterait respectivement de 5 %, 12 %, 17 % et 23 % pour des augmentations de précipitations de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, et ce, pour la pluie de conception de période de retour 5 ans. En d'autres termes, ceci signifie que si ce réseau est dimensionné pour une période de retour de 5 ans, une augmentation de 20 % des intensités de pluie en climat futur conduirait à des dysfonctionnements deux fois plus fréquents, soit un niveau de service de 2,5 ans.

Au sud de l'Ontario, Papa et al. (2004) ont estimé, sur la base de simulations réalisées sur 16 projets de développement totalisant 45 km de conduites (dont 5 km sont dimensionnés pour une période de retour de 2 ans, 30 km pour une période de 5 ans et 10 km pour une période de 10 ans), que l'augmentation de l'intensité des pluies pourrait causer des dépassements de capacité des réseaux sur plus de 3,5 %, 8,3 % et 2,0 % de leur longueur totale, pour les récurrences de 2 ans, 5 ans et 10 ans respectivement.

Pour un bassin de drainage résidentiel du sud de l'Ontario (Burlington), à 35 % imperméable, Watt et al. (2003) ont évalué qu'une augmentation de 15 % du volume total de la pluie de conception conduirait à une augmentation de 13 % du débit de pointe en conduite. Pour un autre secteur résidentiel en développement (Ottawa, Ontario), ces mêmes auteurs ont estimé qu'une augmentation de 15 % de l'intensité de la pluie de

conception conduirait à des dépassements de capacité, et donc possiblement des inondations et/ou des refoulements, dans 25 % des conduites composant ce réseau. Pour un réseau pluvial de la ville de Calgary (Alberta), He et al. (2006) ont calculé également que le nombre de surcharges devrait augmenter de façon significative en raison des CC.

Denault et al. (2006) ont montré, pour leur part, que les CC risquent d'avoir peu d'impact sur les infrastructures de drainage du bassin Mission/Wagg Creek (Vancouver-Nord, Colombie-Britannique). Le système actuellement en place possède en effet une capacité adéquate pour gérer le ruissellement généré par les intensités de pluies futures. Cependant, ces mêmes travaux ont montré que les impacts des CC sur les écosystèmes naturels des cours d'eau récepteurs risquent d'être beaucoup plus importants que les impacts sur les infrastructures pour le secteur étudié.

Au niveau international, les chercheurs les plus actifs dans le domaine de l'évaluation de l'impact des CC sur les réseaux de drainage urbain sont probablement les chercheurs du programme AUDACIOUS (Adaptable Urban Drainage - Addressing Change in Intensity, Occurrence and Uncertainty of Stormwater), au Royaume-Uni. Ce programme a pour objectif d'étudier les principaux aspects reliés aux effets des CC sur les réseaux de drainage urbain et de fournir des outils pour les gestionnaires et les opérateurs de ces réseaux en vue de s'adapter aux conditions en climat futur. Dans le cadre de ce programme, Ashley et al. (2005) ont évalué l'impact de quatre scénarios de CC et de développement socioéconomique sur quatre bassins de drainage du Royaume-Uni, représentatifs des bassins de ce pays. Ces auteurs ont montré que le risque d'inondation des propriétés est plus sensible aux changements appréhendés de la pluviométrie qu'aux possibles variations des caractéristiques des bassins ou de toute autre variable. Ces résultats indiquent que le risque d'inondation urbaine devrait augmenter d'un facteur au moins égal à 2 pour tous les scénarios considérés. Ashley et al. (2005) ont en effet constaté que toute augmentation de l'intensité des pluies par rapport à la situation actuelle entraînera des augmentations significatives du nombre de propriétés inondées. Ceci rejoint les conclusions du document Infrastructure Canada (2006) qui rapporte « qu'on prévoit que de faibles augmentations de la fréquence des événements météorologiques et climatiques extrêmes entraînent potentiellement d'importantes augmentations des dommages aux infrastructures existantes ».

Plus récemment, à Helsinborg (Suède), Semadeni-Davies et al. (2008a) ont estimé que la croissance de la ville et les augmentations prévues des précipitations, qu'elles soient considérées seules ou qu'elles soient combinées, devraient accroître les problèmes actuels de drainage. Les CC seuls (période 2081-2090) entraîneront une augmentation de 10 % des débits moyens acheminés à la station de traitement par le réseau d'égout unitaire, notamment en raison de l'accroissement de l'infiltration d'eau souterraine dans le réseau. Selon les estimations de Semadeni-Davies et al. (2008a), le volume total des surverses vers le milieu récepteur devrait augmenter de 450 % d'ici la fin du XXI^e siècle à Helsinborg, en raison des CC et de l'urbanisation, ce qui entraînerait une multiplication par 10 de la charge totale d'ammonium déversée dans les cours d'eau de cette ville à partir du réseau d'égout unitaire. Parallèlement, les débits de pointe des cours d'eau urbains s'accroîtront, causant une augmentation du risque d'inondation dans ce secteur (Semadeni-Davies et al., 2008b).

Pour la région de Chicago (É-U), Guo (2006) suggère une augmentation de 17 % du diamètre de toutes les nouvelles conduites installées par rapport à un dimensionnement traditionnel pour faire face aux CC. Pour les nouveaux secteurs de la région de Toronto (Ontario), Papa et al. (2004) estiment que l'installation de conduites pouvant faire face au climat futur entraînerait une augmentation des coûts de 2,6 %, 5,6 % et 8,5 % respectivement pour les récurrences de 2 ans, 5 ans et 10 ans (ce qui est beaucoup plus faible que les pourcentages d'augmentation attendus pour les intensités de pluie). Sur la base d'une analyse du cycle de vie des conduites, ces auteurs concluent que l'installation aujourd'hui de conduites pouvant faire face au climat futur n'est pas toujours avantageuse financièrement, et ce, même si l'on tient compte du coût des dommages engendrés par une capacité insuffisante des réseaux. Toutefois, les résultats de cette analyse sont très sensibles au taux d'escompte choisi et sont donc empreints d'une incertitude importante. Également, les projections climatiques sur lesquelles se basent Papa et al. (2004) pour arriver à ces résultats proviennent d'une approche de downscaling temporelle, sans prise en compte de la dimension spatiale, des prédictions d'événements de pluie intenses issues du modèle de simulation du climat CGCM1. Or, puisque les phénomènes de pluies intenses sont la plupart du temps locaux, on peut s'attendre à ce que les intensités de ces événements augmentent de façon plus importante que celles des événements pluvieux à l'échelle spatiale du CGCM1 (dont la

résolution spatiale est de l'ordre de plusieurs centaines de km). Papa et al. (2004) soulignent d'ailleurs, à ce titre, que leurs estimations constituent la limite inférieure des augmentations possibles des précipitations en climat futur.

Enjeux et portée scientifique

L'enjeu principal de ce projet est l'évaluation des impacts et la prise en compte des changements climatiques dans un cadre de conception et de remplacement/réhabilitation des ouvrages/infrastructures existantes de gestion des eaux pluviales afin d'assurer le maintien d'un niveau de risque acceptable à long terme. Diverses mesures d'adaptation seront examinées et leurs performances évaluées dans le cadre de différentes configurations urbaines. En effet, parmi les articles recensés dans la littérature scientifique, et dont un compte-rendu sommaire a été donné aux paragraphes précédents, aucune étude ne s'est penchée, à notre connaissance, sur : 1) l'analyse comparative des dommages potentiels suite à une modification des intensités des pluies intenses et des coûts d'adaptation (analyse économique); 2) l'évaluation de l'efficacité de diverses mesures d'adaptation à mettre en place; 3) le développement et l'évaluation d'une stratégie globale d'adaptation dans un contexte de CC (stratégie combinant une révision des critères de conception, l'identification et l'évaluation de mesures à mettre en place pour le contrôle d'événements de différentes récurrences sur plusieurs échelles de temps). Le projet proposé entend combler ces lacunes en matière de connaissances scientifiques et techniques et proposer aux utilisateurs (ingénieurs municipaux, consultants, gestionnaires de réseaux, etc.) des outils et options leur permettant d'adapter leur mode de gestion des infrastructures/ouvrages urbains de gestion des eaux pluviales au contexte des CC. Il s'agira de revoir les « manières de faire » (critères de conception et palette des aménagements possibles) et aussi de revoir la manière dont la notion de risque est appliquée en hydrologie urbaine.

La question de la gestion des eaux pluviales et des CC sous-tend plusieurs défis techniques et scientifiques dont le plus important est sans doute lié aux échelles de temps en jeu. En effet, la durée de vie utile de plusieurs infrastructures, dont les réseaux, est comparable aux horizons pour lesquels des changements significatifs des paramètres climatiques sont appréhendés. Un tel constat implique que les changements

climatiques appréhendés doivent être considérés dès aujourd'hui dans la conception des ouvrages à mettre en place et que les incertitudes sur les projections climatiques mentionnées soient explicitement prises en compte dans l'évaluation du risque. Comment gérer le risque dans un contexte où la science du climat est en évolution et les incertitudes sur les projections climatiques actuellement disponibles, notamment sur les extrêmes (pluies de courtes durées pouvant être localisées), sont appelées à évoluer ? Un tel contexte impose de développer des stratégies d'adaptation qui intègrent cette dimension évolutive de la connaissance et des projections climatiques. À ce titre, dans un contexte de futur inconnu, l'IPCC (2007) souligne l'importance d'adopter des stratégies d'adaptation qui puissent être modifiées au fur et à mesure que les connaissances concernant les CC s'améliorent et que les technologies progressent. On pourra parler dans ce cas, à juste titre, d' « adaptation adaptative ».

Utilisateurs potentiels des résultats

Les utilisateurs visés regroupent l'ensemble des intervenants du secteur de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain à savoir, parmi les principaux, les ingénieurs municipaux, les gestionnaires de réseaux, les consultants, les représentants des différents ministères et les urbanistes. L'utilisation des résultats des présents travaux pourra être un élément clé pour les ingénieurs municipaux dans leur travail interne visant à convaincre les élus et représentants publics de la nécessité de considérer les CC dans un contexte urbain. De plus, de manière plus générale, les résultats du présent projet serviront, enfin les membres de l'équipe de recherche l'espèrent, d'outil de promotion à des approches plus intégrées et multidisciplinaires de gestion des eaux pluviales (regroupant notamment des ingénieurs, des urbanistes, des paysagistes).

Réalisations antérieures du chercheur principal et des membres de l'équipe de recherche

Le professeur Mailhot a agi à titre de responsable scientifique et administratif de plusieurs projets portant sur la question des CC. Plusieurs des membres de l'équipe de recherche proposée ont participé à l'un ou l'autre de ces projets. Le premier de ces

projets, financé par Ressources Naturelles Canada dans le cadre du programme du Fonds d'Action sur les Changements Climatiques (FACC), cofinancé par le consortium Ouranos et auquel plusieurs chercheurs de cet organisme ont activement participé, a permis d'établir, sur la base d'une analyse des résultats du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC; Plummer *et al.*, 2006), que les intensités des pluies maximales annuelles augmenteront de façon sensible pour le sud du Québec au cours des prochaines décennies (Mailhot *et al.* 2006c; 2007a). Cette étude a permis de montrer que ces modifications au régime pluviométrique entraîneront des augmentations significatives des volumes de ruissellement et des débits de pointe pour divers secteurs urbains types. Ces travaux ont été largement diffusés auprès de la communauté scientifique et des intervenants municipaux à travers plusieurs congrès, tables rondes, colloques et autres. L'intérêt qu'ils ont suscité auprès de ces auditoires a toujours été très vif. Un mandat a par la suite été octroyé au professeur Mailhot par la firme SNC-Lavallin afin d'estimer les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climat futur pour le grand nord québécois dans le cadre de travaux de conception des ouvrages de drainage des parcs de résidus de la mine Raglan (Mailhot *et al.* 2006a). Plus récemment, le professeur Mailhot s'est vu accorder une subvention dans le cadre du Programme d'Impacts et Adaptations aux Changements Climatiques (PIACC) de Ressources Naturelles Canada, financé conjointement par le consortium Ouranos, afin d'analyser les mesures d'adaptation possibles en matière de drainage urbain dans un contexte de CC. Ce projet visait à élaborer un portrait général des mesures possibles pour l'adaptation des systèmes de drainage urbain aux conditions climatiques futures ainsi qu'à évaluer la capacité d'adaptation réelle aux CC de ces systèmes (Mailhot *et al.* 2008c). Le professeur Mailhot a aussi complété récemment un mandat pour le compte de l'Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ) et du Consortium Ouranos afin d'analyser l'évolution future des précipitations et écoulements mensuels en climat futur et d'évaluer de façon préliminaire les impacts qui risquent d'en découler sur les approvisionnements municipaux en eau de surface pour le sud-Québec (Mailhot *et al.* 2008b).

Enfin, il convient de mentionner qu'un projet est actuellement en cours avec la ville de Montréal visant à simuler diverses mesures d'adaptation pour un secteur donné de la ville (Mailhot *et al.* 2008a). L'expertise technique et scientifique acquise durant ce projet,

financé par le Fonds sur l'Infrastructure Municipale Rurale (FIMR) du Ministère des Affaires Municipales et des Régions, la ville de Montréal et le consortium Ouranos, sera directement utilisée dans le cadre du présent projet. Le présent projet s'inscrit en continuité et est complémentaire au projet actuellement en cours avec la ville de Montréal.

4 Objectifs du projet

Les objectifs (et sous-objectifs) du projet V&I&A en regard des cinq axes d'intervention proposés sont décrits dans les paragraphes suivants.

1 Identifier, développer et analyser les indicateurs climatiques liés aux impacts et vulnérabilités.

L'objectif général de cet axe de recherche sera de développer ou de mettre à jour les projections futures pour les types d'événements météorologiques susceptibles d'affecter la performance des infrastructures/ouvrages de gestion des eaux pluviales. Les objectifs spécifiques seront les suivants : 1.1 Mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climat futur pour les durées de 1 heure à 24 heures; 1.2 Construction de projections en climat futur pour les pluies de faibles périodes de retour (2 ans et moins); 1.3 Élaboration de projections pour les pluies hivernales; 1.4 Construction de pluies-types à considérer pour la simulation des conditions hydrologiques/hydrauliques futures. L'utilisation des projections climatiques dans un contexte d'estimation des impacts des CC requiert en effet de préciser comment ces projections seront utilisées dans un contexte de modélisation hydrologique. À noter que les projections proposées seront établies en considérant le plus grand nombre de simulations disponibles. Cette façon de faire permet de mieux rendre compte de la variabilité et des incertitudes sur ces projections (Tebaldi et Knutti, 2007; Palmer *et al.* 2005). Il est d'ailleurs prévu à chacune des grandes étapes du projet d'évaluer l'impact de cette variabilité sur les différents résultats.

2 Mieux comprendre et développer les outils liant climat, activité humaine, impacts et vulnérabilités.

L'objectif général de cet axe sera la mise en place et l'adaptation de modèles hydrologiques urbains pour la simulation des impacts des CC et des mesures d'adaptation envisagées. Cet objectif général sous-tend les étapes spécifiques suivantes : 2.1 Identification et caractérisation de secteurs urbains dans les villes partenaires du projet; 2.2 Identification, comparaison et adaptation de modèles hydrologiques urbains (dont SWMM) pour la simulation des mesures d'adaptation envisagées; 2.3 Développement d'une procédure d'évaluation de la performance des scénarios d'adaptation envisagés. Pour être sélectionné, un secteur urbain devra déjà avoir fait l'objet d'une modélisation hydrologique (mise en place et calage du modèle). De plus, les secteurs urbains considérés devront, autant que faire se peut, être représentatifs des secteurs urbains habituellement rencontrés au Québec.

3 *Quantifier l'évolution probable des impacts et des vulnérabilités biophysiques.*

L'objectif général de cet axe de recherche est la simulation hydrologique des secteurs urbains sélectionnés aux étapes précédentes dans un contexte de climat en évolution. Plus spécifiquement, les sous objectifs sont les suivants : 3.1 Évaluation de l'évolution future de la performance des secteurs retenus dans un contexte où aucune mesure d'adaptation aux CC n'est envisagée (scénario de *statu quo* adaptatif); 3.2 Évaluation de l'évolution future des déversements au milieu récepteur dans le cas de réseaux unitaires; 3.3 Établissement, sur la base des résultats précédents, d'un portrait des impacts et des vulnérabilités futures; 3.4 Identification des paramètres clés définissant la vulnérabilité d'un secteur donné face aux CC; 3.5 Évaluation de la sensibilité en matière d'impacts et de vulnérabilité en regard de la variabilité des projections climatiques disponibles.

4 *Évaluer l'évolution des impacts, risques et opportunités socioéconomiques.*

Cet axe de recherche a pour objectif principal de traduire en termes économiques, les impacts des CC tels qu'estimés à l'étape précédente. Le développement d'une méthodologie pour l'estimation du coût des dommages causés par la sous-capacité potentielle des systèmes en place à traiter et à évacuer les eaux pluviales en climat futur

est envisagée, par la poursuite des sous-objectifs suivants : 4.1 Production de grilles d'évaluation des coûts unitaires pour les secteurs des municipalités partenaires; 4.2 Développement d'indices liant l'amplitude des inondations/refoulements potentiels aux variables hydrologiques/hydrauliques simulées; 4.3 Construction de courbes liant l'amplitude des inondations/refoulements aux coûts des dommages associés pour chacun des secteurs sélectionnés; 4.4 Évolution des coûts liés aux pertes d'usages de l'eau associés à une croissance de la fréquence des débordements de réseau unitaire; 4.5 Évaluation économique de l'évolution des dommages dans le cadre d'un scénario sans mesures d'adaptation aux CC; 4.6 Comparaison des résultats économiques selon les différentes projections climatiques disponibles. Il est important de noter qu'un travail d'évaluation des coûts unitaires des dommages est en cours de réalisation dans le cadre du projet FIMR. Cette grille de coûts sera adaptée et améliorée dans le cadre du présent projet et ce afin qu'elle puisse être utilisée pour les secteurs des autres villes partenaires.

5 Identifier, analyser et/ou comparer différentes barrières et options d'adaptation en y intégrant la meilleure science disponible.

L'objectif général de ce volet est de définir une approche visant à élaborer et à évaluer l'efficacité de divers scénarios d'adaptation. Ces scénarios combineront diverses mesures visant à assurer un contrôle efficace des événements susceptibles de frapper les milieux urbains (depuis les pluies de faible période de retour jusqu'aux pluies très intenses et très rares en passant par les pluies hivernales) et ce selon différents horizons temporels fonction à la fois de la durée de vie utile des ouvrages/systèmes et de l'horizon temporel des projections climatiques disponibles. Les objectifs spécifiques de cet axe sont les suivants : 5.1 Identification et caractérisation des divers types de mesures d'adaptation envisageables; 5.2 Révision des critères de conception et du mode d'évaluation du niveau de performance; 5.3 Élaboration des scénarios d'adaptation; 5.4 Évaluation de la performance des scénarios; 5.5 Analyse de sensibilité en regard des projections climatiques; 5.6 Analyse des coûts; 5.7 Comparaison des performances, classement des scénarios et synthèse. Il est important de comprendre que les scénarios d'adaptation considérés recouperont plusieurs types de mesures et seront évalués sur une période pendant laquelle les CC seront perceptibles. Une telle

approche permettra d'établir le niveau de performance à moyen et long termes des scénarios.

5 Méthodologie

Cette section décrit les étapes de réalisation du projet propres à chaque axe de recherche. Des précisions quant au rôle joué par les représentants des municipalités partenaires sont données le cas échéant. La section 6 donne par ailleurs des détails quant aux rôles et tâches des différents chercheurs impliqués dans le projet.

1 *Identifier, développer et analyser les indicateurs climatiques liés aux impacts et vulnérabilités.*

La mise à jour des courbes IDF se fera en reprenant la méthode développée par Mailhot *et al.* (2007). Cette approche avait permis une première estimation des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour la région du Sud du Québec à l'horizon 2041-2070. Les nouvelles données disponibles aux stations (période 1996-1999) ainsi que les nouvelles simulations climatiques permettront une mise à jour des estimations précédemment obtenues. Ainsi, les maximums annuels de pluie tombés sur diverses durées de 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h seront analysés pour : 1) les données observées à toutes les stations du Québec possédant un historique d'au moins 15 ans de données, soit une soixantaine de stations (la plupart de ces historiques se terminant en 1999); 2) pour les résultats issus de cinq simulations (membres) du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC; Plummer *et al.*, 2006), version 4, piloté par le modèle CGCM3, sur la période 1961-2000; et 3) pour les résultats issus des cinq mêmes simulations du MRCC pour la période 2041-2070. Pour ces trois ensembles de données, l'intensité des événements pluvieux extrêmes pour diverses durées et périodes de retour sera calculée par analyse fréquentielle régionale des maximums annuels (Hosking et Wallis, 1997). La méthodologie développée par Mailhot *et al.* (2007b), basée sur le concept du facteur de réduction d'échelle (*Areal Reduction Factor, ARF*), permettra d'estimer l'intensité des événements pluvieux extrêmes pour diverses durées et périodes de retour en climat futur (période 2041-2070). L'analyse des résultats issus de cinq membres différents du

MRCC permettra d'estimer la variabilité des projections disponibles et donc d'identifier, pour chaque ensemble de courbes IDF, une fourchette de projections possibles. Ces travaux permettront : i) de comparer les intensités et probabilités d'occurrence d'événements de pluie intenses tel que simulés par le MRCC avec les estimateurs issus des observations; ii) de comparer la variabilité entre les différents membres en climats présent et futur; et iii) de construire à l'échelle des tuiles et des stations des courbes IDF qui intègrent la variabilité inter-simulations en climats présent et futur. À noter que la très grande majorité des éléments méthodologiques qui seront utilisés à cette étape a déjà été développée dans le cadre de travaux antérieurs.

L'analyse des pluies plus fréquentes (de période de retour inférieure à deux ans) est cruciale dans un contexte d'évaluation des impacts des CC sur l'évolution des débordements des réseaux unitaires. Pour de tels événements, une analyse des distributions des précipitations journalières observées et simulées (climats présent et futur) sera réalisée. Divers indices seront définis (par exemple, fraction annuelle de journée sans pluie, probabilités de dépassement de différents seuils, nombre annuel moyen de jours avec cumul journalier de pluie supérieur à un seuil donné). Ces indices devront évidemment être pertinents à l'analyse des impacts des conditions climatiques sur les débordements de réseaux unitaires. Une comparaison des valeurs observées et simulées de ces indices en climat présent sera d'abord effectuée afin d'évaluer la qualité de la performance du modèle régional de climat. Des projections quant à l'évolution de ces indices en climat futur seront élaborées sur la base des résultats de simulations disponibles.

L'analyse des conditions futures d'occurrence de pluies hivernales sera réalisée en reprenant les indices développés par Groleau *et al.* (2007) (par exemple, cumul de précipitations sous forme de pluie pour les mois de janvier, février et mars). L'analyse des historiques de précipitations et des valeurs correspondantes de ces indices a permis à ces auteurs de démontrer l'existence d'une tendance vers un accroissement de la fréquence de pluies hivernales pour le sud Québec et le Nouveau-Brunswick. Une analyse similaire des résultats de simulations du modèle régional permettra d'établir l'ampleur des changements à venir en cette matière.

Dans le cas des pluies intenses, l'évaluation des impacts éventuels en milieu urbain des augmentations appréhendées des intensités et de la fréquence de tels événements passe par l'utilisation de modèles hydrologiques urbains. Il faut dès lors traduire l'information statistique sur les projections climatiques relatives aux événements extrêmes (courbes IDF par exemple) en termes de pluies effectives pouvant être utilisées comme données d'entrée à ces modèles. Ces pluies-types devront être représentatives des conditions climatiques futures. Deux approches sont possibles, soit la construction de séries de pluie représentatives du climat d'une région ou le concept de pluie de conception. Ces deux approches sont couramment utilisées pour le design « traditionnel » (i.e. sans tenir compte des CC) des systèmes de drainage urbain. La première approche consiste à utiliser comme intrant au modèle hydrologique des séries de pluies réelles observées, ces séries étant considérées représentatives du climat d'une région. La seconde approche consiste à retenir comme intrant au modèle une unique pluie de conception, dont la distribution temporelle correspond à une forme standard reconnue (ex. pluie Chicago, triangulaire, SEA, etc.) et dont l'intensité maximale et/ou le volume total sont donnés par les courbes IDF, pour la période de retour et la durée d'événement choisies. Dans un contexte d'évaluation de l'impact des CC, ces deux approches doivent être adaptées et comparées. On devra notamment estimer comment l'information fournie par les courbes IDF en climat futur pourra être intégrée efficacement à chacune de ces approches. Pour ce faire, on fera l'hypothèse que la structure spatiale et temporelle des pluies ne sera pas significativement modifiée en climat futur. Dans un premier temps, une série d'événements réels et documentés (données pluviométriques) servira de données de base. Une période de retour en climat actuel sera attribuée à chacun des événements composant cette série, puis cette série sera modifiée en fonction des courbes IDF calculées pour le climat futur à l'étape précédente du projet. Dans un second temps, des pluies de conception types seront construites en tenant compte des changements appréhendés en climat futur. Ces deux ensembles de données, séries d'évènements et pluies de conception, seront utilisés comme intrants à un modèle hydrologique urbain (voir étapes 2 et 5) pour évaluer la performance des systèmes en place et l'efficacité des divers scénarios d'adaptation proposés (voir étapes 3 et 4). À noter que plusieurs jeux de pluies intenses en climat futur seront élaborés en fonction des résultats issus des différentes simulations du climat

disponibles et ce afin de pouvoir estimer la sensibilité des résultats aux incertitudes sur les projections climatiques.

2 Mieux comprendre et développer les outils liant climat, activité humaine, impacts et vulnérabilités.

La première étape de ce volet de recherche visera à sélectionner les secteurs urbains à considérer pour la modélisation hydrologique. Cette sélection se fera en fonction de critères précis. Premièrement, les secteurs en question devront avoir déjà fait l'objet d'une modélisation récente (fichiers de données et caractérisation du territoire et du réseau disponibles). Ceci implique aussi que des données ayant servi au calage des modèles soient disponibles (mesures des intensités de pluie et de débits concomitantes). Évidemment, la municipalité partenaire devra s'engager à fournir ces données et fichiers aux membres de l'équipe de recherche. Deuxièmement, les secteurs urbains retenus seront choisis de façon à représenter l'éventail des conditions rencontrées dans les municipalités du Québec : municipalités de moyenne et de grande taille; secteurs peu et densément habités; secteurs résidentiels, commerciaux et industriels; secteurs plats et en pente; secteurs drainés principalement par des réseaux souterrains (conduites) ou en surface (fossés et canaux). Cette diversification vise évidemment à couvrir un ensemble représentatif de configurations qui, sans prétendre être exhaustif, permettra de couvrir un large éventail de possibilités. Troisièmement, cette sélection devra implicitement considérer la nature et la résolution des simulations disponibles (types de modèles utilisés, représentation spatiale utilisée, etc.). Ce dernier point sera abordé plus en détails au paragraphe suivant mais il vise essentiellement à assurer une certaine cohérence entre les modèles et représentations utilisés pour analyser les différents secteurs. Finalement, les secteurs sélectionnés devront être drainés tant par des réseaux de types séparatifs qu'unitaires.

Il existe à l'heure actuelle une panoplie de modèles mathématiques permettant de calculer les débits et volumes de ruissellement en fonction de la pluie s'abattant sur un territoire urbain donné, d'où la nécessité de procéder à un recensement et à une analyse préliminaire des modèles existants (Zoppou, 2001; Obropta et Kardos, 2007). Il est important de noter toutefois qu'au Québec le modèle SWMM (il existe plusieurs versions commerciales de ce modèle) est largement utilisé par nombre de consultants et

municipalités. Le modèle de base envisagé est donc le modèle SWMM bien que d'autres modèles pourront être considérés dans l'éventualité où certaines municipalités auraient eu recours à ces modèles. Une analyse comparative des modèles hydrologiques urbains les plus courants sera réalisée dans le cadre de ce projet. Cette analyse considèrera autant les modèles de bilans (ex. MUSIC, LIFETM, UVQ) que les modèles incluant la simulation en réseau (ex. SWMM, STORM, HSPF, QQS). Les modèles seront analysés et comparés en fonction de leur facilité de mise en œuvre, de leur niveau de détail, du type de résultats qu'ils permettent d'obtenir et des hypothèses inhérentes aux équations qui les composent. Cette comparaison se fera sur la base de la littérature disponible et des éventuelles applications recensées. Cet exercice visera :

- 1) à identifier et à caractériser le ou les modèles utilisés pour la simulation des secteurs retenus;
- 2) à identifier de possibles lacunes au niveau de la simulation des diverses mesures d'adaptation envisagées ;
- et 3) à identifier comment corriger ces lacunes et comment simuler toutes les mesures d'adaptation envisagées avec le modèle retenu.

Le modèle hydrologique utilisé sera préférablement celui ayant déjà été appliqué au secteur considéré.

L'analyse présentée au paragraphe précédent visera aussi à intégrer aux modèles retenus les éléments ou modules permettant de simuler l'ensemble des mesures d'adaptation, notamment les mesures non traditionnelles. Ainsi, le cas échéant, le modèle SWMM sera adapté au présent contexte d'utilisation en s'inspirant possiblement des représentations utilisées dans d'autres modèles. À titre d'exemple, l'ajout de modules de simulation des ouvrages et/ou aménagements d'infiltration, souvent utilisés comme mesures de contrôle à la source, pourra s'avérer nécessaire. Pour certaines de ces mesures, il faudra développer des procédures afin de simuler les variables hydrologiques d'intérêt (ex. débit de pointe) pour différents événements pluvieux en s'inspirant des représentations utilisées dans d'autres modèles. Les outils ainsi adaptés pourront être utilisés directement pour les évaluations décrites aux étapes 3 et 5, et pourront également être appliqués, au terme du projet, par toute municipalité désireuse de conduire des études d'adaptation sur son territoire.

L'évaluation de l'efficacité des divers scénarios d'adaptation implique la définition d'une procédure d'évaluation de ces derniers afin de déterminer le niveau de service et la performance offerts. L'élaboration d'une telle procédure pose plusieurs défis techniques

dans un contexte de CC puisqu'il est nécessaire d'intégrer plusieurs échelles temporelles distinctes associées à : 1) la durée de vie utile des ouvrages et infrastructures (variable selon que l'on considère un fossé d'infiltration ou une conduite par exemple); 2) l'horizon temporel des projections climatiques disponibles, au terme duquel des changements significatifs sont susceptibles de survenir; 3) l'horizon temporel des plans de gestion et des outils de planification. Ces diverses échelles temporelles doivent être prises en compte lors de l'élaboration d'indices de performance, ce qui implique l'élaboration de scénarios d'adaptation intégrant un ensemble de mesures à court, moyen et long termes et une évaluation de l'évolution temporelle des indices de performance. Plusieurs indices devront être définis selon les objectifs de gestion envisagés, le type de variable considéré et le type d'impacts ciblés (par exemple contrôle des volumes de ruissellement, des débits de pointe, des volumes déversés, sévérité des refoulements et des inondations potentielles). Ces indices devront être représentatifs de l'ampleur des « dysfonctionnements » simulés (mises en charge) et tenir compte de leur durée, de leur localisation et de leur extension spatiale. L'élaboration et la comparaison de ces indices pour les secteurs à l'étude (voir étape suivante) permettra de valider la procédure proposée et d'identifier les indices les plus pertinents à considérer pour la suite de l'étude.

Le rôle des municipalités partenaires et de leurs représentants sera crucial à cette étape du projet. Des démarches seront entreprises dès le début du projet pour rencontrer les municipalités partenaires pressenties et vérifier leur intérêt à participer au projet. Des rencontres avec les responsables de réseaux auront lieu afin d'identifier les secteurs potentiellement intéressants, de dresser la liste des données disponibles, de vérifier la nature et la portée des travaux de modélisation déjà réalisés et de discuter des modalités d'utilisation de ces données et résultats dans le cadre du présent projet. Les interactions avec les représentants des municipalités seront nombreuses à ce stade du projet.

3 Quantifier l'évolution probable des impacts et des vulnérabilités biophysiques.

L'évolution future de la performance des systèmes de gestion des eaux pluviales (inondations et refoulements) sera estimée à l'aide des modèles hydrologiques retenus appliqués aux divers secteurs urbains sélectionnés (voir étape 2). Les pluies de conception et historiques modifiées pour tenir compte des projections climatiques disponibles (voir étape 1) seront utilisées pour simuler les conditions hydrologiques futures pour ces secteurs. L'évaluation des impacts et vulnérabilités se fera à travers l'estimation des différents indices de performance définis à l'étape 2. Ces résultats permettront, entre autres, de sélectionner les secteurs d'étude pour l'analyse des scénarios d'adaptation (les secteurs susceptibles d'être retenus sont ceux où les impacts et les vulnérabilités seront les plus importants) et de simuler un état de référence qui sera utilisé, à titre de comparaison, pour l'évaluation des stratégies d'adaptation.

En ce qui concerne les surverses de réseaux unitaires, nous proposons l'approche suivante afin d'estimer comment leurs probabilités évolueront en climat futur. Cette approche, quoique simple, semble indiquée dans la perspective d'une première évaluation des impacts des CC en cette matière. Elle s'appuie sur l'utilisation d'un seuil pour définir l'occurrence ou non de surverses. Ce seuil sera établi à partir des données historiques recueillies quant à l'occurrence de surverses en fonction des différents événements pluvieux s'étant abattus sur un territoire donné (une analyse plus fine et détaillée de la relation pluie-surverse sera réalisée si les municipalités-partenaires disposent de plus d'information à ce sujet). Les événements seront classés selon qu'ils dépassent ou non ce seuil et donc selon qu'ils soient susceptibles de générer ou non des surverses. Une caractérisation statistique des pluies sera ainsi établie en fonction de leur capacité à générer des surverses pour le secteur sous étude. L'évolution des probabilités d'occurrence de ces pluies sera ensuite évaluée à partir des projections climatiques disponibles en considérant les probabilités de dépassements de divers seuils, tel que décrit à l'étape 1. Il sera ainsi possible d'avoir une première estimation de l'évolution future des probabilités de déversements et des volumes déversés aux principaux sites de déversement des municipalités partenaires.

Les résultats obtenus aux étapes précédentes seront ensuite colligés et analysés en vue de dresser une image de la situation générale à laquelle on peut s'attendre au cours des prochaines décennies en matière d'impacts et de vulnérabilités des systèmes de gestion

des eaux pluviales au Québec. Un recouplement en fonction des caractéristiques des secteurs considérés et des impacts estimés permettra d'identifier les paramètres clés définissant la vulnérabilité d'un secteur donné face aux CC. Ce genre d'analyse, dans l'éventualité où le nombre de secteurs disponibles est suffisamment grand et représentatif, servira à identifier et à classer les secteurs potentiellement vulnérables d'une municipalité donnée.

La prise en compte de la variabilité des projections climatiques se fera en analysant la sensibilité des résultats en matière d'impacts et de vulnérabilités en fonction des projections climatiques disponibles. Cette variabilité aura été établie sur la base de l'analyse de différents résultats de simulations du MRCC (voir étape 1). Les projections climatiques obtenues seront donc classées selon qu'elles prévoient une intensification plus ou moins importante des intensités et fréquences d'occurrence des pluies intenses (pour les réseaux pluviaux) et des pluies fréquentes (pour les réseaux unitaires) en climat futur. Les simulations des secteurs seront reprises avec comme données d'entrée les résultats des diverses simulations du MRCC disponibles. La sensibilité de la performance des systèmes en fonction de possibles variations des projections climatiques considérées sera ainsi établie, permettant du coup d'identifier les conditions et caractéristiques favorisant une plus ou moins grande sensibilité des installations et systèmes en place. Cet aspect est crucial puisque les projections climatiques disponibles sont appelées à évoluer (amélioration de la qualité des simulateurs, meilleure résolution des événements à petite échelle, efficacité des programmes de réduction des gaz à effet de serre et évolution effective des concentrations de ces gaz, etc.) et, qu'à ce titre, il est important de déterminer dans quelle mesure les scénarios d'adaptation devront être ajustés en fonction des nouvelles projections disponibles. Ces considérations sont aussi déterminantes lors de l'élaboration des stratégies d'adaptation puisqu'elles militent en faveur de stratégies combinant des mesures « lourdes », de caractère plus permanent et dont l'implantation s'échelonne sur les moyen et long termes (comme par exemple une révision des normes de conception), et des mesures et aménagements plus « légers », d'implantation plus rapides (par exemple des mesures de type contrôle à la source).

4 Évaluer l'évolution des impacts, risques et opportunités socioéconomiques.

Cet axe de recherche a pour objectif principal l'estimation de l'évolution des impacts économiques des CC en matière de gestion des eaux pluviales (le volet social ne sera pas abordé explicitement si ce n'est à travers le volet économique). Le premier type d'impact évalué sera lié aux dommages causés par les inondations et refoulement potentiels, tandis que le second sera associé à la perte d'usages causée par une détérioration de la qualité des cours d'eau récepteurs engendrée par les déversements de réseaux unitaires.

Pour l'évaluation du premier type d'impact, la première étape concerne la production de grilles d'évaluation des coûts unitaires pour les secteurs des municipalités partenaires. Il s'agira d'adapter et de bonifier la grille de référence déjà produite dans le cadre d'un projet actuellement en cours (projet FIMR). Cette mise à jour se fera en fonction des caractéristiques des secteurs sélectionnés dans les différentes municipalités-partenaires et des réalités économiques propres à ces municipalités.

Les simulations hydrologiques sur les différents secteurs permettront d'estimer les valeurs d'une série de variables hydrologiques/hydrauliques en divers points du réseau. Ces modèles ne peuvent simuler directement l'ampleur ni l'étendue des inondations en surface. Il faut donc définir divers indices ou relations permettant de lier l'amplitude des inondations/refoulements potentiels aux variables hydrologiques/hydrauliques simulées. Ces indices devront intégrer notamment l'intensité des surcharges, leur durée et le nombre de conduites affectées. L'élaboration de ces indices s'inspirera des travaux réalisés au volet 5 portant sur la définition d'indices de performance pour l'évaluation et la comparaison des scénarios d'adaptation.

Une fois établie la relation entre variables hydrologiques/hydrauliques et amplitude potentielle des inondations/refoulements, il importe d'établir une seconde relation liant cette dernière variable aux coûts des dommages associés. La grille de coûts développée dans le cadre de la première étape sera à la base de ces estimations. Les coûts seront estimés en combinant i) les données sur l'occupation du territoire et le bâti des différents secteurs, ii) les coûts unitaires fournis par la grille et iii) les résultats de divers scénarios d'inondations d'amplitude croissante. Une relation moyenne entre coût des dommages et amplitude des inondations/refoulements sera ainsi définie pour chaque secteur.

L'évaluation économique de l'évolution des dommages dans le cadre d'un scénario sans mesures d'adaptation aux CC pourra enfin être complétée. Sur la base des indices et relations développés aux étapes antérieures, il sera en effet possible d'avoir une estimation des coûts des dommages pour différentes pluies de période de retour donnée. Connaissant par ailleurs comment évolueront les probabilités d'occurrence de ces événements, il sera possible d'associer un coût moyen aux dommages associés à chaque événement futur de période de retour donnée et d'ainsi établir l'évolution future de la distribution des coûts des dommages potentiels. Cette analyse suppose implicitement que les paramètres économiques ayant servi à l'évaluation des coûts des dommages pour chaque secteur restent inchangés à l'horizon considéré.

En ce qui concerne l'évaluation du second type d'impact, lié aux déversements de réseaux unitaires, il s'agira, pour chaque municipalité partenaire : i) d'identifier une liste d'usages potentiels des cours d'eau naturels (ex. baignade, pêche, canotage, etc.); ii) d'estimer le nombre d'usagers potentiels pour chaque activité; iii) d'évaluer le nombre de jours moyens lors desquels la mauvaise qualité de l'eau empêche les usages répertoriés suivant un événement de déversement; et iv) d'estimer le coût annuel moyen lié à la perte des usages mentionnés précédemment, sur la base de la fréquence des épisodes de déversements calculée dans le cadre de l'axe de recherche 5.

Les analyses décrites aux paragraphes précédents seront reprises pour chacune des projections climatiques disponibles. La comparaison des résultats obtenus servira à déterminer dans quelle mesure les projections de coûts sont sensibles à la variabilité des projections climatiques disponibles.

5 Identifier, analyser et/ou comparer différentes barrières et options d'adaptation en y intégrant la meilleure science disponible.

La première étape de cet axe du projet sera d'évaluer la portée, l'efficacité, la faisabilité et les coûts de mise en place et d'opération des diverses mesures d'adaptation pouvant contribuer au maintien de la performance des systèmes de drainage urbain, en tenant compte des contraintes particulières auxquelles sont soumises les municipalités du Sud

du Québec. Les mesures d'adaptation évaluées seront regroupées en cinq catégories soit : 1) les mesures de gestion et d'entretien des réseaux existants; 2) les mesures et aménagements de contrôle à la source, visant à ralentir et à réduire les apports au réseau; 3) la construction ou le remplacement d'ouvrages de transport et de stockage; 4) la reconfiguration des réseaux de drainage; et 5) le contrôle dynamique des ouvrages de régulation en temps de pluie. Un travail en ce sens a déjà été amorcé dans le cadre de projets antérieurs et en cours. Il est donc prévu d'explorer un ensemble plus vaste de mesures et d'adapter l'analyse déjà réalisée aux besoins et particularités des municipalités partenaires. Également, les mesures d'adaptation seront évaluées en fonction de deux objectifs complémentaires mais distincts, à savoir la réduction des inondations et refoulements ainsi que la diminution de la fréquence des déversements des réseaux unitaires.

Comme il a été mentionné plus haut, une révision des critères de conception et du mode d'évaluation du niveau de performance s'impose. Traditionnellement, le niveau de service était établi en fonction de la période de retour de l'événement de pluie servant à dimensionner les ouvrages. Dans un contexte de CC, où le concept de période de retour perd son sens, il est essentiel de revoir ce concept et, dans un contexte d'évaluation de la performance des scénarios d'adaptation, de revoir la façon dont le niveau de service est établi. Des pistes en ce sens ont été proposées par Mailhot *et al.* (2008). Ces auteurs ont montré que la définition de critères de conception dans un contexte de CC exige de considérer à la fois : 1) la durée de vie utile de l'ouvrage/infrastructure; 2) les scénarios de projections climatiques disponibles; et 3) le niveau de performance souhaité. Les travaux de la présente étape reprendront ces approches et verront à définir diverses stratégies en matière de conception qui seront intégrées à l'élaboration des scénarios d'adaptation. Il s'agira notamment d'identifier, pour chacune des mesures d'adaptation, une ou plusieurs règles de conception à utiliser dans le cadre des scénarios d'adaptation.

L'élaboration de scénarios d'adaptation vise évidemment à identifier diverses mesures susceptibles d'améliorer la situation pour chaque secteur. La sélection des mesures s'effectuera en fonction des caractérisations des secteurs, de leur performance historique, des diagnostics posés suite aux simulations hydrologiques réalisées à l'étape 3 et aux échanges et discussions avec les gestionnaires de réseau des municipalités

partenaires. Les scénarios seront élaborés selon deux horizons, respectivement de moyen et long termes (le long terme pouvant coïncider avec l'horizon des projections climatiques disponibles et le moyen terme à la moitié de cet horizon). Un certain nombre d'objectifs seront fixés, en fonction des secteurs étudiés, pour chacun de ces horizons en termes de réduction des apports au réseau (par exemple réduction des apports de x % suite à la mise en place de diverses mesures de contrôle à la source), de remplacement des conduites (y % des conduites les plus âgées auront été remplacées par des conduites de diamètres supérieurs selon les « nouvelles » normes de conception), de reconfiguration de différents secteurs, etc. Les scénarios d'adaptation initialement définis pourront, le cas échéant, être modifiés si la performance au terme de ces horizons est jugée insatisfaisante.

L'évaluation de la performance des scénarios d'adaptation proposée se fera par simulation hydrologique des différents secteurs sélectionnés à l'aide des outils et méthodes identifiés aux étapes 2 et 3. Les pluies représentatives du climat futur, élaborées selon les deux approches décrites à l'étape 1, seront utilisées pour représenter les conditions climatiques aux horizons considérés. La procédure et les indicateurs élaborés à l'étape 2 seront appliqués à l'analyse de chaque scénario d'adaptation.

L'analyse précédente sera reprise en considérant les différentes projections d'évolution des pluies en climat futur, projections établies sur la base des différents résultats de simulations disponibles (voir étape 1). Tout comme dans le cas de l'évaluation de la performance des systèmes dans un contexte de « non adaptation », tel que décrite à l'étape 2, cette façon de procéder vise à déterminer la sensibilité des résultats aux incertitudes sur les projections climatiques futures. Ainsi dans chaque cas (combinaison d'un secteur, d'un scénario d'adaptation et d'un horizon), il sera possible d'évaluer les possibles variations de performance dans le cas où, par exemple, la projection « moyenne » s'avérerait sous-estimer la réalité. Une telle analyse est essentielle dans un contexte d'évaluation du risque puisqu'elle pourra, dans le cas d'une grande sensibilité des performances à une variation des projections climatiques, impliquer l'adoption de scénarios d'adaptation plus « agressifs » afin de minimiser les risques en cas de sous-estimation des changements climatiques appréhendés (voir paragraphe suivant).

L'étape suivante servira à analyser les coûts et à évaluer le risque effectif associé à chaque scénario d'adaptation. L'évaluation des coûts des dommages potentiels s'effectuera en utilisant les indices et la procédure décrits à l'étape 4. En ce qui concerne les coûts de mise en place des mesures associées à chaque scénario d'adaptation, ils seront estimés à partir d'une grille de coûts unitaires permettant de déterminer le coût d'un aménagement en fonction de diverses caractéristiques des secteurs. Une grille de ce type a été développée dans le cadre d'un projet en cours (projet FIMR) et sera adaptée pour utilisation dans les différentes municipalités partenaires.

La dernière étape servira à comparer les performances, classer les scénarios et réaliser une synthèse des résultats. Une comparaison des coûts de mise en place et des coûts des dommages potentiels selon les scénarios et les secteurs considérés sera d'abord réalisée afin de permettre une classification des scénarios en fonction du niveau de performance escompté à moyen et long termes. L'estimation de l'efficacité globale des scénarios d'adaptation proposés en regard des défis posés par les CC pour chacun des secteurs devra intégrer les éléments d'analyse suivants : 1) le niveau de performance des systèmes au terme de chacun des horizons temporels envisagés; 2) les coûts probables des dommages potentiels et des pertes d'usages durant cette période; 3) les coûts de mise en place des scénarios d'adaptation; 4) la sensibilité des résultats (performances et coûts) aux incertitudes sur les projections climatiques. Par ailleurs, une comparaison des résultats pour les différents secteurs sélectionnés permettra de dégager des conclusions générales sur les combinaisons de mesures d'intervention les plus appropriées selon le type de réseau, le type de secteur et diverses autres caractéristiques. Ceci conduira à l'élaboration d'une matrice d'adaptation aux CC permettant d'identifier les mesures d'adaptation les plus appropriées en fonction des caractéristiques d'un secteur (ex. type de surfaces et de réseau, vocation, etc.).

Bibliographie / références

Alexander, L.V. et Arblaster, J.M. (2008). Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. *Int. J. Climatol.*, Published on line DOI: 10.1002/joc.1730.

- Ashley, R.M., Balmforth, D.J., Saul, A.J., Blanskby, D.J. (2005). Flooding in the future – predicting climate change, risks, and responses in urban areas. *Wat. Sci. Tech.*, 52(5), 265-273.
- Boo, K.-O., Kwon, W.-T., et Baek, H.-J. (2006). Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01701, doi:10.1029/2005GL023378.
- CNRC (2005). Planification de la gestion des eaux pluviales. Guide national pour des infrastructures municipales durable, Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et Fédération canadienne des municipalités (FCM), Ottawa, Canada, 44 p.
- Denault, C., Millar, R.G., et Lence, B.J. (2006). Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment. *J. Am. Water Resour. Ass. (JAWRA)*, 42(3), 685-697.
- Ekström, M., H.J. Fowler, C.G. Kilsby, et P.D. Jones (2005). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. *J. Hydrol.*, 300, 234-251.
- Emori, S., et Brown, S.J. (2005). Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17706, doi :10.11029/2005GL023272.
- Environnement Canada (2007). *Climate change and extreme rainfall-related flooding and surface runoff risks in Ontario*. Cheng, C.S., Li, G. et Li, Q. Meteorological Service of Canada Branch – Ontario, 203 p.
- Field, R., et Pitt, R.E. (1990). Urban storm-induced discharge impacts – Unites-States-Environmental -Protection-Agency Research Program Review. *Wat. Sci. Tech.*, 22(10-11), 1-7.
- Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., et Jones, P.D. (2005). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations - 1. Assessment of control climate. *J. Hydrol.*, 300: 212-233.
- Fowler, H.J., Ekström, M., Blenkinsop, S., et Smith, A.P. (2007). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res.*, 112, D18104, doi:10.1029/2007JD008619.
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schidli, J., et Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models, *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Groisman, P.Y., Karl, T.R., Easterling, D.B., Knight, R.W., Jamason, P.F., Hennessy, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V. N., Dougals, A., Førland, E., et Zhai, P.-M (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Clim. Change*, 42, 243-283.

- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C., et Razuvaev, V.N. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.*, 18, 1326-1350.
- Groleau, A., Mailhot, A., et Talbot, G. (2007). Trend analysis of winter rainfall over Southern Quebec and New Brunswick (Canada). *Atmosphere-Ocean*, 45(3), 153-162, doi10.3137/ao.450303.
- Grum, M., Jørgensen, A.T. Johansen, R.M., et Linde, J.J. (2006). The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulations. *Wat. Sci. Tech.*, 54(6-7), 9-15.
- Guo, Y. P. (2006). Updating rainfall IDF relationships to maintain urban drainage design standards. *J. Hydrol. Engrg*, 11(5), 506-509.
- Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F.J., et Palmer, T.N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. – I. Basic concepts. *Tellus*, 57A, 219-233.
- He, J., Valeo, C., et Bouchart, F. J. C. (2006). Enhancing urban infrastructure investment planning practices for a changing climate. *Wat. Sci. Tech.*, 53(10), 13-20.
- Hosking, J. R. M., et Wallis, J. R. (1997) *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Infrastructure Canada (2006). L'adaptation des infrastructures du Canada aux changements climatiques dans les villes et les collectivités: Une analyse documentaire. Infrastructure Canada, Division de la recherche et de l'analyse, 28 p.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The physical science basis – Summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 18 p.
- Kije Sipi (2001). *Impacts & Adaptation of Drainage Systems, Design Methods & Policies*. Climate Change Action Fund: Impacts & Adaptation, Contribution Agreement A330.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., et Bush, E. (2008). From Impacts to Adaptation: Canada in a changing climate 2007, Gouvernement of Canada, Ottawa (Ontario), 448 p.
- Mailhot A., Nantel, E., Duchesne, S., Huard, D., et Villeneuve, J.-P. (2006a). Estimation des courbes IDF et des moyennes inter-annuelles des températures moyennes journalières en climat futur (période 2041-2070) - région de la mine Raglan. Rapport final. Rapport de recherche N° R-835, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 83 p.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Rivard G., Nantel E., Caya, D., et Villeneuve, J.-P. (2006b). Climate change impacts on the performance of urban drainage systems for

Southern Québec. *EIC Climate Change Technology Conference*, 9-12 mai 2006, Ottawa, Ontario, Canada.

- Mailhot, A., Rivard, G., Duchesne, S., et Villeneuve, J.-P. (2006c). Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec. Rapport de recherche No R-874, Institut national de la recherche scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 142 p.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., et Talbot, G. (2007a). Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydrol.*, 347(1-2), 197-210, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.019.
- Mailhot, A., Duchesne, S., et Villeneuve, J.-P. (2007b). Les changements climatiques : enjeux et perspectives en matière d'infrastructures urbaines. *Contact Plus, la Revue de l'Association des Ingénieurs Municipaux du Québec*, n° 62, été 2007, p. 20-26.
- Mailhot, A., Bolduc, S., Duchesne, S., et Villeneuve, J.-P. (2008a). Adaptation aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec : Revue de littérature et analyse critique des mesures de contrôle à la source. Rapport de recherche No R-972, 137 p.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Talbot, G., Rousseau, A.N., et Chaumont, D. (2008b). Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulements pour le sud du Québec. Rapport de recherche No R-977, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 174 p.
- Mailhot, A., S. Duchesne, C. Larrivée, S. Bolduc et G. Pelletier (2008c). Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. Rapport de recherche No R-972, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 158 p.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., et Taylor, K.E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset – A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, September 2007, 1383-1394.
- Meehl, G. A., et co-auteurs (2006) Climate change projections for the twenty-first century and climate change commitment in the CCSM3. *J. Climate.*, 19, 2597–2616.
- Minnery, J.R., et Smith, D.I. (1996). Climate change, flooding and urban infrastructure. Dans : *Greenhouse: Coping with climate change - Proceedings of the GREENHOUSE 94 Conference*, 10-14 octobre 1994, Victoria, Australie. CSIRO Division of Atmospheric Research, p. 235-247.
- Niemczynowicz, J. (1989). Impact of the greenhouse effect on sewerage systems – Lund case study. *Hydrol. Sci. J.*, 34(6), 651-666.

- Obropta, C.C., et Kardos, J.S. (2007). Review of urban stormwater quality models: deterministic, stochastic, and Hybrid Approaches. *J. Am. Water Resour. Ass. (JAWRA)*, 43(6), 1508-1523. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00124.x
- Palmer, T. N., Doblas-Reyes, F. J., Hagedorn, R., et Weisheimer, A. (2005). Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 1991–1998. (doi:10.1098/rstb.2005.1750).
- Papa, F., Guo, Y., et Thoman, G.W. (2004). Urban drainage infrastructure planning and management with a changing climate. In: *Proc. 57th Canadian Water Resources Association Annual Congress - Water and Climate Change: Knowledge for Better Adaptation*, Montréal, Québec, June 16-18, 2004, 6 p.
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., et de Elía, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Clim.*, 19 (13), 3112-3132.
- Semadeni-Davies, A. (2003). Response surfaces for climate change impact assessments in urban areas, *Wat. Sci. Tech.*, 48(9), 165-175.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., et Gustafsson, L.-G. (2008a). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer systems, *J. Hydrol.*, 350, 100-113. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.05.028.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., et Gustafsson, L.-G. (2008b). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater, *J. Hydrol.*, 350, 114-125. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.006.
- Stainforth, D. A., Allen, M.R., Tredger, E.R., et Smith, L.A. (2007a). Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2145-2161, doi:10.1098/rsta.2007.2074.
- Stainforth, D. A., Downing, T.E., Washington, R., Lopez, A., et New, M. (2007b). Issues in the interpretation of climate model ensembles to inform decisions. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2163-2177, doi:10.1098/rsta.2007.2073.
- Stainforth, D. A., Aina, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D.J., Kettleborough, J.A., Knight, S., Martin, A., Murphy, J.M., Oiani, C., Sexton, D., Smith, L.A., Spicer, R.A., Thorpe, A.J., et Allen, M.R. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* 433, 403–406. (doi:10.1038/nature03301).
- Tebaldi, C., et Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2053–2075, doi:10.1098/rsta.2007.2076.

- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M., et Meehl, G.A. (2006). Going to the extremes – An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79 (3-4), 181-211.
- Vincent, L.A., et Mekis, E. (2005). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the 20th Century. *Atmos. Ocean*, 44(2), 177-193.
- Walsh, C.J., Roy, A.H., Feminella, J.W., Cottingham, P.D., Groffman, P.M., et Morgan, R.P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. North Am. Benthol. Soc.*, 24(3), 706-723.
- Watt, W.E., Waters, D., et McLean, R. (2003). Climate change and urban stormwater infrastructure in Canada: Context and case studies. Toronto-Niagara Region study report and working paper series, Waterloo, Ontario (Report 2003-1), 27 p.
- Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D., et Niitsoo, A. (2000). Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38(3): 395-429.
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environ. Model. Software*, 16, 195-231.
- Zwiers, F.W., et Kharin, V.V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *J. Climate*, 11: 2200-2222.