

**Conception et planification des
interventions de renouvellement des
infrastructures de drainage urbain dans un
contexte d'adaptation aux changements
climatiques**

Rapport N° R-920

Juin 2008

**CONCEPTION ET PLANIFICATION DES INTERVENTIONS DE RENOUVELLEMENT
DES INFRASTRUCTURES DE DRAINAGE URBAIN DANS UN CONTEXTE
D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Rapport rédigé pour

Ressources naturelles Canada

Programme sur les impacts et adaptation liés aux changements climatiques

Projet A-1368

et

Le consortium Ouranos

par

Alain Mailhot¹
Sophie Duchesne¹
Caroline Larrivée²
Geneviève Pelletier³
Samuel Bolduc¹
Frédéric Rondeau³
Ahmadi Kingumbi¹
Guillaume Talbot¹

1. Centre Eau, Terre, Environnement
Institut national de la recherche scientifique
490, de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

2. Consortium Ouranos
550 rue Sherbrooke Ouest, 19^{ème} étage, Montréal (Québec) H3A 1B9

3. Département de génie civil, Université Laval,
Pavillon Adrien-Pouliot, 1065 av. de la Médecine, Québec (Québec) G1V 0A6

Rapport de recherche

R-920

Juin 2008

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au financement obtenu de Ressources naturelles Canada (Programme sur les impacts et adaptation liés aux changements climatiques) ainsi que du consortium Ouranos.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET GESTION DES EAUX PLUVIALES	5
2.1 Modélisation du climat	5
2.2 Tendances historiques pour les précipitations	7
2.3 Projections climatiques	8
2.4 Incertitudes associées aux projections climatiques	10
2.5 Impacts et adaptation aux changements climatiques	12
2.6 Revue de littérature des études récentes	14
3. ENJEUX ET CAPACITÉS D'ADAPTATION ACTUELLES	23
3.1 Atelier sur la gestion des eaux pluviales et les CC	23
3.2 Enjeux et défis actuels	25
3.3 Capacité d'adaptation actuelle et barrières à l'adaptation	28
3.4 Mesures d'adaptation potentielles et conditions de mise en place	31
3.5 Stratégie globale de promotion des mesures d'adaptation	33
4. DÉFINITION DES CRITÈRES DE CONCEPTION DANS UN CONTEXTE DE CC	35
4.1 Revues des pratiques actuelles	36
4.1.1 Méthodologie	37
4.1.2 Résultats et discussion	38
4.1.3 En résumé	41
4.2 Courbes IDF	42
4.2.1 Distributions Gumbel et GEV	43
4.2.2 Méthode d'estimation	44
4.3 Modèles non stationnaires	45
4.4 Critère de conception en condition non stationnaire	51
4.4.1 Exemple	55
4.5 Évaluation du risque en contexte de CC	59
4.5.1 Durée de vie utile de l'ouvrage	59
4.5.2 Amplitudes des tendances climatiques	60
4.5.3 Incertitudes sur les projections climatiques	60
4.5.4 Plan global de gestion des eaux pluviales	61
4.6 Directives générales	61
4.6.1 Règles de conception	62
4.6.2 Mise en garde	66

5. GESTION DES EAUX PLUVIALES EN MILIEU URBAIN DANS UN CONTEXTE DE CC	67
5.1 Vers un mode de gestion adaptative et hiérarchique intégrant la dimension climatique	71
5.1.1 Échelles temporelles en jeu.....	72
5.1.2 Des mesures d'adaptation pour un contrôle du spectre complet des événements pluvieux.....	74
5.2 Objectifs et structure générale	76
5.3 Suivi et collecte des données	79
5.3.1 Inventaire des actifs.....	80
5.3.2 État structural des réseaux.....	80
5.3.3 Suivi suite à des événements de pluies intenses.....	81
5.3.4 Impacts environnementaux	82
5.3.5 Suivi météorologique	82
5.4 Évaluation du niveau de performance	83
5.5 Élaboration des scénarios d'interventions	85
5.6 Évaluation et optimisation des scénarios d'intervention	86
5.6.1 Liste préliminaire des scénarios d'intervention.....	88
5.6.2 Scénarios de projections climatiques	88
5.6.3 Évaluation du niveau de performance du scénario considéré	89
5.6.4 Comparaison aux critères de performance	90
5.6.5 Révision des scénarios d'intervention	90
5.6.6 Sélection finale du plan d'intervention.....	90
6. CONCLUSION.....	93
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
ANNEXE A LISTE DES PARTICIPANTS À L'ATELIER DU 16 JANVIER 2008	109
ANNEXE B QUESTIONS SOUMISES AUX PARTICIPANTS À L'ATELIER DU 16 JANVIER 2008.....	111
ANNEXE C RÉPONSES DÉTAILLÉES DES MUNICIPALITÉS AU QUESTIONNAIRE SUR LES PROCÉDURES ET LES CRITÈRES DE CONCEPTION EN USAGE.....	113
ANNEXE D TABLEAUX-SYNTÈSE DES RÉPONSES SUR LES PROCÉDURES ET PRATIQUES EN USAGE	123
ANNEXE E PÉRIODE DE RETOUR EN RÉGIME STATIONNAIRE.....	129
ANNEXE F ESTIMATION DU NOMBRE MOYEN DE DÉPASSEMENTS D'UN QUANTILE EN RÉGIME NON STATIONNAIRE.....	131
ANNEXE G MESURES D'ADAPTATION DU TYPE CONTRÔLE À LA SOURCE.....	133

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Évolution possible des distributions dans un contexte non stationnaire : a) translation de la distribution; b) moyenne inchangée mais augmentation de la variabilité; c) changement de la moyenne et de la variabilité (tiré de Lemmen <i>et al.</i> , 2008).	48
Figure 4.2	Période de retour en fonction des années pour un modèle non stationnaire où le paramètre de position de la distribution de Gumbel varie linéairement dans le temps (éq. 4.11) (courbes continues $b/\alpha = 0,001$ année ⁻¹ ; courbes en tirets $b/\alpha = 0,003$ année ⁻¹ et courbe en pointillés $b/\alpha = 0,007$ année ⁻¹).....	50
Figure 4.3	Période de retour en fonction des années pour un modèle non stationnaire où le paramètre de position de la distribution GEV varie linéairement dans le temps (éq. 4.11) (courbes continues $b/\alpha = 0,001$ année ⁻¹ ; courbes en tirets $b/\alpha = 0,003$ année ⁻¹ et courbes en pointillés $b/\alpha = 0,007$ année ⁻¹). La valeur de k a été fixée à -0,05.....	51
Figure 4.4	Définition des paramètres de conception t_c (année de référence) et T_c (période de retour de conception à l'année de référence) et de la période de retour correspondant à l'année de conception T_0	54
Figure 4.5	Précipitations totales en fonction de la période de retour dans le cas de l'exemple présenté à la section 4.4.1.	56
Figure 4.6	Évolution de la période de retour en fonction du temps pour un scénario de CC où la période de retour initiale diminue de moitié après 100 ans. Les différentes courbes correspondent à différentes années de référence (correspondant aux valeurs de l'axe des x sous les traits en pointillés verticaux, soit 20; 40; 60; 80; et 100 ans).....	58
Figure 4.7	Précipitations totales utilisées lors de la conception en fonction de l'année de référence considérée pour l'exemple de la section 4.4.1.	58
Figure 5.1	Structure globale d'élaboration et d'évaluation des plans d'intervention.....	78
Figure 5.2	Évaluation et optimisation des scénarios d'intervention en regard des projections climatiques disponibles	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Description des barrières techniques, économiques et institutionnelles/organisationnelles identifiées par les intervenants.	30
Tableau 4.1	Période de retour de conception à considérer pour différentes périodes de retour critiques et différentes durées de vie utile (scénario climatique de réduction de moitié des périodes de retour sur 100 ans et année de référence fixée à la moitié de la durée de vie utile).	64
Tableau 4.2	Période de retour de conception à considérer pour différentes périodes de retour critiques et différentes durées de vie utile (scénario climatique de réduction de moitié des périodes de retour sur 100 ans et année de référence fixée au deux tiers de la durée de vie utile).	65
Tableau D. 1	Résumé des réponses à la question 1.1 portant sur les critères de rejet.....	123
Tableau D. 2	Résumé des réponses aux questions 1.2 et 1.3 portant sur les critères pour définir le patron temporel, la durée et la fréquence de la pluie pour les ouvrages de collecte et de transport et les ouvrages de stockage	125
Tableau D. 3	Résumé des réponses aux questions 2.1 et 2.2 portant sur les procédures des ouvrages de collecte et de transport et ceux de stockage	127
Tableau G. 1	BMP de type bio-rétention	135
Tableau G. 2	BMP favorisant l'infiltration	137
Tableau G. 3	BMP de type filtration sur médium.....	141
Tableau G. 4	BMP de type filtration à travers un médium végétal	143
Tableau G. 5	BMP de type pavage ou surface poreuse ou perméable.....	145
Tableau G. 6	BMP visant à récupérer les eaux pluviales ruisselant de diverses surfaces imperméables	147
Tableau G. 7	BMP recréant des espaces verts.....	149
Tableau G. 8	BMP du type marais/zones humides	151
Tableau G. 9	BMP du type bassins de rétention.....	153

1. Introduction

Les infrastructures urbaines d'eau actuellement en place dans nos villes représentent un patrimoine technique, économique et social souvent sous-estimé. La récente prise de conscience de la rapide détérioration de nos infrastructures urbaines et des investissements qu'il faudra consentir à court et moyen termes pour maintenir un niveau de performance adéquat a fait l'objet de nombreux débats au Canada et au Québec au cours des dernières années. À titre d'exemple, le gouvernement du Québec, dans sa Politique nationale de l'eau adoptée en novembre 2002, avait fixé comme objectif d'inciter les municipalités à atteindre un taux de renouvellement de leurs réseaux de l'ordre de 0,8 % d'ici 2007 et de 1 % d'ici 2012. Des programmes et des initiatives ont été mis en place afin de structurer une démarche en ce sens, que l'on songe, par exemple, au « Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout » publié par le ministère des Affaires municipales et des Régions du Québec (MAMR, 2005).

L'élaboration de plans d'intervention ne saurait toutefois se faire sans considérer les changements climatiques (CC), puisque ces derniers se traduiront, pour certaines régions, par des modifications significatives des régimes de précipitations et par une plus grande probabilité d'occurrence d'événements pluvieux dits intenses (Mailhot *et al.*, 2007a). En effet, si la conséquence la plus souvent mentionnée des CC est un réchauffement global des températures, une autre conséquence non moins importante sera une modification des intensités (et de la fréquence d'apparition) des événements intenses et extrêmes. Mailhot *et al.* (2007a) ont ainsi montré, suite à l'analyse des résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC), confirmant en cela d'autres études publiées antérieurement, que la période de retour de certains événements de pluies intenses pourrait diminuer de moitié entre les périodes [1961-1990] (climat actuel) et [2041-2070] (climat futur) pour la région du sud-Québec.

Le niveau de performance de plusieurs composantes du cycle hydrologique urbain de l'eau risque ainsi d'être affecté par les CC (approvisionnement en eau potable, traitement de l'eau, évacuation des eaux de pluie, surverse de réseaux unitaires, etc.). Concernant plus spécifiquement les ouvrages et infrastructures ayant pour fonction l'évacuation des eaux de pluie, sachant que la conception de ces ouvrages repose sur une analyse des probabilités d'occurrence des événements de pluies intenses réalisée sur la base des historiques pluviométriques disponibles, une intensification des événements intenses pourra avoir pour conséquence une augmentation des risques de refoulement et d'inondation en secteurs urbains et une détérioration de la qualité des cours d'eau récepteur (Mailhot *et al.*, 2006a,b). Les impacts économiques et sociaux de ce type d'événements sont par ailleurs considérables (Bourque, 2000; Mehdi *et al.*, 2006; Lemmen *et al.*, 2008). Il importe donc de revoir dès aujourd'hui les critères et procédures de conception et d'évaluation des niveaux de performance de ces ouvrages afin d'intégrer des considérations relatives aux CC aux plans d'intervention actuels et d'assurer une adaptation maximale de ces systèmes. Une telle approche est cruciale lorsque l'on considère, notamment, le fait que la durée de vie utile de plusieurs de ces infrastructures peut atteindre 100 ans, période au terme de laquelle le climat, selon les scénarios actuels, se sera substantiellement modifié.

Le présent rapport rend compte de travaux réalisés dans le cadre d'un projet visant à développer une approche pour intégrer les facteurs clés liés aux CC aux plans d'intervention pour le remplacement/réhabilitation des réseaux de drainage urbain. Les réseaux d'égout pluvial, pseudo-séparés et unitaires seront considérés, les impacts des CC sur les réseaux domestiques étant *a priori* négligeables. L'accent sera mis sur le volet quantitatif de cette gestion des eaux pluviales, c'est-à-dire sur la gestion des volumes et débits de pointe. Les travaux abordent trois thèmes principaux, à savoir : 1) analyse et description des impacts potentiels des CC en matière de gestion des eaux pluviales (Chapitre 2); 2) analyse et description de la capacité d'adaptation actuelle des installations et systèmes en place des points de vue technique et organisationnel (Chapitre 3); 3) révision des critères de conception des infrastructures (Chapitre 4); et 4) élaboration d'un protocole visant à guider et à assister les concepteurs afin de proposer des aménagements ou des solutions alternatives en matière de drainage urbain, en vue d'intégrer aux stratégies et outils de planification du renouvellement des infrastructures

souterraines un volet lié à l'évolution de la performance attendue en regard des CC (Chapitre 5). À terme, les auteurs du présent rapport espèrent répondre, du moins en partie, aux préoccupations des intervenants du monde municipal et du génie conseil qui, bien que conscients de la problématique et prêts à revoir leur façon de faire face à cette nouvelle réalité, souhaitent que des stratégies d'analyse adéquates leur soient proposées.

2. Changements climatiques et gestion des eaux pluviales

Le présent chapitre comporte six sections abordant les thèmes suivants : 1) présentation et description sommaire des concepts et outils utilisés en modélisation du climat (section 2.1); 2) discussion des tendances historiques sur les précipitations (section 2.2); 3) description des projections climatiques actuellement disponibles pour les pluies intenses (section 2.3); 4) analyse des incertitudes sur les projections climatiques (section 2.4); 5) description des impacts des CC (section 2.5) et 6) des mesures d'adaptation en matière de gestion des eaux pluviales (section 2.6). Enfin, la section 2.7 passe en revue les études récentes portant sur l'analyse des impacts des CC et sur l'adaptation en matière de gestion des eaux pluviales en milieu urbain.

2.1 Modélisation du climat

Les projections climatiques actuellement disponibles sont établies sur la base de résultats issus de modèles de simulation du climat. Ces modèles climatiques (aussi appelés « Modèles couplés atmosphère-océan de circulation générale » ou en anglais « Atmosphere-Ocean General Circulation Models », AOGCM; l'acronyme GCM pour « Global Circulation Model » sera utilisé dans la suite de ce document) sont des modèles capables de simuler les multiples interactions (océan-atmosphère-terre) et processus physiques et chimiques impliqués dans la « mécanique » climatique terrestre. À partir d'une description mathématique des lois physiques qui régissent le climat, de paramètres astronomiques (ex. rayonnement solaire), de paramètres planétaires (ex. occupation du sol) et d'une description de la composition chimique de l'atmosphère, ces modèles simulent, sur de longues périodes et sur l'ensemble de la planète, un ensemble de variables climatiques telles que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, etc. Ils sont donc en mesure de simuler l'évolution vraisemblable du climat dans un contexte d'augmentation des gaz à effet de serre (GES). Puisque ces modèles doivent nécessairement simuler le climat de la planète entière, leur résolution

spatiale est généralement assez grossière, soit de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Ceci signifie que les GCM représentent la terre, les océans et l'atmosphère par un nombre fini de « blocs » ou « tuiles » d'environ 500 km de côté (la valeur exacte varie selon les modèles et selon la latitude de la région considérée). Les GCM vont donc fournir comme résultats des variables climatiques (températures, précipitations, etc.) moyennées ou cumulées sur ces tuiles et ne sont donc pas en mesure de reproduire les phénomènes plus locaux. Les GCM ne sont pas conçus pour prédire le temps qu'il fera en un moment et en un lieu précis, mais plutôt pour estimer les tendances climatiques à long terme de diverses variables climatiques (ex. température moyenne dans une région, etc.). Ces « simulateurs du climat », très complexes, existent maintenant sous plusieurs formes, plusieurs équipes de recherche en divers pays ayant développé leur propre modèle (voir notamment Meelth *et al.*, 2006, 2007 et Mailhot *et al.*, 2008b pour une liste et les caractéristiques de certains de ces modèles).

Ces modèles sont dits « globaux » par opposition aux modèles régionaux, qui utilisent un découpage plus fin du territoire (par exemple, le Modèle Régional Canadien du Climat considère des tuiles de 45 km x 45 km; voir Plummer *et al.*, 2006 et de Elía *et al.*, 2008) mais qui se limitent toutefois à appliquer ce découpage, et donc à simuler une région donnée dont les conditions aux frontières sont fournies par un modèle global (plusieurs modèles régionaux ont été développés et appliqués à diverses régions; voir par exemple Ekström *et al.*, 2005; Semmler et Jacob, 2004 et Frei *et al.*, 2006 où une comparaison des résultats de simulations de divers modèles régionaux pour les précipitations extrêmes est présentée).

Les projections climatiques établies par ces modèles visent à déterminer comment les variables climatiques, et le climat terrestre dans son ensemble, seront affectés par l'accroissement des GES. Évidemment, la simulation d'un climat sous un schéma particulier d'évolution des concentrations des GES suppose que l'on définit un scénario d'émission de ces gaz. L'élaboration de ces scénarios est basée sur un ensemble d'hypothèses quant à l'évolution future de divers facteurs, telles la démographie, l'évolution des technologies et l'économie, susceptibles de déterminer l'évolution des émissions de GES (IPCC, 2000; pour une description détaillée des scénarios d'émission

et de la méthode utilisée pour leur élaboration, le lecteur est invité à consulter cette dernière référence ainsi que Mailhot *et al.*, 2008b où sont décrits les quatre grandes classes de scénarios d'évolution des émissions de GES).

2.2 Tendances historiques pour les précipitations

Plusieurs études publiées au cours des quinze dernières années se sont intéressées à vérifier l'existence de tendances dans les séries historiques de températures et de précipitations. L'existence de telles tendances dans les séries de plusieurs indices et variables climatiques a été démontrée un peu partout dans le monde (voir, par exemple, pour les études portant sur les précipitations intenses, Karl *et al.*, 1995 et Karl et Knight, 1998 (USA); Plummer *et al.*, 1999 (Australie); Iwashima et Yamamoto, 1993 (Japon); Hundecha et Bárdossy, 2005 (Allemagne); Arnbjerg-Nielsen, 2006 (Danemark); Schmidli et Frei, 2005 (Suisse); Zhai *et al.*, 2005 (Chine); New *et al.*, 2006 (pays du sud et de l'ouest africain); Fowler et Kilsby, 2003 (Royaume-Uni); Goswani *et al.*, 2006 (Indes); voir aussi Alexander *et al.*, 2006 pour une analyse des tendances à l'échelle planétaire).

Concernant plus spécifiquement le Canada, Vincent et Mekis (2005), après analyse des données journalières de précipitations pour un ensemble de stations réparties sur tout le territoire canadien, concluent, de façon globale, à une augmentation des précipitations totales annuelles pendant la deuxième moitié du XXe siècle, principalement attribuable, selon leur analyse, à une augmentation du nombre de jours avec pluie. Par ailleurs, aucune tendance cohérente n'a été observée en matière de pluies intenses. Une conclusion similaire est rapportée par Stone *et al.* (2000), qui indiquent toutefois que cette tendance à la hausse serait imputable à une augmentation du nombre d'événements pluvieux de moyennes et fortes intensités au cours des 50 dernières années. Enfin, Lemmen *et al.* (2008) arrivent à une conclusion similaire, à savoir que le Canada a connu dans son ensemble une augmentation des précipitations pendant la deuxième moitié du XXe siècle, de 12 % en moyenne selon ces auteurs. Les plus grandes augmentations sont survenues au Nuvavut (entre 25 et 45 %) alors que la hausse des précipitations moyennes pour les régions au sud est estimée à entre 5 à 35 % selon les régions (Lemmen *et al.*, 2008).

Il importe de noter cependant que la détection de tendances, surtout pour les événements extrêmes, par définition peu fréquents, nécessite de disposer de séries de données relativement longues. De fait, la plupart des séries de données pour les pluies de durées pertinentes pour le drainage urbain (5 min à 24 h) dépassent rarement quelques dizaines d'années, que ce soit au Canada ou ailleurs dans le monde, ce qui peut expliquer le faible nombre d'études concluant en l'existence de tendances significatives pour les séries de maximums annuels de précipitations pour des durées inférieures à 24 heures. Parmi ces études, il convient de mentionner les travaux de Pagliara *et al.* (1998) qui, après analyse des données de stations en Toscane (Italie) couvrant la période de 1935 à 1992, ont détecté des tendances significatives à la hausse des maximums annuels de pluie sur 1 h, 3 h et 6 h. Vaes *et al.* (2002), considérant des séries de précipitations en Belgique couvrant une période de 100 ans (1898-1997), n'ont détecté aucune tendance significative pour les séries de maximums annuels pour des durées de 10 min à 2 heures. Au Danemark, Arnbjerg-Nielsen (2006) a noté une tendance significative à la hausse de l'intensité maximale de pluie sur 10 minutes à partir de données de 41 stations pluviométriques. Dans la région de Chicago, Guo (2006) calcule, en faisant certaines hypothèses sur la forme des courbes IDF, que les intensités maximales de pluie sur des durées de 5 minutes à 24 heures auraient augmenté de 28 à 60 % entre la première (1901-1947) et la deuxième moitié (1947-1994) du XX^e siècle, pour des périodes de retour de 2 à 50 ans. Mailhot *et al.* (2007a), analysant les séries des maximums annuels pour des durées de 2 h à 24 h à une cinquantaine de stations réparties sur la partie sud du Québec, n'ont pas observé de tendances significatives. Il est important de noter que ces séries étaient relativement courtes (de 30 à 50 années dans les meilleurs cas). À notre connaissance, aucune autre analyse de ce type n'a été réalisée à partir de données pour des durées de moins de 24 heures ailleurs au Canada.

2.3 Projections climatiques

Les projections actuelles en matière de pluviométrie annuelle à l'échelle du Canada prévoient une augmentation globale des précipitations (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 % (il est important de noter que les précipitations étant généralement plus faibles en valeurs absolues dans les régions nord, une augmentation égale dans les régions nord et sud se traduira par une augmentation relative beaucoup plus importante dans les régions nord).

L'estimation des impacts des CC sur la performance des systèmes de drainage urbain exige plus qu'une analyse des tendances historiques ou qu'une analyse des projections climatiques sur la pluviométrie en général. En effet, il est crucial de connaître comment évolueront, au cours des prochaines décennies, les événements auxquels les systèmes de drainage sont les plus sensibles, à savoir les événements de pluies intenses (durées de 5 min à 24 h). Bien que de nombreuses études aient estimé les variations de pluviométrie moyenne (annuelle, saisonnière ou mensuelle) auxquelles on peut s'attendre au cours des prochaines décennies (voir par exemple IPCC, 2007 et plus spécifiquement Meehl *et al.*, 2007; Meelh *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), peu se sont penchées sur l'évolution des événements de pluies extrêmes de courtes durées. La principale difficulté de telles estimations provient essentiellement du fait que les événements de pluies intenses sont des phénomènes locaux, dont l'échelle spatiale est plus petite que celle actuellement simulée par les modèles climatiques. Plusieurs auteurs ont toutefois avancé l'hypothèse, supportée en cela par diverses considérations physiques, que les événements de pluies intenses seraient plus fréquents en climat futur et que les modifications les affectant seraient plus importantes que celles affectant les moyennes (mensuelles ou saisonnières) de précipitations (voir par exemple Frei *et al.*, 1998; Trenberth 1999; Trenberth *et al.*, 2003; Emori et Brown, 2005).

Sur la base des résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC; version 3.7.1; Plummer *et al.*, 2006) et de données issues d'une cinquantaine de stations de mesure, Mailhot *et al.* (2006b, 2007a) ont estimé les variations des intensités de pluie sur des durées de 2, 6, 12 et 24 heures et des périodes de retour de 2, 5, 10 et 25 ans, entre le climat actuel (période 1961-1990) et le climat futur (période

2041-2070) pour la région du sud du Québec. Les estimations des intensités maximales en climat futur montrent que celles-ci devraient augmenter pour toutes les durées de pluie considérées. Les auteurs estiment que ces augmentations seront, en moyenne, de l'ordre de 7 à 23 %, les augmentations étant plus importantes pour les durées plus courtes. Si l'on traduit ces résultats en matière de période de retour, ceci signifie que, en climat futur, les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes de 2 h et 6 h correspondront environ à la moitié des périodes de retour actuelles (événements deux fois plus fréquents). Ces modifications sont très significatives et suggèrent, comme d'autres auteurs l'ont mentionné, et comme il est généralement admis dans la communauté scientifique, qu'une atmosphère où les concentrations de gaz à effets de serre augmentent sera le siège de plus d'instabilités et conséquemment à l'origine d'événements de pluies extrêmes plus intenses et plus fréquents (voir Trenberth, 1999, Trenberth *et al.*, 2003 et Emori et Brown, 2005).

Grum *et al.* (2006) ont conduit une étude similaire pour connaître l'évolution des intensités de pluie extrêmes au Danemark. À partir de résultats issus du modèle régional du climat danois HIRHAM et de données observées en 16 stations pluviométriques, ces auteurs estiment que les événements pluvieux extrêmes de durée 1 heure seront deux fois plus fréquents au cours de la période 2071-2100 qu'ils ne l'ont été pendant la période 1979-1996. Selon ces auteurs, malgré les incertitudes associées à ces projections, la tendance est claire : les événements de précipitations extrêmes qui affectent les systèmes de drainage urbain deviendront plus fréquents en raison des CC.

2.4 Incertitudes associées aux projections climatiques

Plusieurs sources d'incertitudes sont à considérer lorsque les résultats de modèles globaux de simulation du climat sont analysés ou utilisés pour des fins de développement de projections climatiques de diverses variables et/ou indices climatiques. Ces sources d'incertitudes sont associées à la méconnaissance (voir Mailhot *et al.*, 2008b pour une discussion plus détaillée) : 1) des conditions initiales (Hagedorn *et al.*, 2005); 2) de l'évolution future des émissions de GES; 3) de la valeur de certains paramètres des modèles (Tebaldi et Knutti, 2007); et 4) aux représentations

incomplètes, approximatives ou inadéquates des processus en jeu dans les modèles climatiques (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007b; Tebaldi et Knutti, 2007). Ces diverses sources d'incertitudes seront plus ou moins importantes selon le type de variables climatiques et les échelles spatiales et temporelles considérées. Par exemple, il est peu vraisemblable que les projections à long terme soient sensibles à des variations affectant les conditions initiales même si la dynamique du climat est reconnue comme étant chaotique (Tebaldi et Knutti, 2007). Par ailleurs, même si l'évolution future effective des concentrations de GES ne correspond à aucun des scénarios actuellement proposés, l'examen de plusieurs scénarios d'émissions des GES permet d'évaluer la sensibilité du système climatique en fonction du forçage climatique induit par ces gaz.

Il est maintenant admis que la principale source d'incertitudes (ou d'erreur) provient des modèles eux-mêmes (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007b; Tebaldi et Knutti, 2007). Chaque modèle utilise en effet une représentation du monde réel (discrétisation du système réel, échelles spatiale et temporelle) et des processus qui lui sont propres. Ces différences « structurales » entre modèles impliquent que, considérant un jeu de données d'entrée identique, chaque modèle simulera une évolution climatique différente. Ces différences pourront être mineures dans certains cas alors que, dans d'autres cas, elles pourront être majeures (par exemple, un modèle pourra prédire une augmentation des précipitations alors qu'un autre pourra prédire une baisse pour une même région). Cette variabilité inter-modèle est une expression du fait que des représentations diverses, toutes imparfaites et incomplètes, des systèmes réels sont utilisées par les modèles (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007b; Tebaldi et Knutti, 2007).

La prise en compte de cette variabilité se fait en combinant les résultats issus de plusieurs modèles. Il existe une littérature de plus en plus abondante sur cette approche, que l'on désigne par approche multi-modèle (« multi-model approach ») et plusieurs méthodes ont été proposées à cet effet (voir Palmer *et al.*, 2005 et Tebaldi et Knutti, 2007 qui présentent une revue de littérature sur le sujet). L'utilisation de l'approche multi-modèle est, de fait, de plus en plus répandue dans le cadre d'études d'impacts des CC dans divers domaines d'application (voir Thomson *et al.*, 2006 pour un exemple en santé publique, Cantelaube et Terres, 2005 pour une application en agriculture, et

Graham *et al.*, 2007 pour un exemple en hydrologie/gestion de l'eau). Il n'existe pas à l'heure actuelle, à notre connaissance, de projections climatiques multi-modèles pour les événements de précipitations intenses de courte durée. De telles projections seraient certainement très utiles afin d'apprécier la variabilité inter-modèle des projections climatiques pour ce type d'événements pluvieux, variabilité que l'on soupçonne importante compte tenu du caractère dynamique et très local de ces événements.

2.5 Impacts et adaptation aux changements climatiques

Une modification du régime d'occurrence des précipitations en climat futur pourra affecter le niveau de performance des ouvrages et infrastructures en place (Mailhot *et al.*, 2006a, 2007b). Cinq types d'événements sont à considérer dans une telle perspective : 1) les événements de pluie intense; 2) les événements fréquents de période de retour de 2 ans et moins; 3) les pluies de longue durée; 4) les événements de pluie hivernale et 5) les périodes de fonte printanière.

Les impacts d'une modification des probabilités d'occurrence des pluies intenses sont évidents puisqu'un tel changement pourrait accroître les risques de refoulement et d'inondation en milieu urbain. 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 (cet aspect est largement couvert aux chapitres 4 et 5 du présent rapport).

Une portion importante des réseaux d'égout des grands centres urbains au Canada sont 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 moindres intensités mais de plus longues durées, peuvent s'avérer critiques en matière de drainage 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. Ces précipitations sont souvent suivies d'une baisse brusque des températures, transformant rues et trottoirs en patinoire au grand dam des piétons et des automobilistes! Les événements de ce type demeurent cependant complexes à analyser globalement en matière d'apports aux réseaux de drainage urbain, puisque le ruissellement qu'ils engendrent dépend de l'interaction entre de nombreux facteurs, dont la quantité et le type de neige au sol, la température et les précipitations elles-mêmes. Par ailleurs, la littérature scientifique concernant les événements de « pluie sur neige » et leurs effets sur le ruissellement est peu abondante (Sui et Koehler, 2001). Quant à l'occurrence future de ces événements et leurs impacts potentiels dans un contexte de CC, ils sont encore moins documentés. Groleau *et al.* (2007) ont réalisé une analyse des tendances historiques de quatre indices liés aux pluies hivernales (probabilité d'occurrence, intensité moyenne, nombre de jours avec pluie et pluie maximale journalière). Ces auteurs ont montré que plus du tiers des stations analysées, toutes localisées dans la partie sud du Québec, montraient une tendance à la hausse de la probabilité d'occurrence des pluies hivernales (janvier et février) et, dans une moindre mesure, de la hauteur totale tombée sous forme de pluie pendant cette période. Ces résultats sont cohérents avec le constat maintes fois rapporté d'une augmentation des températures moyennes à la fin du XX^e siècle, augmentation qui favoriserait, en période hivernale pour certaines régions, l'apparition de précipitations liquides au détriment des précipitations solides.

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).

L'adaptation aux CC pose un défi tant technique, économique qu'organisationnel à nos sociétés (voir chapitre 3). 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; le chapitre 5 aborde cette question plus en détail). Les mesures d'adaptation à évaluer peuvent être regroupées en cinq catégories, soit : 1) les mesures de gestion et d'entretien des réseaux existants (ex. débranchement des drains de toit, programme d'inspection des clapets, etc.); 2) les mesures et aménagements de contrôle à la source, visant à ralentir et à réduire les apports au réseau (ex. bandes filtrantes, fossés de rétention, aménagements d'espaces verts, etc.); 3) la construction ou le remplacement d'ouvrages de transport et de stockage (ex. conduites, bassins de rétention aux points de débordement, etc.); 4) la reconfiguration des réseaux de drainage (ex. interconnexion entre les bassins); et 5) le contrôle dynamique des ouvrages de régulation en temps de pluie.

2.6 Revue de littérature des études récentes

Face à la difficulté d'estimer avec précision l'ampleur des changements attendus, les études visant à évaluer l'impact des CC sur la performance des systèmes de drainage urbain adoptent diverses hypothèses concernant l'intensité des pluies extrêmes en climat futur. Certains auteurs, tels Mailhot *et al.* (2006b), He *et al.* (2006), Semadeni-Davies *et al.* (2008a), Papa *et al.* (2004) et Ashley *et al.* (2005), évaluent l'intensité des précipitations futures à partir d'une analyse des résultats de modèles de simulation du climat et de données observées aux stations pluviométriques. D'autres appliquent plutôt des augmentations arbitraires aux intensités actuelles des précipitations extrêmes : de 10 à 30 % pour Niemczynowicz (1989), 15 % pour Watt *et al.* (2003), de 5 à 20 % pour

Jobin (2001) ou de -10 à 40 % pour Semadeni-Davies (2004). Enfin, Denault *et al.* (2006) extrapolent les tendances observées par le passé pour construire des scénarios de pluie futurs.

Quelle que soit la méthode retenue pour évaluer les intensités de pluie en climat futur, toutes les études d'impact que nous avons recensées dans la littérature utilisent ces intensités 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. Notons que, en plus des variations attendues dans les intensités de pluie, certaines études considèrent également la croissance potentielle des zones urbaines au cours des prochaines décennies (croissance des aires connectées au réseau et croissance du pourcentage d'imperméabilité des surfaces drainées; Ashley *et al.*, 2005; Semadeni-Davies *et al.*, 2008a,b). Notons également que 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). À cet égard, Semadeni-Davies (2004) mentionne n'avoir trouvé aucune publication concernant l'impact des CC sur le drainage urbain. 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).

À partir d'une étude sur différents secteurs urbains types (résidentiel, commercial), Mailhot *et al.* (2006b) ont estimé que, pour le sud du Québec, les débits de pointe augmenteront, selon la période de retour considérée (de 2 à 100 ans), de 20 à 25 % pour un stationnement et de 24 à 38 % pour un secteur résidentiel imperméable à 35 %, entre le climat actuel et la période 2041-2070. Pour les volumes, les augmentations correspondantes sont de 14 à 19 % pour le stationnement et de 21 à 49 % pour le secteur résidentiel. Quant à Jobin (2001), il a évalué 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 propos d'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 ».

À Helsinborg (Suède), Semadeni-Davies *et al.* (2008a) estiment 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).

Ces divers impacts (augmentation des surcharges, des refoulements, des inondations et des surverses) auront des conséquences monétaires différentes selon les pays et selon les secteurs. 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. Les mesures d'adaptation à mettre en place pour réduire ces impacts devront varier selon le secteur. Leur implantation nécessite une planification rigoureuse tenant compte, notamment, des CC et des développements attendus du territoire. Ces aspects sont discutés en détail au chapitre 5 de ce rapport. Les paragraphes suivants rendent compte de certains travaux récents sur le sujet.

Une des mesures auxquelles on pense d'emblée pour faire face aux CC consiste à remplacer les conduites de capacité insuffisante par des conduites de diamètre supérieur, bien que, dans la plupart des cas, cette mesure ne soit pas la plus avantageuse financièrement. À cet égard, Denault *et al.* (2006) soulignent que les conduites de capacité insuffisante pourront être remplacées graduellement au cours des prochaines décennies, dans le cadre d'un programme d'intervention préétabli. Dans ce contexte, le remplacement peut se faire à coûts moindres puisque les conduites remplacées devaient l'être de toute façon en raison de leur état de dégradation avancée.

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 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* (mise à l'échelle) 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.

D'autres mesures moins coûteuses et plus simples que le remplacement de conduites existent pour adapter les systèmes de drainage aux CC. À titre d'exemple, Watt *et al.* (2003) ont démontré, sur un bassin de drainage du sud de l'Ontario (Burlington), que le fait de rediriger les eaux de ruissellement provenant de la moitié des toits du secteur vers des surfaces perméables plutôt que vers le réseau de drainage (débranchement des gouttières) permettrait de contrer les effets des CC. En effet, le débit de pointe simulé en climat futur dans ce réseau en tenant compte de cette mesure d'adaptation est équivalent à celui simulé en climat présent sans débranchement de gouttières (en supposant que les intensités de pluie augmenteront de 15 % en climat futur).

Évidemment, la mesure proposée par Watt *et al.* (2003) ne sera pas aussi efficace dans tous les secteurs et devra souvent être combinée à d'autres mesures d'adaptation. Selon Infrastructure Canada (2006), des méthodes de planification de l'utilisation du territoire intégrant des éléments de conception durable ainsi que de meilleures stratégies de gestion de l'eau pourront réduire les impacts des CC. Concrètement, des méthodes favorisant le contrôle à la source, l'infiltration des eaux de pluie et le débranchement des surfaces imperméables (« Best Management Practice », BMP) pourront soulager les réseaux et leur permettre de transporter les débits

supplémentaires engendrés par les CC (CNRC, 2003; Semadeni-Davies *et al.*, 2008a; Mailhot *et al.*, 2008a; Rivard *et al.*, 2007). Ces méthodes peuvent du même coup, tel que le rapporte notamment Semadeni-Davies *et al.* (2008b), avoir un effet positif sur l'environnement urbain en général de même qu'atténuer les effets de l'urbanisation sur les cours d'eau récepteurs. Or, selon Ashley *et al.* (2005), bien que les méthodes traditionnelles (stockage, augmentation du diamètre des conduites, etc.) peuvent s'avérer moins avantageuses financièrement pour faire face aux CC, l'efficacité à grande échelle des méthodes alternatives, telles que l'augmentation de l'infiltration des eaux de pluie, reste cependant à démontrer.

Dans un contexte de futur inconnu, l'IPCC (2007) propose 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. Watt *et al.* (2003) recommandent à cet effet : 1) de mettre à jour les courbes IDF et les pluies de projets pour les principales villes du Canada; 2) d'encourager le design des infrastructures en considérant des scénarios de CC; 3) de déterminer le coût de mise à niveau des infrastructures de drainage pour diverses tailles de municipalités; 4) de déterminer les mesures d'adaptation appropriées; et 5) de conduire une analyse de faisabilité pour une nouvelle génération de modèles de simulation du drainage urbain (pouvant intégrer diverses BMP et d'autres méthodes d'adaptation non traditionnelles). Il est clair que le dimensionnement des nouveaux ouvrages de drainage doit dorénavant s'appuyer sur des courbes IDF mises à jour, intégrant toutes les données disponibles et, lorsque possible, tenant compte des modifications attendues dans l'intensité des pluies extrêmes au cours des prochaines décennies. Or, tel qu'il est mentionné notamment par Guo (2006), il devient alors difficile pour les municipalités qui utilisent ces courbes mises à jour d'assurer la cohérence entre la capacité de transport des secteurs développés sur la base de ces nouvelles courbes (souvent situés en amont) et celle des secteurs déjà construits, en aval. L'adoption d'une approche de gestion des eaux de pluie à l'échelle du bassin versant devient alors inévitable. De plus, outre ces considérations liées au dimensionnement des réseaux et à la mise en place de mesures d'adaptation, les gestionnaires de réseaux doivent dès maintenant réfléchir à la meilleure façon de gérer les situations de crises engendrées par des événements pluvieux qui dépassent la

capacité des réseaux actuels, qui pourront devenir de plus en plus fréquents dans un futur rapproché (Grum *et al.*, 2006).

3. Enjeux et capacités d'adaptation actuelles

La nature des enjeux de même que le caractère, dans une certaine mesure, imparable des modifications climatiques à court et moyen termes font en sorte qu'il est nécessaire d'envisager la mise en place de mesures d'adaptation susceptibles de réduire les impacts négatifs appréhendés de ces changements. Il est important, dans un tel contexte, de s'interroger sur la capacité technique, c'est-à-dire sur les moyens techniques disponibles pour adapter les systèmes de gestion des eaux pluviales, mais aussi sur la capacité des organisations à mettre en place les mesures d'adaptation nécessaires.

Un atelier de réflexion a été organisé dans le cadre du projet afin de consulter divers intervenants du domaine de la gestion des eaux pluviales et d'apporter un éclairage sur ces questions. Les informations et commentaires recueillis lors de cette journée visaient trois objectifs spécifiques à savoir :

- identifier les enjeux actuels en matière de gestion des eaux pluviales;
- évaluer la capacité d'adaptation technique, économique et organisationnelle en matière de gestion du patrimoine urbain;
- proposer un cadre général de promotion des nouvelles pratiques d'adaptation aux CC.

3.1 Atelier sur la gestion des eaux pluviales et les CC

L'atelier avait pour but d'identifier les impacts les plus significatifs des changements climatiques sur la gestion des eaux pluviales selon différentes perspectives, puis de discuter des solutions d'adaptation les plus pertinentes pour les municipalités du Québec afin de les aider à faire face aux défis posés par les changements anticipés.

L'atelier visait aussi à fournir un cadre (et à développer un réseau) pour échanger sur différentes thématiques liées au drainage urbain dans un contexte de changements climatiques.

L'atelier s'est tenu le 16 janvier 2008 dans les locaux du consortium Ouranos à Montréal et regroupait dix-sept professionnels (en plus des membres de l'équipe de recherche) provenant de divers domaines¹ et de différents secteurs et organisations² œuvrant dans le secteur de la gestion des eaux pluviales. Les participants étaient invités à discuter et à échanger sur les enjeux actuels, sur les impacts anticipés, sur les solutions envisageables et sur les barrières empêchant une mise en œuvre effective des stratégies d'adaptation aux CC pour la gestion des eaux pluviales.

Après une courte présentation du projet d'étude en cours, les participants ont été divisés en trois groupes de six à neuf personnes pour débattre de huit questions entourant le drainage urbain et les changements climatiques. Les groupes ont été préalablement identifiés de manière à répartir les divers intervenants et assurer une représentativité homogène des diverses organisations et expertises au sein des différents groupes. À la fin de la journée, un sommaire des discussions a été présenté afin de le valider auprès des participants. Un compte rendu écrit plus détaillé des discussions a aussi été remis aux participants pour obtenir leurs commentaires et corrections. L'Annexe A dresse la liste des participants présents à l'atelier alors que la liste de questions soumises aux participants se trouve à l'Annexe B.

¹ Les participants œuvraient dans les domaines du génie, des assurances et de l'aménagement du territoire.

² Les participants représentaient le secteur public (via les ministères et les villes), le secteur privé (via les firmes de génie-conseil et les entreprises d'assurances) et le milieu académique (via les universités et les centres de recherche).

3.2 Enjeux et défis actuels

Pour les municipalités, les enjeux liés au drainage urbain s'inscrivent dans un contexte particulier dont il faut impérativement tenir compte. Tout d'abord, plusieurs infrastructures sont vieillissantes et atteindront d'ici peu la fin de leur vie utile. Des investissements importants devront être consentis et des programmes d'intervention devront être élaborés. Par ailleurs, les programmes de suivi et d'entretien de l'état structural et de la performance hydraulique des réseaux sont en voie d'être mis en place ou le sont depuis peu. Ce faisant, plusieurs municipalités (et plus particulièrement les petites municipalités) ne disposent pas d'une connaissance complète et à jour de l'état réel de leurs infrastructures. Enfin, il convient de noter qu'une mise à niveau des directives en matière de conception des infrastructures s'impose. Ces trois composantes (infrastructures vieillissantes, données incomplètes, mise à niveau des directives) définissent pour une large part les enjeux actuels et doivent être nécessairement prises en compte lorsque l'on aborde la question des impacts et de l'adaptation des systèmes de collecte (et des modes de gestion afférents) aux CC.

Si les enjeux sont essentiellement similaires entre municipalités de différentes tailles, les solutions à envisager, toutefois, devront varier afin de tenir compte des ressources disponibles (économiques, financières, techniques, humaines) dans chaque catégorie de municipalités. Ainsi, les moyens à mettre en œuvre pour parvenir à une caractérisation technique des systèmes (monitoring de la performance et de l'état structural, utilisation de modèles hydrauliques, etc.) varieront selon la taille de la municipalité. Cet aspect n'est pas à négliger puisque souvent les démarches proposées exigent une expertise et des moyens financiers bien au-delà de ceux dont disposent les petites et moyennes municipalités.

Une distinction importante s'impose aussi entre secteurs bâtis (ceux où les infrastructures existent déjà) et les secteurs à développer. La nature des solutions à rechercher sera fortement influencée par le type de secteur considéré. Si, pour les secteurs à développer, les contraintes techniques et financières demeurent, elles ne

sont pas comparables aux secteurs développés où les contraintes, notamment d'espace et de droits acquis, rendent la recherche de solutions beaucoup plus complexe.

Selon les municipalités, les défis liés à la gestion des eaux pluviales sont complexes mais peuvent être regroupés selon six catégories :

- 1) Les **coûts** (économiques, environnementaux et sociaux) sont considérables et ont tendance à croître à mesure que les infrastructures vieillissent et que les exigences sur les plans environnemental et social deviennent plus élevées.
- 2) Les **attentes des citoyens** (par exemple, en ce qui concerne les niveaux de service exigés) augmentent tandis que leur volonté de payer diminue. Ces attentes s'ajoutent à une utilisation du territoire qui ne correspond pas à la capacité des réseaux de collecte d'eau (imperméabilisation des sols, aménagement des sous-sols, sursaturation des réseaux).
- 3) Les **approches de gestion requises**, transversales et multidisciplinaires, ne concordent pas avec les structures ou modes de fonctionnement en silos des organisations impliquées dans la gestion des eaux.
- 4) Le **cadre légal et réglementaire** en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales est mince et ne semble pas être appliqué de manière très rigoureuse.
- 5) Une **information de qualité et mise à jour** pour la conception et la réhabilitation des infrastructures est déficiente et souvent inaccessible aux intervenants qui en auraient le plus besoin pour prendre des décisions éclairées.
- 6) Un **manque d'expertise** en matière de drainage urbain au Québec empêche le développement et la promotion des solutions innovatrices efficaces applicables au contexte québécois.

Les participants à l'atelier considèrent que les changements climatiques sont un enjeu, certes important, mais parmi plusieurs autres avec lesquels les municipalités doivent composer. Au surplus, les impacts anticipés des changements climatiques ne se

manifestent vraisemblablement, selon la perception des participants, qu'à plus long terme, diminuant ainsi l'importance accordée à cet enjeu.

Par contre, pour la plupart des intervenants, les changements climatiques demeurent un enjeu important parce qu'ils pourraient contribuer à exacerber les problèmes existants. Les impacts pourraient aussi être aggravés par certaines pratiques, particulièrement en lien avec l'aménagement du territoire. Cependant, certains participants ont souligné que, selon eux, il existerait relativement peu de données quantitatives pour appuyer l'affirmation selon laquelle le niveau de risque de refoulement ou d'inondation augmenterait et continuerait de le faire dans un contexte de CC. Il faudra donc aussi améliorer et uniformiser (i.e. assurer un niveau minimum d'information) la qualité des données climatiques disponibles pour toutes les municipalités. Ce dernier point, même s'il n'a pas été explicitement identifié par les intervenants comme une barrière à l'adaptation (voir tableau 3.1), ne doit pas être négligé. Il est la manifestation d'un certain scepticisme de la part de quelques intervenants devant ce que certains perçoivent comme une « croisade climatique ». Mais au-delà de ce scepticisme de bon aloi, il faut convenir que la science du climat reste encore relativement imprécise quant aux conséquences qu'auront les augmentations des GES sur les régimes pluvieux en général et les pluies intenses en particulier (cette question est abordée plus en détail aux sections 2.3 et 2.4). Watt *et al* (2003) avaient d'ailleurs déjà identifié cette imprécision des projections climatiques comme un frein à l'adaptation en matière de gestion des eaux pluviales. Cette observation montre, si nécessaire, l'importance de la stratégie de communication et de diffusion des résultats de la science du climat au sein des organisations qui auront à développer des mesures d'adaptation.

Mais bien que, dans l'ensemble, l'on semble d'accord sur l'existence du problème, les solutions ou stratégies à mettre en place ne semblent pas faire consensus (quelles solutions, quand, par qui, avec quels impacts, etc.). À titre d'exemple, certaines mesures de contrôle à la source (comme les barils) peuvent engendrer des problèmes de santé publique (en favorisant la croissance des insectes et augmenter les risques d'infection du virus du Nil Occidental). Il existe, par ailleurs, encore peu de données et peu d'outils

pour supporter les décisions et actions en ce sens. En plus, pour le moment, la perception de certains intervenants est à l'effet que plusieurs solutions potentielles coûteront souvent beaucoup plus cher que les dommages susceptibles de survenir dans un contexte de maintien du *statu quo*, et ce, en dépit du fait qu'une évaluation économique de type « coûts-avantages » à plus long terme n'ait jamais été réalisée.

En dépit de ces réserves, les intervenants consultés considèrent que, généralement, les CC pourraient servir de levier et aider à une prise de conscience plus globale des enjeux touchant la gestion des eaux pluviales. La dimension climatique pourrait ainsi servir de catalyseur à la mise de l'avant de solutions et à la promotion de celles-ci, solutions qui seraient, par ailleurs, susceptibles de satisfaire d'autres objectifs (liés à l'environnement et au vieillissement des infrastructures). La prise en compte des CC favoriserait notamment l'élaboration d'une planification stratégique plus globale pour faire face à l'ensemble des enjeux.

3.3 Capacité d'adaptation actuelle et barrières à l'adaptation

De manière générale, comme il est mentionné plus haut, la capacité d'adaptation variera considérablement selon la taille des municipalités et le type de secteurs considérés (bâties ou à développer). Par ailleurs, la capacité d'adaptation actuelle est essentiellement déterminée par divers facteurs critiques perçus souvent comme des barrières à l'adaptation. Les participants ont ainsi identifié plusieurs barrières d'ordre technique, économique ou institutionnel, empêchant la mise en place effective de différentes solutions d'adaptation aux CC pour le drainage urbain. Les principales barrières identifiées par les intervenants sont regroupées au tableau 3.1.

L'examen du tableau 3.1 est très révélateur. D'abord, il montre clairement que, même si l'adaptation aux CC présente des défis techniques, les barrières économiques et institutionnelles sont plus nombreuses et demanderaient, pour être surmontées, des bouleversements assez importants des structures institutionnelles, de financement et

même des pratiques. Par ailleurs, même si l'atelier abordait plus spécifiquement la question des CC, il est évident que nombre des barrières identifiées ne concerne pas spécifiquement l'adaptation aux CC mais plus généralement l'amélioration globale des modes et outils de gestion des eaux pluviales. Ce constat rejoint en fait ce qui avait été mentionné à la section précédente à l'effet que les CC s'inscrivent dans un ensemble plus vaste d'enjeux et pourraient servir de catalyseur, compte tenu de la visibilité dont cet enjeu jouit, à une remise en question de ces modes et outils de gestion. Enfin, il est intéressant de noter que plusieurs des barrières identifiées par les intervenants dans le cadre de cet atelier recourent celles généralement rapportées dans la littérature concernant l'implantation d'un mode de gestion intégrée des eaux pluviales (voir notamment Mailhot *et al.*, 2008a; Brown, 2005; Marsalek et Chocat, 2002).

La conclusion à tirer quant à la perception des intervenants sur la capacité d'adaptation (technique et des structures décisionnelles) en matière de drainage urbain est que les défis à relever sont nombreux et touchent à des aspects très sensibles. Il est clair que les changements à venir dans les modes de gestion des eaux pluviales, qu'ils soient induits par les CC, par des considérations environnementales ou par tout autre vecteur, se feront lentement, à petits pas, sur des périodes pouvant s'échelonner sur plusieurs années.

Tableau 3.1 Description des barrières techniques, économiques et institutionnelles/organisationnelles identifiées par les intervenants.

<i>Barrières</i>	<i>Description</i>
<i>Techniques</i>	Les contraintes locales, incluant le manque d'espace ou l'absence d'exutoire et les conditions géographiques (topographie, géologie, climat, etc.) rendent certaines solutions d'adaptation difficiles à mettre en place.
	Le manque de données et de standards empêche une mise en place optimale et à grande échelle des bonnes pratiques ou des pratiques innovatrices.
<i>Économiques</i>	L'absence de prise en compte des coûts d'entretien à long terme (sur le cycle de vie complet) ne favorise pas une gestion optimale des infrastructures.
	Les municipalités ont peu de moyens ou de ressources (financières, humaines) pour investir dans la recherche de solutions innovatrices.
	Le mode d'octroi des contrats, basé sur le plus bas soumissionnaire, ne favorise pas les solutions durables et l'innovation.
<i>Institutionnelles / organisationnelles</i>	La structure et le fonctionnement des administrations municipales (y compris la structure budgétaire) ne correspondent pas à l'approche plus transversale et multidisciplinaire exigée pour une gestion optimale des eaux.
	La réticence au changement de la part de tous les intervenants, pour qui la responsabilité professionnelle peut être en jeu, est augmentée par l'absence d'information sur la fiabilité à long terme des solutions innovatrices. La crainte de l'erreur est plus grande que le succès escompté.
	Il y a discordance entre la vision politique (court terme) et l'adaptation aux changements climatiques (long terme).
	La prise en compte des changements climatiques est perçue comme une contrainte ou un frein au développement des municipalités car elle ajoute à la complexité d'un projet.
	Le contrôle et le suivi au cours des phases de construction et d'opération sont inadéquats.

3.4 Mesures d'adaptation potentielles et conditions de mise en place

Les intervenants ont été invités à proposer des mesures d'adaptation potentielles et à préciser les conditions qui, selon eux, sont essentielles à leur intégration aux pratiques actuelles. Ainsi, un meilleur encadrement légal et réglementaire de la gestion des eaux pluviales (comme la standardisation ou la normalisation des pratiques « exemplaires »), ou davantage d'obligations légales avec une application plus vigoureuse, pourraient, selon plusieurs, aider à accélérer la mise en place de solutions plus optimales. À titre d'exemple, les municipalités auraient avantage à élaborer et à appliquer une réglementation plus claire en matière de gestion des eaux pluviales qui démontre à la fois l'importance qu'elles accordent à l'enjeu et qui aide à prévenir les éventuels impacts liés à l'augmentation possible des cas de refoulements ou d'inondations.

Pour assurer l'intégration des CC dans les processus courants et existants (le « mainstreaming »), il serait aussi souhaitable d'inclure, à l'intérieur des programmes d'investissement, des critères ou conditions spécifiques pour assurer la prise en compte des CC dans les projets de construction ou de réhabilitation. Ces conditions pourraient inclure, par exemple, un meilleur suivi pendant et après la construction.

Quelques mesures théoriques et des exemples de pratiques exemplaires ont aussi été cités par les participants, allant d'une plus grande sensibilisation et responsabilisation des intervenants impliqués, à des solutions beaucoup plus techniques appliquées directement sur les réseaux de collecte d'eaux pluviales. Un constat se dégageait toutefois des échanges entre les participants à l'effet qu'il n'existe pas de solution unique pour assurer une gestion optimale des eaux de pluie. Les solutions diffèrent selon la nature spécifique du problème et le contexte particulier (terrain, type de sol, utilisation et occupation du territoire, etc.). Dans tous les cas, les intervenants s'entendent pour affirmer qu'une approche multidisciplinaire est à privilégier. Des solutions d'ingénierie ne pourront à elles seules solutionner les problèmes de drainage urbain dans un contexte de CC où le risque est évolutif et où d'autres composantes, tel

l'aménagement du territoire, jouent un rôle déterminant et viennent complexifier les enjeux.

De toutes les mesures mentionnées au cours des entretiens, la première mesure à considérer consiste simplement à bien gérer les systèmes en place. Il s'agit donc d'améliorer les modes de gestion actuels et notamment les programmes de suivi des infrastructures afin d'avoir une idée relativement précise du niveau de performance des ouvrages. Plusieurs problèmes existants seront en effet aggravés dans un contexte de CC. Une gestion adéquate en climat présent permettrait sans doute de diminuer les vulnérabilités et les risques anticipés associés aux CC.

Des solutions plus techniques ont aussi été mentionnées pour améliorer la gestion actuelle comme, par exemple, l'optimisation de la chaîne de traitement et la gestion des réseaux en temps réel. D'autres solutions plus flexibles, qui ne demandent pas de travaux d'ingénierie importants et qui peuvent plus facilement être adaptées au fil du temps, basées sur un meilleur contrôle à la source des eaux pluviales, diminueraient la pression sur les réseaux existants. Cette souplesse représente un avantage majeur lorsque l'on connaît les incertitudes encore importantes sur les projections actuelles sur les pluies intenses à l'horizon de la fin du XXI^e siècle à l'échelle des milieux urbains (voir section 2.4).

Les intervenants ont par la suite été invités à citer des exemples d'aménagements ou de pratiques actuellement en place au Québec qui pourraient représenter des options intéressantes en matière d'adaptation aux CC. Plusieurs cas pilotes ont été cités démontrant l'efficacité de certaines solutions en fonction de plusieurs considérations (densité d'occupation, topographie, forme et taille du bassin versant). Ces solutions incluent, par exemple :

- des bassins de rétention bien intégrés aux bassins de drainage naturels (les étangs du Parc de la cité à St-Hubert);
- des projets avec un double drainage (projet Harmonie à Boucherville, Ville de Québec);

- des restricteurs de débit associés au stockage sur les surfaces imperméables comme pour les grands stationnements (en zones commerciale et industrielle, Ville de Laval);
- la gestion en temps réel des réseaux (Verdun, Ste-Marie-de-Beauce);
- la revalorisation des eaux pluviales (la TOHU, la Cité des Arts du Cirque; Pavillon Lassonde, École Polytechnique de Montréal).

Il semble cependant encore difficile d'inscrire ce type de projet à l'intérieur de stratégies plus globales de gestion des eaux à grande échelle (municipalité, région).

3.5 Stratégie globale de promotion des mesures d'adaptation

Devant les défis qui se présentent, les intervenants ont été invités à se prononcer sur les moyens à mettre en place afin d'assurer une promotion efficace des mesures d'adaptation aux CC. Même s'il demeure difficile de convaincre et de faire changer les attitudes ou mentalités des individus ou des élus, les participants semblent considérer qu'aucune barrière n'est insurmontable, à plus ou moins longue échéance. Par contre, il apparaît évident que, pour surmonter ces obstacles, il faudra assurer une meilleure formation des divers intervenants impliqués dans la gestion des eaux pluviales (professionnels, gestionnaires, opérateurs). Par ailleurs, une plus grande sensibilisation de l'ensemble des acteurs, y compris les citoyens, permettrait une meilleure compréhension de la problématique et des facteurs aggravants de même que des solutions durables. De plus, elle permettrait d'envisager un spectre plus large de solutions, parfois simples et relativement peu coûteuses (à l'échelle du lot), comme l'installation de barils pour récupérer les eaux de pluie.

Le besoin de gérer les enjeux du drainage urbain dans un contexte de changements climatiques via une approche multidisciplinaire fait consensus. Selon les participants, les intervenants qui devraient être impliqués dans l'élaboration des solutions incluent les différents paliers gouvernementaux (élus et professionnels) qui élaborent et appliquent la réglementation et font la promotion et la diffusion des bonnes pratiques. Les ordres

professionnels ont un rôle de sensibilisation et de formation à jouer auprès de leurs membres et peuvent contribuer à identifier et promouvoir les bonnes pratiques. Le milieu de la recherche (universités et centres de recherche) doit être impliqué pour assurer une meilleure formation (appliquée et continue), poursuivre les projets de recherche et de développement, puis identifier, promouvoir et diffuser de l'information sur les bonnes pratiques. Les consultants, des firmes de génie-conseil et d'assurances, ont également un rôle important à jouer au niveau de la pratique et peuvent notamment faire une promotion active de certaines solutions dont l'efficacité a été démontrée. Les groupes de citoyens et autres groupes collectifs (comités de bassin versant) devraient aussi être représentés. Finalement, il a été suggéré que d'autres groupes de professionnels soient représentés (comme le milieu de la santé) pour aider à identifier les bonnes pratiques et les impacts potentiels des solutions préconisées sur la santé. Tous ces groupes ont aussi un rôle de sensibilisation à jouer pour améliorer la compréhension des enjeux associés et ainsi faciliter la recherche de solutions optimales. La collaboration entre ces groupes favoriserait en particulier l'adoption et la mise en place de solutions permettant d'atteindre plusieurs objectifs simultanément (par exemple des solutions ayant des effets bénéfiques en matière d'environnement et de santé publique).

4. Définition des critères de conception dans un contexte de CC

L'un des grands défis conceptuels et techniques liés aux CC tient à la nécessaire redéfinition de plusieurs concepts clés actuellement utilisés lors de la conception des ouvrages ou infrastructures. Ainsi, l'un des paramètres importants à déterminer lors de la conception, est la dimension de l'ouvrage (par exemple de la conduite, du bassin, de la tranchée, etc.) en vue de garantir un niveau de service donné ou, de façon équivalente, afin d'établir un niveau de risque « acceptable » en regard des aléas météorologiques susceptibles de frapper une ville donnée. Ce niveau de service a été historiquement établi en fixant la période de retour des événements de pluie intense à considérer lors de la conception. D'un point de vue théorique, la période de retour de conception ainsi définie établit le seuil au-delà duquel la capacité du système pourra être insuffisante, risquant ainsi d'entraîner refoulements et inondations. Il faut bien voir cependant que, outre ce critère de conception, plusieurs facteurs déterminent la performance réelle d'un système de drainage donné, tels, par exemple, le niveau d'entretien et l'évolution de l'occupation du territoire. Ce critère de conception définit de façon approximative la fourchette des événements pluvieux que le système de drainage devrait être en mesure d'évacuer sans risque.

Le concept de période de retour, central à la définition de la notion de risque, repose sur l'hypothèse fondamentale de stationnarité, c'est-à-dire sur l'hypothèse que les différentes caractéristiques statistiques des pluies intenses ne varient pas en fonction du temps. Cette hypothèse permet d'estimer les probabilités d'occurrence future d'événements dits extrêmes à partir de l'analyse statistique des événements passés. En cette matière, donc, on peut affirmer que « le passé est garant de l'avenir ». Or, les changements climatiques remettent précisément en cause cette hypothèse. L'activité humaine et les émissions de GES qui en résultent modifient la dynamique climatique terrestre et conduiront, selon les projections climatiques actuelles, à une intensification

des pluies (événements plus intenses et plus fréquents). Ce constat soulève dès lors la question suivante : si le concept de période de retour, tel qu'on le connaît, est, dans une certaine mesure, désuet, peut-on le modifier ou définir un équivalent en régime non stationnaire qui puisse être utile dans un cadre de conception des ouvrages de drainage?

Le présent chapitre entend, dans un premier temps, faire une revue des pratiques actuelles en matière de conception alors que la section 4.2 s'attarde plus spécifiquement aux différents aspects techniques liés à l'élaboration des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) (distributions statistiques utilisées et méthodes d'estimation). Les sections suivantes abordent plus spécifiquement la définition de critères de conception lorsque les séries pluviométriques sont non stationnaires (la non-stationnarité signifie que les propriétés statistiques des séries (moyenne ou autres moments) varient en fonction du temps). La section 4.3 présente d'abord une discussion des modèles statistiques non stationnaires possibles pour décrire les modifications appréhendées aux distributions des pluies extrêmes. La section 4.4 discute plus spécifiquement de la définition de critères de conception des ouvrages dans un contexte de CC. L'évaluation du risque dans un contexte de climat en évolution est abordée à la section 4.5 et, enfin, une règle simple de définition des périodes de retour pour la conception tenant explicitement compte des projections climatiques est proposée à la section 4.6.

4.1 Revues des pratiques actuelles

Les critères et procédures de conception permettent de mieux orienter les concepteurs dans l'élaboration des différents projets. La présente section fait la lumière sur ces critères et sur les méthodes de conception présentement employées par les municipalités du Québec afin notamment de savoir si elles sont aptes à prendre en compte une possible évolution du climat. Deux objectifs ont été fixés :

1. Documenter les procédures et les critères actuellement en usage.
2. Discuter de ces pratiques en considérant leur aptitude à prendre en compte une possible évolution du climat.

4.1.1 Méthodologie

La méthodologie employée a été de rencontrer différents représentants de municipalités du Québec afin de discuter des critères et des procédures qu'ils utilisent actuellement dans leur pratique. Les municipalités rencontrées sont : Longueuil, Sherbrooke, Québec, Trois-Rivières et Montréal. Un questionnaire a été soumis à chacune d'entre elles. De plus, les villes de Laval et de Gatineau ont transmis leurs réponses au questionnaire par courriel. Le questionnaire comportait cinq questions séparées en deux catégories. La première catégorie comprend trois questions traitant des critères de conception, à savoir :

1. Quels sont vos critères pour établir le débit permmissible à la sortie d'un nouveau développement?
2. Comment choisissez-vous le patron temporel (forme; par exemple SEA, triangulaire), la fréquence (par exemple 10 ans, 25 ans) et la durée (par exemple une heure) de la pluie de conception pour la conception des ouvrages de collecte et de transport (et non des ouvrages de stockage)?
3. Comment choisissez-vous le patron temporel (forme; par exemple SEA, triangulaire), la fréquence (par exemple 10 ans, 25 ans) et la durée (par exemple une heure) de la pluie de conception pour la conception des ouvrages de stockage?

La seconde catégorie de questions traitait des procédures utilisées pour respecter les critères identifiés dans les trois questions précédentes et comportait les deux questions suivantes :

4. Quelles sont vos procédures pour respecter les critères mentionnés ci-haut pour les ouvrages de collecte et de transport?
5. Quelles sont vos procédures pour respecter les critères pour les ouvrages de stockage?

4.1.2 Résultats et discussion

Les réponses fournies par les différentes municipalités sont présentées de façon intégrale à l'Annexe C alors que l'Annexe D présente une synthèse des réponses sous forme de tableaux. Les différentes rencontres ont permis de tirer un bilan général sur les pratiques actuelles des municipalités. Dans le cadre de la question « Quels sont vos critères pour établir le débit permmissible à la sortie d'un nouveau développement? », un portrait global de la situation a pu être dressé pour les trois volets suivants : le plan directeur, les courbes IDF et les critères de rejet aux cours d'eau.

En premier lieu, notons que, pour toutes les villes ayant participé à l'enquête, le plan directeur n'est ni complet, ni à jour. La principale problématique est la fusion des villes en 2002 puisqu'il a été difficile d'uniformiser et de fondre tous les anciens plans directeurs en un seul et unique plan pour les nouvelles villes. Ensuite, il convient de noter que les grandes municipalités (Laval, Longueuil, Québec) sont en meilleure position pour tenir à jour leur plan directeur. Les plus petites municipalités ont, quant à elles, mentionné qu'elles éprouvaient de la difficulté à maintenir leur plan directeur à jour car elles sont déjà surchargées par la gestion des nouveaux développements. De plus, certaines des villes ont mentionné le manque de ressources humaines et de connaissances à l'interne pour gérer leurs plans directeurs et pour en faire le suivi.

L'utilisation des courbes IDF semble inquiéter plusieurs villes, conscientes que cet outil joue un rôle crucial lors de la conception. La ville de Québec est sans aucun doute la plus avancée sur ce chapitre puisqu'elle utilise une approche tenant compte des changements climatiques. Par contre, cette ville est en réflexion par rapport aux nouvelles courbes IDF et par rapport au niveau de service offert dans les nouveaux développements situés à l'intérieur de secteurs existants. Outre la ville de Québec, la ville de Gatineau est la seule à utiliser des courbes IDF construites sur la base de données acquises à plusieurs stations, localisées respectivement à l'aéroport d'Ottawa et dans une ferme expérimentale. Les autres villes se servent des courbes IDF les plus récentes à leur disposition, les dernières mises à jour de ces courbes ayant été

effectuées entre 1996 et 2005 selon les villes. La ville de Trois-Rivières n'a pas identifié de courbes à utiliser, laissant plutôt ce choix aux consultants.

Pour le critère de rejet permmissible aux cours d'eau récepteur, le débit avant développement semble la méthode adoptée par la plupart des villes. Seules les villes de Québec et de Montréal utilisent des critères de rejet fixes qui sont basés sur la capacité résiduelle du réseau. Pour celles qui utilisent le débit naturel avant développement, les méthodes avec lesquelles elles fixent le critère de rejet sont déterminées soit par des modèles de simulation tels SWMM ou par la méthode rationnelle. La ville de Trois-Rivières a mentionné qu'elle éprouvait de la difficulté à gérer les informations et données de ces modèles, faute d'une expertise en cette matière au sein de la municipalité. Cette tâche, de même que la mise en place des modèles hydrologiques, est donc confiée aux consultants.

La question suivante portait sur la sélection du patron temporel, de la fréquence et de la durée de la pluie de conception pour la conception des ouvrages de collecte et de transport. Dans le cas du patron temporel, il est clair que le patron le plus fréquemment utilisé est le patron Chicago modifié (Kiefer et Chu, 1957). Les villes de Québec et de Gatineau sont les seules à demander que plusieurs patrons temporels soient considérés. À l'opposé, certaines villes, dont Sherbrooke et Trois-Rivières, ne formulent pas d'exigence spécifique à ce sujet et laissent ce choix aux consultants. Encore une fois, le manque de personnel semble être la raison évoquée pour cet état de fait. Dans le cas de la durée de la pluie, elle varie énormément d'une ville à l'autre. Certaines demandent de considérer une plage de durées, d'autres fixent la durée et d'autres demandent une durée égale au temps de concentration. Par ailleurs, la fréquence de la pluie utilisée pour la conception des réseaux de drainage varie d'une ville à l'autre. Certaines villes utilisent une seule fréquence pour tous les réseaux, tandis que d'autres villes ont des fréquences différentes pour les conduites mineures, les collecteurs et les réseaux majeurs (i.e. transport des eaux en rue). À titre d'exemple, notons le cas du réseau mineur pour lequel la fréquence retenue varie de 1 fois dans 2 ans pour Laval et Québec et jusqu'à 1 fois dans 25 ans pour la ville de Sherbrooke. Il n'y a donc aucune constante entre les différentes municipalités du Québec en ce qui a trait à la fréquence,

au patron temporel et à la durée de la pluie retenus pour la conception des ouvrages de collecte et de transport.

Des conclusions similaires sont obtenues pour la conception des ouvrages de stockage. Ainsi, le patron temporel et la durée de la pluie varient de façon similaire pour les ouvrages de stockage. La ville de Longueuil, par exemple, demande l'étude d'un patron uniforme avec une durée de 24 heures en plus du patron de Chicago modifié pour une durée de 3 heures. Par contre, pour la fréquence, deux périodes de retour sont considérées, variant selon les villes et/ou le type d'ouvrage : 1 fois dans 50 ans et 1 fois dans 100 ans. La plupart des villes utilisent toutefois cette dernière, les seules exceptions étant Sherbrooke et Longueuil qui utilisent une période de retour de 50 ans pour les ouvrages de stockage. Ces villes ont cependant recours à un critère de 1 fois dans 100 ans dans le cadre de certains projets.

Pour les autres questions traitant des procédures, différentes conclusions ont pu être tirées. Dans le cas des ouvrages de collecte et de transport, le double drainage et le contrôle à la source sont les deux procédures les plus utilisées. Le double drainage semble être une méthode adoptée par les grandes municipalités. Il est principalement pratiqué dans les nouveaux développements. Les plus petites municipalités ne l'utilisent qu'à l'occasion. Par contre, le contrôle à la source est employé par toutes les villes. En général, ce type d'approche n'est envisagé que dans les secteurs commerciaux et industriels. La ville de Gatineau est la seule à faire du contrôle à la source dans les secteurs résidentiels en milieu déjà bâti. Par ailleurs, plusieurs villes se questionnent sur l'entretien et l'efficacité à long terme des aménagements de contrôle à la source du type rétention en stationnement, rétention sur les toitures et régulateurs de débit à l'intérieur de conduites. Elles mentionnent aussi qu'il est difficile d'en assurer le suivi. Outre le contrôle à la source et le double drainage, certaines villes tendent à développer des stratégies afin d'utiliser de façon optimale la capacité existante des conduites en place.

Les procédures relatives aux ouvrages de stockage se subdivisent en deux catégories : les ouvrages hors ligne et ceux en ligne. La plupart des villes utilisent les ouvrages de

stockage de type hors ligne. Ainsi, pour certains projets, la ville de Gatineau aménage deux bassins de rétention en parallèle, un premier pour le réseau mineur et le second pour le réseau majeur. Les bassins hors ligne sont plus couramment utilisés car ils sont plus faciles à entretenir et utilisent les milieux naturels comme ouvrages de stockage. Les bassins en ligne ne sont pas pratique courante. Ils sont utilisés surtout lorsque les conduites sont surdimensionnées, comme dans le cas des conduites unitaires. Ce type d'ouvrage est également considéré lorsqu'il est impossible d'aménager des bassins hors ligne, faute d'espace. De même, l'utilisation des cours d'eau comme ouvrage de rétention est peu répandue. Certaines villes envisagent toutefois cette option comme, par exemple la ville de Laval, qui étudie actuellement cette possibilité dans le cadre d'un projet de reprofilage d'un cours d'eau.

4.1.3 En résumé

À la lumière des différentes réponses données par les municipalités aux questions qui leur ont été soumises en regard des critères et procédures de conception en usage, il convient de tirer les conclusions suivantes :

- Les fusions municipales ont entraîné plusieurs problèmes, notamment en matière d'uniformisation des plans directeurs et des critères et pratiques.
- Il est clair que les critères et procédures utilisés varient d'une municipalité à l'autre et qu'aucun standard n'existe à cet égard au Québec.
- Les plus petites municipalités éprouvent des difficultés à assurer un suivi efficace en matière de plan directeur, de courbes IDF, etc. Les grandes municipalités semblent, à cet égard, s'en tirer beaucoup mieux. Le manque de main-d'œuvre et d'expertise est souvent évoqué pour expliquer cette situation.
- Les villes, pour certaines, éprouvent des difficultés à établir des critères et procédures de conception. Elles ne savent manifestement pas comment prendre en compte une possible évolution du climat.

Cette enquête a été réalisée afin de dresser un portrait de la situation au Québec en matière de gestion des eaux urbaines. Il serait intéressant de diffuser ce questionnaire à l'échelle du Canada afin d'avoir un portrait pancanadien et ainsi d'être mieux à même de

positionner les municipalités du Québec par rapport aux autres municipalités canadiennes.

4.2 Courbes IDF

Le traitement des données historiques de pluie a pour objectif de déterminer les caractéristiques statistiques de ces séries, caractéristiques permettant d'inférer sur les probabilités d'occurrence d'événements similaires dans le futur. Les données de base généralement utilisées pour la construction de ces indicateurs statistiques sont les maximums annuels de précipitations sur diverses durées allant généralement de 5 minutes à 24 heures (voir Coles, 2001; d'autres méthodes d'estimations existent dont la plus connue est la méthode des séries partielles où les intensités au-dessus d'un seuil donné sont considérées; voir aussi Madsen *et al.*, 1997).

Les courbes IDF actuellement disponibles au Canada sont celles basées sur des historiques de mesures de pluie s'arrêtant en 1990. Ces courbes utilisent les historiques de maximums totaux sur différentes périodes (5 min, 10 min, 15 min, 30 min, etc.). Plus récemment, Lam *et al.* (2004) ont amorcé un travail de mise à jour de ces courbes en présentant les résultats préliminaires pour la station de Dorval. À notre connaissance, et après consultation des personnes en charge de ce travail, ce travail de mise à jour des courbes IDF n'a pas encore été complété. Au-delà de la question de l'intégration des CC dans l'élaboration de courbes IDF non stationnaires, il est clair qu'un travail de mise à jour systématique des courbes IDF s'impose, mise à jour qui doit être réalisée par une instance « officielle » ou mandatée par une telle instance. Plusieurs utilisateurs potentiels (ingénieurs, municipalités, etc.) rencontrés au fil de conférences et de colloques se sont dits préoccupés par une telle situation, conscients en fait d'utiliser de « vieilles » courbes IDF dont la pertinence est questionnable.

4.2.1 Distributions Gumbel et GEV

La méthode d'estimation des courbes IDF encore actuellement en usage consiste à utiliser la distribution de Gumbel, dont les paramètres sont estimés par la méthode des moments. La fonction de distribution de la distribution de Gumbel, $f(x)$, s'écrit (Rasmussen et Gautam, 2003) :

$$f_{Gum}(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left\{ -\frac{(x-\xi)}{\alpha} - \exp \left[-\frac{(x-\xi)}{\alpha} \right] \right\} \quad (4.1)$$

alors que la distribution cumulative $F(x)$ prend la forme :

$$F_{Gum}(x) = \exp \left\{ -\exp \left[-\frac{(x-\xi)}{\alpha} \right] \right\} \quad (4.2)$$

avec x ($-\infty < x < +\infty$), le total annuel maximal de précipitations pour une durée t_d , ξ ($\xi \in \mathbb{R}$), le paramètre de position et α ($\alpha > 0$), le paramètre d'échelle. Le quantile x de probabilité F est donné par :

$$x_{Gum}(F) = \xi - \alpha \log(-\log F) \quad (4.3)$$

Cette distribution est un cas particulier de la distribution généralisée des valeurs extrêmes (« Generalized Extreme Values », GEV) dont la fonction cumulative est de la forme (Hosking et Wallis, 1997) :

$$F_{GEV}(x) = \exp \left\{ -\left[1 - k \frac{(x-\xi)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} \quad (4.4)$$

avec k ($-\infty < k < +\infty$), le paramètre de forme. La fonction cumulative inverse s'écrit par ailleurs :

$$x_{GEV}(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[1 - (-\log(F))^k \right] \quad (4.5)$$

La distribution Gumbel est obtenue en prenant la limite $k \rightarrow 0$.

4.2.2 Méthode d'estimation

Trois familles de méthodes sont largement utilisées pour l'estimation des paramètres d'une distribution : (a) la méthode du maximum de vraisemblance (MV) (Cunnane, 1973; Madsen *et al.*, 1997; Coles, 2001), (b) la méthode des moments (MOM) (NERC, 1975; Madsen *et al.*, 1997) et (c) la méthode des moments de probabilité pondérés (MPP) (Greenwood *et al.*, 1979; Whalen *et al.*, 2002; Rasmussen et Gautam, 2003). La revue de ces méthodes d'estimation dépasse largement le cadre du présent rapport. Le lecteur est invité à consulter les ouvrages et articles cités pour plus de détails. Seule la méthode MOM sera présentée dans ce qui suit dans le cas spécifique où les paramètres de la distribution de Gumbel sont estimés, essentiellement parce que les courbes de Hogg et Carr (1985) (et de Lam *et al.*, 2004) ont été établies à partir de cette méthode. Pour une comparaison des performances de ces différentes méthodes d'estimation, le lecteur peut consulter Madsen *et al.* (1997).

La méthode des moments (MOM) consiste simplement à estimer les valeurs des premiers moments à partir des séries disponibles puis à exprimer les deux paramètres de la distribution de Gumbel en fonction de ces moments (voir Perreault et Bobée, 1992 pour une description de cette approche). Ainsi, les estimateurs MOM sont donnés par (Rasmussen et Gautam, 2003) :

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6} \hat{\sigma}}{\pi} \quad \hat{\xi} = \hat{\mu} - \hat{\alpha} \gamma \quad (4.6)$$

où $\hat{\alpha}, \hat{\xi}$ sont les estimateurs de α, ξ , $\hat{\mu}$ et $\hat{\sigma}$ sont la moyenne et l'écart-type de la série considérée et enfin γ désigne la constante d'Euler ($\gamma = 0,57721\dots$). Cette

approche offre l'avantage d'être simple, rapide à implanter et le modèle ne comporte que deux paramètres α, ξ .

Les courbes IDF qui résultent de ces calculs sont souvent présentées sous la forme suivante (Guo, 2006) :

$$i = \frac{a}{(t_d + c)^b} \quad (4.7)$$

où i est l'intensité moyenne de la précipitation sur une durée t_d pour une période de retour donnée T et a, b, c sont trois paramètres à caler, spécifiques à un site et à une période de retour donnée.

Il convient de noter toutefois que plusieurs analyses subséquentes des historiques de pluie disponibles montrent que les valeurs du paramètre de forme pour les stations situées au Canada sont souvent légèrement inférieures à zéro et varient globalement entre $-0,1 \leq k \leq 0$ (Mailhot *et al.*, 2007a; Adamowski *et al.*, 1996; Alila, 1999; Onibon *et al.*, 2004) suggérant donc que, pour certains sites, l'utilisation d'une distribution de Gumbel n'est peut être pas la plus appropriée et qu'une distribution de type GEV pourrait mieux représenter les séries historiques.

4.3 Modèles non stationnaires

La sélection d'une distribution pour représenter les séries annuelles des maximums sur diverses durées, et l'estimation des paramètres de cette distribution, permet d'associer une période de retour aux événements de différentes intensités. Cette période de retour est définie par :

$$T = \frac{1}{[1 - F(x)]} \quad (4.8)$$

Cette valeur correspond à la durée moyenne séparant l'occurrence de deux événements successifs d'intensité égale ou supérieure à x (l'Annexe E présente une dérivation de cette expression). La stationnarité des séries implique que cette période de retour est indépendante du temps et ainsi qu'un événement passé associé à une période de retour de 30 ans, par exemple, surviendra aussi en moyenne à tous les 30 ans dans le futur.

L'hypothèse de stationnarité des séries est généralement vérifiée à l'aide d'un test statistique (voir Kundzewicz et Robson, 2004 pour une revue des principaux tests statistiques disponibles pour la détection des tendances). De ces tests, celui de Mann-Kendall est très certainement le plus utilisé. Le test de Mann-Kendall vérifie l'existence d'une tendance monotone (à la hausse ou à la baisse) de la moyenne. Ainsi, ce test ne permettra pas de détecter, par exemple, une tendance dans la variance d'une série où par ailleurs la moyenne reste stationnaire (augmentation ou diminution de la variabilité du signal). De très nombreuses études ont été publiées utilisant ce test (adapté et amélioré selon les hypothèses statistiques utilisées) afin de détecter des tendances dans les données observées de diverses variables climatiques, notamment des températures et des précipitations (voir section 2.2 pour une liste de telles études).

Une fois l'existence d'une tendance démontrée, un modèle doit être sélectionné afin de la décrire. Plusieurs modèles sont possibles pour décrire ces non-stationnarités. La figure 4.1 (tirée de Lemmen *et al.*, 2008) présente des exemples pour lesquels : 1) la distribution est translatée d'un bloc (la moyenne change au fil du temps sans que la variabilité de la série ne soit modifiée); 2) la variabilité de la série est modifiée (l'écart-type de la distribution change au fil du temps) sans changement de la moyenne et 3) la moyenne et la variabilité de la série évoluent au fil du temps. Évidemment, ces quelques cas n'épuisent pas tous les cas possibles mais représentent très certainement les hypothèses les plus plausibles. En effet, il est toujours possible d'imaginer une situation, par exemple, où l'asymétrie de la distribution change au fil du temps, ce qui signifierait pour le cas de la figure 4.1 que la distribution d'abord symétrique deviendrait asymétrique en fonction du temps.

Le modèle le plus simple et, de fait, le plus utilisé pour représenter l'impact des CC correspond au cas (a) de la figure 4.1, à savoir le cas où la distribution est translatée. Ceci correspond à une situation où seul le paramètre de position de la distribution dépend du temps. La plupart des études qui s'intéressent aux impacts des CC sur diverses variables climatiques (précipitations, températures, etc.) reprennent, d'une manière ou d'une autre, cette hypothèse puisqu'elles s'attardent à analyser l'évolution des moyennes entre climat présent et futur (voir par exemple Frei *et al.*, 2006; Boo *et al.*, 2006; Grum *et al.*, 2006; Fowler *et al.*, 2007a). Sans que ce ne soit explicitement mentionné, ces études supposent que les autres moments des distributions empiriques des séries sont stationnaires. Aucune étude à notre connaissance ne s'est attardée à analyser l'impact des CC sur la variabilité du signal afin de voir si, outre une dépendance temporelle de la moyenne, les CC ne pourraient entraîner une plus grande variabilité dans les séries.

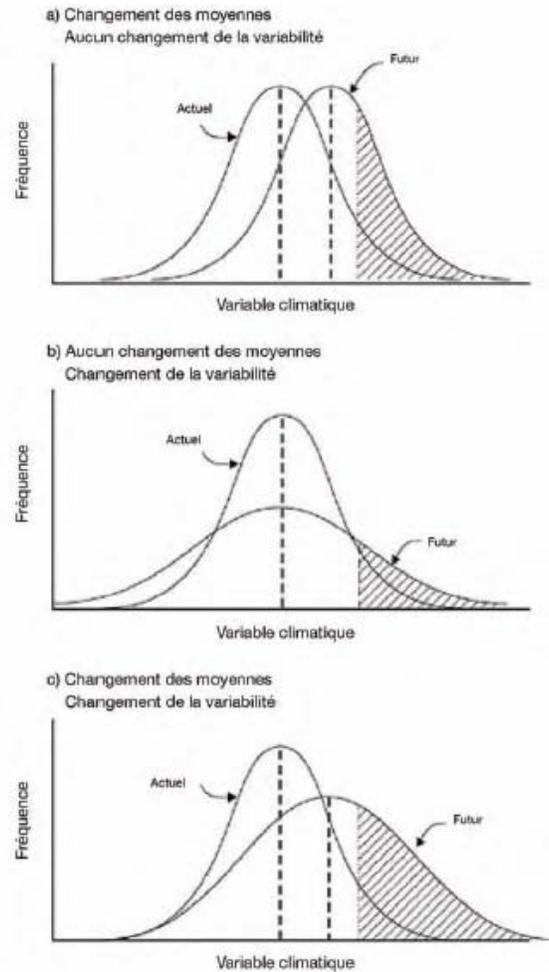


Figure 4.1 Évolution possible des distributions dans un contexte non stationnaire : a) translation de la distribution; b) moyenne inchangée mais augmentation de la variabilité; c) changement de la moyenne et de la variabilité (tiré de Lemmen *et al.*, 2008).

Un modèle non stationnaire où la distribution est translatée au fil du temps et qui est représenté par une dépendance temporelle du paramètre de position, $\xi(t)$, implique que tous les quantiles associés aux différentes probabilités de non-dépassement de la distribution sont translatés en bloc (voir équations 4.3 et 4.5). Dans la suite de notre exposé, le modèle non stationnaire suivant est considéré :

$$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1(t) \quad (4.9)$$

où ξ_0 correspond à la valeur de ξ à $t = t_0$ et donc $\xi_1(t) = 0$ lorsque $t = t_0$. Reprenant la distribution de Gumbel, et exprimant la probabilité cumulative à l'année t , F_t , en fonction de la probabilité cumulative au temps t_0 , F_0 , on obtient :

$$F_t = \exp \left\{ \exp \left[\frac{\xi_1(t)}{\alpha} \right] \ln F_0 \right\} \quad (4.10)$$

L'expression 4.10 donne la probabilité cumulative au temps t , F_t , correspondant au quantile x dont la probabilité cumulative lorsque $\xi = \xi_0$ est F_0 . Si l'on considère plus spécifiquement le modèle pour lequel le paramètre de position de la distribution dépend linéairement du temps, alors on a :

$$\xi_1(t) = b(t - t_0) \quad (4.11)$$

La figure 4.2 montre les graphiques obtenus pour différentes valeurs de b/α (les probabilités cumulatives sont exprimées en fonction de la période de retour estimée à l'année t) lorsque l'équation 4.11 est utilisée. Comme le montre cette figure, une valeur de b/α égale à 0,007 année⁻¹ conduit approximativement à une réduction de moitié des périodes de retour après 100 ans pour toutes les périodes de retour « initiales » considérées.

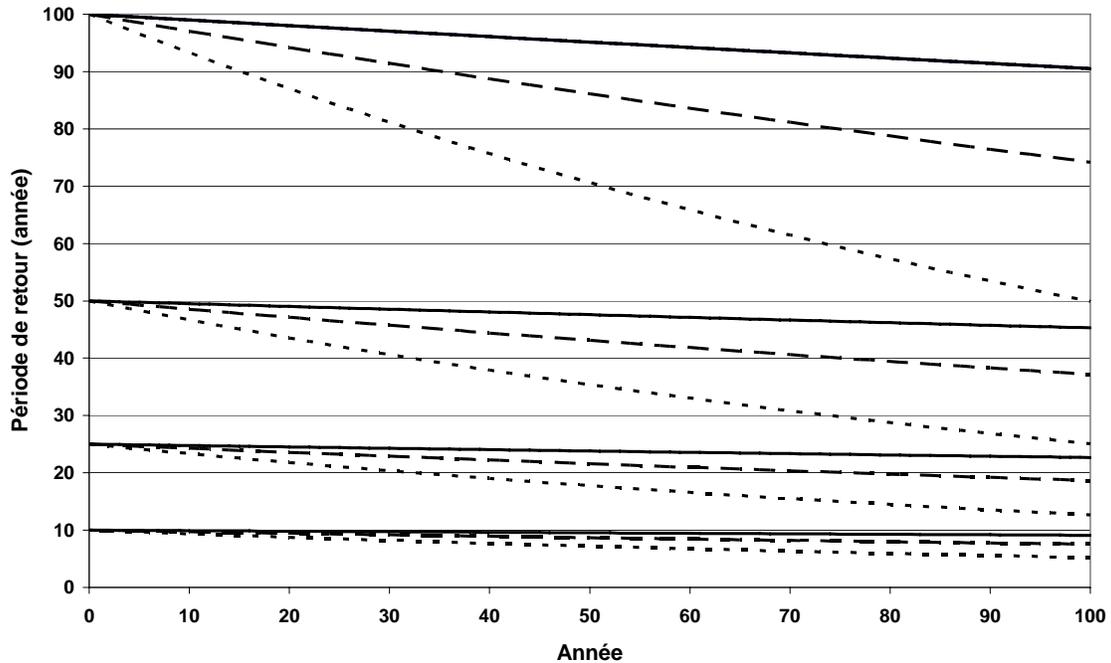


Figure 4.2 Période de retour en fonction des années pour un modèle non stationnaire où le paramètre de position de la distribution Gumbel varie linéairement dans le temps (éq. 4.11) (courbes continues $b/\alpha = 0,001$ année-1; courbes en tirets $b/\alpha = 0,003$ année-1 et courbe en pointillés $b/\alpha = 0,007$ année-1)

De façon similaire, on peut exprimer la probabilité cumulative à l'année t , F_t , en fonction de la probabilité cumulative F_0 lorsque $\xi = \xi_0$ pour la distribution GEV. On obtient :

$$F_t = \exp \left\{ - \left[(-\ln F_0)^k + \frac{k}{\alpha} \xi_1(t) \right]^{1/k} \right\} \quad (4.12)$$

Dans le cas linéaire (éq. 4.11), l'évolution future de la probabilité F_t dépend cette fois du rapport b/α et du paramètre de forme k . La figure 4.3 montre les différentes courbes obtenues dans le cas où $k = -0,05$ (à noter que la période de retour après 100 ans pour un ensemble de valeurs données diminue lorsque k diminue).

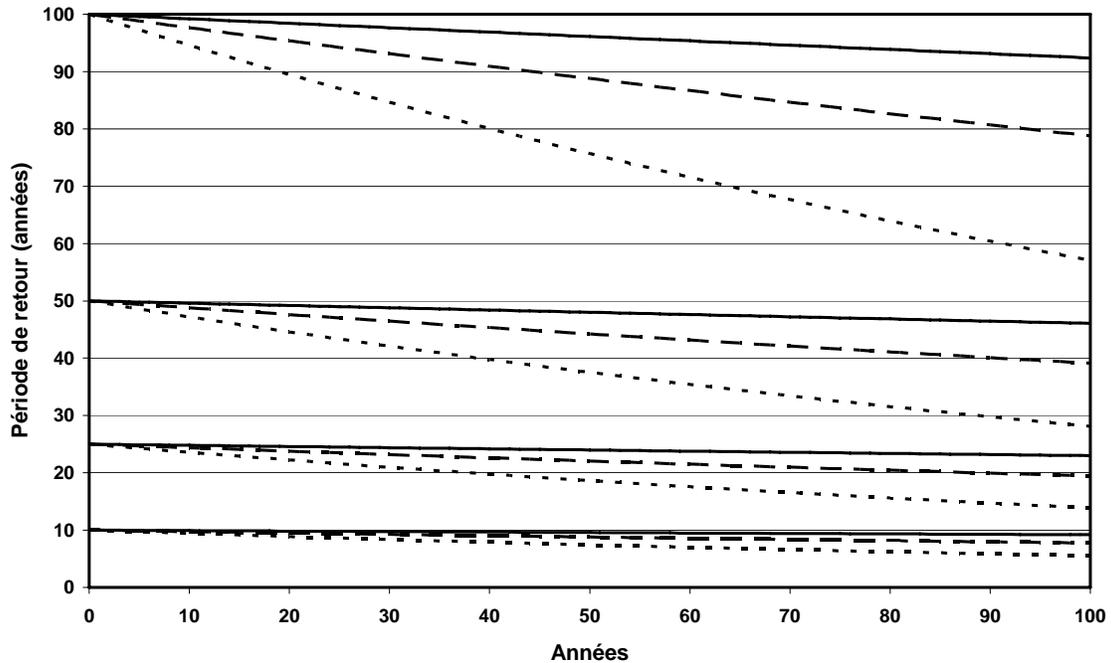


Figure 4.3 Période de retour en fonction des années pour un modèle non stationnaire où le paramètre de position de la distribution GEV varie linéairement dans le temps (éq. 4.11) (courbes continues $b/\alpha = 0,001 \text{ année}^{-1}$; courbes en tirets $b/\alpha = 0,003 \text{ année}^{-1}$ et courbes en pointillés $b/\alpha = 0,007 \text{ année}^{-1}$). La valeur de k a été fixée à $-0,05$.

4.4 Critère de conception en condition non stationnaire

La non-stationnarité des séries, quel que soit le modèle considéré, rend, dans une certaine mesure, imprécise la notion de période de retour telle que considérée jusqu'ici pour définir les critères de conception. En effet, affirmer par exemple que l'on désire concevoir un ouvrage capable de traiter un événement pluvieux de période de retour de 30 ans implique : a) que cette période de retour demeure inchangée durant toute la durée d'opération de cet ouvrage et b) que la probabilité qu'un tel événement survienne au début de la mise en opération est la même qu'à la fin de sa vie utile. La non-stationnarité des régimes climatiques a pour conséquence : 1) que la durée de vie utile de l'ouvrage ou de l'infrastructure doit explicitement être prise en considération lors de sa conception; 2) que la probabilité de dépassement des critères de conception (et du risque qui y est associé) ne sera pas constante mais évoluera durant la vie utile de l'ouvrage en fonction des modifications des probabilités d'occurrence des événements extrêmes; 3) qu'un modèle statistique décrivant les non-stationnarités, de même que les

modifications appréhendées des conditions climatiques pour la période d'opération des ouvrages, doit être précisé; et 4) qu'un critère de conception doit être défini, équivalent à la période de retour en régime stationnaire, permettant d'évaluer la probabilité d'occurrence d'événements dépassant les critères de dimensionnement durant la période d'opération de l'ouvrage/infrastructure. Cet indicateur, équivalent à la période de retour en régime stationnaire, pourra être utilisé comme critère de conception, de sorte à assurer un niveau de risque acceptable durant toute la durée de vie utile de l'ouvrage.

Il est possible d'imaginer plusieurs indicateurs afin de caractériser l'évolution des probabilités d'événements extrêmes durant la durée de vie utile d'un ouvrage ou d'une infrastructure. Par exemple, il est possible d'estimer le nombre moyen de dépassements d'un quantile donné pendant cette période et ainsi calculer la période de retour moyenne correspondante. Ce calcul est toutefois plus complexe qu'il n'y paraît (voir l'Annexe F où des détails techniques sont donnés) et, pour cette raison, très certainement inapproprié dans le présent contexte. L'indicateur choisi doit demeurer simple à utiliser et s'apparenter en matière d'utilisation opérationnelle, autant que faire se peut, à la période de retour utilisée jusqu'ici. Un tel critère est décrit aux paragraphes suivants. Bien que simple et d'application facile, l'utilisateur potentiel doit évidemment bien en comprendre la nature et la portée exacte. Une approche simple pour la définition des critères de conception dans un contexte de CC est expliquée à la section 4.6, approche qui reprend les éléments techniques présentés dans ce qui suit.

On définit t_d comme étant la durée de vie de l'ouvrage. Comme la période de retour diminue dans un contexte de CC (voir figures 4.2 et 4.3), on sélectionne une année t_c pendant la durée de vie utile de l'ouvrage, année à laquelle on associe une période de retour critique, T_c et donc un quantile $x_c(t_c)$. On aura évidemment (voir figure 4.4) :

$$\begin{aligned} T > T_c & \quad \text{si} \quad t_0 < t < t_c \\ T < T_c & \quad \text{si} \quad t_c < t < t_d \end{aligned} \tag{4.13}$$

c'est-à-dire que la probabilité d'observer un événement plus intense que l'événement de référence de quantile $x_c(t_c)$ sera plus petite que F_c ($F_c = 1 - 1/T_c$) pour $t < t_c$ mais plus élevée que F_c pour $t_c < t < t_d$. Ainsi, à titre d'exemple, on pourra souhaiter que, pour un ouvrage dont la durée de vie utile est estimée à 100 ans, la période de retour « annuelle » n'excède pas la période de retour critique de 100 ans avant la 70e année. Dans ce cas, on aura $T_c = 100$ ans, $t_c = 70$ ans et $t_d = 100$ ans. La sélection de t_c définit ainsi l'horizon pendant lequel le concepteur ne souhaite pas de dépassement de la valeur critique. La sélection de ces deux valeurs t_c et F_c (ou T_c) dépendra de plusieurs facteurs et devra être considérée dans un contexte plus global de gestion à long terme des eaux pluviales (cet aspect sera développé à la section 4.5). Dans la suite de cet exposé, t_c sera désigné comme étant l'année de référence, F_c , la probabilité de dépassement de conception (ou critique) à l'année de référence et T_c la période de retour de conception (ou critique) correspondante.

Une fois t_c et F_c (ou T_c) précisés, il faut estimer la valeur de la période de retour correspondant à l'année de conception de l'ouvrage, T_0 (voir figure 4.4). Dans le cas de la distribution Gumbel, cette valeur est donnée par :

$$F_0 = \exp \left\{ \exp \left[-\frac{\xi_1(t_c)}{\alpha} \right] \ln F_c \right\} \quad (4.14)$$

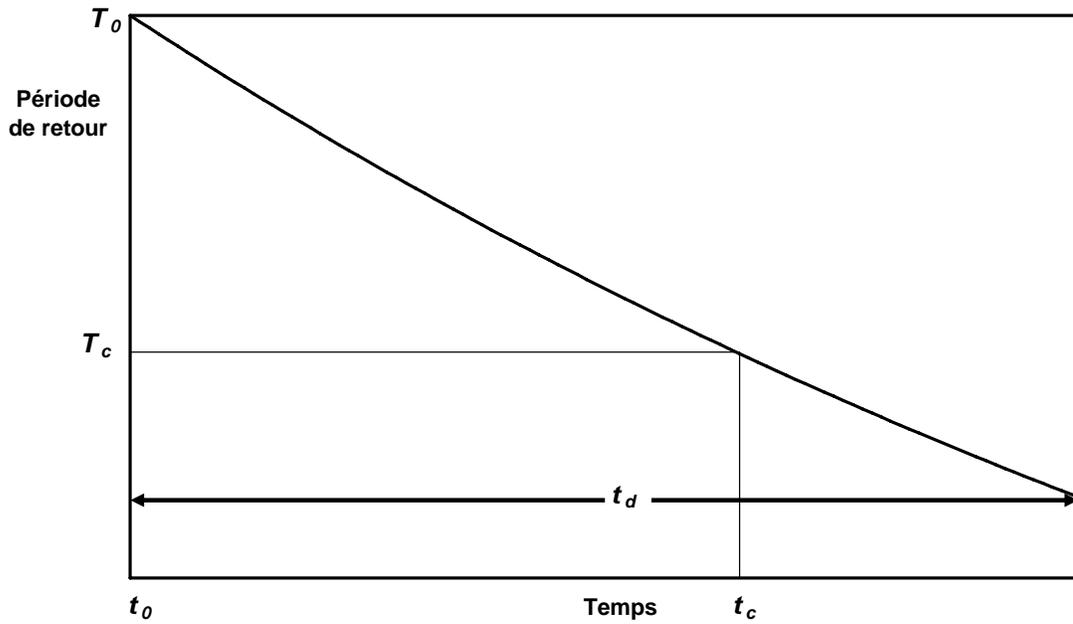


Figure 4.4 Définition des paramètres de conception t_c (année de référence) et T_c (période de retour de conception à l'année de référence) et de la période de retour correspondant à l'année de conception T_0 .

ou, dans le cas où $\xi_1(t)$ est donné par l'équation 4.11 :

$$F_0 = \exp \left\{ \exp \left[-\frac{b}{\alpha} (t_c - t_0) \right] \ln F_c \right\} \quad (4.15)$$

Pour la distribution GEV, on trouve :

$$F_0 = \exp \left\{ - \left[(-\ln F_c)^k - \frac{k}{\alpha} \xi_1(t_c) \right]^{1/k} \right\} \quad (4.16)$$

et, si $\xi_1(t)$ est défini par l'équation 4.11 :

$$F_0 = \exp \left\{ - \left[(-\ln F_c)^k - \frac{kb}{\alpha} (t_c - t_0) \right]^{1/k} \right\} \quad (4.17)$$

Ces expressions définissent la probabilité cumulative à considérer à l'année de conception et la période de retour correspondante, si l'on souhaite que la période de retour à l'année de référence soit égale à la valeur critique.

4.4.1 Exemple

À titre d'exemple, considérons le cas d'un ouvrage dont la durée de vie utile est estimée à 100 ans ($t_d = 100$ ans) et pour lequel, dans un contexte de climat stationnaire, on fixerait un critère de conception de période de retour de 100 ans pour les pluies maximales sur 24 heures. Supposons que la distribution des pluies extrêmes pour la durée 24 heures dans la région considérée satisfasse une distribution GEV de paramètres $\xi = 45$ mm, $\alpha = 10$ mm et $k = -0,05$. La figure 4.5 montre la valeur des précipitations sur 24 heures en fonction de la période de retour. La valeur de conception dans ce cas serait de 96,7 mm dans un contexte de climat stationnaire.

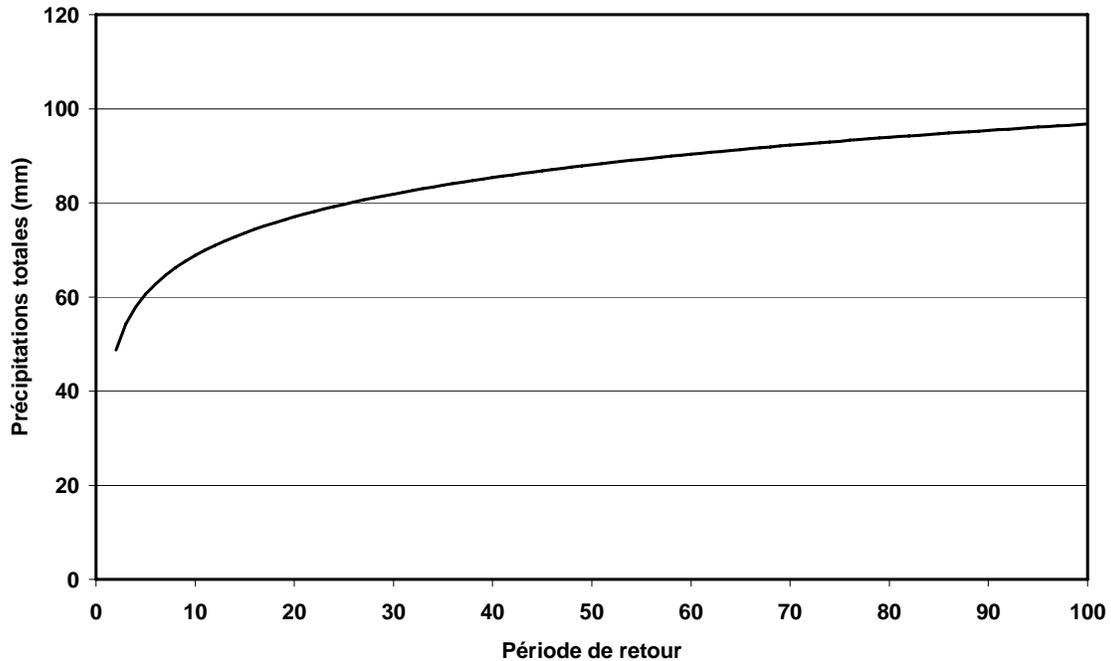


Figure 4.5 Précipitations totales en fonction de la période de retour dans le cas de l'exemple présenté à la section 4.4.1.

On suppose par ailleurs que, pendant la durée de vie utile de l'ouvrage, les projections climatiques suggèrent une modification significative des probabilités d'occurrence des pluies intenses se traduisant par une dépendance linéaire du paramètre de position, tel que le décrit l'équation 4.11, pour lequel $b = 0,08 \text{ an}^{-1}$. Un tel changement des conditions climatiques implique que si la capacité de l'ouvrage était initialement conçue de sorte à faire face aux événements de période de retour 100 ans, au terme de sa vie utile, sa capacité serait telle qu'il ne pourrait plus faire face qu'aux événements de période de retour de 52 ans (voir figure 4.6). Autrement dit, la probabilité de dépassement de la capacité de l'ouvrage aurait doublé au terme de sa vie utile.

La figure 4.6 montre les différentes courbes de l'évolution des périodes de retour lorsque différentes valeurs de l'année de référence sont considérées. Ainsi, un ouvrage initialement conçu en fonction d'une période de retour de 100 ans verra, au terme de 100 ans, sa période de retour effective réduite à 50 ans (courbe en gras de la

figure 4.6). Afin de maintenir une période de retour effective supérieure à 100 ans jusqu'à la 60^e année après la conception (année de référence), il faudra concevoir l'ouvrage en utilisant une période de retour de 145 ans (courbe tiret-point de la figure 4.6). De même, il faudra considérer une période de retour de conception de l'ordre de 185 ans pour s'assurer que la période de retour effective soit supérieure à 100 ans pendant les 100 prochaines années (année de référence égale à 100 ans dans ce cas; courbe en pointillée de la figure 4.6). Cette figure permet par ailleurs d'apprécier comment les probabilités d'événements intenses dépassant la capacité de conception évolueront selon l'année de référence sélectionnée. Dans le cas où l'on fixe l'année de référence à 100 ans, c'est-à-dire qu'on veut que la période de retour associée à chacune des années durant toute la durée de vie utile de l'ouvrage soit inférieure à 100 ans, la période de retour à la conception sera de 185 ans. Ainsi, l'ouvrage en question risque d'être « surdimensionné » par rapport aux probabilités d'événements extrêmes durant toute sa durée de vie. À l'autre extrême, une conception basée sur une période de retour de 100 ans représente un « sous-dimensionnement » par rapport aux probabilités réelles d'événements dépassant la capacité de conception de l'ouvrage. Ce sous-dimensionnement deviendra de plus en plus critique au fil des années puisque le risque de dépassement de la capacité de conception augmentera tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. La sélection de l'année de référence implique qu'un ensemble de facteurs soit pris en compte (voir section 4.5). La figure 4.7 présente, toujours pour l'exemple mentionné plus haut, les valeurs des précipitations totales sur 24 heures à prendre en compte lorsque diverses années de référence sont considérées.

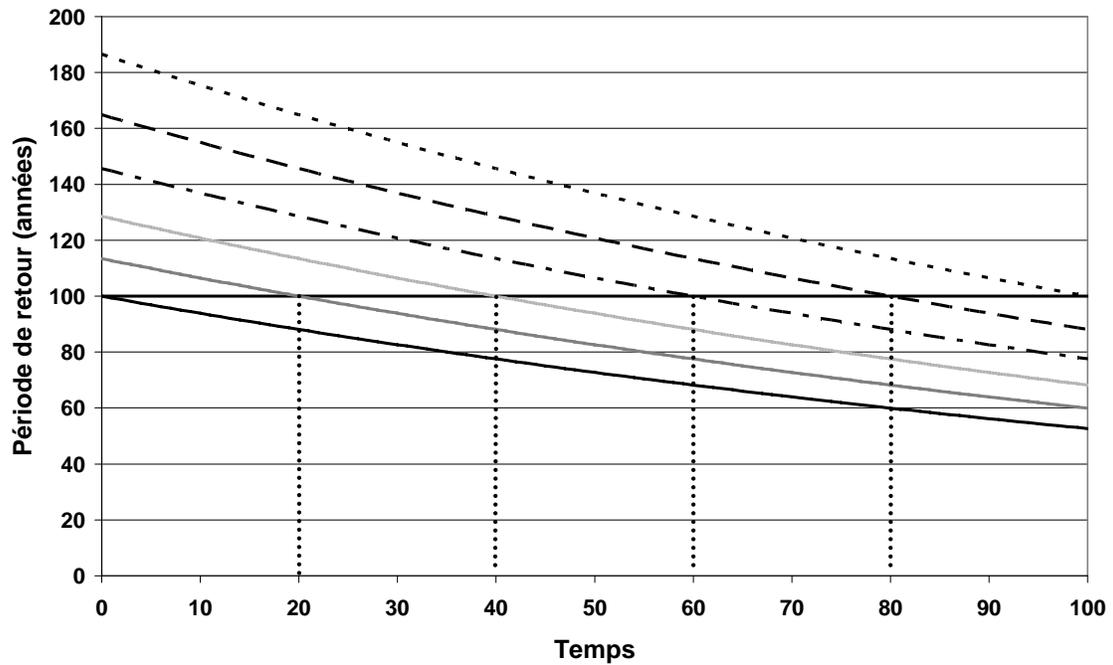


Figure 4.6 Évolution de la période de retour en fonction du temps pour un scénario de CC où la période de retour initiale diminue de moitié après 100 ans. Les différentes courbes correspondent à différentes années de référence (correspondant aux valeurs de l'axe des x sous les traits en pointillés verticaux, soit 20; 40; 60; 80; et 100 ans).

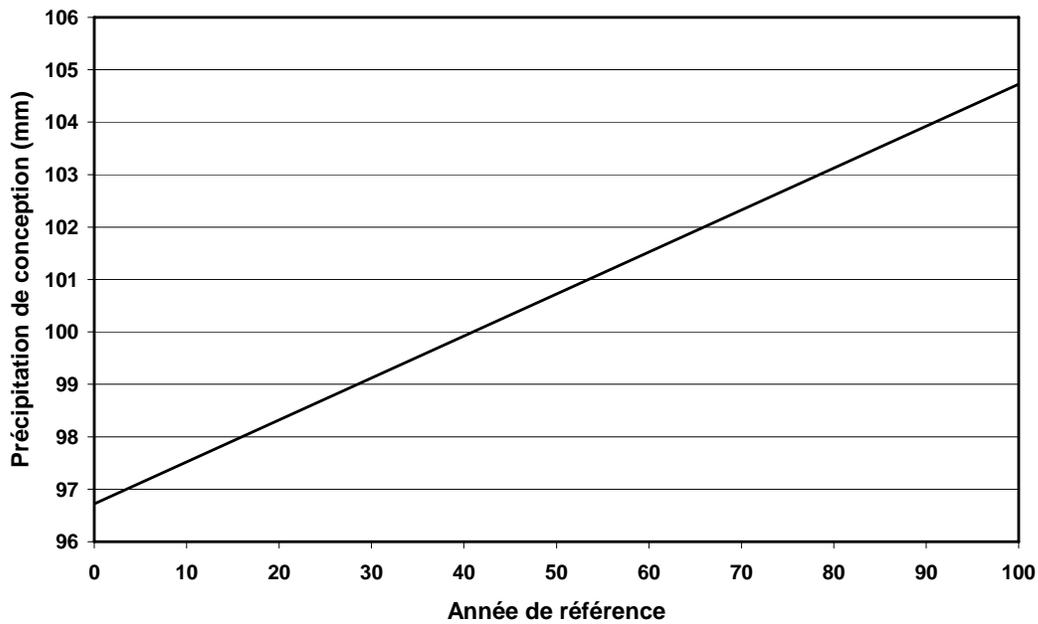


Figure 4.7 Précipitations totales utilisées lors de la conception en fonction de l'année de référence considérée pour l'exemple de la section 4.4.1.

4.5 Évaluation du risque en contexte de CC

La procédure proposée à la section précédente implique qu'une année de référence soit définie en plus d'une période de retour de référence. La définition de cette année de référence et de la période de retour critique qui lui est associée établit le niveau de risque acceptable en regard duquel l'ouvrage sera dimensionné. L'établissement de cette année de référence, et plus généralement du niveau de risque acceptable en regard de l'infrastructure/ouvrage à mettre en place, doit dorénavant s'inscrire dans un contexte plus large d'analyse et de planification en milieu urbain. Cette gestion des ouvrages et des infrastructures se doit d'être évolutive et adaptative, en ce sens qu'elle doit reposer sur une évaluation continue de la performance des ouvrages en place et du risque réel encouru en regard des aléas climatiques. Conception d'ouvrage, réhabilitation, remplacement et mise à niveau des ouvrages et infrastructures existants, aménagements de BMP (par exemple de type contrôle à la source) doivent s'inscrire dans une démarche de planification qui s'appuie sur le suivi et le monitoring de la performance des systèmes existants en regard des aléas météorologiques passés mais aussi en fonction des avancées en matière de science du climat et de projections climatiques (cette démarche est décrite au chapitre 5).

Plusieurs facteurs sont à considérer lors de la sélection de l'année de référence, et plus globalement lors de l'évaluation du niveau de risque : 1) la durée de vie utile de l'ouvrage; 2) l'ampleur des modifications des probabilités d'occurrence d'événements intenses en climat futur; 3) les incertitudes sur les projections climatiques; 4) le plan global de gestion des eaux pluviales.

4.5.1 Durée de vie utile de l'ouvrage

L'exemple de la section 4.4.1 l'a montré, établir un critère de conception d'un ouvrage/infrastructure dont la durée de vie utile est grande peut avoir des conséquences désastreuses dans un contexte de CC si le risque est mal évalué. Il est donc important, dans le cas d'infrastructures qui seront en opération pendant de longues périodes, de

procéder à une analyse plus conséquente des impacts des CC sur une période couvrant la durée de vie utile de l'ouvrage.

4.5.2 Amplitudes des tendances climatiques

La détermination des paramètres de conception sera critique dans un contexte où les profils d'occurrence des événements météorologiques d'intérêt (pluies intenses dans le cas de l'évacuation des eaux pluviales, pluies de faible à moyenne intensités pour les déversements de réseau unitaire) sont appelés, selon les scénarios de projections climatiques disponibles, à subir des modifications importantes au cours de la durée de vie utile de l'ouvrage. De manière générale, la mise en place de mesures favorisant une adaptation aux CC devra se faire sur un horizon d'autant plus court que les tendances climatiques appréhendées seront prononcées.

4.5.3 Incertitudes sur les projections climatiques

Les incertitudes affectant les projections climatiques actuelles sont importantes et proviennent tant de considérations liées à l'évolution des gaz à effet de serre (divers scénarios sont, de fait, proposés mais nul ne peut présumer de celui qui se produira en réalité en climat futur) que de diverses considérations liées à la modélisation du climat (représentation physique, paramétrisation, impacts des conditions initiales, échelles de temps et d'espace, etc.; voir le chapitre 2 pour une discussion de cette question). Ce constat vaut particulièrement pour les événements météorologiques dits extrêmes, notamment les précipitations intenses. Ces événements se produisent souvent, en effet, à de petites échelles (spatiale et temporelle) pour lesquelles les représentations actuelles des modèles demeurent approximatives.

L'évaluation même de ces incertitudes sur les projections climatiques demeure un exercice difficile et beaucoup reste à faire. La tendance actuelle en cette matière consiste à combiner les résultats de plusieurs modèles et de plusieurs résultats utilisant des paramétrisations différentes des modèles (plusieurs paramètres ne pouvant être

fixés *a priori*). Cette approche a été appliquée en Europe (Frei *et al.*, 2006) mais aucune approche de ce type n'a, à notre connaissance, été considérée au Canada.

Ces considérations doivent nous inciter à une certaine circonspection et doivent être prises en compte lors de l'évaluation du risque dans le cadre de la conception d'ouvrages de génie. Les incertitudes, lorsqu'elles sont disponibles, doivent être prises en compte lors de la définition des critères de conception, et plus généralement lors de l'élaboration des plans de gestion des eaux pluviales (voir chapitre 5). Les projections climatiques disponibles sont appelées à changer et à évoluer en fonction de l'évolution des connaissances en matière de science du climat et de modélisation du climat. Ces « incertitudes » montrent toute l'importance de développer une approche de gestion plus adaptative à travers une gestion dynamique du risque.

4.5.4 Plan global de gestion des eaux pluviales

Le maintien d'un niveau de performance acceptable à long terme exige d'examiner les différents plans d'intervention proposés dans une perspective de long terme. Les mesures d'adaptation à considérer à court et moyen termes doivent en effet s'inscrire dans un plan de gestion à long terme des systèmes et ne doivent plus être perçues comme une série ponctuelle d'interventions. Les objectifs de performance à long terme doivent servir de trame de fond à l'ensemble de la démarche. Cette question sera largement développée au chapitre 5.

4.6 Directives générales

La pratique traditionnelle du génie repose souvent sur l'utilisation de directives et de règles d'application simples et rapides. La présente section entend donc proposer une telle règle qui permette d'établir le niveau de service à considérer lors de la conception dans un contexte de CC. Elle repose sur une linéarisation de la fonction reliant la période de retour et le temps (figure 4.6). Une telle approximation paraît tout à fait justifiée dans un contexte où les incertitudes sur plusieurs paramètres sont non

négligeables (incertitudes sur les projections climatiques et sur les paramètres des distributions statistiques décrivant les probabilités d'occurrence d'événements extrêmes) et où l'on souhaite définir une première estimation des corrections à apporter aux critères de conception dans un contexte de CC.

4.6.1 Règles de conception

Trois éléments d'information doivent être précisés à savoir : 1) les projections climatiques considérées; 2) le niveau de performance souhaité (ou du risque jugé acceptable); et 3) la durée de vie utile de l'ouvrage. En effet, l'analyse présentée aux sections 4.3 et 4.4 montre que l'évolution de la période de retour pendant toute la durée de vie utile d'un ouvrage donné dépend du scénario de projection climatique considéré et de la durée de vie utile de cet ouvrage. Supposons, de façon générale que, selon les projections climatiques disponibles, la période de retour au terme d'un horizon de 100 ans diminue d'un facteur α , c'est-à-dire que :

$$T(t = 100 \text{ ans}) = \alpha T_0 \quad (4.18)$$

où T_0 correspond à la période de retour de conception ($t = 0$). Par ailleurs, la figure 4.4 montre qu'il est tout à fait raisonnable de considérer une relation linéaire entre la période de retour et la durée écoulée depuis la conception, ce qui s'écrit :

$$T(t) = T_0 - b t \quad (4.19)$$

Reprenant l'équation 4.18 et substituant dans l'équation précédente, on a :

$$T(t) = T_0 \left[1 - \frac{(1-\alpha)t}{100} \right] \quad (4.20)$$

On fixe ensuite l'année de référence t_c , qui correspond à l'année où la période de retour est égale à la période de retour « critique » (voir section 4.4 et figure 4.4), que l'on exprime en fonction de la durée de vie utile de l'ouvrage t_d sous la forme :

$$t_c = \beta t_d \quad (4.21)$$

Remplaçant dans l'expression 4.20, on a :

$$T_c = T_0 \left[1 - \frac{(1-\alpha) \beta t_d}{100} \right] \quad (4.22)$$

Inversant cette dernière équation pour trouver la période de retour à considérer lors de la conception pour que la période de retour critique survienne à l'année t_c (βt_d), on trouve enfin :

$$T_0 = T_c \left[1 - \frac{(1-\alpha) \beta t_d}{100} \right]^{-1} \quad (4.23)$$

Dans le cadre des hypothèses suivantes (il est important de préciser que ces hypothèses pourront être modifiées selon les scénarios climatiques disponibles et le niveau de performance escompté):

- La période de retour des événements extrêmes diminuera de moitié au cours des 100 prochaines années ($\alpha = 0,5$)
- L'année de référence est fixée à la moitié de la durée de vie utile de l'ouvrage considéré ($\beta = 0,5$)

L'expression (4.23) prend la forme :

$$T_0 = \frac{T_c}{[1 - 0,0025 t_d]} \quad (4.24)$$

Le tableau 4.1 présente les valeurs obtenues dans ce cas. Ainsi, par exemple, selon cet ensemble d'hypothèses, il faudra utiliser une valeur de période de retour de 133 ans pour un ouvrage dont la durée de vie utile estimée est de 100 ans et pour lequel la période de retour critique (ou moyenne) souhaitée est de 100 ans. Comme il est mentionné à la section 4.4, l'année de référence sépare la durée de vie utile de

l'ouvrage en deux périodes. La période de retour effective pendant la première période sera supérieure à la période de retour critique alors qu'elle sera inférieure pendant la seconde période. Dans un contexte où les modifications induites par les CC sont importantes et que le risque devient inacceptable au terme de fin de la durée de vie utile de l'ouvrage, il pourra être souhaitable de prendre une année de référence plus près de la fin de la durée de vie utile de l'ouvrage. À titre d'exemple, dans le cas où l'année de référence serait fixée à $t_c = 2/3 t_d$, on aurait :

$$T_0 = \frac{T_c}{[1 - 0,0033 t_d]} \quad (4.25)$$

et les valeurs correspondantes sont présentées au tableau 4.2.

Tableau 4.1 Période de retour de conception à considérer pour différentes périodes de retour critiques et différentes durées de vie utile (scénario climatique de réduction de moitié des périodes de retour sur 100 ans et année de référence fixée à la moitié de la durée de vie utile).

Durée de vie utile (ans)	Période de retour critique (ans)				
	20	40	60	80	100
20	21	42	63	84	105
40	22	44	67	89	111
60	24	47	71	94	118
80	25	50	75	100	125
100	27	53	80	107	133

Tableau 4.2 Période de retour de conception à considérer pour différentes périodes de retour critiques et différentes durées de vie utile (scénario climatique de réduction de moitié des périodes de retour sur 100 ans et année de référence fixée au deux tiers de la durée de vie utile).

Durée de vie utile	Période de retour critique				
	20	40	60	80	100
20	21	43	64	86	107
40	23	46	69	92	115
60	25	50	75	100	125
80	27	54	82	109	136
100	30	60	90	119	149

En résumé, cette règle de conception très simple demande que soient précisés :

- Le ratio de la période de retour des événements extrêmes considérés (en précisant la durée de ces événements) au terme des 100 prochaines années par rapport à la période de retour actuelle (exprimé par le paramètre α) selon les projections climatiques disponibles.
- La durée de vie utile de l'ouvrage ou infrastructure considéré (t_d)
- La période de retour critique qui correspond à la période de retour qui serait considérée dans un contexte sans changements climatiques (T_c)
- L'année de référence t_c , qui correspond à l'année où la période de retour effective sera égale à la période de retour critique, exprimée en fonction de la fraction de la durée de vie utile de l'ouvrage ($\beta = t_c/t_d$)

Une fois ces paramètres fixés, l'équation (4.23) est utilisée pour estimer la période de retour de conception T_0 .

4.6.2 Mise en garde

La simplicité de la règle proposée à la section précédente ne doit pas faire oublier que sa mise en application doit s'inscrire dans un schéma plus large d'élaboration des plans d'intervention qui intègre plusieurs mesures d'adaptation et non seulement une révision des normes de conception (voir chapitre 5). En fait, la mise en application « ponctuelle » de cette règle de conception pourra régler localement certaines situations potentiellement problématiques résultant d'un sous-dimensionnement dans une perspective à moyen et long termes, au détriment toutefois de secteurs plus en aval où le sous-dimensionnement de ces secteurs sera exacerbé par ces apports supplémentaires résultant d'une augmentation des capacités des secteurs en amont. L'application de cette règle doit donc se faire en adoptant une vision plus large et après analyse des conséquences d'une telle modification des normes de conception pour un secteur ou un tronçon donné.

5. Gestion des eaux pluviales en milieu urbain dans un contexte de CC

L'objectif premier et unique de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain, tel qu'il est défini traditionnellement, était d'évacuer le plus rapidement possible les eaux de ruissellement afin de minimiser les risques d'inondation (Watt *et al.*, 2003; CNRC, 2005). Cet objectif a amené l'implantation de systèmes de collecte et d'évacuation des eaux pluviales vers les milieux récepteurs, sans égard à la valeur de cette ressource et aux impacts négatifs sur les cours d'eau récepteurs que peut avoir le mode de gestion actuel (par exemple, augmentation de l'érosion et de la sédimentation, augmentation de la température des eaux, enrichissement en nutriments, etc.; Niemczynowicz, 1999; Marsalek et Chocat, 2002; CNRC, 2005).

À cet objectif traditionnel doivent donc s'ajouter d'autres objectifs visant l'implantation d'une approche intégrée de gestion des eaux pluviales où, notamment, la qualité des eaux de ruissellement est aussi considérée (Watt *et al.*, 2003; Villarreal et Bengtsson, 2004; Rauch *et al.*, 2005; USEPA, 2006; Dietz, 2007). Une telle approche repose sur les principes et constats suivants (CNRC, 2005) : 1) les eaux pluviales représentent une ressource à protéger compte tenu de leur importance pour le milieu naturel; 2) le spectre complet des événements pluvieux doit être pris en compte, de par son importance pour l'écologie naturelle et ses répercussions sur le cadre bâti; 3) des pratiques respectant le plus possible le cycle hydrologique naturel doivent être mises en œuvre, ce qui se traduira par un meilleur contrôle des inondations, le maintien du débit de base naturel dans les rivières et cours d'eau, ainsi que la recharge des nappes souterraines.

Une telle approche suppose, notamment, selon Marsalek et Chocat (2002) : 1) le développement de systèmes de drainage urbain respectant les préceptes du développement durable, c'est-à-dire qui tendent à préserver les bilans hydrologiques

originels et empêchent autant que possible la contamination des eaux de ruissellement par les sédiments et les polluants urbains; 2) une utilisation des mesures de contrôle à la source de sorte à réduire les eaux de ruissellement et les charges polluantes acheminées au réseau (dans les secteurs bâtis, il s'agit de réduire, autant que faire se peut, les apports des surfaces imperméables); 3) une transformation des infrastructures urbaines de drainage de ce qu'elles étaient, à savoir essentiellement un réseau de conduites servant à la collecte rapide et efficace des eaux pluviales vers un système plus « vert » comportant des aménagements paysagers formés d'étangs et de milieux humides intégrés au cycle hydrologique urbain des eaux pluviales. Les aménagements possibles englobent une panoplie de mesures qui peuvent être appliquées tant en amont qu'en aval des réseaux (ex. : bassins de rétention, unités de traitement des eaux pluviales, etc.). Les mesures de type « contrôle à la source », situées en amont des réseaux, s'intègrent dans une stratégie de développement à faible impact (*Low Impact Development*, LID), dont l'objectif est d'assurer une protection maximale de l'intégrité écologique des eaux réceptrices par le maintien du régime hydrologique du bassin versant (Coffman, 2000; USEPA, 2000). Cette approche, qui reçoit également les appellations *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS) au Royaume-Uni (Scholz et Grabowiecki, 2007) et *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) en Australie (Taylor et Wong, 2003), s'impose de plus en plus comme le nouveau paradigme à suivre pour la conception des réseaux urbains de drainage en vue de minimiser leur impact sur les cours d'eau récepteurs.

Dans le cas de secteurs déjà bâtis, une telle « métamorphose » vers un mode intégré de gestion des eaux pluviales devra se faire progressivement à travers l'implantation et la mise à niveau des infrastructures existantes. Il ne faudrait pas sous-estimer les défis, tant techniques qu'institutionnels, que pose cette transformation du mode de gestion actuel.

Tout comme l'ont souligné, à juste titre, Watt *et al.* (2003), il est peu vraisemblable de penser que les CC, à eux seuls, peuvent justifier une complète remise en question des modes de gestion, de planification ou plus simplement des critères de conception. Un

ensemble de facteurs justifie un tel changement des modes de gestion et les CC sont certainement l'un de ces facteurs (cette vision est partagée par nombre d'intervenants du secteur; voir chapitre 2).

L'évaluation des interventions à mettre en place impose une évaluation du niveau de performance à long terme des dites interventions. Plusieurs facteurs sont à considérer lors de l'évaluation de la performance globale, ou de la capacité à satisfaire les objectifs d'un système de drainage urbain, dans une perspective de moyen et long termes. Ces facteurs sont : 1) le vieillissement structural des conduites et de différentes composantes du système ayant pour conséquence une plus grande probabilité de dysfonctionnement ou une réduction globale de la performance; 2) une modification de l'occupation du territoire et de la démographie ainsi que l'ajout de nouveaux secteurs (par ex. augmentation des surfaces imperméables, le développement résidentiel), ou la modification de tout autre variable ayant une incidence sur cette performance; 3) un programme d'entretien et de suivi déficient qui aura un impact sur la performance globale du système. Une modification des objectifs de gestion est aussi à considérer, que l'on pense à la préoccupation récente en regard des cours d'eau récepteurs face aux déversements des réseaux unitaires et, plus généralement, au souci d'améliorer la qualité des cours d'eau en milieu urbain (Walsh *et al.*, 2005). À cet égard, Watt *et al.*, (2003) relèvent aussi une série de facteurs à caractère moins technique mais pouvant avoir une incidence déterminante sur l'évolution des développements en matière de gestion des eaux pluviales et d'élaboration des interventions : 1) établissement de nouveaux modèles de financement des infrastructures urbaines; 2) établissement de nouvelles réglementations (par exemple au niveau des paramètres de qualité des eaux déversées au milieu récepteur); 3) nouvelles tarifications des services d'eau; 4) évolution des perceptions de la population en regard des questions environnementales; 5) modifications des attentes des citoyens en regard des niveaux de services municipaux et des risques jugés acceptables; et 6) accroissement de l'influence et des responsabilités des instances locales par rapport aux autres niveaux de gouvernement.

Si l'évaluation prospective des niveaux de performance n'est pas facile, d'un point de vue technique, l'évaluation rétrospective des niveaux de performance (ou de risque) est aussi complexe. Il s'agit en effet dans ce cas de déterminer si, en regard des critères définis à la conception, l'événement de pluie qui s'est abattu sur le secteur urbain considéré et qui a causé des débordements/refoulements et des dommages, se situait au-delà ou en-deçà de la capacité théorique de conception du réseau. Dans le premier cas, c'est dire que la capacité du réseau était, de fait selon les critères originels de conception, insuffisante pour évacuer les eaux déversées par un tel événement. Dans le deuxième cas, l'incapacité du réseau à évacuer les eaux de ruissellement est plutôt une indication d'une capacité hydraulique déficiente puisque cet événement n'aurait pas dû, en principe, entraîner de refoulement/débordement. Évidemment, l'établissement d'une telle ligne de partage est simple, d'un point de vue théorique, mais beaucoup plus complexe à mettre en évidence, d'un point de vue pratique, et ce, pour plusieurs raisons. Si, comme il est mentionné plus haut, il est possible d'identifier et d'évoquer plusieurs facteurs pouvant avoir entraîné une diminution de la capacité hydraulique du réseau par rapport à sa capacité théorique à la conception, il est par ailleurs aussi très difficile de caractériser un événement pluvieux donné. Les données météorologiques recueillies permettant une telle caractérisation demeurent généralement fragmentaires et partielles. En effet, le caractère extrême de certains de ces événements fait en sorte qu'ils peuvent être très localisés et ainsi échapper aux stations réparties sur le territoire. Le recours aux données de radar peut, dans certains cas, être très utile pour mieux caractériser spatialement les événements. D'autres considérations liées à la façon de caractériser statistiquement les événements de pluies compliquent aussi l'analyse (voir section 4.2).

La planification des interventions est, on le voit, une tâche importante mais combien complexe qui doit viser à maintenir, voire à améliorer le niveau de service offert (dans la perspective où ce dernier est jugé inadéquat dans certains secteurs) et possiblement à combler certaines déficiences en vue de l'atteinte de nouveaux objectifs devenus prioritaires (par exemple, la mise en place de mesures afin de réduire les charges polluantes acheminées jusqu'au milieu récepteur). La planification de ces interventions se concrétise à travers le plan d'intervention, qui vise à déterminer et à hiérarchiser les interventions à réaliser afin d'atteindre les objectifs préalablement établis. Le plan

d'intervention doit être élaboré sur la base d'une démarche structurée et systématique, et ce, afin d'assurer l'atteinte de ces objectifs dans un souci d'optimisation des investissements (MAMR, 2005).

En matière de système de collecte des eaux pluviales, l'un des défis réside dans le monitoring de l'état structural, et plus généralement de diverses variables et paramètres susceptibles de caractériser le niveau de performance du système. À titre d'exemple, le ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR) a rédigé un guide d'élaboration des plans d'interventions pour les réseaux d'eau potable et les réseaux unitaires (MAMR, 2005). Bien que ce guide ne concerne pas les réseaux pluviaux (un complément à ce guide souligne expressément ce point; voir MAMR, 2007), on peut penser que les grandes étapes qui y sont décrites (collecte des données, évaluation des indicateurs de performance, etc.) s'appliquent aussi à ce type de réseau (les indicateurs de performance pouvant toutefois être différents dans ce dernier cas). Le plan d'intervention, tel qu'il est défini dans le cadre de ce guide et tel qu'il est généralement défini, se limite toutefois à l'aspect remplacement/renouvellement des infrastructures existantes dans l'optique d'une mise à niveau structurale et hydraulique des réseaux. Il est cependant crucial, dans une perspective de CC, que ce cadre strict soit élargi afin de prendre en compte les impacts des CC et de pouvoir procéder à une évaluation périodique du niveau de performance des réseaux en regard de l'évolution de la performance passée et des projections climatiques disponibles.

5.1 Vers un mode de gestion adaptative et hiérarchique intégrant la dimension climatique

La gestion adaptative, selon CNRC (2005), implique que « les ouvrages et les systèmes sont conçus à partir des meilleures données disponibles, puis revus et améliorés périodiquement sur la base des données récoltées dans les phases subséquentes de suivi ». Ce mode de gestion « dynamique » prend toute son importance et toute sa valeur dans un contexte de CC (voir aussi Lemmen *et al.*, 2008, Encadré RS-1 pour une discussion de la notion d'adaptation et une présentation des différents types d'adaptation possibles).

Plusieurs raisons militent en faveur de ce type de gestion (CNRC, 2005) : 1) les connaissances scientifiques et techniques évoluent, permettant une meilleure caractérisation des systèmes et une meilleure évaluation des impacts hydrologiques et écologiques sur les milieux naturels; 2) les outils technologiques de prise de décisions sont également en évolution de même que le nombre d'études de cas et d'expériences ajoutant à la connaissance globale sur le sujet; 3) les systèmes évolués de contrôle et d'acquisition de données se développent permettant un meilleur monitoring et un meilleur suivi de la performances des systèmes de gestion des eaux pluviales.

À ces raisons s'ajoutent dorénavant plusieurs considérations liées aux CC. La nécessité d'adopter un tel mode de gestion s'impose encore plus dans le cadre de l'hypothèse selon laquelle les probabilités d'occurrence d'événements extrêmes risquent de croître. L'adaptation dans un tel contexte implique l'examen de plusieurs scénarios de projections climatiques et de plusieurs plans d'intervention visant l'implantation de différentes mesures d'adaptation puisque les incertitudes à long terme sur ces projections restent importantes et qu'il faudra revoir ces plans d'intervention au regard des projections climatiques qui évolueront selon les avancées de la science du climat. À ce titre, comme le mentionne le document CNRC (2005), une gestion adaptative doit s'appliquer à tous les aspects de la planification de la gestion des eaux pluviales et intégrer un ensemble de connaissances et de données, incluant les données climatiques et l'évolution du risque en regard de ces projections, afin de favoriser une prise de décision s'inspirant des connaissances scientifiques les plus récentes.

5.1.1 Échelles temporelles en jeu

Plusieurs échelles temporelles différentes doivent être considérées lors de l'évaluation des plans d'intervention dans un contexte de CC. Ces échelles sont : 1) l'horizon temporel des projections climatiques disponibles (actuellement, les scénarios considèrent des périodes se terminant entre les années 2070 et 2100); 2) la durée de vie utile des infrastructures et aménagements (celle-ci peut varier globalement entre 20 ans et 100 ans); 3) la période pour laquelle le plan d'intervention est développé (généralement de cinq à dix ans). L'analyse des plans d'intervention, même si ces derniers ne concernent en principe que les interventions à mettre en place dans les cinq à dix années à venir, doit s'inscrire dans un contexte plus large où les impacts à plus

long terme (sur les 50 à 75 ans à venir) seront pris en compte. Deux raisons militent en faveur d'une telle approche. La première est que la durée de vie utile de certaines infrastructures dépasse largement la seule période des interventions et qu'une mise à niveau de l'ensemble du réseau en regard des CC devra se faire par étapes à travers une série de plans d'intervention. La deuxième raison est que les tendances appréhendées, selon les projections actuelles, pour les probabilités d'occurrence d'événements de pluies extrêmes en climat futur ne seront perceptibles que sur des périodes de temps dépassant largement la simple période couverte par le plan d'intervention lui-même, et ce, compte tenu de la variabilité naturelle (ou intrinsèque) du climat et des faibles probabilités d'occurrence d'événements dits extrêmes.

Un tel constat implique donc que la période d'analyse des plans d'intervention soit telle que les tendances climatiques seront perceptibles sur cette période (par « perceptibles », il faut entendre que des tendances statistiques significatives pourront se dégager durant cette période). Une période d'analyse de l'ordre de 50 à 75 ans est suggérée à cet effet. En principe, c'est dire que le plan d'intervention lui-même devrait couvrir cette période. Toutefois, il semble peu réaliste de définir un plan d'intervention sur cet horizon. Si une définition précise des interventions sur un horizon court terme va de soit, l'évaluation à plus long terme pourra se faire en définissant de façon plus globale le type d'intervention à prévoir au-delà de la période d'intervention considérée à court terme. De même, une évaluation du niveau de performance à plus long terme pourra être réalisée dans un tel cadre afin de voir si le niveau de performance demeure acceptable ou si des ajustements ne pourraient pas être apportés afin de saisir certaines opportunités d'intervention à court ou moyen terme qui permettraient de maintenir ou d'améliorer le niveau de performance dans une perspective à plus long terme où les impacts des CC seront significatives. Le tout est ici d'estimer l'évolution du niveau de performance du système et de développer des stratégies d'intervention et d'adaptation qui vont au-delà d'un simple rétablissement du niveau de performance initial du système mais qui permettent de maintenir un niveau de performance acceptable à long terme.

5.1.2 Des mesures d'adaptation pour un contrôle du spectre complet des événements pluvieux

La conception des systèmes, et plus généralement la gestion des eaux pluviales, doit se faire en tenant compte du spectre complet des événements pluvieux et non seulement des événements de pluies intenses qui, de par leur nature, sont peu fréquents. À ce titre, comme le souligne CNRC (2005), l'écologie naturelle des cours d'eau récepteurs est globalement plus sensible aux conditions moyennes qu'elle ne l'est aux conditions extrêmes. Il importe donc de considérer tout le registre des pluies susceptibles de s'abattre sur un territoire ou un bassin versant, et de mettre en place une panoplie de mesures afin de maintenir, autant que faire se peut, dans une optique de gestion intégrée et durable, les débits de pointe, les volumes de ruissellement et les autres variables caractéristiques à des valeurs proches de leur état pré-développement (CNRC, 2005).

Les projections climatiques actuelles suggèrent que le spectre complet des régimes de pluie risque d'être modifié dans un contexte de CC, affectant ainsi non seulement les événements de pluie intenses (grandes périodes de retour) mais aussi les événements les plus fréquents (voir chapitre 2). L'élaboration de stratégies d'intervention et leur analyse doivent donc se faire en considérant diverses mesures susceptibles d'améliorer ou de maintenir un niveau de performance à long terme dans un contexte de CC et les objectifs de gestion devront être définis en conséquence. Cette diversité des mesures exige la mise en place d'une approche de gestion de type hiérarchique suivant laquelle la planification de la gestion des eaux pluviales se fait en considérant le système selon les différentes échelles spatiales en jeu, en débutant par le bassin versant, puis de façon de plus en plus détaillée jusqu'au niveau de chaque lotissement (CNRC, 2005). Une telle approche vise essentiellement à développer des plans d'interventions où des infrastructures/ouvrages/aménagements adaptés à ces différentes échelles spatiales sont mis en place, chacun(e) visant à assurer un contrôle des divers types d'événements pluvieux. Cet aspect est d'autant plus important que les gestionnaires et maîtres d'œuvre des ouvrages de gestion des eaux pluviales peuvent varier selon les échelles spatiales considérées, pouvant aller de plusieurs municipalités à l'échelle des bassins versants, à une municipalité pour un secteur de développement ou encore à un

propriétaire à l'échelle d'un lotissement (résidentiel, commercial, industriel ou institutionnel).

Les mesures d'adaptation envisageables peuvent être regroupées en cinq catégories soit : 1) les mesures de gestion et d'entretien des réseaux existants (ex. programme d'inspection des clapets, etc.); 2) les mesures et aménagements de contrôle à la source, visant à ralentir et à réduire les apports au réseau (ex. bandes filtrantes, fossés de rétention, accroissement des capacités de rétention en surface, etc.); 3) la construction ou le remplacement d'ouvrages de transport et de stockage (ex. conduites, bassins de rétention en aval des points de débordement, etc.); 4) les mesures visant à réduire les apports des surfaces imperméables (ex. programme de débranchement des gouttières); 5) la reconfiguration des réseaux de drainage (ex. interconnexion entre les bassins); et 6) le contrôle dynamique des ouvrages de régulation en temps de pluie.

À ces mesures dites structurales, impliquant la mise en place d'ouvrages d'ingénierie ou l'aménagement de sites en vue de contrôler les volumes et/ou la qualité du ruissellement, s'ajoute une panoplie de mesures dites non structurales. Les mesures non structurales consistent en des pratiques institutionnelles et de prévention qui visent à prévenir ou à minimiser la présence d'éléments polluants dans le ruissellement urbain et/ou à réduire le volume des eaux de ruissellement; elles n'impliquent aucun dispositif ni aménagement permanent, mais visent plutôt une modification des comportements, que ce soit par la réglementation, la persuasion ou des incitatifs économiques (Taylor et Fletcher, 2007; Taylor et Wong, 2003). Les mesures non structurales comprennent un ensemble de mesures directement applicables sur le terrain (par exemple, le balayage des rues pour réduire la quantité de polluants pouvant être entraînée par le ruissellement des eaux de pluie) et de stratégies visant à mettre en place des mesures de gestion des eaux pluviales, qu'elles soient structurales ou non structurales (par exemple, les plans municipaux de gestion des eaux pluviales, les programmes de sensibilisation et d'éducation, les mécanismes de financement, etc.) (Taylor et Fletcher, 2007). Bien que l'efficacité de quelques mesures non structurales ait été démontrée dans certaines villes d'Amérique du Nord et d'Océanie (par exemple, par Taylor et Fletcher, 2007), ces résultats et expériences demeurent toutefois difficilement transférables.

L'examen critique et l'analyse des conditions d'application de ces différentes mesures dépassent largement le cadre du présent document. Une présentation sommaire de quelques mesures de type contrôle à la source est toutefois présentée à l'Annexe G. Il existe par ailleurs, à l'heure actuelle, tout un spectre de mesures structurales et non structurales, d'aménagements, d'ouvrages, d'infrastructures susceptibles d'assurer un contrôle quantitatif et qualitatif des eaux pluviales émanant de différents types d'événements pluvieux (faibles intensités → fortes intensités) et adaptés aux conditions de divers sites (faible densité → forte densité). Une littérature plus qu'abondante existe en cette matière (une liste bibliographique de différents guides est présentée à la fin de l'Annexe G).

5.2 Objectifs et structure générale

L'implantation d'un mode de gestion adaptative passe par l'élaboration d'un plan d'intervention visant à définir les interventions en réseau en fonction d'un ensemble d'objectifs préalablement identifié. Les objectifs d'un plan d'intervention intégrant la dimension climatique peuvent être définis comme suit : 1) maintenir un niveau de risque « acceptable », ou encore diminuer ce risque, dans un contexte de climat en évolution; 2) limiter au possible les impacts négatifs sur les milieux récepteurs (tant en matière de qualité des eaux que de modification des régimes hydrologiques); 3) implanter des principes de gestion intégrée des eaux pluviales au schéma actuel de gestion. Ces objectifs doivent être clairement établis et des indicateurs de performance précisés avant de procéder à une analyse du système. Si ces objectifs demeurent somme toute similaires aux objectifs qui pourraient être définis dans un contexte de climat stationnaire, la prise en compte des CC impose qu'une planification plus prospective soit mise en place. Il ne s'agit pas uniquement, par exemple, de remplacer une conduite existante par une conduite similaire, mais de se demander comment évoluera le niveau de service et de performance du système en regard des différents scénarios d'intervention possibles (par exemple, augmentation du diamètre de la conduite, implantation à moyen terme de différentes mesures de contrôle à la source, etc.), et ce, dans une perspective où les probabilités d'occurrence d'événements extrêmes évolueront tout au long de la durée de vie utile des différentes composantes du système. Ainsi, dans le cas du remplacement d'un tronçon de réseau, il importe de se demander

si le remplacement de ce tronçon par des conduites de même diamètre, par exemple, n'entraînera pas à l'horizon de quelques décennies une augmentation déraisonnable des probabilités de surcharge du réseau, auquel cas diverses options doivent être examinées et analysées (par exemple, augmentation des diamètres des conduites de ce tronçon, ajout de bassins de rétention, aménagements de type contrôle à la source afin de diminuer les apports, etc.).

L'analyse des différents scénarios d'aménagements doit donc se faire dans un cadre : 1) prospectif (évaluation périodique de la performance du système en fonction des projections climatiques disponibles); et 2) global (identification de stratégies globales à l'échelle de secteurs, ou de l'ensemble du réseau, afin d'atteindre les objectifs de gestion). La figure 5.1 présente de manière schématique de la démarche proposée. Les différentes étapes de cette approche sont explicitées dans les paragraphes suivants. Cette démarche, dans la version présentée dans ce qui suit, est sans doute mieux adaptée aux municipalités de grandes tailles puisque, comme les paragraphes suivants le montreront, elle implique la mise en œuvre d'outils et de moyens dont seules les grandes municipalités peuvent généralement disposer. Le cas des petites et moyennes municipalités est brièvement discuté en conclusion.

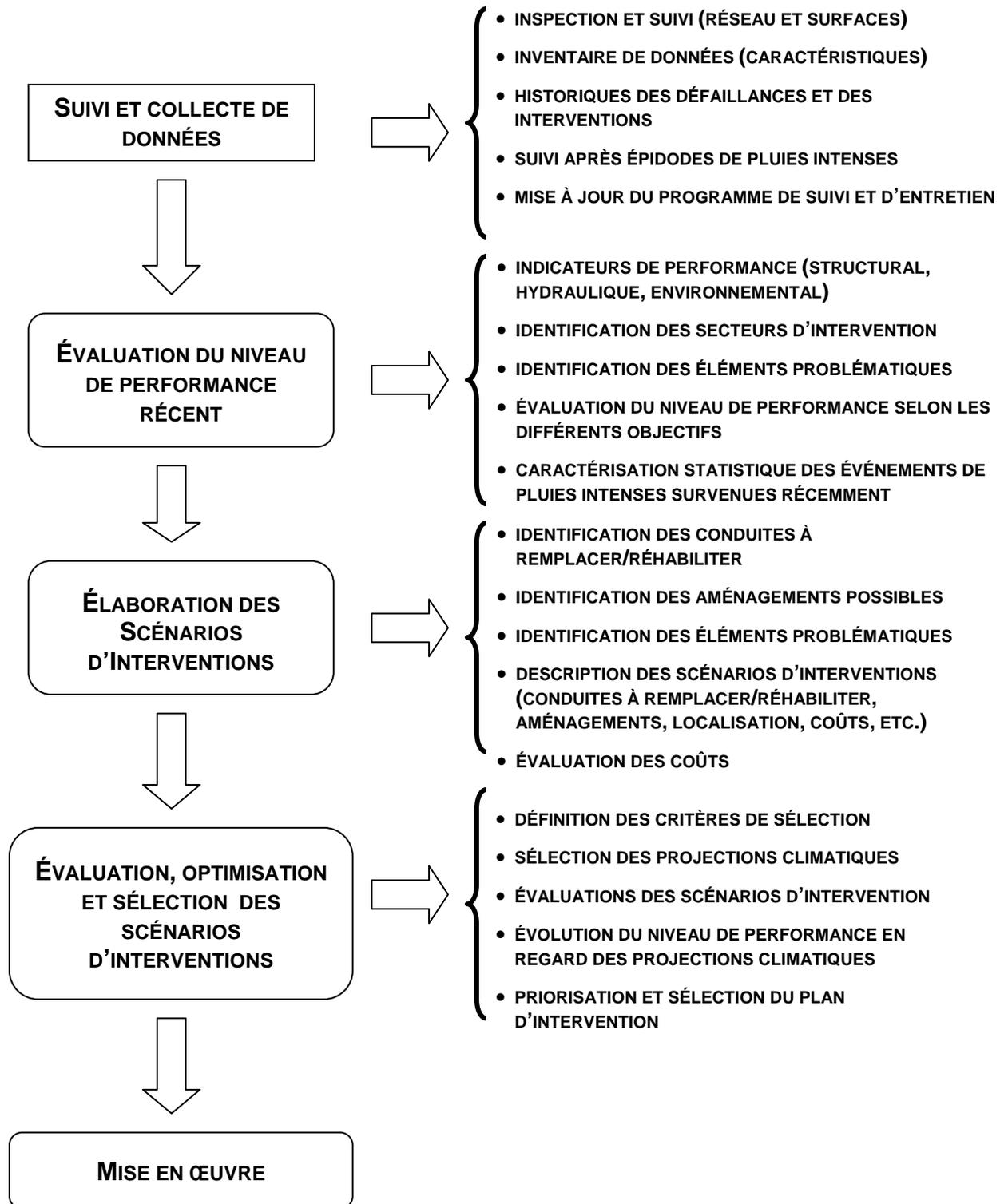


Figure 5.1 Structure globale d'élaboration et d'évaluation des plans d'intervention

Il importe de mentionner que nous reprenons dans ce qui suit l'ensemble de la démarche proposée, et non pas seulement les éléments ponctuels à considérer dans un contexte de CC. Cette façon de faire a été privilégiée puisqu'il n'existe pas, à notre connaissance, d'approche standard en matière d'élaboration des plans d'intervention, approche qu'il aurait été possible d'adapter pour intégrer les considérations relatives aux CC. L'approche proposée a, par ailleurs, enfin selon ses auteurs, le mérite de demeurer suffisamment générale pour pouvoir s'adapter à différents contextes. Enfin, plusieurs éléments de cette démarche nécessitent, à des degrés divers, la mise en place d'outils d'analyse qui seront, le cas échéant, mentionnés (par exemple, modèles de simulation, bases de données, systèmes d'information géographique, etc.). Par ailleurs, certaines étapes de la procédure d'analyse proposée ne seront pas détaillées, plusieurs éléments méthodologiques restant à préciser (identification des indicateurs, définition des critères de performance, démarche d'analyse multicritère, etc.). L'accent sera plutôt mis sur les aspects et éléments de la méthodologie qui sont directement liés à la question des CC.

5.3 Suivi et collecte des données

Toute démarche d'analyse d'un système donné, quel qu'il soit, exige qu'un ensemble de données et d'information soit colligé afin de procéder à ladite analyse et à une évaluation de la capacité de ce système à satisfaire les objectifs de performance préalablement définis. Dans le cas de systèmes de drainage urbain, on peut subdiviser ce travail de suivi et de collecte de données en cinq principales tâches, selon le type de données colligées : 1) mise à jour de l'inventaire des actifs (infrastructures, ouvrages, BMP, etc.) 2) données sur l'état structural et hydraulique du réseau (diagnostic de l'état structural du réseau, suivi et entretien, plaintes, etc.); 3) données acquises suite à des événements de pluies intenses ayant causé, ou non, des problèmes ou des dommages (niveaux, mesures de débits, observations, plaintes, coûts des dommages et réclamations, etc.); 4) données sur les impacts environnementaux (qualité du milieu récepteur, nombre de déversements); 5) données météorologiques (événements de pluies intenses). Ces différents groupes de données visent essentiellement, d'une part, à permettre d'établir un portrait le plus fidèle possible de l'évolution de la performance du système et d'estimer dans quelle mesure il rencontre et a rencontré les objectifs de

gestion prescrits. D'autre part, ce travail doit servir à identifier les lacunes du programme d'entretien, de suivi et de collecte et à mettre à niveau, le cas échéant, le dit programme.

5.3.1 Inventaire des actifs

Il est important de disposer d'un inventaire aussi complet et détaillé que possible des ouvrages et infrastructures en place (CNRC, 2004; voir aussi Halfawy, 2008 et Pelletier *et al.*, 2003 pour une discussion de la question des données et de l'inventaire des actifs). Plusieurs outils existants permettent de structurer, de consulter et de manipuler ces données (système d'information géographique (SIG), base de données; voir Halfawy *et al.*, 2006). Cet inventaire doit aussi comprendre un volet de mise à jour de l'information sur le suivi des actifs (entretien), les coûts, les mises à niveau et toute information susceptible d'affecter la performance ou le niveau de service de l'ouvrage (CNRC, 2004).

5.3.2 État structural des réseaux

Les réseaux de collecte des eaux sont enfouis et l'évaluation de la qualité de leur état structural exige d'avoir recours à différentes techniques d'inspection et d'auscultation (le lecteur est invité à consulter à cet effet les documents produits par le CERIU (www.ceriu.qc.ca) pour une description de ces techniques). Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour caractériser cet état et plusieurs techniques de classification des défauts structuraux existent (la revue de ces indicateurs dépassant cependant largement le cadre de la présente étude). Ces données et indicateurs permettent de caractériser l'état structural des conduites du réseau et d'identifier, le cas échéant, les tronçons à remplacer ou à réhabiliter en priorité. Un état structural déficient peut diminuer la capacité d'écoulement en réseau (par exemple, si des racines obstruent une partie de la section d'écoulement), favoriser les infiltrations d'eau, voire même entraîner l'effondrement de la chaussée (si, par exemple, les eaux ont lessivé le sol autour des conduites). La caractérisation de l'état structural du réseau exige au préalable que les caractéristiques de ce dernier soient connues et mises à jour. Ces caractéristiques incluent une description de la topologie du réseau (position des conduites et des différentes composantes du réseau, surfaces des bassins alimentant les différents

secteurs), l'année d'installation, le diamètre, la pente, le matériau des conduites, les types de sols, etc.

5.3.3 Suivi suite à des événements de pluies intenses

La performance hydraulique détermine la capacité du réseau à évacuer les eaux pluviales (ou unitaires). Il demeure toutefois difficile de mesurer directement cette performance. Certes, une évaluation de l'état structural permet aussi de porter un diagnostic partiel sur la performance hydraulique ou de repérer certaines anomalies susceptibles de réduire la capacité hydraulique (par exemple, présence de sédiments ou d'objets dans les conduites), mais généralement aucune mesure directe ne permet d'apprécier la performance hydraulique (des mesures de niveaux ou de débits sont prises en certains points mais rarement à grande échelle; de telles données peuvent être disponibles suite à des études de caractérisation ou de campagnes conduites dans le cadre d'études de conception des ouvrages de rétention en place.). La performance hydraulique est plutôt caractérisée en fonction de la fréquence des « dysfonctionnements » observés, c'est-à-dire la fréquence des épisodes de refoulements ou de débordements répertoriés. Évidemment, cette évaluation « après fait » n'est pas sans poser de problème puisque les dommages engendrés peuvent être importants et que, par ailleurs, l'incapacité du réseau à évacuer les eaux de ruissellement associées à un événement ne signifie pas nécessairement une capacité hydraulique déficiente du réseau (voir discussion en introduction du chapitre 5).

La collecte et le suivi de la performance du réseau suite à des événements de pluies intenses sont donc essentiels pour permettre une appréciation, même partielle, même indirecte, de la performance hydraulique du réseau et de sa capacité à évacuer les eaux pluviales (ou unitaires) en regard des différents événements pluvieux (cette évaluation demande toutefois à ce que des données météorologiques soient colligées pour chacun de ces événements; voir section 5.3.5). Les données et informations à colliger concernent tant les données sur les secteurs affectés (types de problème (inondation en surface ou refoulement), types de secteur (résidentiel, commercial, industriel, etc.), ampleur des dégâts, nature des dommages (bris d'équipement, sous-sols inondés,

commerces, etc.) que le type d'intervention requis (évacuation, réparation, remise en état, etc.). Outre ces données à caractère technique, qui permettent de retracer le fil des événements et d'éventuellement porter un diagnostic sur les causes possibles des dommages, des données à caractère économique peuvent aussi être colligées (nombre de réclamations, coûts des réclamations, impacts sur les activités économiques et commerciales, coûts des interventions).

5.3.4 Impacts environnementaux

Il importe d'assurer un suivi des impacts environnementaux afin de vérifier l'atteinte ou non des objectifs. Cet objectif de gestion peut par ailleurs regrouper l'ensemble des considérations liées à la mise en place d'une gestion respectant les principes de gestion intégrée des eaux pluviales. Un suivi de la qualité biologique, bactériologique et chimique des cours d'eau récepteurs et des écosystèmes pourra permettre notamment d'évaluer l'efficacité des différents aménagements mis en place dans l'espace urbain, par exemple, en vue de réduire les charges polluantes acheminées au cours d'eau récepteur (un tel suivi peut être réalisé par une autre instance que la municipalité mais il importe que ces données soient considérées dans le cadre élargi de l'analyse de la gestion des eaux pluviales). Une caractérisation du territoire urbain en matière d'espaces verts, et plus généralement d'occupation du territoire, est aussi un outil essentiel de planification dans un contexte de planification des interventions, notamment celles visant à réduire les apports au réseau (volumes et charges polluantes).

5.3.5 Suivi météorologique

La collecte de données météorologiques sur le territoire desservi par le réseau de collecte des eaux pluviales est essentielle dans la mesure où l'on souhaite procéder à une analyse *a posteriori* des événements intenses ayant frappé ce territoire et ainsi reconstruire le fil des événements suite à des inondations et/ou refoulements. Le recours à des données provenant de stations opérées par les gouvernements provinciaux ou fédéraux est, à cet égard, essentiel, surtout pour les petites localités n'ayant pas les ressources pour opérer une station météorologique. Par ailleurs,

l'utilisation d'images radar peut s'avérer très utile dans certains cas pour permettre une caractérisation de l'événement pluvieux ayant frappé un territoire.

Pour les municipalités disposant d'un réseau dense et de longs historiques de données, il peut être très intéressant de procéder à une analyse statistique de ces données afin d'établir des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) sans doute mieux adaptées aux conditions locales, plus récentes que celles actuellement disponibles et pouvant être périodiquement mises à jour (voir section 4.2). Enfin, l'examen des tendances en matière d'événements extrêmes sur un territoire municipal donné peut s'avérer très intéressant dans un contexte de CC afin de voir si les probabilités d'événements de pluies intenses sont effectivement à la hausse et conformes aux projections climatiques. Une telle analyse n'est cependant possible que si des historiques assez longs sont disponibles. Par ailleurs, le recours à une expertise externe (consultant, université) pourra être nécessaire puisque les techniques statistiques en cause sont parfois pointues.

5.4 Évaluation du niveau de performance

Les données et informations colligées à l'étape précédente serviront à établir un diagnostic quant à la capacité du système à répondre aux objectifs de performance prescrits. Si, antérieurement, aucun cas n'était fait de la possibilité d'une détérioration de la performance pour cause d'occurrences de plus en plus fréquentes de situations de pluies intenses dépassant les limites de conception des ouvrages, cette éventualité doit dorénavant être envisagée et analysée.

Divers indicateurs et indices peuvent être définis afin d'évaluer le niveau de performance du système sous examen. Les indicateurs en question devront permettre de définir les niveaux de performance du système en regard des différents objectifs de gestion (état structural, performance hydraulique, suivi environnemental, etc.) préalablement définis. L'établissement de pareils indicateurs est intimement tributaire de la nature, de la quantité et de la qualité des données recueillies. L'absence ou l'insuffisance de données

rendra plus erratiques l'évaluation de la performance du réseau et la planification des interventions (ce problème risque d'être d'autant plus criant pour les petites localités).

Il ne saurait être question de passer en revue dans le cadre de ce rapport l'ensemble des systèmes de notation proposés dans la littérature pour caractériser, par exemple, l'état structural des réseaux ou des démarches visant à combiner différents indices pour identifier les stratégies d'intervention appropriées. Par ailleurs, l'analyse et la reconstitution *a posteriori* des conditions ayant conduit à des refoulements ou inondations reposent sur une investigation réalisée à partir des données colligées pendant ces événements. Il est difficile à cet effet de proposer et de décrire une approche générique valable en toutes situations et pour toutes municipalités. En général, dans le cas d'événements où des dommages importants ont été causés et où les réclamations sont nombreuses, un mandat est confié afin d'analyser les éléments d'information et de proposer par la suite une série de recommandations quant aux interventions ou modifications à apporter.

Comme il est mentionné plus haut, la prise en compte de l'hypothèse climatique exige que la méthodologie d'analyse soit adaptée afin qu'elle puisse explicitement envisager cette hypothèse, d'où l'importance de procéder à une caractérisation et à une investigation plus détaillée et plus systématique des événements survenus sur un territoire donné. À cette fin, il peut être utile d'établir un classement des différents événements, établi en fonction de la comparaison de la performance escomptée (période de retour de l'événement et critère de conception) et de la performance réelle (occurrence ou non de refoulements/inondations, caractérisation de l'étendue et de l'ampleur des dommages, coût total des réclamations, etc.).

L'évaluation de la performance globale du système permet de porter un diagnostic et d'identifier les défaillances du système et de statuer sur le caractère extrême des événements de pluie. Il faut toutefois rester prudent quant aux possibles conclusions d'une telle analyse. En effet, la complexité des systèmes en jeu (diversité des réseaux, des occupations du territoire, etc.) et la caractérisation souvent grossière des

événements pluvieux (faible densité de pluviomètres, caractère très local et très dynamique des pluies, etc.) feront en sorte qu'il sera très souvent difficile d'associer un niveau de risque à chacun de ces événements et d'ainsi estimer un niveau de performance. À moins, donc, d'une analyse détaillée à partir d'une caractérisation extensive des événements, il restera difficile de procéder à une évaluation structurée et rigoureuse du niveau de performance d'un système de collecte des eaux pluviales face à un événement donné et d'ainsi établir clairement si le risque réellement encouru était conforme au risque établi à la conception du réseau. Le recours à l'expérience et à l'expertise des gestionnaires sera à cet égard critique. Cette mise en garde formulée, il n'en demeure pas moins important de procéder à cette analyse rétrospective des événements de pluies intenses et de statuer, même sur la base d'une appréciation qualitative à partir des informations et données récemment colligées, sur l'évolution globale du niveau de performance dans divers secteurs urbains.

5.5 Élaboration des scénarios d'interventions

L'analyse des différents indices de performance permettra une première identification des défaillances (par exemple, secteurs sujets à des refoulements/inondations sur une base régulière), des éléments à remplacer ou à réhabiliter (par exemple, tronçons de réseau en piètre état ou encore de capacité dorénavant insuffisante) et des ouvrages exigeant certains travaux (par exemple, suite à la réduction de capacité de certaines tranchées d'infiltration). Plus globalement, aux objectifs traditionnels de protection contre les inondations peuvent s'ajouter des objectifs plus stricts en vue de réduire les apports au réseau et d'améliorer la qualité des eaux de ruissellement, auxquels cas des aménagements de type contrôle à la source pourront être envisagés et intégrés à la planification en cours. L'élaboration de scénarios d'intervention dans un contexte de CC implique l'adoption d'une approche plus large où, aux interventions visant à remplacer/réhabiliter différentes composantes du système, s'ajoutent celles visant à introduire différents aménagements afin de maintenir un niveau de performance acceptable à long terme considérant les projections climatiques disponibles.

5.6 Évaluation et optimisation des scénarios d'intervention

Dans un contexte de CC, les scénarios d'intervention doivent être non seulement évalués et élaborés en fonction de la performance globale et des déficiences observées par le passé mais aussi en fonction de la performance appréhendée en climat futur. De manière générale, sur la base de considérations scientifiques et techniques à ce jour les plus rigoureuses, l'évaluation de cette performance devrait se faire à partir d'une modélisation hydrologique des différents scénarios d'intervention (voir figure 5.2). La méthode générale d'évaluation des scénarios d'intervention devra comporter les étapes suivantes : 1) établissement de la liste préliminaire des scénarios d'intervention; 2) établissement des scénarios de projections climatiques et des pluies types à considérer; 3) évaluation du niveau de performance du scénario considéré; 4) comparaison au critère de performance escompté; 5) révision du scénario d'intervention; 6) sélection du scénario à mettre en œuvre parmi les scénarios retenus. Les paragraphes suivants présentent une description de chacune de ces étapes.

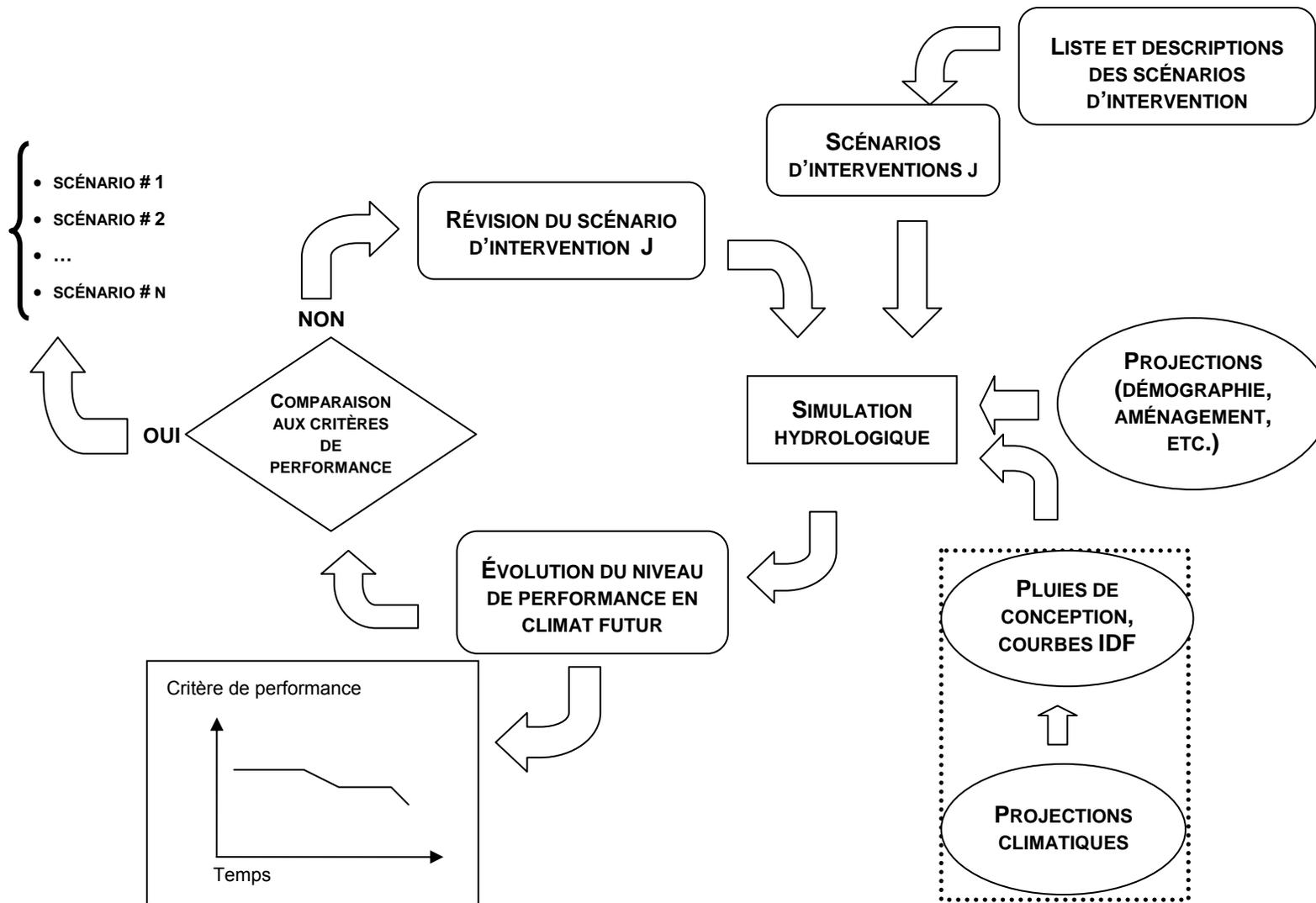


Figure 5.2 Évaluation et optimisation des scénarios d'intervention en regard des projections climatiques disponibles

5.6.1 Liste préliminaire des scénarios d'intervention

Cette liste sera établie sur la base des analyses de performance réalisées à l'étape précédente. Cette liste est dite préliminaire en ce sens qu'elle est appelée à être complétée et précisée dans le cadre de l'évaluation décrite plus bas. Les divers scénarios seront élaborés sur la base de considérations relatives à l'état structural et de la performance passée du système, mais aussi de considérations liées à l'évolution à long terme des probabilités d'occurrence d'événements extrêmes. C'est dire que le gestionnaire devra faire une part plus grande aux mesures susceptibles d'être bénéfiques à cet égard, et donc « saisir » les diverses opportunités qui se présenteront au fil des réaménagements du territoire et des mises à niveau des infrastructures et ouvrages déjà en place. Ces différents scénarios pourront se distinguer par l'amplitude plus ou moins grande qui sera accordée à des mesures de type contrôle à la source versus des mesures affectant directement le réseau et les parties aval du réseau.

5.6.2 Scénarios de projections climatiques

L'évaluation de la performance future des systèmes dans le cadre de la mise en place d'un plan d'intervention donné exige de préciser la nature et l'ampleur des modifications climatiques appréhendées. Dans le cas des réseaux de collecte des eaux pluviales, ces scénarios doivent préciser l'évolution de différentes caractéristiques statistiques des pluies et notamment des pluies extrêmes (voir le chapitre 2 pour une description des modèles climatiques et des différents concepts liés à la modélisation du climat). L'élaboration de ces scénarios dépasse largement le cadre strict de la gestion des réseaux urbains. Ces scénarios devront être fournis aux gestionnaires municipaux sur la base d'analyse des résultats de modèles les plus récents (l'élaboration de ces scénarios devra être confiée à des groupes possédant une expertise en ce domaine). Il est important que les résultats les plus à jour soient utilisés et qu'une mise à jour périodique de ces projections soit réalisée par une instance possédant les compétences pour le faire. Les sections 4.2 et 4.3 donnent un aperçu de la forme et de la nature des changements appréhendés en matière de pluies intenses et les sections 4.4 à 4.6 expliquent comment ces changements affecteront la définition des critères de conception. Si l'approche proposée s'applique bien à la conception de plusieurs ouvrages (en effet, une période de retour « de conception » est définie qui permet de calculer la dimension de l'ouvrage considéré), il peut être plus avantageux de procéder autrement dans un contexte où une modélisation complète du secteur sous étude est réalisée afin d'évaluer la performance à long terme des plans d'intervention

proposés. L'utilisation de pluies réelles ou de pluies de conception est sans doute plus indiquée dans ce cas. Plusieurs approches sont alors possibles pour traduire les projections climatiques en matière de pluies réelles ou de conception. Ici encore, l'élaboration d'une procédure « standardisée » en vue de l'élaboration des projections climatiques en matière de pluie de conception ou de modification des pluies réelles reste à élaborer (voir Mailhot *et al.*, 2006b et Guo, 2006 pour des exemples de telles approches).

5.6.3 Évaluation du niveau de performance du scénario considéré

Une fois la liste des scénarios d'intervention élaborée et les pluies à considérer dans un contexte de CC définies, il est possible de procéder à l'évaluation du niveau de performance de chacun des scénarios d'intervention proposés. Cette évaluation demande : 1) à ce qu'un modèle hydrologique soit sélectionné et mis en place; et 2) que des critères de performance soient identifiés et/ou définis. Le choix du modèle hydrologique repose sur un ensemble de considérations techniques (voir à ce sujet Obropta et Kardos, 2007; Elliot et Trowsdale, 2007; Zoppou, 2001). L'aspect sans doute le plus important à considérer lors de la sélection du modèle est la nature du problème pour lequel on cherche à trouver des réponses et la nature de ces réponses (autrement dit, il faut que le modèle puisse apporter des éléments de réponse pertinents aux questions posées). Il importe de sélectionner un modèle dont le niveau de complexité est adapté au problème considéré. La complexité croissante du modèle exigera en effet une caractérisation plus fine du système réel, donc un ensemble plus considérable de données à colliger, et se traduira par une mise en place plus lourde et vraisemblablement plus longue (Obropta et Kardos, 2007). Par ailleurs, l'intégration aux plans d'intervention de mesures de type contrôle à la source implique évidemment que les modèles hydrologiques considérés puissent simuler ce type d'aménagement.

Les critères de performance seront établis en fonction des objectifs de gestion prescrits (CNRC, 2002). Ces critères seront évalués sur la base des résultats de simulation et pourront consister en différents estimateurs statistiques (moyenne spatiale ou temporelle) de variables de débits ou de volumes en divers points du réseau. La performance du système sous examen devra être évaluée en fonction de projections climatiques disponibles, et ce, pour un horizon de temps futur prédéfini. Il sera dès lors nécessaire de spécifier, pour chaque plan d'intervention, un calendrier préliminaire des interventions sur l'horizon en question.

5.6.4 Comparaison aux critères de performance

Le niveau de performance et son évolution en fonction du temps seront comparés avec les objectifs de performance préalablement définis (voir section 5.2). Le scénario d'intervention est retenu dans l'éventualité où le niveau de performance du système est jugé acceptable pour la période considérée. Ceci implique que le niveau de performance minimal pendant la période considérée doit être établi. Dans le cas où le critère de performance n'est pas satisfait, le scénario sera modifié afin d'en améliorer le niveau de performance et sera réévalué en regard des projections climatiques disponibles.

5.6.5 Révision des scénarios d'intervention

Le caractère itératif du processus d'évaluation des différents plans d'intervention s'impose considérant la complexité du système en cause et la difficulté *a priori* de préciser l'ensemble des paramètres des divers scénarios afin d'assurer une performance maximale pendant toute la période d'analyse considérée (Figure 5.2). Diverses modifications pourront ainsi être apportées au scénario original afin d'en améliorer la performance globale ou de permettre une performance plus constante au fil des années. Comme il a été précisé à la section 5.6.1, les scénarios d'intervention préliminaires pourront se distinguer par la répartition et la configuration des mesures de type contrôle à la source versus des mesures touchant plus spécifiquement le réseau. Le processus itératif d'évaluation vise davantage à procéder au réglage de précision (« fine-tuning ») des plans d'intervention et à vérifier la sensibilité de la performance lorsque différents paramètres sont modifiés (par exemple, la capacité de certains aménagements, la configuration des aménagements). Un scénario d'intervention ne permettant pas, même après révision, de respecter les critères de performance ne sera évidemment pas retenu. Il est clair que cet exercice demandera une certaine expertise et une certaine expérience et s'apparentera au début à un processus d'apprentissage par « essais et erreurs ». Des lignes directrices pourront éventuellement se dégager après l'examen de différents secteurs et de différents plans d'intervention.

5.6.6 Sélection finale du plan d'intervention

Le plan d'intervention à mettre en place sera finalement sélectionné parmi les scénarios d'intervention retenus. À ce stade, il pourra être nécessaire de procéder à une caractérisation plus

poussée des scénarios disponibles, notamment afin d'estimer les coûts de mise en place. La sélection d'un plan d'intervention implique que divers critères devront être comparés, touchant à la performance, aux coûts (mise en place et entretien) et à divers critères plus intangibles comme la perception du risque des citoyens ou la recevabilité sociale de solutions potentielles s'écartant des solutions en usage. Ces questions cruciales sont discutées en conclusion.

6. CONCLUSION

Les aléas météorologiques de toutes sortes peuvent entraîner des dommages importants aux infrastructures publiques et aux propriétés privées. Au Canada, Lemmen *et al.* (2008) rapportent que les coûts des dommages causés par les événements météorologiques extrêmes survenus au cours de la dernière décennie (1996-2006) ont dépassé les coûts totaux des dommages associés aux événements survenus antérieurement à cette période. Les pluies intenses sont évidemment à compter parmi ces aléas météorologiques. Outre les crues en rivière et les possibles inondations qui peuvent en résulter, ce type d'événements peut entraîner des inondations en milieu urbain, conséquence de l'incapacité des réseaux de collecte des eaux pluviales à capter et à évacuer les eaux de ruissellement (voir Mailhot *et al.*, 2006b pour une liste et une caractérisation des événements de ce type ayant frappé le territoire québécois au cours des dernières décennies). Inondations de divers secteurs de la ville et de sous-sols résidentiels sont le lot habituel de pareils épisodes météorologiques dont les médias font régulièrement état. Les coûts économiques, sociaux et humains associés aux inondations/refoulements en milieu urbain sont considérables et ne sauraient donc être négligés.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'incapacité des systèmes de collecte des eaux pluviales à évacuer un événement pluvieux donné. À ce titre, un événement pluvieux similaire qui survient à 10 ou 20 ans d'intervalle pourra avoir des conséquences très différentes suite, par exemple, à une modification au fil des ans du pourcentage du territoire imperméabilisé. Par ailleurs, il est clair que les réseaux n'ont pas été conçus pour évacuer « toutes » les pluies. En effet, un niveau de performance est préalablement fixé, défini en fonction de la probabilité d'occurrence d'événements de pluie dont l'intensité dépassera la capacité des ouvrages.

L'estimation de l'occurrence d'épisodes pouvant entraîner un dépassement de la capacité des systèmes ne pose pas de problèmes particuliers dans le contexte d'un climat où les probabilités d'occurrence d'événements extrêmes restent inchangées (régime stationnaire). Cette probabilité de dépassement est évaluée sur la base d'une analyse des données historiques de pluie sur le territoire

considéré. Épisodiquement, des événements entraînant des inondations/refoulements surviendront, mais la durée moyenne séparant ces événements restera inchangée et suffisamment longue pour être perçue comme un événement malencontreux, une fatalité en quelque sorte, un préjudice « acceptable » puisque perçue comme « inévitable ». Toute cette notion de perception du risque et d'acceptabilité est toutefois hautement volatile. En fait, il est permis de penser que les gens, au Canada et au Québec, ont tendance en général à être de moins en moins « tolérants » face au risque et ont des exigences de plus en plus élevées face à ce qu'ils estiment comme un risque « acceptable ». Par ailleurs, la perception du risque évolue aussi en fonction de l'expérience passée des communautés et des individus qui les composent.

Les choses en seront autrement cependant dans un contexte de régime pluviométrique non stationnaire, c'est-à-dire un régime où les indicateurs statistiques caractérisant les pluies évoluent au fil du temps (par exemple, si la moyenne des pluies mensuelles augmente ou les épisodes de pluie intenses sont plus fréquents). Il est facile de se convaincre que, dans le cas plus spécifique où les épisodes de pluies intenses seront plus fréquents (et, de façon corollaire, les pluies de fréquence donnée seront plus intenses), les probabilités de dépassement de la capacité des installations en place seront elles aussi plus grandes et ces dépassements plus importants. Or, il appert, selon les projections climatiques actuelles, que les événements de pluies intenses seront plus intenses, notamment pour la région sud du Québec. Mailhot *et al.* (2007a) ont ainsi estimé, sur la base d'une analyse de résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du climat (MRCC) que les périodes de retour des événements de durées 2 heures à 24 heures devraient diminuer de moitié à l'horizon 2080. Les impacts directs de ces changements seront une augmentation des volumes de ruissellement et des débits de pointe de ruissellement et potentiellement une augmentation du nombre d'épisodes d'inondation en milieu urbain. Il convient de noter que le document d'Infrastructure Canada (2006), citant en cela Auld et McIver (2006), mentionne qu'une augmentation des intensités des événements extrêmes au-delà d'un certain seuil entraînera sans doute une augmentation disproportionnée des dommages par rapport à celle des pluies.

Les modifications au régime climatique se feront graduellement sentir. C'est dire, par exemple, qu'au cours des décennies à venir, les probabilités d'occurrence d'événements majeurs, dépassant les capacités actuelles d'évacuation des systèmes de gestion des eaux pluviales, croîtront. Cette lente évolution exige la mise en place, elle aussi progressive et adaptative, de mesures (aménagement,

ouvrages, infrastructures) visant à maintenir, à tout le moins, le niveau de risque en climat futur à ce qu'il était au moment de la conception première des ouvrages. Cette « mise à niveau climatique » doit se faire en fonction des projections climatiques disponibles, des incertitudes qui leur sont associées et de l'inévitable révision dont elles seront l'objet (la modélisation du climat étant appelée à s'affiner et à s'améliorer au fil des années à venir). De même, il faut intégrer cette « mise à niveau climatique » dans un contexte plus large de réhabilitation/remplacement des infrastructures existantes, qui en sont pour plusieurs à la fin de leur vie utile. Ces considérations montrent l'importance d'adopter une approche de gestion des eaux pluviales adaptative qui mise sur l'implantation pondérée et progressive de mesures en fonction des données climatiques les plus récentes et des évaluations de niveaux de performance les plus à jour.

Une démarche a été proposée en ce sens dans le cadre de la présente étude. Elle suppose une évaluation périodique des niveaux de performance des systèmes en place, l'élaboration de scénarios d'intervention en fonction des objectifs de performance préétablis et des déficiences observées et enfin l'évaluation de la performance du système à moyen et long termes suite à l'implantation de ces scénarios d'intervention. Ce dernier aspect est crucial puisqu'il permettra d'apprécier l'évolution du niveau de risque en regard des projections climatiques disponibles, ce qui est important considérant que plusieurs infrastructures ont des durées de vie utile comparables à l'horizon temporel des projections climatiques.

L'intégration d'une dimension CC à l'élaboration des plans d'intervention ne peut donc se faire sans une prise en compte explicite de la dimension temporelle. Se limiter à des mesures où l'on remplace/réhabilite des ouvrages ou infrastructures afin de rétablir leur niveau de performance originel risque d'entraîner à long terme une augmentation significative des risques au-delà de ce qui aura été historiquement tolérable. Cette approche progressive, et l'analyse prospective qui doit l'accompagner, compliquent significativement, il faut le reconnaître, l'élaboration des plans d'intervention. Dans sa forme la plus achevée, elle exige une caractérisation et un monitoring régulier de l'état du système (état structural, capacité hydraulique des réseaux, suivi de la performance des différents ouvrages et aménagements), un archivage et une mise à jour de ces données (utilisation d'outils informatiques tels que bases de données, systèmes d'information géographique, etc.) et l'utilisation d'outils de modélisation à même d'évaluer la performance des systèmes en regard des plans d'intervention envisagés et des projections climatiques disponibles.

La promotion et l'adoption d'un tel mode de gestion des eaux pluviales n'est pas, à proprement parler, nouveau et, bien qu'il semble bien adapté à la problématique des CC, les raisons justifiant sa mise en place dépassent largement ce seul enjeu. En fait, l'adaptation des systèmes existants aux CC s'ajoute à de nombreuses autres considérations devant nous inciter à jeter un regard critique sur les pratiques actuelles en matière de drainage urbain (Chocat *et al.*, 2001). L'instauration d'un mode de gestion intégrée des eaux pluviales a été développée en réponse à plusieurs des principaux enjeux actuels en cette matière et l'intégration à un tel schéma de considérations liées aux CC ne pose pas de problème conceptuel particulier (CNRC, 2005; Marsalek et Chocat, 2002; Chocat *et al.*, 2001). D'ailleurs, plusieurs des intervenants du milieu ont souligné cet aspect et perçoivent les CC comme une opportunité de revoir les modes actuels de gestion et de conception.

Selon les projections actuelles, les CC risquent d'avoir des incidences sur le spectre complet des précipitations. Outre donc une augmentation des probabilités d'occurrence des pluies intenses, une modification globale des régimes pluviométriques est appréhendée, se traduisant pour les latitudes du sud du Québec par une augmentation des précipitations moyennes. L'impact d'une transformation de cette nature, s'il est moins « spectaculaire » qu'une hausse des intensités des pluies extrêmes, mérite cependant très certainement qu'on s'y attarde. L'impact pourrait être important dans les cours d'eau urbains où se déversent les eaux des réseaux unitaires et les eaux pluviales, exacerbant le phénomène de « syndrome du cours d'eau urbain » (Meyer *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 2005), faisant référence à la dégradation écologique des cours d'eau en milieu urbain, dont les réseaux de drainage seraient en partie responsables. Les mesures d'adaptation à envisager et les plans d'intervention doivent donc non seulement s'intéresser aux événements intenses mais aussi aux événements pluvieux de moins grandes intensités afin de réduire au maximum les charges de polluants acheminées au milieu récepteur.

Une prise en compte effective des CC dans l'élaboration des plans d'intervention, ou plus généralement dans la gestion des eaux pluviales, impose, de l'avis même des intervenants du milieu, une révision substantielle des façons de faire et de penser. Les défis sont en effet nombreux et dépassent les simples considérations techniques. Différentes barrières à l'adaptation aux CC ont été, de fait, identifiées dans le cadre de ce travail. La mise en place à grande échelle d'un mode de

gestion intégrée et adaptative des eaux pluviales, cadre bien adapté à la prise en compte des CC, demeure pour l'instant très limitée et les exemples d'implantation sont peu nombreux (Brown, 2005; Montalto *et al.*, 2007; USEPA, 2000). Marsalek et Chocat (2002) reconnaissent d'ailleurs que l'implantation d'un cadre de gestion intégrée dans des secteurs déjà bâtis est encore très peu avancée. Mailhot *et al.* (2008a) proposent à cet effet une liste des principaux obstacles et embûches à l'implantation de ce mode de gestion (l'étude de Mailhot *et al.*, 2008a s'intéressait plus spécifiquement à l'implantation de solutions du type contrôle à la source au Québec, mais les considérations énoncées dans cette étude sont certainement valables dans le contexte élargi de la mise en place d'un mode intégré de gestion). Ces obstacles et éléments risquant de poser problème, qui recoupent en grande partie ceux identifiés dans le cadre de la présente étude, sont (voir Mailhot *et al.*, 2008a pour une description plus détaillée) : 1) la décentralisation des ouvrages et aménagements (ceci va à l'encontre d'une gestion traditionnelle centrée sur le système de collecte); 2) le fait que les enjeux liés aux eaux pluviales sont peu présents dans le débat public (d'où la difficulté de convaincre les instances décisionnelles de l'importance de cet enjeu); 3) la difficulté d'établir les responsabilités (par exemple, dans le cas d'aménagements localisés sur les propriétés privées); 4) la perception du risque par les citoyens et les gestionnaires (toute modification du mode de gestion des eaux pluviales, fondamentalement basée sur la notion de risque acceptable, soulèvera un certain scepticisme chez les citoyens et les gestionnaires); 5) un programme d'entretien plus exigeant et plus coûteux (un déplacement des coûts vers un mode d'entretien plus soutenu pourra être mal perçu par plusieurs organisations municipales, considérant la réorganisation du travail que cela implique et le caractère récurrent des coûts d'entretien); 6) des projets nécessitant la coordination de plusieurs expertises (la coordination de plusieurs intervenants et experts (ingénieurs, experts en aménagements paysagers, urbanistes) sont nécessaires, ce qui va l'encontre d'un mode de conception cloisonnant les différentes expertises au sein de la structure organisationnelle; Keeley, 2007); 7) le développement d'une expertise québécoise (le faible nombre d'expériences pratiques concrètes, de « vitrines » technologiques, alimente le scepticisme et fait en sorte que l'expertise en ce domaine est encore peu développée); et 8) la difficulté d'établir les avantages économiques et environnementaux à long terme (les modes d'évaluation des options ne prennent pas en compte les implications à long terme en matière environnementale, par exemple, et il devient difficile de justifier l'implantation de mesures plus coûteuses au départ; par ailleurs, la mise à niveau des secteurs déjà bâtis est assujettie à de nombreuses contraintes qui complexifient l'analyse et font augmenter les coûts).

Cette étude a par ailleurs permis de mettre en évidence l'importance du « monitoring climatique » et du monitoring de la performance des systèmes de drainage urbain. Par ces termes, les auteurs désignent la mise en place de programmes d'entretien et de suivi rigoureux permettant la collecte de données et d'information susceptibles d'aider le gestionnaire à statuer sur le niveau de performance des systèmes. Au volet touchant spécifiquement les systèmes de drainage urbain (aménagements, ouvrages et réseaux) doit dorénavant s'ajouter un volet « climatique ». Ce dernier vise essentiellement à assurer, d'une part, un meilleur suivi des événements de pluie s'abattant sur un territoire donné et, d'autre part, à procéder à une révision périodique des références utilisées pour la conception (courbes IDF et scénarios de projections climatiques). L'amélioration du suivi des événements pluvieux exige la mise en place d'un réseau de stations pluviométriques (particulièrement en milieu urbain ou près de ces derniers) que peu de municipalités peuvent se permettre pour des raisons de coûts et de ressources humaines. À cet égard, il serait peut-être opportun d'établir une collaboration plus étroite entre les instances des paliers supérieurs de gouvernements (gouvernements provinciaux et fédéral), responsables de l'opération des stations météorologiques, et les municipalités, et ce, afin de voir si certaines stations ne pourraient pas être ajoutées ou déplacées et aussi afin que les échanges d'information soient plus fluides entre ces organisations.

Concernant plus spécifiquement les courbes IDF, qui constituent encore aujourd'hui la principale référence pour la conception des ouvrages hydrauliques dans un sens large (dépassant largement le seul cadre urbain), il est absolument impératif de procéder à leur révision, et ce, dans les plus brefs délais. Plusieurs gestionnaires et consultants sont conscients que cette mise à jour est nécessaire et la réclament. Les courbes actuellement disponibles doivent être mises à jour et les méthodes d'estimation revues par la même occasion. Ce travail, de grande envergure, devra être réalisé par une instance nationale et un important travail de diffusion de ces nouvelles courbes devra être entrepris par la suite.

La présente étude a par ailleurs montré l'importance des scénarios de projections climatiques dans un cadre d'évaluation des options d'intervention à long terme. Ces projections climatiques, nous ne saurions trop insister sur ce point, sont le résultat de simulations climatiques réalisées à partir de modèles de simulations du climat. Ces projections s'affineront, seront plus précises, s'amélioreront en fonction de l'évolution des connaissances en matière de science climatique. Elles sont établies

par ailleurs sur la base de projections futures concernant l'évolution des GES. Même incertaines, ces projections demeurent essentielles à une évaluation des tendances à moyen et long termes des performances des systèmes de drainage et leur révision périodique doit être prise en compte dans le processus global de planification et d'élaboration des scénarios d'intervention. Ce travail incombe aux spécialistes en climatologie et en CC, qui devraient régulièrement proposer une version à jour des projections climatiques de même qu'une évaluation critique des incertitudes.

La question du suivi et de l'entretien des infrastructures (état structural, performance hydraulique, etc.), maintes fois évoquée dans le cadre de conférences et de colloques sur le sujet, demeure un incontournable. Il est impossible de statuer sur l'état d'un système sans un examen minimal de ce dernier et sans avoir recours à un minimum d'évaluation diagnostique. Certes, un équilibre est à rechercher entre le volume de données à cumuler, et conséquemment, la qualité du diagnostic, et les coûts de pareilles campagnes. De même, l'étendue du programme de suivi est à ajuster en fonction de la taille de la municipalité et des ressources disponibles.

Le cas des petites municipalités n'a pas été explicitement considéré dans le cadre de la présente étude. Le cadre d'évaluation proposé est générique et demande, tel qu'il est présenté, des ressources techniques et des expertises inaccessibles aux petites municipalités. L'élaboration de directives globales pourra, dans ce cas, être nécessaire. Ces directives pourront se traduire par des recommandations quant à une majoration des critères de conception de différents ouvrages selon la durée de vie utile de ces ouvrages. Ainsi, dans le cadre de cette étude, les auteurs proposent une approche afin d'estimer la période de retour à considérer à la conception en fonction : 1) de la période de retour applicable en l'absence de CC; 2) de la durée de vie utile; et 3) de l'année de référence définie comme l'année où la période de retour effective sera égale à la période de retour en l'absence de CC. Cette approche montre que la période de retour à considérer en contexte de CC sera d'autant majorée que la durée de vie utile de l'ouvrage est importante. Si cette directive a l'avantage d'être simple, elle ne doit cependant pas occulter le fait que d'autres mesures d'adaptation doivent aussi être considérées (par exemple, la mise en place de mesures de contrôle à la source, la diminution des apports des surfaces imperméables, l'interconnexion et la redistribution des apports entre différents sous-bassins, l'ajout de bassins de rétention, l'aménagement d'espaces verts, etc.) et qu'une planification plus globale combinant les aménagements à différentes échelles spatiales (lots, sous-bassins, bassins versants) doit être envisagée même dans le cas des petites localités. À ce

titre, il serait important qu'une mise en commun plus étroite et mieux structurée des expertises et des expériences des mondes municipaux, universitaires et gouvernementaux soit envisagée.

7. Références bibliographiques

- Adamowski, K., Alila, Y., et Pilon, P.J. (1996). Regional rainfall distribution for Canada. *Atmospheric Res.*, 42, 75-88.
- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Ceasar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stepenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., et Vasquez-Aguirre, J.L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res.*, 111, DO5109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Alila, Y. (1999). A hierarchical approach for the regionalization of precipitation annual maxima in Canada. *J. Geophys. Res.* 104(D24), 31645–31655.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Wat. Sci Tech.*, 54(6-7), 1-8.
- 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.
- Auld, H., et McIver, D. (2006). Changing Weather Patterns, Uncertainty and Infrastructure Risks: Emerging Adaptation Requirements. Environment Canada, Adaptation and Impacts Research Group, Toronto.
- 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.
- Bourque, A. (2000). Les changements climatiques et leurs impacts, *Vertigo* 1(2), (www.vertigo.uqam.ca).
- Brown, R.R. (2005). Impediments to Integrated Urban Strowwater Management: The need for Institutional Reform, *Environ. Manage.*, 36 (3), 455-468.
- Cantelaube, P., et Terres, J.-M. (2005). Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus A* 57, 476–487. (doi:10.1111/j.1600-0870.2005.00125.x)
- Chocat, B., Krebs, P., Marsalek, J., Rauch, W., et Schilling, W.M. (2001). Urban drainage redefined: From stormwater removal to integrated management. *Wat. Sci. Tech.*, 43, 61-68.
- 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.
- CNRC (2004). Gestion d'un actif d'infrastructures. Guide national pour des infrastructures municipales durables, Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et Fédération canadienne des municipalités (FCM), Ottawa, Canada, 48 p.

- CNRC (2003). Contrôle à la source et sur le terrain pour les réseaux de drainage municipaux. Guide national pour des infrastructures municipales durables, Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et Fédération canadienne des municipalités (FCM), Ottawa, Canada, 54 p.
- CNRC (2002). L'élaboration d'indicateurs et de points de référence. Guide national pour des infrastructures municipales durables, Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et Fédération canadienne des municipalités (FCM), Ottawa, Canada, 22 p.
- Coffman, L. (2000). Low-Impact Development Design Strategies; An Integrated Design Approach. EPA 841-B-00-003. Prince George's Countym, Maryland. Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division.
- Coles, S. (2001). An introduction to statistical modelling of extreme values. Springer Series in Statistics, Springer - Verlag, London, UK.
- Cunnane, C. (1973) A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. *J. Hydrol.*, 18, 257–271.
- de Elía, R., Caya, D., Côté, H., Frigon, A., Biner, S., Giguère, M., Paquin, D., Harvey, R., et Plummer, D. (2008). Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate. *Clim. Dyn.* 30, 113-132, doi:10.1007/s00382-007-0288-z.
- 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.
- Dietz, M.E. (2007). Low Impact Development Practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water Air Soil Pollut*, 186, 351-363.
- Ekström, M., Fowler, H.J., Kilsby, C.G., et Jones, P.D. (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.
- Elliott, A.H., et Trowsdale, S.A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage, *Environ. Model Software*, 22, 394-405.
- 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., et Kilsby, C.G. (2003). A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *Int. J. Climatol.*, 23 (11), 1313–1334.
- 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. (2007a). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res.*, 112, D18104, doi:10.1029/2007JD008619.

- Fowler H.J., Kilsby, C.G., et Stunell, J. (2007b). Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 11(3), 1115-1126.
- Frei, C., Schar, C., Luthi, D., et Davies, H.C. (1998). Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, 25(9), 1431-1434.
- 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.
- Goswami, B.N., Venugopal, V., Sengupta, D., Madhusoodanan, M.S., et Xavier, P.N. (2006). Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 314, 1442-1445.
- Graham, L.P., Andréasson, J., et Carlsson, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Clim. Change*, 81:293–307, DOI 10.1007/s10584-006-9215-2.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., et Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definitions and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resour. Res.*, 15 (6), 1049–1054.
- Groleau, A., Mailhot, A., et 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., 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.
- Halfawy, M.R., Vanier, D.J., et Froese, T.M. (2006). Standard data models for interoperability of municipal infrastructure asset management systems. *Can. J. Civ. Eng.*, 33, 1459-1469.
- Halfawy, M.R. (2008). Integration of municipal infrastructure asset management processes: Challenges and solutions. *J. Comput. Civ. Eng.*, ASCE, 22(3), 216-229.
- 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.
- Hogg, W.D., et Carr, D.A. (1985). Rainfall Frequency Atlas for Canada, Environment Canada. Atmospheric Environment Service.
- Hosking, J. R. M., et Wallis, J. R. (1997) *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hundecha, Y., et Bárdossy, A. (2005). Trends in daily precipitation and temperature extremes across western Germany in the second half of the 20th Century, *Int. J. Clim.*, 25, 1189-1202.
- 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 (2000). Emissions scenarios. Summary for policymakers. Special report of Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III. IPCC, Geneva, Switzerland, 21 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.
- Iwashima, T., et Yamamoto, R. (1993). A statistical analysis of extreme events: long-term trend of heavy daily precipitation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 71, 637-640.
- Jobin, D. (2001). *Impacts & Adaptation of Drainage Systems, Design Methods & Policies*. Natural Resources Canada – Climate Change Action Fund: Impacts & Adaptation Contribution Agreement A330. Kije Sipi, Gloucester, Canada, 117 p.
- Karl, T.R., Knight, R.W., et Plummer, N. (1995). Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century, *Nature*, 377, 217-220.
- Karl, T.R., et Knight, R.W. (1998). Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(2), 231-241.
- Keeley, M. (2007). Using individual parcel assessments to improve stormwater management. *J. Am. Plan. Ass.*, 73(2), 149-160.
- Kiefer, C.J., et Chu, H.H. (1957). Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *J. Hydraul. Div., ASCE*, 83 (HY4): 1332-1 to 1332-25.
- Kundzewicz, Z.W., et Robson, A.J. (2004). Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrol. Sci. J.*, 49(1): 7–19.
- Lam, K.-H., Milton, J., Nadeau, M., et Vescovi, L. (2004). Update of the short duration rainfall IDF curves for recent climate in Quebec. 57th Canadian Water Resources Association Annual Meeting, Water and Climate Change: Knowledge for better adaptation, 16-18 Juin 2004, Montréal (Québec) Canada.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., et Bush, E. (2008). Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 488 p.
- Madsen, H., Rasmussen, P. F., et Rosbjerg, D. (1997). Comparison of annual maximum series and partial duration series method for modelling extreme hydrologic events: 1. at site modelling. *Water Resour. Res.*, 33(4), 747-757.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Rivard G., Nantel E., Caya, D., et Villeneuve, J.-P. (2006a). 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. (2006b). Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec. Rapport de recherche N° 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.
- MAMR (2005). Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout, Direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales et des Régions, octobre 2005, 36 p.
- MAMR (2007). Complément explicatif au Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout, Direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales et des Régions, juillet 2007, 13 p.
- Marsalek, J., et Chocat, B. (2002). International Report: Stormwater management. *Wat. Sci. Tech.*, 46(6-7), 1-17.
- 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.
- 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.
- Mehdi, B., Mrena, C., et Douglas, A. (2006). S'adapter aux changements climatiques: Une introduction à l'intention des municipalités canadiennes. Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN), 36 p
- Meyer, J.L., Paul, M.J., et Taulbee, W.K. (2005). Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *J. North Am. Benthol. Soc.*, 24(3), 602-612.
- 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.
- Montalto, F., Behr C., Alfredo K., Wolf M., Arye M., et Walsh, M. (2007). Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control. *Landscape Urban Plan.*, 82, 117-131.
- NERC (1975) *Flood Studies Report, vol. 1*. Natural Environment Research Council, London, UK.
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D.B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., Gomez, B., Coelho, C.A.S., Masisi, D.N., Kululanga, E., Mbambalala, E., Adesina, F., Saleh, H., Kanyanga, J., Adosi, J., Bulane, L., Fortunata, L., Mdoka, M.L., et Lajoie, R. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa, *J. Geophys. Res.*, 111, D14102, doi:10.1029/2005JD006289.
- Niemczynowicz, J. (1989). Impact of the greenhouse effect on sewerage systems – Lund case study. *Hydrol. Sci. J.*, 34(6), 651-666.
- Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management – Present and future challenges. *Urban Water*, 1, 1-14.

- 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
- Onibon, H., Ouarda, T. B. M. J., Barbet, M., St-Hilaire, A., Bobée, B., et Bruneau, P. (2004). Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec, Canada. *Hydrol. Sci. J.*, 49(4), 717–735.
- Pagliara, S., Viti, C., Gozzini, B., Meneguzzo, F., et Crisci, A. (1998). Uncertainties and trends in extreme rainfall series in Tuscany, Italy: Effects on urban drainage network design, *Wat. Sci. Tech.*, 37(11), 195-202.
- 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.
- Pelletier, G., Mailhot, A., et Villeneuve, J.-P. (2003). Modeling water pipe breaks - Three case studies. *J. Water Resour. Plan. Manage. (ASCE)*, 129(2), 115-123.
- Perreault, L., et Bobée, B. (1992). Loi généralisée des valeurs extrêmes, propriétés mathématiques et statistiques, estimation des paramètres et des quantiles XT de période de retour T. INRS-Eau, Rapport de recherche N° 350, Sainte-Foy (Québec), Canada, 56 p.
- Plummer, N., Salinger, M.J., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessy, K.J., Leighton, R.M., Trevin, B., Page, C.M., et Lough, J.M. (1999). Changes in Climate Extremes over the Australian Region and New Zealand during the Twentieth Century, *Clim. Change*, 42(11), 183-202.
- 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.
- Rasmussen, P. F., et Gautam, N. (2003). Alternative PWM-estimators of the Gumbel distribution. *J. Hydrol.*, 280, 265-271.
- Rauch, W., Seggelke, K., Brown, R., et Krebs, P. (2005). Integrated approaches in Urban Storm Drainage: Where do we stand?. *Environ. Manage.*, 35(4), 396-409.
- Rivard, G., Mailhot, A., et Duchesne, S. (2007). Source control as an adaptation measure for urban drainage systems in a context of climate change. Novatech 2007, 6th international conference on sustainable techniques and strategies in urban water management, 25-28 juin 2007, Lyon, France.
- Schmidli, J., et Frei, C. (2005). Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th Century. *Int. J. Clim.*, 25, 753-771.
- Scholz, M., et P. Grabowiecki. (2007). Review of permeable pavement systems, *Build. Environ.*, 42, 3830-3836.
- Semadeni-Davies, A. (2003). Response surfaces for climate change impact assessments in urban areas, *Wat. Sci. Tech.*, 48(9), 165-175.

- Semadeni-Davies, A. (2004). Urban water management vs. climate change: impacts on cold region waste water inflows, *Clim. Change*, 64, 103-126.
- 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.
- Semmler, T., et Jacob, D. (2004). Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe. *Global Plan. Change*, 44, 119-127.
- Stone, D.A., Weaver, A.J., et Zwiers, F.W. (2000). Trend in Canadian precipitation intensity. *Atmos. Ocean*, 38(2), 321-347.
- Sui, J., et Koehler, G. (2001). Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany. *J. Hydrol.*, 252, 205-220.
- Taylor, A.C., et Wong, T. (2003). Non-structural stormwater quality best management practices: Guidelines for monitoring and evaluation. Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Technical Report, Report 03/14, 154 p.
- Taylor, A.C., et Fletcher, T.D. (2007). Nonstructural urban stormwater quality measures: Building a knowledge base to improve their use. *Environ. Manage.*, 39, 663-677.
- 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.
- 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.
- Thomson, M. C., Doblus-Reyes, F. J., Mason, S. J., Hagedorn, R., Connor, S. J., Phindela, T., Morse, A. P., et Palmer, T. N. (2006). Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature*, 439, 576–579. (doi:10.1038/nature04503)
- Trenberth, K.E. (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Clim. Change*, 42, 327-339.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M., et Parsons, D.B. (2003). The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1205-1217.
- USEPA (2000). Low Impact Development (LID). A Literature Review. United States Environmental Protection Agency, Report No EPA-841-B-00-005, Washington DC, 41 p.
- USEPA (2006). BMP Modeling Concepts and Simulation, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC 20460, EPA/600/R-06/033. 148 p.
- Vaes, G., Willems, P., et Berlamont, J. (2002). 100 years of Belgium rainfall: are there trends? *Wat. Sci. Tech.*, 45(2), 55-61.
- Villarreal, E.L., et Bengtsson, B. (2004). Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecol. Eng.*, 22(4-5), 279-298.
- 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.
- Whalen, T. M., Savage, G. T., et Jeong, G. D. (2002). The method of self-determined probability weighted moments revisited. *J. Hydrol.*, 268, 177–191.
- Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., et Pan, X. (2005). Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China, *J. Climate*, 18, 1096-1108.
- 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.

ANNEXE A LISTE DES PARTICIPANTS À L'ATELIER DU 16 JANVIER 2008

Groupe/animateur	Nom	Organisme
Groupe 1 Gilles Rivard	Nathalie Rheault	Association des ingénieurs municipaux du Québec (AIMQ)
	Gaston Francoeur	Ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR)
	Denis Brisson	Ville de Québec
	Sébastien Fortin	L'Union canadienne
	Sylvie Lavigne	Roche
	Mohammed Osseyrane	Ville de Montréal (Service des infrastructures, transport et environnement)
	Frédéric Rondeau	Université Laval (équipe de recherche)
	Ahmadi Kingumbi	INRS-Eau, Terre, Environnement (équipe de recherche)
	Alain Bourque	Ouranos
Groupe 2 Geneviève Pelletier	Claude Beaulac	Ordre des urbanistes du Québec (OUQ)
	Daniel Damov	SNC-Lavalin
	Jean-Luc Demers	Promutuel Lévisienne-Orléans
	Nathalie Jolicoeur	BPR
	André Aubin	Ville de Montréal (Service des infrastructures, transport et environnement)
	Jean-Pierre Trudeau	Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ)
	Anne Debrabandère	Ouranos
Groupe 3 Sophie Duchesne	Denis Isabel	SNC-Lavalin / OIQ
	Jean-François Cyr	Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
	Mélanie Glorieux	Association des architectes paysagistes du Québec (AAPQ)
	Hervé Logé	Ville de Montréal (Service des infrastructures, transport et environnement)
	Isabelle Tardif	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU)
	Samuel Bolduc	INRS-ETE (équipe de recherche)
	Caroline Larrivée	Ouranos

ANNEXE B QUESTIONS SOUMISES AUX PARTICIPANTS À L'ATELIER DU 16 JANVIER 2008

Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques

Questions à discuter en petits groupes

Noms des participants

Organisme

- 1) Identifier les **cinq principaux enjeux** actuels en matière de drainage urbain pour les grandes et petites municipalités en justifiant brièvement.
- 2) Est-ce que vous estimez que les changements climatiques représentent un enjeu important en milieu urbain? Si oui, en quoi est-ce que cette problématique se démarque des autres enjeux urbains et de quelle manière en êtes-vous touchés dans votre organisation?

- 3) Est-ce que vous pensez que le niveau de risque de refoulement/inondation en milieu urbain a augmenté au cours des années (décennies) récentes? Si oui, sur quelle base pouvez-vous l'affirmer et à quoi en attribuez-vous les causes?
- 4) Identifier **cinq solutions** (théoriques) qui permettraient, selon vous, de mieux faire face et de mieux se préparer aux impacts des changements climatiques pour le drainage urbain.
- 5) Connaissez-vous des pratiques exemplaires au Québec en matière de drainage urbain? Est-ce que ces pratiques sont applicables aux nouveaux développements et aux endroits déjà bâtis? Est-ce que ces pratiques pourraient représenter des options intéressantes pour l'adaptation aux changements climatiques?
- 6) Donner des exemples de freins à la mise en place de nouvelles approches, méthodes ou façons de faire pour s'adapter aux changements climatiques selon qu'ils soient à caractère technique, économique ou institutionnel/organisationnel. Justifier brièvement.
- 7) Est-ce que ces barrières sont insurmontables? Élaborer.
- 8) Qui sont les principaux acteurs impliqués dans le domaine du drainage urbain et quels rôles pourraient-ils jouer dans la promotion de nouvelles façons de faire? Identifier par ordre de priorité et décrire brièvement le rôle que chacun pourrait jouer.

ANNEXE C Réponses détaillées des municipalités au questionnaire sur les procédures et les critères de conception en usage

1) CRITÈRES

Question 1.1 Quels sont vos critères pour établir le débit permis à la sortie d'un nouveau développement? (étude pour établir la capacité du réseau existant, basé sur le plan directeur ou débit naturel avant développement) :

Trois-Rivières

- On ne rejette plus dans le fleuve ni la St-Maurice, car il n'y a plus de nouveaux développements disponibles près de ces cours d'eau. Les nouveaux développements se rejettent dans les petits ruisseaux et cela est problématique.
- La Ville de Trois-Rivières demande comme norme de rejet le débit naturel. Celui-ci est calculé avec l'aide d'un modèle SWMM. La Ville ne semble pas être informée des intrants et des paramètres de SWMM que les consultants utilisent.
- Les courbes IDF peuvent varier, la ville ne semble pas contrôler cet intrant de conception. Ils ont mentionné que les consultants utilisaient les courbes de Montréal dans le passé, car elles étaient plus sécuritaires.
- Le plan directeur est très difficile à mettre à jour principalement en raison des fusions et des secteurs nombreux à développer.

Québec

- IDF - Ville de Québec en tenant compte du climat futur (étude réalisée par l'INRS).
- Réalisation d'une étude sur la capacité résiduelle du réseau existant et limitation à 15L/s-ha pour 1 : 10 ans et à 50L/s-ha pour 1 : 100 ans.

- Lorsque les plans directeurs seront mis à jour, ils remplaceront éventuellement les limitations de 15 et 50L/s/ha.
- La réflexion pour l'utilisation des débits pré-développement a été amorcée, mais la Ville de Québec est en attente du guide de gestion des eaux pluviales du MDDEP. Le débit pré-développement a cependant été utilisé dans le cas d'un projet de développement dans le bassin versant de la rivière Cap-Rouge.
- Lorsqu'un nouveau développement est dans un endroit entouré de secteurs existants, la Ville de Québec applique la réflexion suivante : laisser les dimensions des conduites comme actuelles si ça coule bien.
- Actuellement en réflexion par rapport au niveau de service du réseau existant par rapport à la courbe IDF – 2005 vs. IDF climat futur.

Montréal

- Développement dans la partie urbanisée : 35 L/s/hectare pour un lot, peut être différent si une étude est disponible sur le bassin versant en question.
- Nouveau développement : le débit naturel.
- IDF, on utilise les dernières courbes disponibles c'est-à-dire celles de 2005 de l'aéroport de Dorval.

Laval

- À la Ville de Laval, des plans directeurs sont disponibles pour l'ensemble de la ville. Dans le cadre d'un nouveau projet, la Ville consulte ce plan directeur, mais elle précise les critères de conception par la réalisation d'une étude hydraulique plus détaillée et propre au projet.
- La Ville de Laval privilégie de façon générale le double drainage (mineur 2 ans et majeur 100 ans). Par contre, selon les secteurs de la ville, on pourrait réduire la protection à une récurrence de 10 ans (réseau conventionnel) ou diminuer le taux de rejet à 10L/s·ha, soit l'équivalent du débit avant développement.

Longueuil

- Les plans directeurs de St-Hubert et du Vieux-Longueuil ne sont pas à jour, mais la Ville travaille présentement à leur mise à jour.

- Les rejets pour St-Hubert sont basés sur le plan directeur de 1996 dans lequel on avait modélisé les débits naturels. Le rejet peut varier de 7 à 15 L/s·ha, ce qui représente le débit avant développement.
- Les rejets du Vieux-Longueuil sont du cas par cas. On fait des études sectorielles.
- La ville utilise les dernières courbes IDF disponibles pour l'aéroport de St-Hubert.

Sherbrooke

- Habituellement, du moins dans l'ancienne ville de Sherbrooke, les bassins de drainage ont été analysés en fonction de leur développement à l'ultime. Des ouvrages de rétention sont prévus ou ont été aménagés à des endroits précis. Ailleurs, une analyse du bassin est effectuée. Dans la majorité des cas, la ville préconise l'ajout de structures de rétention (avec comme critère de conception le débit naturel à l'exutoire). Dans les nouveaux développements, la Ville établit le critère de conception à la capacité du réseau existant.
- Les plans directeurs ne sont pas à jour et la Ville a de la difficulté à avoir le contrôle sur les plans, car il y a trop de nouveaux développements.

Gatineau

- Dans la majorité des cas, la ville utilise le principe du débit naturel avant développement.
- Dans certains cas où elle a des problèmes de capacité des infrastructures, dans la portion aval du bassin de drainage, à la suite d'études, la Ville a établi des débits maximaux de rejet en fonction de la capacité des réseaux et des infrastructures existantes dans le bassin.

Question 1.2 Comment choisissez-vous le patron temporel (forme; p. ex. SEA, triangulaire), la fréquence (p. ex. 10 ans, 25 ans) et la durée (p. ex. une heure) de la pluie de conception pour la conception **des ouvrages de collecte et de transport** (et non des ouvrages de stockage)?

Québec

Depuis tout récemment, la Ville précise ses règles par l'établissement d'une méthodologie de conception :

- (1) une normalisation des pratiques, les pluies SEA, triangulaire et Chicago doivent être considérées;
- (2) 1 : 2 ans pour le réseau mineur résidentiel, 1 : 100 ans pour le réseau majeur et 1 : 10 ans dans les sections principales à forte pente (> 5 %);

(3) durée de 1 à 3 heures pour considérer le cas maximum; et ligne piézométrique sur profil demandée.

Montréal

- La ville utilise le patron Chicago modifié d'une durée de 3 heures pour l'ensemble des projets.
- La fréquence 1 fois dans 10 ans est utilisée à la grandeur du réseau.

Laval

- Dans le cas des secteurs gérés en double drainage, la Ville applique la récurrence de 2 ans pour le réseau mineur. Cette récurrence est basée sur la capacité maximale du réseau majeur (rues).
- Une hauteur d'eau dans la rue de 150 à 200 mm est tolérée.
- La récurrence utilisée pour les pluies est fonction des choix du type de drainage que l'on privilégie pour le secteur.
- De façon générale, c'est toujours la même pluie qui est utilisée, soit la pluie de type Chicago d'une ou trois heures.

Longueuil

- Chicago modifié d'une durée de 1h30, basé sur une étude faite dans le passé ou le temps de concentration.
- La fréquence dépend de la nature du réseau : réseau mineur (1 fois 5 ans), collecteur (1 fois dix ans) ou réseau majeur (1 fois 50 ans).

Sherbrooke

- 1 dans 25 ans;
- Le temps de concentration comme durée (la Ville n'était pas claire sur cette durée).
- Ne semble pas avoir de patron temporel.

Trois-Rivières

- La pluie de conception est une pluie d'une durée de 105 minutes avec une fréquence de 1:10 ans. Cette durée a été déterminée par une firme de consultant dans le passé.
- Le patron temporel est choisi par le consultant.

Gatineau

- Pour le système mineur, la Ville utilise une période de récurrence de 5 ans, tandis que pour le système majeur une période de récurrence de 100 ans est retenue.
- Les courbes IDF de l'aéroport d'Ottawa ou de la ferme Expérimentale sont utilisées comme données de bases pour la conception.
- Dans certains cas particuliers, lors de l'étude d'un bassin de drainage, le consultant a utilisé plusieurs types de pluies synthétiques et même une pluie combinée à la fonte des neiges.

Question 1.3 Comment choisissez-vous le patron temporel (forme; p. ex. SEA, triangulaire), la fréquence (p. ex. 10 ans, 25 ans) et la durée (p. ex. une heure) de la pluie de conception pour la conception **des ouvrages de stockage** ?

Québec

- Même chose que pour les conduites, récurrences 10 ans et 100 ans considérées pour respecter les normes de rejets (voir ci-haut).

Laval

- De façon générale, tous les ouvrages de rétention permanents doivent être conçus selon une récurrence centennale. Ce choix s'inscrit dans le souci de la protection du public et des contraintes propres aux réseaux existants.
- De façon générale, c'est toujours la même pluie qui est utilisée, soit la pluie de type Chicago d'une ou trois heures.

Longueuil

- Bassin de stockage (1 fois dans 50 ans).
- Chicago modifié (3h) ou rectangulaire (24h), étude coûts-bénéfices pour justifier un choix.

Sherbrooke

- Minimum 1 fois dans 50 ans, durée 1 heure, dans certains cas (beaucoup d'espace) ou si le MTQ est impliqué, on va jusqu'à 1 fois dans 100 ans.
- La Ville de Sherbrooke ne semble pas connaître la notion de patron d'une pluie, pour les bassins nous avons cru comprendre que c'est le patron rectangulaire qu'on utilise.

Trois-Rivières

- La pluie de conception est une pluie d'une durée de 105 minutes avec une fréquence de 1 : 100 ans. On utilise la pointe du débit vs. le débit naturel pour déterminer le volume de rétention.
- Le patron temporel est choisi par le consultant.

Gatineau

- Les ouvrages de rétention sont dimensionnés pour répondre à une pluie ayant une récurrence de 100 ans.
- Les courbes IDF et les pluies de 1 heure à 3 heures de type Chicago sont utilisées pour la conception de ces ouvrages.

2) PROCÉDURES

Question 2.1 Quelles sont vos procédures pour respecter les critères mentionnés ci-haut pour **les ouvrages de collecte et de transport?** (double drainage et contrôle à la source) :

Québec

- Application du double drainage dans les nouveaux développements.
- Contrôle à la source pour des projets > 1 200 m², 50L/s/ha ou inférieur si le réseau existant est problématique.
- Rapport d'ingénieur idéalement requis avec sommaire des hypothèses et résultats.
- Amorce d'une réflexion pour établir une règle uniforme à appliquer à l'ingénierie.

Laval

- Les secteurs résidentiels unifamiliaux et semi-détachés n'ont aucune restriction à la source, mais leurs eaux de pluie sont acheminées vers un bassin de rétention central (double drainage).
- Dans le cas des secteurs commerciaux et industriels, une restriction est appliquée à la source (de façon générale de l'ordre de 50 L/s/ha).

Longueuil

- Double drainage dans les nouveaux développements et contrôle à la source pour les secteurs commerciaux et industriels.

Sherbrooke

- Restricteurs de débit dans les puisards.
- Captage supplémentaire aux points bas si le réseau le permet, maximisation de la capacité de transport des eaux par la construction de cunettes pluviales.
- Optimisation de l'efficacité de captage des avaloirs vs. le diamètre de la conduite.
- Le double drainage est parfois utilisé, mais c'est du cas par cas.

Trois-Rivières

- Le double drainage est utilisé dans un seul secteur de la ville.
- Le contrôle à la source est utilisé pour les commerces et les industries. La Ville se questionne énormément sur l'entretien des régulateurs et leur baisse de performance avec le temps.

Gatineau

- Dans la grande majorité des cas, le double drainage est utilisé lors de la conception des ouvrages de collecte et de transport des eaux de ruissellement.
- Le système majeur est composé des rues, passages piétonniers, et à l'occasion de surfaces engazonnées dans un parc ou sur une propriété privée.
- Le contrôle à la source est surtout utilisé pour les développements de type commercial ou les insertions de projets résidentiels en milieu bâti.

Question 2.2 Quelles sont vos procédures pour respecter les critères dans **les ouvrages de stockage?** (bassins de rétention en ligne ou hors ligne, etc.) :

Québec

- Même chose que pour les conduites. Rétentions en ligne et hors ligne utilisées selon la spécificité du projet.
- Attention à la ligne piézométrique lors de la conception.

Laval

- Les bassins de rétention sont « hors ligne » et aménagés dans les secteurs de développement.
- Par contre, la Ville a présentement un projet de reprofilage d'un cours d'eau qui nécessitera un bassin de rétention; le bassin sera dans la plaine inondable d'un cours d'eau.
- La hauteur d'eau permise dans le bassin de rétention majeur est de l'ordre de 1,0 m à 1,2 m avec une revanche d'environ de 0,5 m. Le bassin de rétention mineur a une profondeur plus importante.

Longueuil

- Préférence pour les bassins hors ligne, mais la Ville fait de la rétention en ligne dans les conduites unitaires lorsque celles-ci sont surdimensionnées.

Sherbrooke

- Chaque cas a ses particularités, souvent la Ville recherche des bassins de rétention naturels, pour lesquels il y a moins de modifications à y apporter.

Trois-Rivières

- Dans les développements résidentiels, la Ville fait beaucoup de rétention hors ligne.
- Dans les secteurs commerciaux et industriels, la Ville fait de la rétention en ligne et hors ligne, mais la rétention en ligne est beaucoup plus présente.

Gatineau

- Les bassins de rétention hors ligne sont utilisés comme ouvrages de stockage.
- Dans certains cas, deux bassins de rétention sont utilisés pour un même projet, soit un pour le système majeur et un autre pour le système mineur.

ANNEXE D Tableaux-synthèse des réponses sur les procédures et pratiques en usage

Tableau D. 1 Résumé des réponses à la question 1.1 portant sur les critères de rejet

SUJET	Laval	Longueuil	Sherbrooke	Trois-Rivières	Québec	Montréal	Gatineau
Plan directeur	<ul style="list-style-type: none"> Plan directeur semble à jour 	<ul style="list-style-type: none"> Plan directeur pas à jour depuis les fusions Travaillent en ce moment pour le mettre à jour 	<ul style="list-style-type: none"> Plan directeur pas à jour depuis les fusions Ne semblent pas avoir d'intérêt pour le mettre à jour, car trop d'endroits où il y a un potentiel de développement 	<ul style="list-style-type: none"> Plan directeur pas à jour depuis les fusions Ne semblent pas avoir d'intérêt pour le mettre à jour, car trop d'endroits où il y a un potentiel de développement 	<ul style="list-style-type: none"> Plan directeur pas à jour depuis les fusions Travaillent en ce moment pour le mettre à jour 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de renseignement à ce sujet 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de renseignement à ce sujet
Rejets au cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> Basé sur le plan directeur, mais la Ville précise les critères de conception par une étude plus détaillée 	<ul style="list-style-type: none"> Les rejets pour St-Hubert sont basés sur le plan directeur (débit avant développement) Dans le cas du Vieux-Longueuil, c'est du cas par cas 	<ul style="list-style-type: none"> Débit naturel avant développement Selon capacité du réseau existant 	<ul style="list-style-type: none"> La Ville exige le débit naturel avant développement (déterminé avec SWMM) La Ville n'est pas en contrôle des paramètres d'entrée de SWMM (IDF et patron temporel des pluies) 	<ul style="list-style-type: none"> La Ville a des critères de rejet fixes : 15L/s/ha pour 1 : 10 ans et 50L/s/ha pour 1 : 100 ans Débit naturel avant développement dans le bassin versant de la rivière Cap-Rouge 	<ul style="list-style-type: none"> 35L/s/ha pour les développements dans la partie urbanisée Dans les nouveaux développements, la Ville exige le débit naturel avant développement 	<ul style="list-style-type: none"> La Ville demande le débit naturel avant développement Dans certains cas, la Ville tient compte de la capacité en aval : suite à une étude détaillée, la Ville peut établir un nouveau débit

<p>Courbes IDF utilisées</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de renseignement 	<ul style="list-style-type: none"> • Les dernières disponibles à l'aéroport de St-Hubert (1996) 	<ul style="list-style-type: none"> • Les plus récentes disponibles, donc 1996 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne semble pas clair : la Ville utilisait dans le passé celles de Montréal, car elles été considérées plus sécuritaires • Le choix est laissé aux soins des consultants 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisent les courbes IDF qui tiennent compte du climat futur • Utilisent celles de 2005 quand celles du climat futur sont difficilement applicables (p. ex. nouveau projet rejetant dans un réseau existant) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilise les courbes IDF de 2005 de Dorval 	<ul style="list-style-type: none"> • IDF de l'aéroport d'Ottawa ou celles d'une ferme expérimentale
-------------------------------------	--	--	--	---	--	---	--

Tableau D. 2 Résumé des réponses aux questions 1.2 et 1.3 portant sur les critères pour définir le patron temporel, la durée et la fréquence de la pluie pour les ouvrages de collecte et de transport et les ouvrages de stockage

SUJET	Laval	Longueuil	Sherbrooke	Trois-Rivières	Québec	Montréal	Gatineau
OUVRAGE DE COLLECTE ET DE TRANSPORT							
Patron temporel	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'information 	<ul style="list-style-type: none"> Choix du consultant 	<ul style="list-style-type: none"> SEA, triangulaire et Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Plusieurs types de pluie selon les consultants
Durée	<ul style="list-style-type: none"> 1 heure et 3 heures 	<ul style="list-style-type: none"> 1 heure 30 ou temps de concentration 	<ul style="list-style-type: none"> Temps de concentration (pas clair) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 heure 45 (basé sur une étude passée, fait par un consultant) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 à 3 heures (considérer le cas maximum) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 heures 	<ul style="list-style-type: none"> Les consultants en essaient plusieurs; à quelques occasions, ils tiennent compte de la fonte des neiges
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> 1:2 ans pour le réseau mineur dans les zones de double drainage 1:100 ans pour le réseau majeur, double drainage 1:10 ans dans certains secteurs de la ville pour le réseau majeur 	<ul style="list-style-type: none"> 1:5 ans pour le réseau mineur 1:10 ans pour les collecteurs 1:50 ans pour le réseau majeur 	<ul style="list-style-type: none"> 1:25 pour le réseau mineur 	<ul style="list-style-type: none"> 1:10 ans pour le réseau mineur 	<ul style="list-style-type: none"> 1:2 ans pour le réseau mineur 1:100 ans pour le réseau majeur, double drainage 1:10 ans pour les conduites principales à forte pente 	<ul style="list-style-type: none"> 1:10 ans pour le réseau mineur 	<ul style="list-style-type: none"> 1:5 ans pour le réseau mineur 1:10 ans pour le réseau majeur
OUVRAGES DE STOCKAGE							
Patron temporel	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié ou rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'information 	<ul style="list-style-type: none"> Choix du consultant 	<ul style="list-style-type: none"> SEA, triangulaire et Chicago modifié 	<ul style="list-style-type: none"> Information non disponible 	<ul style="list-style-type: none"> Chicago modifié
Durée	<ul style="list-style-type: none"> 1 heure et 3 heures 	<ul style="list-style-type: none"> 3 heures (Chicago) et 24h pour la rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> 1 heure 	<ul style="list-style-type: none"> 1 h 45 (basé sur une étude passée, faite par un consultant) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 à 3 heures (considérer le cas maximum) 	<ul style="list-style-type: none"> Information non disponible 	<ul style="list-style-type: none"> 1 à 3 heures

<p>Fréquence</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 1:100 ans pour tous les ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> • 1:50 ans pour tous les ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> • 1:50 ans pour tous les ouvrages de rétention • 1:100 dans certains cas (beaucoup d'espace disponible ou implication du MTQ) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1:100 ans pour tous les ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> • 1:100 ans pour tous les ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> • Information non disponible 	<ul style="list-style-type: none"> • 1:100 ans pour tous les ouvrages de rétention
-------------------------	---	--	--	---	---	--	---

Tableau D. 3 Résumé des réponses aux questions 2.1 et 2.2 portant sur les procédures des ouvrages de collecte et de transport et ceux de stockage

SUJET	Laval	Longueuil	Sherbrooke	Trois-Rivières	Québec	Montréal	Gatineau
Ouvrage de collecte et de transport	<ul style="list-style-type: none"> • Dans les secteurs résidentiels, la Ville n'applique pas de contrôle à la source, seulement du double drainage • Dans les secteurs commerciaux et industriels, la Ville applique le contrôle à la source avec une restriction de 50l/s/ha 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans les secteurs résidentiels, la Ville n'applique pas de contrôle à la source, seulement du double drainage • Dans les secteurs commerciaux et industriels, la Ville applique le contrôle à la source 	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison de restricteurs de débit à la sortie des puisards • Captage supplémentaire aux points bas • Optimisation de l'efficacité de captages des avaloirs vs le diamètre de la conduite 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans les secteurs commerciaux et industriels, la Ville utilise le contrôle à la source 	<ul style="list-style-type: none"> • Application du double drainage dans les secteurs le permettant • Contrôle à la source lorsque le projet est supérieur à 1 200 m², avec restriction de 50l/s/ha 	<ul style="list-style-type: none"> • Information non disponible 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans la grande majorité des cas, le double drainage est utilisé • Le contrôle à la source est surtout utilisé dans les secteurs commerciaux et dans des projets de type résidentiel intégrés à un milieu déjà bâti
Ouvrages de stockage	<ul style="list-style-type: none"> • Les bassins hors ligne sont les plus utilisés • Actuellement, la Ville a un projet de reprofilage d'un cours d'eau, dans lequel la rétention sera dans les plaines inondables 	<ul style="list-style-type: none"> • Les bassins hors ligne sont les plus utilisés • Lorsque les conduites unitaires sont surdimensionnées, la rétention en ligne peut être utilisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Les bassins hors ligne sont les plus utilisés • La Ville essaie d'utiliser des milieux naturels pour faire la rétention 	<ul style="list-style-type: none"> • Les bassins hors ligne sont plus utilisés dans les secteurs résidentiels • Dans les secteurs commerciaux et industriels, la Ville priorise la rétention en ligne 	<ul style="list-style-type: none"> • La Ville fait de la rétention en ligne et hors ligne selon les projets 	<ul style="list-style-type: none"> • Information non disponible 	<ul style="list-style-type: none"> • Les bassins hors ligne sont toujours utilisés • Dans certains cas, deux bassins de rétention sont placés en parallèle, un pour le réseau mineur et l'autre pour le majeur

ANNEXE E PÉRIODE DE RETOUR EN RÉGIME STATIONNAIRE

Soit $F(x)$ la probabilité d'observer pour une année donnée un événement de pluie d'intensité $X \leq x$. La probabilité d'observer k événements de pluie d'intensité $X \geq x$ pendant N années est donnée par la distribution binomiale :

$$\Pr(k) = \binom{N}{k} [1 - F(x)]^k [F(x)]^{N-k} \quad (\text{E.1})$$

Le nombre moyen d'événements de pluie d'intensité $X \geq x$ est alors donné par :

$$\bar{n} = N [1 - F(x)] \quad (\text{E.2})$$

Puisque ces événements sont indépendants, le temps moyen séparant deux de ceux-ci, T , est donné par :

$$T = [1 - F(x)]^{-1} \quad (\text{E.3})$$

La période de retour $T(x)$ correspond donc au temps moyen séparant deux événements d'intensités supérieures à x ($X \geq x$).

ANNEXE F ESTIMATION DU NOMBRE MOYEN DE DÉPASSEMENTS D'UN QUANTILE EN RÉGIME NON STATIONNAIRE

Soit p_i la probabilité de dépasser le quantile x à l'année i et supposons que cette valeur varie d'une année à l'autre. Nous souhaitons calculer la probabilité d'observer k dépassements de ce quantile pendant un nombre d'années N , $\Pr(k|N)$, de même que le nombre moyen de dépassements sur la période de N années, \bar{n} . Dans le cas où $p_i = p (\forall i)$, la solution correspond à la distribution binomiale présentée à l'Annexe E. Dans le cas plus général, aucune solution analytique du type de l'équation E.1 n'existe et l'évaluation de ces probabilités peut être relativement exigeante en temps de calcul. Ainsi pour $\Pr(k=1|N)$, on aura :

$$\Pr(k=1) = \sum_{k_1=1}^N p_{k_1} \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k_1}}^N (1-p_j) \right) \quad (\text{F.1})$$

De même, pour $\Pr(k=2|N)$, on aura :

$$\Pr(k=2) = \sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=k_1+1}^N p_{k_1} p_{k_2} \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k_1 \\ j \neq k_2}}^N (1-p_j) \right) \quad (\text{F.2})$$

Le nombre de termes à considérer croît cependant de façon rapide et est donné par :

$$\binom{N}{k} = \frac{N!}{(N-k)!k!} \quad (\text{F.3})$$

Ainsi, dans le cas où $N=100$ et $k=10$ (par exemple dans le cas où l'on veut calculer la probabilité d'observer 10 événements extrêmes pendant une période de 100 ans), $1,73 \times 10^{13}$ termes doivent être évalués.

ANNEXE G Mesures d'adaptation du type contrôle à la source

Les mesures de contrôle à la source visent essentiellement à réduire la production et l'entrée de polluants dans les eaux pluviales de ruissellement, et à gérer les volumes et les débits d'eaux de ruissellement à la « source », c'est-à-dire avant leur entrée dans le réseau urbain de collecte (CNRC, 2003). Ce type d'aménagements (« best management practice », BMP; l'acronyme anglais sera parfois utilisé dans ce qui suit) se décline sous plusieurs formes et est adapté à la gestion des événements de faibles intensités (période de retour de moins de 2 ans). Les tableaux qui suivent présentent quelques-unes de ces BMP, parmi les plus courantes, regroupées en fonction de certaines caractéristiques fonctionnelles (à noter que cette classification, bien que pratique, n'est pas totalement « hermétique » en ce sens qu'une même BMP pourrait, selon l'appréciation de chacun, se trouver dans des catégories différentes ou encore dans plusieurs catégories différentes). On retrouve : 1) les systèmes de bio-rétention (Tableau G.1); 2) les systèmes favorisant l'infiltration (Tableau G.2); 3) les dépressions, baissières ou chenal à surface libre (« open channel ») (Tableau G.3); 4) les systèmes de filtration sur médium (Tableau G.4); 5) les systèmes de filtration à travers un médium végétal (Tableau G.5); 6) les pavages ou surfaces poreuses ou perméables (Tableau G.6); 7) les BMP visant à récupérer les eaux pluviales ruisselant de diverses surfaces imperméables (Tableau G.7); 8) les BMP recréant des espaces verts (Tableau G.8); 9) les BMP du type marais/zones humides (Tableau G.9); et 10) les BMP du type bassins de rétention (Tableau G.10). La terminologie retrouvée dans la littérature étant exclusivement de langue anglaise, des équivalents français sont suggérés. Des références sont aussi proposées pour de plus amples informations techniques (la liste de ces références se trouve à la suite des tableaux).

Les tableaux présentés dans cette annexe sont tirés de Mailhot *et al.* (2008a).

Tableau G. 1 BMP de type bio-rétention

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Infiltration Planter	Jardin pluvial urbain	Réservoir utilisé dans les milieux fortement urbanisés et dont le périmètre est généralement constitué de béton. Il reçoit les eaux de ruissellement provenant des surfaces imperméables environnantes (trottoirs et toits) et favorise la filtration et l'infiltration des eaux de ruissellement.	City of Portland (2004)
Flow-Through Planter	Jardin pluvial pour édifice	Réservoir aménagé à même les bâtiments et édifices en milieu urbain. Les eaux de ruissellement engendrées par ces immeubles sont alors directement dirigées vers le réservoir. Cet aménagement permet de filtrer les eaux et de les infiltrer dans le sol sous-jacent.	City of Portland (2004)
Rain Garden	Jardin pluvial	Dépression ou réservoir dans lequel se trouve une diversité de plantes reconstituant un milieu naturel. Ce réservoir agit comme un bassin où les eaux de ruissellement sont acheminées pour y être conservées de façon temporaire. Ce type d'aménagement met à profit plusieurs processus telles la filtration, l'infiltration et l'évapotranspiration.	IDEQ (2005) DEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007) NCDWQ (2007)
Tree Box Filter	Mini jardin pluvial	Petits jardins pluviaux se présentant sous la forme d'une boîte contenant un arbre (ou une série d'arbres) et pouvant être aménagés le long des trottoirs par exemple. Les eaux de ruissellement sont dirigées vers cet aménagement pour, par la suite, être acheminées dans un bassin de captage d'eau ou vers le réseau de drainage urbain.	UDT (2007)

Tableau G. 2 BMP favorisant l'infiltration

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Infiltration Trench	Tranchée d'infiltration	Tranchée creusée à même le substrat originel dans laquelle est ajouté un agrégat de roches graduées. Cette tranchée joue un rôle de réservoir pour les eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables. Une partie (ou la totalité) des eaux est par la suite infiltrée alors que l'excès peut être dirigé vers le réseau de drainage.	City of Portland (2004) IDEQ (2005) DEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007)
Infiltration Basin	Bassin d'infiltration	Aménagement de taille et de forme variables caractérisé par une dépression formant un petit bassin et recouvert de plantes, généralement des herbacées. Ce type d'ouvrage, situé sur un site non perturbé, permet de recueillir, d'emmagasiner et d'infiltrer rapidement les eaux de ruissellement pluviales émanant des surfaces imperméables avoisinantes.	Barr Engineering (2001) DEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007) NCDWQ (2007)
Downspout Infiltration Systems - Private Soakage Trench	Tranchée d'infiltration sur lot; système d'infiltration des eaux de gouttières	Tranchée ou puits aménagé sur les lots résidentiels, constituée d'un agrégat de roches graduées et recouvert de sable ou de plantes. Une conduite perforée peut être installée à l'intérieur de la tranchée afin d'augmenter la capacité d'infiltration et ainsi recevoir les eaux de ruissellement en provenance de superficies imperméables plus importantes.	City of Portland (2004) WSDE (2005)
Perforated Stub-Out Connections - Private Drywell	Puits d'égouttement	Conduite verticale perforée qui peut contenir un volume d'eau qui s'infiltré par la suite en profondeur dans le sol sous-jacent dans un intervalle de temps relativement court.	CWP (2003) City of Portland (2004) WSDE (2005)

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Dry Well Infiltration Tubes - French Drains - Soak-Away Pits - Soak holes	Puits d'égouttement tubulaire; puits filtrant	Réservoir situé sous la terre qui reçoit et accumule temporairement les eaux de ruissellement provenant généralement de toits et qui favorise l'infiltration de l'eau dans le sol sous-jacent.	CWP (2003) DEP (2006) MDEP (2006) MSSC (2006)
Stormwater Planter	Petit jardin pluvial pour édifice	Ouvrage destiné à recevoir les eaux en provenance des toits de divers bâtiments, comprenant un sol organique et un réservoir. Similaire au jardin pluvial pour édifice, mais de plus petite dimension, il est parfois nécessaire d'en aménager plusieurs autour d'un seul bâtiment.	IDEQ (2005)
On-Lot Infiltration	Infiltration sur lot	Ensemble de BMP conçues pour être aménagées sur les lots des secteurs résidentiels urbains et assimilables, dans la mesure où des plantes sont présentes, au jardin pluvial sur site résidentiel. Comprend des BMP du type bassins d'infiltration et tranchées d'infiltration dont elles diffèrent en raison de l'échelle des aménagements.	Barr Engineering (2001)
Gravel Bag Berm - Infiltration Berm - Retentive Grading	Berme d'infiltration	Petit monticule de terre compacté aménagé selon les lignes de niveau le long des pentes de faible inclinaison et qui forme plusieurs petits bassins pour l'accumulation des eaux de ruissellement. Une partie des eaux est infiltrée dans le sol alors que l'excédent peut être acheminé vers le réseau de drainage.	CASQA (2003) DEP (2006)

Tableau G. 3 BMP de type dépressions, baissières ou chenal à surface libre («open channel»)

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Biofiltration Swale - Vegetated Swale - Vegetated Swale System	Dépression végétalisée	Long chenal avec une pente légère, de section parabolique ou trapézoïdale recouvert d'herbacées, qui reçoit et contient les eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables. Cette M/A est constituée d'un médium en surface hautement perméable (sable ou concassé) afin d'optimiser l'infiltration des eaux de ruissellement.	MDE (2000) City of Portland (2004) IDEQ (2005) DEP (2006) CTRE (2007)
Grass Swale	Dépression gazonnée	Fossé de drainage conventionnel, avec une pente légère, recouvert d'herbacées dont les pouvoirs d'infiltration sont limités et bien en-deçà de ceux des dépressions végétales. En raison des capacités d'infiltration restreintes, cette BMP vise essentiellement à capter divers polluants provenant des eaux de ruissellement et à acheminer par la suite les eaux traitées vers le réseau de drainage.	DEP (2006) CTRE (2007)
Subsurface Infiltration Bed	Lit souterrain d'infiltration	Dépression de formes diverses recouverte de plantes, possédant un sol hautement perméable et qui repose sur un lit de roche gradué similaire à celui des tranchées d'infiltration.	DEP (2006)
Bioinfiltration Swale - Grass Percolation Areas	Dépression de rétention végétalisée	Dépression végétale de diverses formes caractérisée par la présence de bermes et de digues dans le but de former plusieurs petits bassins et ainsi contenir les eaux de ruissellement. Ce système se trouve à mi-chemin entre le bassin de rétention et la dépression végétalisée.	IDEQ (2005) WSDE (2005)

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Biofiltration Swale - Continuous Inflow	Dépression végétalisée à flux constant	Aménagement semblable aux dépressions végétalisées mais où les eaux de ruissellement sont acheminées sur les pentes tout le long du chenal plutôt que par l'une des extrémités. Ces aménagements sont plus longs que les dépressions végétalisées afin d'assurer un temps de résidence suffisant de l'eau dans la dépression.	WSDE (2005)
Enhanced Swales-Enhanced Vegetated Swale - Infiltration Swale System	Système d'infiltration à chenal ouvert	Chenal ouvert recouvert d'herbacées, en-dessous duquel se trouvent un lit de roches et une conduite perforée pour maximiser l'infiltration des eaux de ruissellement. BMP qui combine les aspects des dépressions végétales et des tranchées d'infiltration.	ARC et GDNR (2001) Stephens et al. (2002) DEP (2006)
Vegetated Street Swale	Dépression végétalisée sur route	Petites dépressions végétales, disposées en bordure des routes ou près des intersections. Cette BMP doit être intégrée dans la conception des rues et des routes et elle représente une alternative efficace aux endroits où l'espace est restreint.	City of Portland (2004)

Tableau G. 3 BMP de type filtration sur médium

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Filter system - Filtration Basins - Medias Filtration Facilities - Surface Sand Filter	Système de filtration; bassin de filtration	Procédé utilisé essentiellement dans une optique de prétraitement des eaux de ruissellement composé de chambres de sédimentation en bordure des surfaces imperméables, vers lesquelles les eaux de ruissellement sont dirigées et filtrées. Ces chambres, constituées de sable, peuvent être recouvertes de sable ou d'herbacées et une conduite perforée peut se retrouver sous les chambres de sédimentation pour collecter les eaux passant au travers des chambres.	Barr Engineering (2001) MSSC (2006)
Underground Filters - Underground Sand Filter	Système de filtration souterrain	Procédé similaire à celui des systèmes de filtration mais où les chambres de sédimentation se trouvent sous la surface du sol, adapté donc aux sites où l'espace est limité.	Barr Engineering (2001) MSSC (2006) CTRE (2007)
Filters Perimeter– Linear Perimeter - Linear Sand Filter	Système de filtration linéaire	Composé de plusieurs chambres de sédimentation, tout comme pour les systèmes de filtration, disposées linéairement sur le pourtour des surfaces imperméables.	CWP (2003) WSDE (2005) DEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007)
Contained Filter - Sand Filter - Sand Filter Vault	Bassin de filtration; enceinte de filtration sur sable	Bassin dont le fond peut reposer autant sur une surface imperméable que perméable. Le bassin est rempli de sable sur un substrat à granulométrie plus grossière tel du gravier. Une ouverture localisée à l'une des extrémités du bassin permet de diriger les eaux excédentaires vers le réseau de drainage.	City of Portland (2004) IDEQ (2005) DEP (2006) CTRE (2007) NCDWQ (2007)

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Constructed Filter	Filtre artificiel	Structure de superficie variable, contenant une couche de sable, de compost, de tourbe et d'autres médias filtrants, recouverte d'une végétation herbacée dense. Lors de leur passage à travers ces médias, les eaux de ruissellement sont traitées et acheminées par la suite vers le réseau de drainage et/ou dans le sol sous-jacent.	DEP (2006)
Baffle Boxes	Trappe à sédiments	Structure de béton ou de fibre de verre qui contient une série de chambres de sédimentation séparées par des cloisons. L'objectif premier est de capter les sédiments solides en suspension. Des filtres peuvent également être ajoutés pour capter les débris plus grossiers.	ASCE (2001) USEPA (2001)

Tableau G. 4 BMP de type filtration à travers un médium végétal

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Filter Strips - Vegetated Buffers - Vegetated Filter - Vegetated Filter Strips	Bande filtrante végétalisée	Surface gazonnée de superficie variable, de faible pente, localisée entre une source de pollution diffuse (par ex. surface imperméable) et une zone de captage des eaux de ruissellement (par ex. cours d'eau, réseau de drainage). Le passage des eaux de ruissellement émanant de la source diffuse à travers la végétation permet leur filtration, réduit les vitesses d'écoulement et favorise l'infiltration.	City of Portland (2004) DEP (2006) MDEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007)
Wet Swales	Dépression végétalisée humide	Cellules linéaires ayant l'apparence d'un marais, dont la pente est nulle, qui agissent comme un bassin pour recevoir les eaux de ruissellement et qui nécessitent une nappe phréatique élevée et un sol légèrement perméable. La présence d'une nappe phréatique élevée est nécessaire pour ne pas que l'aménagement se vide entre chaque évènement pluvieux	ARC et GDNR (2001) WSDE (2005) DEP (2006) MSSC (2006) CTRE (2007)
Dry Swales	Dépression végétalisée sur lit d'infiltration	Chenal végétatif dont la pente est nulle, qui comprend un lit filtrant composé de roches et qui infiltre la totalité des eaux de ruissellement reçues. Les dépressions sèches se vident complètement entre chaque évènement pluvieux.	ARC et GDNR (2001) Barr Engineering (2001) MSSC (2006) CTRE (2007)

Tableau G. 5 BMP de type pavage ou surface poreuse ou perméable

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Asphalt Pervious - Paving Paver System - Permeable Pavement - Pervious Bituminous - Pervious Concrete and Asphalt Mixes -Pervious Pavement - Pervious Paving	Chaussée poreuse; chaussée perméable; Asphalt poreux; Bitume perméable;	Utilisation d'un matériau poreux ou perméable pour couvrir des surfaces autrement imperméables (pavé, asphalte, bitume) permettant à l'eau de s'infiltrer dans le sol ou d'être recueillie pour ensuite être acheminée au réseau de drainage. La surface perméable est créée à partir d'une matrice ne comportant pas d'éléments fins. La présence de particules grossières crée un volume interstitiel plus important et en mesure d'absorber les eaux de ruissellement.	Stephen <i>et al.</i> (2002) City of Portland (2004) DEP (2006) MSSC (2006)
Pervious Pavement with Infiltration Bed - Porous Pavement	Chaussée perméable avec lit d'infiltration	Aménagement constitué d'une chaussée perméable sous lequel est ajouté un lit de gravier. Cette particularité supplémentaire permet de retenir un plus grand volume d'eau et maximise l'infiltration des eaux de ruissellement.	IDEQ (2005) DEP (2006)
Blocks Pervious - Concrete Block - Permeable Pavers Modular Paving Blocks	Pavage à interstices perméables	Pavage dont les interstices sont occupés par du matériel perméable permettant d'emmagasiner un certain volume d'eau et d'en infiltrer une partie.	Barr Engineering (2001) City of Portland (2004) DEP (2006) MSSC (2006)

Tableau G. 6 BMP visant à récupérer les eaux pluviales ruisselant de diverses surfaces imperméables

Mesure adaptative	Équivalent français proposé	Description	Référence
Capture and Reuse - Haversting and Re-use - Haversting Rainwater Re-use - Rainwater Collection System - Rooftop Runoff Water Rainwater	Système de collecte des eaux pluviales	Ensemble de BMP visant à recueillir et stocker dans un ou plusieurs réservoirs les eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables. Ces eaux peuvent ensuite être utilisées pour différents usages domestiques, dirigées vers d'autres BMP ou sur une surface gazonnée, ou encore retourner graduellement vers le réseau de drainage.	City of Portland (2004) IDeq (2005) MSSC (2005) TWDB (2005) DEP (2006)

Tableau G. 7 BMP recréant des espaces verts

BMP	Équivalent français proposé	Description	Référence
Absorbent Landscaping	Aménagement paysager avec sol absorbant	Petits secteurs recouverts de végétation (plantes, arbustes, arbres) copiant les caractéristiques d'un milieu naturel reposant sur un sol aménagé de sorte à assurer une absorption maximale des eaux pluviales et des eaux de ruissellement qui y sont acheminées.	Stephens <i>et al.</i> (2002)
Contained Planter	Bac à plantes	Récipient contenant un sol organique riche et épais et dans lequel croissent diverses plantes et arbustes. Ces bacs sont disposés sur des surfaces imperméables pour capter une part des précipitations. Leur utilité pour capter les eaux de ruissellement est nulle.	City of Portland (2004)
Green Parking Lots	Stationnement vert	Les stationnements verts combinent l'utilisation de pavage perméable, le recours au réseau de drainage naturel et la réduction de l'espace utilisé en surface de stationnement. L'espace ainsi récupéré est par la suite utilisé pour garantir un meilleur traitement des eaux de ruissellement à l'intérieur de la zone de stationnement.	IDEQ (2005)
Green Roofs - Green Rooftops - Rooftop Runoff Management	Toit vert	Aménagement paysager plus ou moins élaboré installé sur le toit des édifices (résidence, bâtiment à logements multiples, commercial et industriel), composé de plusieurs couches de sol recréant un milieu propice à la croissance des plantes (herbacées, arbustes et arbres).	Barr Engineering (2001) Stephens <i>et al.</i> (2002) IDEQ (2005) MSSC (2006) NCDWQ (2007)
Ecoroof - Extensive Vegetated Roof	Toit vert extensif	Toit vert constitué de plantes herbacées, adapté pour les toits des résidences.	City of Portland (2004) DEP (2006)
Intensive Vegetated Roof - Roof Garden	Toit vert intensif	Toit vert comprenant des arbres et des arbustes et accessible au public	City of Portland (2004) DEP (2006)

Tableau G. 8 BMP du type marais/zones humides

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Biodetention Basin	Bassin de bio-rétention	Marais artificiel ayant pour but de contenir les eaux de ruissellement. Il s'agit d'un ouvrage permanent des fonctions récréationnelles, esthétiques et fauniques.	IDEQ (2005)
Construted Wetlands	Marais aménagé	Marais peu profond, ayant une végétation émergente, qui emmagasine et traite les eaux de ruissellement. BMP similaire aux bassins de bio-rétention.	ARC et GDNR (2001) ASCE (2001a) CWP (2003) DEP (2006) City of Knoxville (2007)
Shallow Wetland	Marais peu profond	Variation du marais aménagé, moins profond et qui a le désavantage de nécessiter une grande superficie.	ARC et GDNR (2001)
Extented Detention Shallow Wetland	Bassin humide peu profond avec extension	Bassin peu profond pourvu d'une aire additionnelle qui assure un traitement de l'eau plus efficace que les marais peu profonds employés seuls et qui diminue les besoins en superficie. Les eaux contenues dans l'extension sont relâchées lentement vers le bassin humide.	ARC et GDNR (2001)
Pond/Wetland System	Bassin/Zone humide	Ce système est constitué de deux cellules : un bassin de rétention et un marais aménagé. Le bassin de rétention capte les eaux de ruissellement et retient les sédiments solides en suspension. Par la suite, l'eau est acheminée graduellement vers le marais.	ARC et GDNR (2001)
Pocket Wetland	Mini marais aménagé	Ce bassin est conçu pour traiter les eaux de ruissellement provenant de zones imperméables dont la superficie se situe entre 2 et 4 hectares.	ARC et GDNR (2001)

Tableau G. 9 BMP du type bassins de rétention

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Retention basin - Wet Detention Ponds - Wet pond - Wetpool	Bassin permanent de rétention	Bassin dans lequel se trouve de l'eau en permanence et où les eaux de ruissellement sont dirigées. Les eaux de ruissellement, après avoir été captées, sont retournées lentement vers le réseau de drainage.	MDE (2000) ARC et GDNR (2001) IDEQ (2005) DEP (2006) CTRE (2007)
Extended Wet Detention Pond	Bassin permanent de rétention avec extension	Aménagement constitué d'un bassin dans lequel se trouve de l'eau en permanence, additionné d'une zone de stockage supplémentaire. Ce réservoir additionnel reçoit un certain volume d'eau lors des événements pluvieux, volume qu'il relâche par la suite graduellement vers le bassin. Cette BMP peut être dimensionnée afin de traiter les eaux d'événements pluvieux de différentes périodes de retour.	ARC et GDNR (2001) Barr Engineering (2001) City of Portland (2004) IDEQ (2005) MSSC (2006)
Wet Detention Ponds with Filtration System	Bassin permanent de rétention avec système de filtration	Même type de bassin que le bassin permanent de rétention, excepté qu'il possède en plus un système souterrain de drains qui permet de relâcher doucement le volume d'eau vers le bassin permanent.	ASCE (2001)
Wet Pond Nutrients	Bassin de rétention et de captage des nutriments	Constitué d'un bassin de rétention permanent auquel est annexé un petit marais qui permet de capter une plus grande quantité de polluants (plus spécialement les nutriments). Ce sont essentiellement les plantes, qui se trouvent dans le marais, qui captent les divers polluants.	IDEQ (2005)

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Dry Detention Basin - Dry Detention Pond - Dry Pond	Bassin temporaire de rétention	Bassin de rétention recouvert de végétation recueillant les eaux de ruissellement qui sont par la suite libérées et acheminées graduellement vers le réseau de drainage. Ce type d'aménagement est conçu pour relâcher la totalité des eaux entre les événements pluvieux.	Barr Engineering (2001) City of Portland (2004) MSSC (2006) CTRE (2007) NCDWQ (2007)
On-line Dry Retention Ponds	Bassin de rétention temporaire et d'infiltration	Bassin qui reçoit toutes les eaux de ruissellement d'un secteur donné et qui les élimine en grande partie par infiltration et évaporation. Seul un très faible volume est par la suite acheminé au réseau ou vers un plan d'eau récepteur.	ASCE (2001)
Dry Extended Detention Basin - Dry Extended Detention Pond - Off-Line Retention/Detention Systems	Bassin de rétention temporaire avec extension	Aménagement similaire au bassin temporaire de rétention mais qui possède en plus un second bassin, de sédimentation cette fois, et qui achemine plus lentement le volume d'eau vers le bassin temporaire. Cette mesure est généralement plus efficace que le bassin temporaire de rétention pour traiter les eaux de ruissellement.	ASCE (2001) IDEQ (2005) DEP (2006)
Micropool Extended Detention Pond	Micro bassin de rétention avec extension	Bassin permanent de rétention avec extension de plus faible superficie adaptée aux aires imperméables plus petites.	ARC et GDNR (2001) CWP (2003) MSSC (2006)
Multiple Pond System	Système de bassins multiples	Aménagements comportant plusieurs bassins temporaires de rétention inter-reliés.	CWP (2003)

BMP	Équivalent Français proposé	Description	Référence
Detention Tanks	Citerne de rétention temporaire	Réservoir souterrain, construit généralement à partir de conduites de métal ondulées et de large diamètre, et servant au stockage des eaux de ruissellement. Ces structures permettent de stocker temporairement les eaux de ruissellement, avant de les retourner vers le réseau de drainage, permettant ainsi de réduire les risques de surcharges du réseau.	ARC et GDNR (2001)
Wet Vault Tank Wetvault	Bassin souterrain	Structure souterraine dans laquelle se trouve de l'eau en permanence, afin d'éviter la remise en suspension des sédiments à chaque événement pluvieux, et qui emmagasine temporairement les eaux de ruissellement. Agit sensiblement comme un bassin de rétention mais adapté aux sites où l'espace en surface est limité.	Barr Engineering (2001) IDEQ (2005) WSDE (2005)
Streets Berm	Berme de rue	Ouvrage légèrement surélevé traversant perpendiculairement la rue d'un trottoir à l'autre. Ce monticule retient les eaux de ruissellement formant ainsi autant de zones temporaires de stockage des eaux. Ces eaux seront, par la suite, soit acheminés au réseau de drainage ou s'évaporeront à la fin de l'événement pluvieux.	Walesh (1999)

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE (TABLEAUX G.1 À G.10)

- ARC et GDNR (2001). Georgia Stormwater Management Manual. Volume 2, Technical Handbook, Atlanta Regional Commission and Georgia Department of Natural Resources - Environmental Protection Division Atlanta, Georgia.
- ASCE (2001). Guide for Best Management Practice (BMP) Selection in Urban Developed Areas. Urban Water Infrastructure Management Committee's, Task Committee for Evaluating Best Management Practices, 51 p.
- Barr Engineering (2001). Minnesota Urban Small Sites BMP Manual: Stormwater Best Management Practices for Cold Climates. Prepared for the Metropolitan Council, St Paul, Minnesota (disponible sur le site www.metrocouncil.org/environment/Watershed/bmp).
- CASQA (2003). California Stormwater Best Management Practice Handbook: New Development and Redevelopment, California Stormwater Quality Association, 376 p.
- City of Knoxville (2007). Best Management Practices (BMP) Manual. City of Knoxville, Engineering Department, Stormwater Engineering Division, 537 p.
- City of Portland (2004). Stormwater Management Manual: Revision #3. Environmental Services, City of Portland, Clean River Works. Oregon.
- CTRE (2007). Iowa Stormwater Management Manual. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University (disponible sur le site <http://www.ctre.iastate.edu/PUBS/stormwater/index.cfm>).
- CWP (2003). Stormwater Management Design Manual. Center for Watershed Protection, New York State, Department of Environmental Conservation, 478 p.
- DEP (2006). Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual. Department of Environmental Protection, Bureau of Watershed Management, 363-0300-002, 642 p.
- IDEQ (2005). Catalog of Stormwater Best Management Practices for Idaho Cities and Counties. Idaho Department of Environmental Quality, Water Quality Division, Boise, Idaho, 663 p.
- MDE (2000). Maryland Stormwater Design Manual: Volume I & II, Maryland Department of the Environment, Water Management Administration, Baltimore, Maryland.
- MSSC (2006). Minnesota Stormwater Manual (Version 1.1), Minnesota Stormwater Steering Committee, Saint-Paul, Minnesota, 624 p.
- NCDWQ (North Carolina Division of Water Quality) (2007). NCDENR Stormwater Best Management Practices Manual. 360 p.
- Stephens, K.A., Graham, P., et D. Reid. (2002). Stormwater Planning - A guidebook for British Columbia. Ministry of Water, Land and Air Protection, Vancouver, B.C., 244 p.
- TWDB (2005). The Texas Manual on Rainwater Harvesting, Texas Water Development Board, 3rd Edition, Austin, Texas, 58 p + 1 annexe.
- UDT (2007) Low Impact Development: Tree Box Filter. Urban Design Tools, www.lid-stormwater.net/treeboxfilter_home.htm (consulté le 21 janvier 2008)

USEPA (2001). Storm Water Technology Fact Sheet: Baffle Boxes. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C., EPA 832-F-01-004, 7 p.

Walesh S.G. (1999). Street storage system for control of combined sewer surcharge-Retrofitting stormwater storage into combined sewer systems. Contact 8C-R416-NTSX, EPA, Edison, NJ.

WSDE (2005). Stormwater Management Manual for Western Washington; Volume V, Runoff Treatment BMPs. Washington State Department of Ecology, Water Quality Program, Publication No. 05-10-33, 250 p.