

**IMPACTS ET ADAPTATIONS LIÉS AUX CHANGEMENTS  
CLIMATIQUES (CC) EN MATIÈRE DE DRAINAGE URBAIN AU  
QUÉBEC**

*Rapport N° R-874*

*Janvier 2007*



**IMPACTS ET ADAPTATIONS LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES (CC) EN  
MATIÈRE DE DRAINAGE URBAIN AU QUÉBEC**

**RAPPORT NO R-874**

Financé par le Fonds d'action sur les changements climatiques  
(FACC)  
Ressources naturelles Canada et  
le Consortium OURANOS

Par

Alain Mailhot  
Gilles Rivard  
Sophie Duchesne  
Jean-Pierre Villeneuve

Rapport N° R-874

 **INRS-Eau, Terre et Environnement**

Québec (Québec)

Janvier 2007



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES AYANT CAUSÉ DES DOMMAGES EN MILIEU URBAIN .....</b>	<b>5</b>
2.1 Liste des événements passés.....	5
2.2 Constats généraux à l'examen des événements historiques.....	10
<b>3. ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES INTENSES .....</b>	<b>15</b>
3.1 Énoncé du problème.....	15
3.2 Distributions considérées .....	16
3.2.1 Distribution généralisée des valeurs extrêmes (« Generalized Extreme Value ») (GEV).....	16
3.2.2 Distribution logistique généralisée (« Generalized logistic ») (GLO) .....	17
3.3 Estimation des paramètres – méthode des L-moments .....	17
3.4 Régionalisation des précipitations.....	18
3.4.1 Identification de la distribution « parente » et estimation des paramètres régionaux .....	19
3.4.1.1 Identification de la distribution parente .....	20
3.4.1.2 Test d'hétérogénéité .....	21
<b>4. ESTIMATIONS DES STATISTIQUES DE PLUIES INTENSES EN CLIMATS ACTUEL ET FUTUR.....</b>	<b>23</b>
4.1 Modélisation climatique.....	24
4.1.1 Scénarios des gaz à effet de serre (GES) .....	24
4.1.2 Variables et tuiles considérées .....	24
4.1.3 Analyse préliminaire des résultats .....	26
4.2 Données observées aux stations .....	27
4.2.1 Analyse préliminaire des données aux stations .....	29
4.3 Comparaison tuile-station en climat présent .....	31
4.4 Estimations tuile par tuile en climats présent et futur .....	34
4.5 Régionalisation des PME.....	38
4.5.1 Régionalisation des PME aux stations.....	38
4.5.2 Courbes IDF moyennes régionales aux stations en climat présent.....	42
4.5.3 Régionalisation des PME aux tuiles (climats présent et futur).....	43
4.5.4 Courbes IDF moyennes régionales aux tuiles en climats présent et futur.....	46
4.6 Courbes IDF en climat futur à l'échelle des stations.....	51
4.6.1 Invariance du ARF entre climats présent et futur (période de retour fixe) .....	51
4.6.2 Invariance du ARF entre climats présent et futur (à intensité donnée).....	53

<b>5. ANALYSE DES IMPACTS DES CC EN MILIEU URBAIN .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 Pluie et drainage urbain.....</b>	<b>62</b>
<b>5.2 Classification des pluies .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3 Élaboration des profils types pour chaque classe .....</b>	<b>67</b>
5.3.1 Première approche : tri des cumuls par sous-intervalle.....	68
5.3.2 Deuxième approche : Interpolation des cumuls.....	69
<b>5.4 Aménagements urbains types considérés .....</b>	<b>72</b>
<b>5.5 Simulations hydrologiques des pluies sur les bassins types.....</b>	<b>73</b>
5.5.1 Discussion des résultats.....	80
<b>5.6 Mesures d'adaptation envisageables.....</b>	<b>83</b>
5.6.1 Approche générale et description des mesures d'adaptation.....	87
5.6.2 Bénéfices potentiels et faisabilité des différentes mesures de contrôle .....	97
5.6.2.1 Contrôles à la source.....	98
5.6.2.1.1 Aménagement avec sol absorbant.....	105
5.6.2.1.2 Infiltration.....	107
5.6.2.1.3 Toits verts.....	113
5.6.2.1.4 Effets combinés de plusieurs mesures de contrôle.....	116
<b>5.7 En résumé .....</b>	<b>118</b>
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>121</b>
<b>7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>129</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Région sous étude.....	25
Figure 4.2	Nombre de stations disponibles en fonction des années. ....	30
Figure 4.3	PME sur 24 h aux tuiles en fonction des PME sur 24 h aux stations correspondantes.....	32
Figure 4.4	PME sur 12 h aux tuiles en fonction des PME sur 12 h aux stations correspondantes.....	32
Figure 4.5	PME sur 6 h aux tuiles en fonction des PME sur 6 h aux stations correspondantes.....	33
Figure 4.6	PME sur 2 h aux tuiles en fonction des PME sur 2 h aux stations correspondantes.....	33
Figure 4.7	Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 24 h. ....	35
Figure 4.8	Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 12 h. ....	36
Figure 4.9	Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 6 h. ....	36
Figure 4.10	Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 2 h. ....	37
Figure 4.11	Diagramme des L-moments pour 24 h. ....	40
Figure 4.12	Diagramme des L-moments pour 12 h. ....	40
Figure 4.13	Diagramme des L-moments pour 6 h. ....	41
Figure 4.14	Diagramme des L-moments pour 2 heures .....	41
Figure 4.15	Courbes IDF moyennes régionales aux stations.....	42
Figure 4.16	Diagramme des ratios des L-moments ( $\underline{t_4}$ vs $\underline{t_3}$ ) pour les PME sur 24 h en climat présent.....	43
Figure 4.17	Diagramme des ratios des L-moments ( $\underline{t_4}$ vs $\underline{t_3}$ ) pour les PME sur 12 h en climat présent.....	44
Figure 4.18	Diagramme des ratios des L-moments ( $\underline{t_4}$ vs $\underline{t_3}$ ) pour les PME sur 6 h en climat présent.....	44
Figure 4.19	Diagramme des ratios des L-moments ( $\underline{t_4}$ vs $\underline{t_3}$ ) pour les PME sur 2 heures en climat présent. ....	45
Figure 4.20	Courbes IDF moyennes régionales aux tuiles en climats présent et futur.....	48
Figure 4.21	Pourcentages d'augmentation des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des tuiles.....	50
Figure 4.22	Augmentation absolue des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des tuiles.....	50

Figure 4.23	Courbes IDF moyennes régionales aux stations tuiles en climats présent et futur (méthode ARF fonction du quantile).....	52
Figure 4.24	Construction des courbes IDF en climat futur à l'échelle des stations à partir des courbes IDF régionalisées aux tuiles (climats présent et futur) et de la courbe IDF régionalisée en climat présent aux stations.....	54
Figure 4.25	Courbes IDF moyennes régionales aux stations tuiles en climats présent et futur (méthode ARF dépendant de l'intensité).....	58
Figure 4.26	Courbes IDF moyennes régionales aux stations en climat futur selon les deux méthodes d'estimation utilisée.....	58
Figure 4.27	Augmentations absolues des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des stations (ARF dépendant de l'intensité).....	60
Figure 4.28	Pourcentages d'augmentation des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des stations (ARF dépendant de l'intensité).....	60
Figure 5.1	Représentation schématique d'un événement pluvieux.....	65
Figure 5.2	Taxonomie des profils temporels pour l'analyse des réseaux urbains.....	67
Figure 5.3	Exemple d'application de la première méthode d'estimation des profils types par classe. Les différentes courbes correspondent à différentes pluies.....	68
Figure 5.4	Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 1 (aéroport de Dorval).....	69
Figure 5.5	Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 2 (aéroport de Dorval).....	70
Figure 5.6	Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 3 (aéroport de Dorval).....	70
Figure 5.7	Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 4 (aéroport de Dorval).....	71
Figure 5.8	Caractérisation des bassins pour un secteur résidentiel type de densité moyenne.....	73
Figure 5.9	Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits (graphique du haut) et volumes de ruissellement maximaux annuels (graphique du bas) pour un secteur 100 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare.....	74
Figure 5.10	Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits et volumes de ruissellement totaux maximaux annuels pour un secteur résidentiel à 35 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare.....	75
Figure 5.11	Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits et volumes de ruissellement totaux maximaux annuels pour un secteur résidentiel à 35 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare.....	76
Figure 5.12	Résultats des simulations pour les conditions futures (stationnement de 0,5 ha).....	78

Figure 5.13	Résultats des simulations pour les débits pour les conditions futures (secteur résidentiel de densité moyenne de 0,5 ha, 35 % imperméable).....	79
Figure 5.14	Résultats des simulations pour les volumes de ruissellement pour les conditions futures (secteur résidentiel de densité moyenne de 0,5 ha, 35 % imperméable).....	80
Figure 5.15	Hydrogrammes pour un bassin de 0,5 ha de type résidentiel à faible densité (35 % imperméable).....	81
Figure 5.16	Chaîne de traitement pour le contrôle du ruissellement urbain (CNRC, 2003). ....	83
Figure 5.17	Prise en compte des différents événements pluvieux pour la gestion des eaux pluviales (tiré de MWLAP, 2002). ....	88
Figure 5.18	Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).....	91
Figure 5.19	Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).....	91
Figure 5.20	Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).....	92
Figure 5.21	Fossé aménagé avec biofiltration dans un terre-plein de boulevard. ....	92
Figure 5.22	Aménagement de rues résidentielles pour maximiser le contrôle à la source et l'infiltration.....	93
Figure 5.23	Exemple d'aménagement de rues résidentielles permettant d'augmenter l'infiltration.....	93
Figure 5.24	Exemple d'aménagement de bandes filtrantes et de fossé de rétention pour un stationnement. ....	94
Figure 5.25	Exemple d'aménagement de fossé de rétention pour un stationnement (avec biofiltration). ....	95
Figure 5.26	Exemple d'aménagement d'espaces verts pour un bâtiment commercial ou multi-résidentiel. ....	95
Figure 5.27	Exemple d'aménagement de toits verts.....	96
Figure 5.28	Volumes disponibles à un point bas d'une rue résidentielle de 10 m de large, avec un devers latéral de 2 % et une pente longitudinale de 1 %. ....	100
Figure 5.29	Volumes disponibles à un point bas d'une rue résidentielle de 10 m de large, avec un devers latéral de 3 % et une pente longitudinale de 0,5 %. ....	101
Figure 5.30	Concept général de rétention en surface des rues (tiré de Walesh, 1999). ....	102
Figure 5.31	Stockage additionnel sous les rues avec des conduites surdimensionnées (tiré de Walesh, 1999).....	103
Figure 5.32	Berme pour augmenter la rétention en surface des rues (tiré de Walesh, 1999). ....	103
Figure 5.33	Exemple d'application avec stockage en surface des rues avec berme pour augmenter la rétention en surface (tiré de Walesh, 1999).....	104
Figure 5.34	Effet de l'épaisseur du sol sur la performance d'un aménagement absorbant avec de la végétation (tiré de MWLAP, 2002). ....	105
Figure 5.35	Bénéfices en matière de réduction de volume de ruissellement et de débit avec un couvert de végétation d'une épaisseur de 300 mm (tiré de MWLAP 2002). ....	106

Figure 5.36	Bénéfices obtenus suite à une réduction des surfaces imperméables (par exemple suite au débranchement des gouttières de toit) pour un lot résidentiel typique (tiré de MWLAP 2002).....	109
Figure 5.37	Seuils en matière de coût pour des contrôles par infiltration sur un lot résidentiel (tiré de MWLAP, 2002). .....	110
Figure 5.38	Seuils pour des contrôles par infiltration sur un lot commercial ou industriel (tiré de MWLAP, 2002). .....	111
Figure 5.39	Bénéfices en matière de réduction de volume de ruissellement et de débit pour ouvrage d'infiltration dans une rue (tiré de MWLAP, 2002). .....	112
Figure 5.40	Bénéfices pour un toit vert en fonction de l'épaisseur du sol (tiré de MWLAP 2002).....	114
Figure 5.41	Bénéfices pour un toit vert en fonction de l'occupation du sol (tiré de MWLAP 2002).....	115
Figure 5.42	Bénéfices globaux en matière de réduction de débit avec différents contrôles (tiré de MWLAP 2002). .....	117

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 2.1	Liste (non exhaustive) des événements pluviométriques d'importance ayant causé des refoulements et inondations en milieu urbain au Québec3 .....	7
Tableau 4.1	Nombre de tuiles ne satisfaisant par les tests d'homogénéité, d'indépendance ou de stationnarité (niveau de confiance de 5 %) pour les simulations en climats présent et futur.....	26
Tableau 4.2	Données disponibles aux différentes stations météorologiques.....	27
Tableau 4.3	Nombre de stations ne satisfaisant pas l'un ou l'autre des tests statistiques au niveau de confiance de 5 %.....	30
Tableau 4.4	Rapport moyen entre PME estimées à partir des données observées et des résultats de simulation du MRCC en fonction de la durée et de la période de retour. ....	34
Tableau 4.5	Moyenne et écarts-types (entre parenthèses) des augmentations relatives (exprimées en pourcentage) des intensités des PME sur les 61 tuiles de la région du sud du Québec. ....	37
Tableau 4.6	Résultats du test pour la sélection de la distribution régionale pour les stations.....	39
Tableau 4.7	Résultats de la statistique H pour les valeurs aux stations.....	39
Tableau 4.8	Valeurs de la distribution GEV régionalisée. ....	39
Tableau 4.9	Valeurs moyennes régionalisées des PME aux stations selon la durée et la période de retour. ....	42
Tableau 4.10	Résultats du test pour la sélection de la distribution régionale pour les tuiles (climats présent et futur). ....	45
Tableau 4.11	Résultats pour les tests H (homogénéité régionale des données) en climats présent et futur.....	46
Tableau 4.12	Moyenne régionale des ratios des L-Moments pour les tuiles en climats présent et futur.....	47
Tableau 4.13	Valeurs régionales des paramètres des distributions parentes en climats présent et futur.....	47
Tableau 4.14	PME moyenne (mm) pour la région du sud du Québec en climats présent (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des tuiles. ....	49
Tableau 4.15	PME régionale moyenne (mm) en climats actuel (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des stations (méthode <i>ARF</i> dépendant du quantile).....	53
Tableau 4.16	PME régionale moyenne (mm) en climat actuel (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des stations (méthode <i>ARF</i> dépendant de l'intensité).....	57

Tableau 5.1	Exemple de classification de pluie (durée totale D = 1 h, et hauteur totale de H = 10 mm (la pluie est associée à la classe 1).....	66
Tableau 5.2	Bassins urbain types analysés. ....	72
Tableau 5.3	Types de pluie sélectionnés pour chacun des types de bassin urbain considérés ....	77
Tableau 5.4	Résumé des résultats pour l'augmentation des débits et volumes de ruissellement pour les conditions actuelles et futures1. ....	82
Tableau 5.5	Pourcentages d'augmentation de quantité de pluie pour les conditions futures et pourcentages d'augmentation pour les débits et volumes de ruissellement pour différents types d'occupation du sol.....	82
Tableau 5.6	Résultats de simulation pour le bassin Malvern pour différentes mesures de contrôle (tiré de Watt et al. 2003). ....	117
Tableau 5.7	Coûts des différentes mesures de contrôle pour le bassin Malvern (tiré de Watt et al, 2003).....	118

# 1. Introduction

---

Le présent rapport rend compte des principaux travaux réalisés dans le cadre du projet financé par le Fonds d'Action sur les Changements Climatiques (FACC) de Ressources naturelles Canada et portant sur la problématique de l'impact des changements climatiques (CC) sur le drainage urbain au Québec. Ce projet a débuté en avril 2004 et s'est officiellement terminé le 31 mars 2006. Les objectifs, tels qu'énoncés dans la proposition de projet déposé auprès de Ressources naturelles Canada, étaient les suivants :

- 1) Évaluer les impacts et les risques de dommages associés aux CC en milieu urbain ainsi que les incidences économiques d'un accroissement de l'occurrence d'événements météorologiques susceptibles de générer des inondations et des dommages;
- 2) Identifier les paramètres caractérisant la vulnérabilité en matière de drainage urbain face aux CC;
- 3) Identifier les mesures d'adaptation à mettre en place et les coûts associés afin de maintenir un niveau de vulnérabilité acceptable en matière de drainage urbain;
- 4) Dans un contexte de réhabilitation des infrastructures de drainage, évaluer les critères de conception actuellement en vigueur au Québec et réviser au besoin ces critères afin de favoriser un rendement optimal sur investissement;
- 5) Définir, sur la base de l'estimation des coûts des mesures d'adaptation, des coûts appréhendés et des dommages, les enjeux posés par les CC en matière de drainage urbain à l'échelle du Québec.

La plupart des objectifs initialement proposés ont été atteints, voire dépassés. Certains volets du projet ont été, en effet, explorés plus avant considérant le potentiel intéressant qu'ils présentaient. Par ailleurs, d'autres objectifs n'ont pu être atteints soit parce que les données pertinentes n'étaient pas disponibles ou étaient inaccessibles ou encore parce que l'analyse s'est avérée beaucoup plus complexe que prévue. Les paragraphes qui suivent donnent une description des travaux et résultats présentés dans ce rapport tout en précisant dans quelles mesures ils rencontrent les objectifs initiaux du projet et, le cas échéant, expliquent en quoi ces travaux ont dépassé les objectifs initiaux, ou encore n'ont pas permis d'atteindre ces objectifs.

L'évaluation des risques et des impacts associés aux CC en milieu urbain s'inscrivait dans une démarche dont les principales étapes visaient à : 1) Dresser un portrait de la situation au Québec en matière de drainage urbain; 2) Recenser les événements récents au Québec ayant conduit à des inondations en milieu urbain; 3) Analyser les données et informations relatives aux événements récents; 4) Élaborer des scénarios de CC de référence; 5) Analyser les impacts des scénarios de CC. Les items 1), 2) et 3) ont été examinés entre autres dans le cadre d'un mandat confié à M. Gilles Rivard de Aquapraxis Inc. Le mandat consistait, sur la base des cas survenus dans la région montréalaise, à faire un inventaire des événements pluvieux ayant causés des dommages significatifs de types inondations et/ou refoulements en territoire urbanisé au cours des 20 dernières années (1985 à 2004). Pour chaque événement, il s'agissait de colliger les informations suivantes : 1) la date, 2) la localisation des dommages (Île de Laval, Île de Montréal et/ou Rive-Sud), 3) la nature des dommages ainsi que 4) une estimation de l'ampleur des dommages causés. Ce mandat a conduit à la rédaction d'un rapport (Rivard 2006) dont le chapitre 2 reprendra les grandes lignes. L'inventaire non exhaustif de ces cas d'inondation en milieu urbain, quoique très instructif à plusieurs égards, n'a pas permis toutefois d'établir de relations claires entre le caractère extrême des événements et l'ampleur des dommages. Plusieurs autres facteurs sont en effet à considérer (cette question sera abordée au chapitre 2). Par ailleurs, il convient de noter qu'il est très difficile d'obtenir des données sur les dommages attribuables à des inondations en milieu urbain. Ces données et informations sont jugées confidentielles par les municipalités qui sont souvent aux prises avec des poursuites devant les tribunaux suite à certains événements. Non seulement est-il difficile d'un point de vue technique de définir des estimateurs afin de quantifier les dommages (par ex. nombre de sous-sol inondés, coût des réclamations, etc.) suite à des inondations en milieu urbain mais les données elles-mêmes permettant l'évaluation de ces estimateurs sont souvent confidentielles.

Les travaux réalisés dans le cadre de l'élaboration des scénarios de CC ont, quant à eux, nettement dépassé les objectifs initiaux, tant en fonction de leur ampleur qu'en fonction de la qualité scientifique des résultats générés. Ces travaux ont en effet permis de construire les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climats présent et futur pour la région du sud du Québec (ces courbes, établies par Environnement Canada, sont utilisées lors de la conception des ouvrages de drainage). Il était initialement prévu d'utiliser les méthodes de « downscaling » statistique pour l'élaboration des scénarios de changements climatiques (CC) des précipitations extrêmes en climat futur. Ces méthodes utilisent les résultats de simulations des modèles globaux de climat (MGC) qui découpent le territoire en tuiles d'environ 300 km x 300 km. Or, nous avons eu accès, par l'entremise d'Ouranos, aux données du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC), dont la résolution spatiale est de 45 km x 45 km, une échelle beaucoup mieux adaptée à la dimension même des événements de pluies intenses en milieu urbain. Le développement des outils d'analyse statistique des résultats de

simulation du MRCC et leur comparaison pour fin de validation avec les estimations issues des données mesurées aux stations ont permis une première évaluation de la performance du MRCC en climat actuel. Les courbes IDF régionales pour le sud du Québec en climat futur pour des pluies de durées 2, 6, 12 et 24 heures et des périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans ont ensuite été estimées. Ces résultats, ainsi que toute la méthodologie y afférant, sont présentés et commentés au chapitre 4. Ces résultats, présentés à quelques occasions lors de colloques ou de conférences, ont soulevé beaucoup d'intérêt.

L'étape suivante a consisté en l'évaluation des impacts que ces modifications aux intensités des pluies intenses pouvaient avoir en matière de débit et de volume de ruissellement en milieu urbain. Plusieurs topologies urbaines ont été considérées (par exemple stationnements, secteurs résidentiels, etc.). Des profils de pluies types ont été construits à partir de pluies réelles et les augmentations escomptées aux intensités attribuables aux CC ont été appliquées à ces profils de pluie. Les pluies types ainsi construites ont été utilisées pour simuler l'écoulement sur différents types de bassin urbain afin d'estimer les volumes et les débits de ruissellement correspondants. Les résultats pour les bassins de types stationnement et secteur résidentiel sont discutés au chapitre 5.

Les incidences économiques d'un accroissement des intensités de pluies intenses en climat futur, et donc des probabilités d'inondation en milieu urbain, n'ont malheureusement pu être estimées dans le cadre de ce projet. Les données à caractère économique sur les dégâts et dommages liés aux inondations et refoulements en milieu urbain sont en effet, comme mentionné plus tôt, très difficilement accessibles compte tenu de leur caractère névralgique. Il n'a pas été possible d'établir une relation, par exemple, entre l'intensité d'un événement et les coûts des dommages en résultant, relation qui nous aurait permis, en extrapolant, d'estimer les coûts en climat futur. Il semble clair cependant que, sans qu'ils aient été chiffrés, les risques d'inondation en milieu urbain croîtront au cours des années à venir si aucune mesure n'est mise en place afin de pallier les augmentations potentielles aux débits et volumes de ruissellement. À ce titre, le contrôle à la source est envisagé comme mesure d'adaptation qui permettrait de réduire les volumes acheminés au réseau de drainage. Ce type de méthode favorise des aménagements ou des pratiques qui ont pour objectif de réduire le volume des eaux de ruissellement et de traiter les eaux pluviales avant qu'elles n'atteignent le réseau municipal. La démonstration de l'efficacité de ce type de mesure, afin de pallier les risques supplémentaires que font peser les CC en matière d'inondation et de refoulement des eaux pluviales en milieu urbain, reste cependant à faire bien que, comme certains résultats présentés au chapitre 5 le montre, l'on peut penser que des gains significatifs peuvent être escomptés suite à la mise en place de telles mesures. Les coûts d'implantation de ces mesures à grande échelle n'ont pas été estimés puisque le choix de la méthode la mieux appropriée, de même que les coûts de mise en place, dépendent d'une foule de facteurs locaux difficilement quantifiables a priori.

Il est clair enfin, dans un contexte de CC, que la conception actuelle des réseaux, basée sur l'utilisation des courbes IDF, doit être revue considérant que les ouvrages de drainage sont souvent conçus pour des périodes allant de 50 à 100 ans. Les échanges avec les gestionnaires et consultants municipaux rencontrés dans le cadre du projet confirment que la méthodologie de conception et l'utilisation même des courbes IDF dans un contexte de conception des réseaux de drainage doivent être revues au Québec. Un travail important reste à faire à ce niveau. Enfin, il convient de noter que la méthodologie d'estimation des courbes IDF dans un contexte non stationnaire n'a pas été examinée dans le cadre de ce projet même si les travaux réalisés ont permis d'identifier des pistes de solution très intéressantes.

## **2. Événements historiques ayant causé des dommages en milieu urbain**

---

Le présent chapitre donne une description sommaire du travail de recensement des événements de pluies passés ayant causé des inondations en milieu urbain. Il est important de noter que ce répertoire n'est pas exhaustif et n'inclut que les cas répertoriés dans la région de Montréal. L'objectif initial de ce type d'exercice était double. D'abord vérifier si, comme plusieurs consultants rencontrés l'ont mentionné, l'on assiste à un accroissement du nombre de cas d'inondation en milieu urbain au cours des dernières décennies, et, en deuxième lieu, vérifier s'il est possible de lier ce possible accroissement de cas d'inondation à une augmentation parallèle de l'intensité et du nombre d'événements de pluies intenses à avoir frappé le milieu urbain.

Un mandat a été confié à la firme Aquapraxis afin de dresser la liste des événements de pluies intenses survenus au Québec, et particulièrement dans la région montréalaise, ayant causé des problèmes d'inondation et/ou de refoulement en milieu urbain. Pour chaque événement, il s'agissait de colliger les informations suivantes : 1) la date, 2) la localisation des dommages (Île de Laval, Île de Montréal et/ou Rive-Sud), 3) la nature des dommages ainsi que 4) une estimation de l'ampleur des dommages causés. La section 2.1 présente les résultats de ce travail et la section 2.2 dresse un bilan des principales conclusions que ce travail d'analyse des événements passés a permis d'établir.

### **2.1 Liste des événements passés**

Le tableau 3.1 donne la liste des différents événements majeurs ayant causé des refoulements et dommages en milieu urbain pour les 35 dernières années au Québec. Les inondations causées par les crues printanières (de mars à mai) ont été volontairement exclues de la liste, bien que ces crues printanières puissent évidemment avoir pu causer des dommages en milieu urbain. Soulignons qu'il n'y a pas d'événement entre 1999 et 2005 qui ait causé des dommages importants (plusieurs pluies importantes ont toutefois été observées à l'été et l'automne 2005 dans les régions de Montréal (14 juin, 5 juillet et 31 août) et de Québec (septembre 2005) mais elles n'ont pas été incluses au tableau puisqu'elles n'ont pas encore fait l'objet d'analyses). Mis à part le fait qu'il ait pu y avoir effectivement moins d'événements météorologiques d'importance entre 1998 et 2005, un des facteurs qui pourrait expliquer en partie ce constat serait les modifications et améliorations apportées

aux réseaux depuis 1997 qui ont entraîné une hausse du niveau de service dans plusieurs cas. Ceci montre le caractère évolutif des systèmes de drainage, ce qui doit évidemment être pris en compte pour l'analyse des relations entre les pluies fortes, le comportement des réseaux et les dommages observés. Les types d'intervention sur des réseaux de drainage existants qui peuvent permettre une hausse du niveau de service sont multiples (la section 5.6 donne une description plus technique de certaines de ces interventions) :

- Prise en compte des capacités de stockage en surface des rues, en utilisant les puisards de rue se trouvant aux points bas des restricteurs permettant de diminuer les débits pouvant atteindre les réseaux souterrains. En maximisant l'accumulation d'eau en surface (sans pour autant créer d'autres problèmes), on peut ainsi réduire les apports aux réseaux souterrains et minimiser les mises en charge hydraulique ;
- Ajout de volumes de stockage à l'intérieur des réseaux, soit par des conduites surdimensionnées ou avec la mise en place de bassins de rétention ;
- Reconstruction des réseaux jusqu'à un exutoire principal, avec un concept de double drainage.

La conception dite du double drainage, qui tient compte de l'existence d'un réseau mineur (les conduites) et d'un réseau majeur (les rues et les ouvrages majeurs d'évacuation), permet de mettre en place des réseaux avec un niveau de service pouvant aller jusqu'à 1 dans 100 ans. Cette approche est parfois plus difficile à utiliser pour des réseaux existants mais, pour de nouveaux développements, la seule différence réside souvent dans le niveau de détails légèrement plus élevé en comparaison avec une conception de type traditionnel. À titre d'exemple, la ville de Laval utilise depuis plusieurs années, pour la plupart de ses nouveaux développements résidentiels, une approche de conception en double drainage, avec une récurrence de 1 dans 100 ans pour les volumes de rétention et l'analyse des réseaux. Comme on peut le constater en examinant les données du tableau 3.1, très peu d'événements ont affecté de façon très dramatique les réseaux de la ville de Laval depuis les 20 dernières années, ce qui semble confirmer le fait que cette approche de conception permet effectivement de rehausser le niveau de service.

Plusieurs informations du tableau ont été tirées de Bergeron *et al.* (1997) (notées avec un <sup>1</sup> après la date de chaque événement), qui regroupaient les données à partir de plusieurs autres sources. Les données sont toutefois dans certains cas incomplètes. Perrier et Slivitzky (1999) se sont également attardés aux cas de pluies abondantes répertoriés au Québec (voir tableau 3.2 de Rivard 2006). Les sections 3.2 à 3.5 de Rivard (2006) discutent plus en détail de certains des événements importants présentés au Tableau 3.1.

**Tableau 2.1 Liste (non exhaustive) des événements pluviométriques d'importance ayant causé des refoulements et inondations en milieu urbain au Québec<sup>3</sup>**

Date	Caractéristiques météorologiques de l'événement	Région affectée	Description sommaire des dommages
1 <sup>er</sup> septembre 1971 <sup>2</sup>	Précipitation peu significative à Dorval ou McGill (donc orage localisé sur Laval, sans données disponibles).	Laval	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés (110 plaintes).
1 <sup>er</sup> août 1979 <sup>2</sup>	Précipitation à Dorval de 16,2 mm en 7 h (période de retour < 2 ans) et 26,7 mm en 12 h à McGill (période de retour < 2 ans).	Laval	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés (148 plaintes).
1 <sup>er</sup> septembre 1979 <sup>2</sup>	Précipitation peu significative à Dorval ou McGill (donc orage localisé sur Laval, sans données disponibles).	Laval	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés (325 plaintes).
14 septembre 1979 <sup>1,2</sup>	Précipitation à Dorval de 81,9 mm en 15 h et 84,5 mm en 14 h à McGill (période de retour entre 25 et 50 ans) (probablement de caractère relativement homogène sur le territoire). Relié à l'ouragan Frédéric : 109,5 mm à St-Anicet (records battus).	Laval, Montréal, sud du Québec	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés (110 plaintes à Laval) et glissements de terrain.
16 juin 1979 <sup>1,2</sup>	Pluie intense: 78 mm en 2 h (période de retour > 100 ans).	Québec	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés.
1-2 juillet 1979 <sup>1</sup>	38 mm le 1 <sup>er</sup> juillet à Ste-Agathe et 16,8 mm le 2 juillet (durée totale inconnue).	Sud des Laurentides Région de Ste-Agathe	Érosion entraînant la fermeture de l'autoroute 15, glissements de terrain et inondations.
6 juillet 1980 <sup>1</sup>	Record de 40 ans battu 137,8 mm en 24 h à Grande-Vallée (période de retour > 100 ans).	Gaspésie	Ponts et routes emportés; 150 personnes évacuées.
21-22 juillet 1980 <sup>1,2</sup>	32 mm le 21 juillet (en 7 h, période de retour de 2 ans) et 28,8 mm le 22 juillet (en 5 h, période de retour de 2 ans) total de 79,8 mm en 48 h à McGill.	Région de Montréal	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés. La deuxième pluie (du 22 juillet) s'est faite sur un sol déjà saturé, ce qui a dû augmenter la réponse hydrologique des bassins versants.
1 <sup>er</sup> septembre 1980 <sup>1</sup>	40 mm en 30 min (période de retour entre 25 et 50 ans pour Dorval).	Région de Montréal Laval et Nord/Est de Montréal	Crues subites avec refoulements d'égouts et sous-sols inondés; 3 morts indirectement liés aux inondations.

20-21 septembre 1980 <sup>1</sup>	58,9 mm le 20 septembre à Québec en 7 h; 51,9 mm en 4 h (période de retour de 10 ans) et 44,8 mm en 2 h (période de retour entre 10 et 25 ans) 20,6 mm le 21 septembre en 2 h (période de retour < 2 ans).	Région de Québec et Cantons de l'Est	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés; pannes électriques à Québec. La deuxième pluie (le 21 sept.) s'est faite sur un sol déjà saturé, ce qui a dû augmenter la réponse hydrologique des bassins versants.
1 <sup>er</sup> janvier 1981 <sup>1</sup>	Pluie hivernale (quantité et durée inconnues).	Laval	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés (118 plaintes).
22 juin 1981 <sup>1</sup>	95 mm en 24 h à Shawinigan (période de retour de 100 ans) 55,3 mm en 6 h à Québec (période de retour de 10 ans)	Nord du Saint-Laurent : de l'Outaouais à Baie-Comeau	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés à Shawinigan, Roberval, St-Hubert et Québec.
20-21 juillet 1981 <sup>1</sup>	35,6 mm en Abitibi 58,6 mm à Québec en 11 h (34,1 mm en 3 h, période de retour entre 2 et 5 ans) Gaspé : 51,4 mm Basse-Côte-Nord : 62,8 mm.	Abitibi vers Québec; Est de la province	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés. À part pour Québec, la durée de la pluie à chaque jour est inconnue mais la réponse hydrologique a probablement été augmentée puisque la pluie de la deuxième pluie s'est abattue sur un sol déjà mouillé.
5-7 août 1981 <sup>1</sup>	100 mm à Rimouski 80 mm à Baie-Comeau Ste-Anne-des-Monts : 75 mm Saguenay : 60 mm (durées inconnues).	Sud et est de la province	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés. 250 maisons à Montmagny, Rimouski, Baie-Comeau, Ste-Anne-des-Monts, Gaspé, Sept-Îles et Saguenay affectées.
25 août 1982 <sup>1</sup>	45-70 mm en 12 h (période de retour entre 2 et 10 ans).	Région de Montréal Estrie, Sud-Est Ottawa	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés.
2 février 1983 <sup>1</sup>	59 mm en 24 h à Québec 45,8 mm en 24 h à Montréal (pluies sur sol gelé).	Montréal et Québec	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés.
18 juin 1984 <sup>1,2</sup>	53,6 mm en 13 h à Montréal (période de retour entre 5 et 10 ans); intensité maximale de pluie probablement plus rare pour de courtes durées.	Montréal	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés. Plus de 1 M\$ de dommages.
27-28 septembre 1985 <sup>1</sup>	79,8 mm à Deschambault. Tempête tropicale Gloria.	Sud du Québec	Refoulements d'égouts et sous-sols inondés à Québec.
8 juin 1986 <sup>1</sup>	61,6 mm en 24 h et 44,3 mm en 1 h à Dorval (période de retour entre 25 et 50 ans).	Montréal	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés.

2. Événements historiques ayant causé des dommages en milieu urbain

26 juillet 1986 <sup>1</sup>	33,4 mm en 8 h à Dorval (période de retour de moins de 2 ans) et 33,2 à St-Hubert (période de retour de moins de 2 ans); intensité maximale de pluie probablement plus rare pour de courtes durées.	Rive Sud de Montréal	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés. St-Constant : 125 plaintes.
9 août 1986 <sup>1</sup>	20 mm en 1 h (période de retour de moins de 2 ans) 50-60 mm en 24 h.	Montréal	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés / Tunnel Ville-Marie inondé.
12 septembre 1986 <sup>1</sup>	Pour 48 h : Angers : 116 mm Lachute : 102 mm Ste-Agathe : 112 mm (60,5 mm en 6 h le 12, période de retour entre 25 et 50 ans) Sept-Îles : 41 mm en 12 h.	Sud du Québec	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés. Ponceaux emportés.
14 juillet 1987 <sup>1,2</sup>	Pluie intense de niveau inégalé pour la région de Montréal 101,2 mm en 2 heures à la station McGill, 86 mm in 1 h à Dorval; 100 mm au Parc Lafontaine et 91,8 mm au Jardin Botanique (période de retour >> 100 ans).	Région de Montréal	Viaduc Décarie inondé avec 3,6 m d'eau, submergeant totalement les autos; 1 mort; 40 000 résidences affectées avec refoulements d'égouts et sous-sols inondés; 100 M \$ de dommages. Pour Laval : 1100 plaintes.
29 juillet 1993 <sup>1,2</sup>	17,5 mm en 5 h à St-Hubert (donc cellules orageuses localisées qui ont produit des précipitations locales plus fortes).	Laval Rive-Sud de Montréal	Refoulements d'égouts; sous-sols inondés. Laval : 78 plaintes. Saint-Constant : 380 plaintes.
19 janvier 1996 <sup>1,2</sup>	Précipitation importante et fonte hivernale rapide et totale avec températures anormalement élevées (13°C). Voir annexe B de Rivard (2006).	Sud du Québec Laval	1 100 maisons évacuées sur la Rive Sud, 72 municipalités affectées. Pour Laval : 300 plaintes. Pour St-Constant : 74 plaintes.
18-20 juillet 1996 <sup>1,2</sup>	Précipitations record atteignant 275 mm en 48 h sur une large surface; plus important événement sur 48 h et une surface de 10 000 km <sup>2</sup> . Période de retour >> 100 ans.	Saguenay, Charlevoix, Côte-Nord	Dommmages sans précédent d'au-dessus de 800 M\$; 10 morts; plaines d'inondation entièrement dévastées par des rivières sortant de leur lit.

8-9 novembre 1996 <sup>2</sup>	Période de retour >> 100 ans pour plusieurs stations pour une durée de 24 h (précipitation maximale de 148 mm en 29 h). Voir annexe C de Rivard (2006).	Rive-Sud de Montréal Mauricie Saguenay-Lac-St-Jean Laval et Basses-Laurentides	Inondations importantes sur un large territoire avec refoulements d'égouts dans plusieurs municipalités; plus de 60 M\$ en dommages seulement pour la Montérégie. Pour Laval : 81 plaintes; Saint-Constant : 700 plaintes; Montérégie : plus de 3 000 plaintes; Décret d'assistance financière pour les sinistrés.
14 juillet 1997 <sup>2</sup>	Orage intense Période de retour > 100 ans pour une durée de plus de 6 h (précipitation maximale de 90 mm en 8 h pour certaines stations). Voir annexe D de Rivard (2006).	Rive-Sud de Montréal	Inondations importantes avec refoulements d'égouts dans plus de 30 municipalités. Décret d'assistance financière pour les sinistrés.
25 août 1998 <sup>2</sup>	Orage fort Période de retour de 20 ans pour une durée de 2 h. Voir annexe E de Rivard (2006).	Rive sud de Montréal	Environ 200 sous-sols inondés en Montérégie.

1. Informations tirées de Bergeron *et al.* (1997)
2. Informations tirées d'entrevues et d'analyses spécifiques rassemblées dans le cadre du mandat d'Aquapaxis
3. Un examen plus détaillé de ces événements est donné dans Rivard (2006).

## 2.2 Constats généraux à l'examen des événements historiques

Les informations regroupées au tableau 3.1 font ressortir le fait que, mis à part les pluies de nature très exceptionnelle comme celles du 14 juillet 1987 à Montréal ou du 18 au 22 juillet 1996 au Saguenay, certains des événements qui ont causé des dommages par le passé n'étaient pas tous de récurrence très rare. En fait, la vulnérabilité face à un événement de pluie donné dépend de plusieurs facteurs :

- **Les types de réseau, leur âge et le mode de conception (critères et approches).**  
Concernant les types de réseau de drainage, on retrouve actuellement au Québec des réseaux de type combiné (construits avant le milieu des années 1960) ou séparatifs (construits à partir du début des années 1980). Les réseaux combinés (qui ne sont plus permis au Québec sauf pour des cas d'exception) étaient généralement conçus avec une

récurrence un peu plus élevée que les réseaux exclusivement pluviaux (période de retour de 1 dans 10 ans au lieu de 1 dans 5 ans qui est le plus souvent utilisée pour les réseaux pluviaux). Malgré ce critère de conception plus serré, ils sont souvent plus vulnérable, et ce pour différentes raisons. Tout d'abord, pour plusieurs municipalités, ce type de réseau se retrouve près des cours d'eau récepteurs et les réseaux se sont par la suite développés vers l'amont. Les réseaux combinés se retrouvent donc souvent en aval de secteurs dont le développement n'avait pas été initialement prévu et dont les apports additionnels peuvent occasionner une surcharge des réseaux plus anciens en aval. L'âge plus avancé des réseaux combinés peut également faire en sorte que des problèmes structuraux, et non pas exclusivement hydrauliques, puissent se développer et favoriser les mises en charge. Il y a également les réseaux de type pseudo-séparatif (eux aussi proscrits au Québec depuis le début des années 1980), où on permettait, en plus des débits domestiques, d'accueillir dans les réseaux domestiques les drains de fondation. Ce type de réseau peut devenir en charge lors de pluies longues et fortes pour lesquelles les contributions des drains de fondation sont importantes. Quant aux approches de conception, elles ont évolué au fil des ans et il est maintenant tenu pour acquis que des techniques plus modernes de conception, prenant en compte par exemple un concept de double drainage et utilisant de la rétention, permettent d'obtenir un niveau de service global plus élevé. Un autre élément qui n'était pas intégré aux conceptions antérieurement est la prise en compte des singularités hydrauliques dans les réseaux, par exemple aux jonctions avec différentes conduites, où il est important de considérer les pertes de charge locales et de bien concevoir les chambres de jonction afin d'éviter un rehaussement trop important de la ligne piézométrique.

- **La topographie générale des territoires** peut également avoir une influence sur la vulnérabilité des réseaux. Par exemple, les municipalités de la Rive Sud de Montréal sont caractérisées, de façon générale, par un relief relativement plat et l'influence des niveaux d'eau dans les milieux récepteurs peut, dans ce cas, avoir une influence directe et non négligeable sur le comportement hydraulique des réseaux (par le rehaussement de la ligne piézométrique et son influence sur l'écoulement). Ce facteur joue moins par exemple dans les régions de Québec ou Sherbrooke où on retrouve une topographie plus accidentée. D'autres problèmes peuvent toutefois apparaître dans ces cas, en particulier lorsque des réseaux de pente forte se jettent dans des parties de réseau de pente plus faible. On peut alors, sous certaines conditions, observer lors d'événements pluvieux très intenses une mise en charge très rapide et forte, souvent associée à la formation d'un ressaut hydraulique. Ce type de problème peut également être exacerbé par les mauvaises conditions hydrauliques à une

jonction entre plusieurs conduites (Communication, M. Richard Bernier, ing., ville de Sherbrooke).

- **La situation géographique et les types de sol** peuvent également parfois être des facteurs aggravants. Certains secteurs sont par exemple construits sur des sites où les niveaux de la nappe phréatique sont élevés, entraînant des taux d'infiltration importants dans les réseaux. Ce niveau d'infiltration peut être acceptable pour un réseau pluvial (considérant l'ampleur relativement faible des débits d'infiltration comparativement aux débits de ruissellement) mais intolérable pour un réseau domestique, ce qui pourra causer des refoulements.
- **Contexte socio-économique et réglementation.** L'ampleur des dommages peut être aussi affectée par le contexte socio-économique et l'application ou la non-application de la réglementation (par exemple la permissivité quant à la construction d'habitations en zone inondable, la richesse foncière et la présence de biens de plus grande valeur dans les sous-sols complètement aménagés, la présence ou non de clapet de retenue qui devrait, selon la plupart des réglementations municipales ou le code de plomberie, être installé, etc.). Concernant l'utilisation des clapets de retenue pour la protection des sous-sols, il est intéressant de noter qu'avec une conception traditionnelle des réseaux, en choisissant par exemple une récurrence de 1 dans 5 ans, on assume implicitement que les réseaux viendront en charge pour un événement plus rare et c'est pourquoi on préconise la mise en place de clapets. Or, ce n'est qu'en 1951 que le Code de Plomberie du Québec mentionne l'utilisation des clapets et la plupart des réglementations municipales ne les mentionnent qu'à partir des années 1960 au mieux; on peut donc présumer que la plupart des habitations construites avant la fin des années 1950 n'ont pas été munies de clapets. Cet élément, combiné au fait que ces habitations sont souvent desservies par des réseaux combinés dans les vieux secteurs qui drainent parfois de nouveaux secteurs de développement en amont (voir point 1), augmentent le niveau de vulnérabilité de ces demeures.
- **Entretien et maintenance des réseaux.** Cet aspect peut être facilement négligé et pourtant être un facteur critique à la mise en charge des réseaux, par exemple, lorsque des sédiments ou débris accumulés réduisent la capacité hydraulique de certains tronçons. Une pluie courte et intense pourra remettre en suspension ces sédiments dans les réseaux qui pourront, par la suite, se redéposer en plus grande concentration en un autre endroit et réduire la surface d'écoulement. Par ailleurs, une pluie très longue générant des volumes de pluie importants pourra lessiver complètement les surfaces des rues et transporter des débris plus en aval, où ils pourront, dans certains cas, bloquer des ponceaux ou des parties de réseaux.

- **Niveau d'imperméabilisation et planification mal contrôlée des aménagements.**  
Finalement, une planification déficiente ne tenant pas compte des capacités d'accueil des réseaux en place pourra évidemment devenir un facteur aggravant pouvant conduire à une surcharge des réseaux. De même l'augmentation induite des surfaces imperméables au fil des ans accroîtra le niveau des apports au réseau et pourra entraîner des mises en charge et des refoulements pour des pluies qui, antérieurement, ne posaient aucun problème.



### 3. Analyse statistique des pluies intenses

---

L'élaboration des scénarios de pluies intenses s'effectue en utilisant les résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) (voir chapitre 4). Afin de comparer les données observées et les résultats de simulation, une analyse statistique des extrêmes de pluie doit être réalisée. Les outils et techniques standards ont été utilisés à cette fin. Les distributions GEV et GLO (voir sections 3.2.1 et 3.2.2) ont été considérées pour décrire les précipitations maximales annuelles (valeurs locales et régionalisées) et estimer leurs intensités pour différentes périodes de retour. L'estimation des paramètres des distributions a été effectuée en utilisant la méthode des L-moments dont le biais est moins prononcé lorsque les historiques disponibles sont courts (voir section 3.3). Considérant que les résultats du MRCC doivent être interprétés en terme régional, les résultats de simulation et les précipitations aux stations ont été régionalisés. La régionalisation consiste à supposer l'existence d'une distribution régionale pour laquelle les moments d'ordres supérieurs sont uniques pour l'ensemble de la région, les réalisations locales dépendant de la valeur de la moyenne, par exemple. Diverses procédures permettent d'identifier cette distribution régionale et de vérifier que les données peuvent être effectivement considérées comme homogènes. L'ensemble de ces techniques et procédures est décrit à la section 3.4.

#### 3.1 Énoncé du problème

Soit  $X_i$  la valeur maximale d'une variable aléatoire  $x$  sur une période de durée fixe, par exemple une année. Dans le cas qui nous intéressera,  $x_i$  sera la précipitation maximale enregistrée sur une durée donnée (par exemple 24 h) pendant les mois de mai à octobre inclusivement pour une année  $i$  à une station donnée. L'on dispose donc pour un historique de  $n$  années d'un ensemble de  $n$  données  $\{x_i\}$  que l'on ordonne selon un ordre croissant  $\{x_{j_1}^{(1)} < x_{j_2}^{(2)} < \dots < x_{j_n}^{(n)}\}$ . L'objectif est dès lors de trouver la distribution qui permettra de reproduire la probabilité cumulative empirique de cette série.

## 3.2 Distributions considérées

Deux types de distribution ont été considérées dans la suite des analyses, à savoir les distributions GEV (pour « Generalized Extreme Value ») et GLO (pour « Generalized Logistic »). Les sections suivantes présentent successivement ces deux distributions.

### 3.2.1 Distribution généralisée des valeurs extrêmes (« Generalized Extreme Value ») (GEV)

La distribution généralisée des valeurs extrêmes (distribution GEV) s'écrit sous la forme suivante (Hosking et Wallis 1997; Coles 2001) :

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \exp \left[ - \left\{ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \xi) \right\} \right]^{1/k} & k \neq 0 \\
 &= \exp \left[ - \exp \left\{ - \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right\} \right] & k = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

avec :

$$\begin{aligned}
 -\infty < x < \xi + \frac{\alpha}{k} & \quad \text{si } k > 0 \\
 \xi + \frac{\alpha}{k} \leq x < \infty & \quad \text{si } k < 0 \\
 -\infty < x < \infty & \quad \text{si } k = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Les trois paramètres de la distribution GEV sont le facteur de position  $\xi$  ( $\xi > 0$ ), le facteur d'échelle,  $\alpha$  ( $\alpha > 0$ ) et le facteur de forme,  $k$ , compris généralement dans l'intervalle  $[-1/2, 1/2]$  (Hosking *et al.* 1985). La distribution Gumbel (ou EV-I) est obtenue lorsque  $k = 0$ . La fonction cumulative inverse de la distribution GEV est donnée par :

$$\begin{aligned}
 x(F) &= \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - (-\log F)^k \right\} & k \neq 0 \\
 &= \xi - \alpha \log(-\log F) & k = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

### 3.2.2 Distribution logistique généralisée (« Generalized logistic ») (GLO)

La fonction de distribution « Generalized Logistic » se présente comme suit :

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \left\{ 1 + \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \xi) \right]^{1/k} \right\}^{-1} & k \neq 0 \\
 &= \left\{ 1 + \exp \left[ -\frac{(x - \xi)}{\alpha} \right] \right\}^{-1} & k = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Les valeurs possibles de  $x$  sont similaires à celles de la distribution GEV (voir équation 2). La fonction cumulative s'écrit :

$$\begin{aligned}
 x(F) &= \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[ \frac{1-F}{F} \right]^k \right\} & k \neq 0 \\
 &= \xi - \alpha \log \left( \frac{1-F}{F} \right) & k = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

### 3.3 Estimation des paramètres – méthode des L-moments

La méthode des L-moments (Hosking et Wallis 1997; Hosking *et al.* 1985) a été utilisée afin d'estimer les valeurs des paramètres de la distribution GEV à partir des données disponibles. Cette méthode offre l'avantage de fournir des estimateurs non biaisés des valeurs de paramètres, et ce même si l'échantillon disponible est petit. Soit  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  un ensemble ordonné de  $n$  données ( $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ; par exemple, des précipitations maximales annuelles sur 24 h). On définit la statistique  $b_r$  telle que (Perreault et Bobée 1992) :

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_j \tag{6}$$

avec  $r = 0, 1, 2, \dots$ . Les L-moments jusqu'à l'ordre 4 sont estimés à partir des expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
l_1 &= b_0 \\
l_2 &= 2b_1 - b_0 \\
l_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0 \\
l_4 &= 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0
\end{aligned}
\tag{7}$$

Les ratios des L-moments  $t$  (« L-CV ratio »),  $t_3$  (« L-skewness ratio ») et  $t_4$  (« L-Kurtosis ratio ») sont calculés à partir des expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
t &= l_2/l_1 \\
t_3 &= l_3/l_2 \\
t_4 &= l_4/l_2
\end{aligned}
\tag{8}$$

Enfin, il est possible d'exprimer les L-moments en fonction des paramètres de la distribution GEV et d'inverser ces fonctions. Hosking *et al.* (1985) ont montré que l'on peut estimer les paramètres de la distribution GEV à partir des expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
k &\approx 7.8590c + 2.9554c^2 \\
\alpha &= k \left[ \frac{2b_1 - b_0}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})} \right] \\
\xi &= b_0 + \frac{\alpha}{k} [\Gamma(1+k) - 1]
\end{aligned}
\tag{9}$$

et où :

$$c = \frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3}
\tag{10}$$

Des expressions similaires peuvent être obtenues pour la distribution GLO (voir annexe A de Hosking et Wallis 1997).

### 3.4 Régionalisation des précipitations

La régionalisation consiste à supposer que les réalisations d'une variable aléatoire observée en différents sites sont issues d'une distribution « parente » dont certains paramètres ont un caractère régional. L'avantage de la régionalisation est qu'elle permet de regrouper les données de divers sites et d'améliorer ainsi la fiabilité des estimations statistiques. Par ailleurs, considérant le fait que le

modèle climatique travaille à partir d'une représentation discrète du territoire (tuile de 45 km x 45 km; voir chapitre 4), il est plus juste de considérer ces résultats représentatifs d'un climat régional plutôt que d'un climat local. À ce titre, les techniques de régionalisation sont les outils tout désignés pour regrouper les résultats du modèle et en tirer des statistiques régionales des précipitations extrêmes. La régionalisation, telle qu'appliquée dans le cadre du présent projet, comporte deux étapes, à savoir 1) l'identification de la distribution parente à considérer et l'estimation des paramètres régionaux, et 2) l'élaboration d'un test visant à vérifier l'homogénéité des sites ainsi regroupés.

### 3.4.1 Identification de la distribution « parente » et estimation des paramètres régionaux

Hosking et Wallis (1997) proposent d'utiliser le diagramme des ratios  $t_4$  vs  $t_3$  afin de vérifier le type de distribution parente à considérer dans un cas donné. Les distributions comportant trois paramètres (tels que la GEV, la distribution de Pareto, la distribution logistique généralisée) sont représentées par des courbes sur ce diagramme alors que les distributions à deux paramètres (par exemple la distribution Gumbel) correspondent à des points. La proximité du couple de valeurs  $(t_3, t_4)$ , estimées à partir d'un ensemble de données observées, des valeurs associées à l'une des distributions paramétriques communément utilisées, sert de critère d'identification de la distribution parente à retenir. Un test permet d'identifier cette distribution, test décrit à la section 3.4.1.1.

Les valeurs régionalisées des ratios des L-moments  $t^R, t_3^R, t_4^R$  sont définies en effectuant la moyenne pondérée des valeurs aux sites :

$$\begin{aligned} t^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t_j \\ t_3^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t_3^{(j)} \\ t_4^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t_4^{(j)} \end{aligned} \quad (11)$$

où  $t_j, t_3^{(j)}, t_4^{(j)}$  sont les ratios des L-moments au site  $j$ ,  $n_j$  est le nombre de données disponibles au site  $j$ ,  $n$ , le nombre de sites et  $N$  le nombre total de données disponibles :

$$N = \sum_{j=1}^n n_j \quad (12)$$

### 3.4.1.1 Identification de la distribution parente

Soit une région comportant  $N_s$  sites et avec pour chacun les ratios  $t_j, t_3^{(j)}, t_4^{(j)}$  des L-moments. Les valeurs régionalisées des ratios des L-moments  $t^R, t_3^R, t_4^R$  sont estimées conformément à l'équation 11. Les distributions candidates à trois paramètres pressenties pour décrire le comportement statistique régional sont les distributions logistique généralisée (GLO), GEV, Pareto généralisée (GPA), log-normal (LN3) et Pearson type III (PE3) (voir l'annexe A de Hosking et Wallis (1997) pour une description de ces distributions). L'identification de la distribution parente s'effectue selon les étapes suivantes :

- 1) Le ratio des L-moments  $t_4^{DIST}$  pour chaque distribution candidate DIST est estimé à partir des valeurs régionales des L-moments  $1, t^R, t_3^R$ ;
- 2) Les paramètres de la distribution Kappa sont estimés à partir des ratios des L-moments  $1, t^R, t_3^R, t_4^R$  (la distribution Kappa englobe, en tant que cas particulier, les distributions GLO, GEV, GPA, LN3 et PE3; voir annexe A de Hosking et Wallis 1997 et Hosking 1994);
- 3) La distribution Kappa est utilisée pour générer un grand nombre de réalisations conformes aux données de la région considérée. Ainsi, si  $N_s$  est le nombre de sites et  $n_i$  le nombre d'années de données disponibles au site  $i$ , alors  $N_{sim}$  réalisations de  $n_i$  valeurs aux  $N_s$  sites sont générées. Les valeurs des L-moments  $t^{(m)}, t_3^{(m)}, t_4^{(m)}$  pour chaque réalisation sont calculées.
- 4) La valeur  $Z^{DIST}$  est calculée pour chaque distribution candidate :

$$Z^{DIST} = \frac{1}{\sigma_4} (t_4^{DIST} - t_4^R + B_4) \quad (13)$$

où :

$$B_4 = \frac{1}{N_{sim}} \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{(m)} - t_4^R)$$

$$\sigma_4 = \left\{ \frac{1}{(N_{sim} - 1)} \left[ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{(m)} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (14)$$

- 5) La distribution candidate DIST pour laquelle  $Z^{DIST}$  est le plus près de zéro est sélectionnée et le résultat est jugé concluant si  $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ .

#### 3.4.1.2 Test d'hétérogénéité

Afin de vérifier si les différents sites peuvent être considérés issus d'une même distribution « parente » régionale, le test d'hétérogénéité suivant est effectué :

- 1) Les valeurs moyennes pondérées des L-moments sont estimées (équation 11);
- 2) L'écart-type entre la valeur moyenne régionale des ratios des L-moments et l'ensemble des valeurs aux sites est estimé :

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} n_i (t_k^{(i)} - t_k^R)^2}{\sum_{i=1}^{N_s} n_i}} \quad (15)$$

L'indice  $k$  réfère aux trois L-moments  $t, t_3, t_4$  ;

- 3) Les paramètres de la distribution Kappa sont estimés à partir des ratios des L-moments  $1, t^R, t_3^R, t_4^R$  ;
- 4) La distribution Kappa est utilisée pour générer  $N_{sim}$  conformément aux données de la région considérée (voir section précédente);
- 5) Les valeurs de  $t^{(m)}, t_3^{(m)}, t_4^{(m)}$  et de  $V_k$  sont calculées pour chaque réalisation;
- 6) La moyenne  $\mu_{V_k}$  et l'écart-type  $\sigma_{V_k}$  des valeurs de  $V_k$  pour l'ensemble des simulations sont estimés;
- 7) L'indice d'hétérogénéité est ensuite calculé :

$$H_k = \frac{(V_k - \mu_{V_k})}{\sigma_{V_k}} \quad (16)$$

8) Une région est déclarée « raisonnablement homogène » si les indices des trois ratios satisfont la condition  $H_{V_k} < 1$ , « possiblement hétérogène » si l'un ou l'autre des ratios satisfait  $1 \leq H_{V_k} < 2$  et « très certainement hétérogène » si l'un des indices satisfait l'inégalité  $2 \leq H_{V_k}$ .

## 4. Estimations des statistiques de pluies intenses en climats actuel et futur

---

Le présent chapitre décrit la méthodologie utilisée, de même que les principaux résultats obtenus, dans l'élaboration des scénarios de changements climatiques des pluies intenses. Les résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) en climats présent (période [1961-1990]) et futur (période [2041-2070]) ont été utilisés. La section 4.1 donne une brève description de ce modèle, du scénario de gaz à effet de serre considéré et des simulations et variables utilisées dans le cadre de la présente étude. Une première étape a consisté en la comparaison des résultats du MRCC en climat actuel avec les données observées. Les données mesurées ayant servi à cette comparaison sont décrites à la section 4.2 et la comparaison effective des résultats du MRCC avec les estimations obtenues des données observées sont décrites à la section 4.3. L'approche statistique utilisée est décrite à la section 3.4 et repose pour une part sur les techniques de régionalisation statistique des pluies. Les résultats de ces analyses sont présentés aux sections 4.4 et 4.5 où sont successivement présentés les résultats des comparaisons entre les estimateurs des PME issues des valeurs observées et simulées (climat actuel) et les estimations des PME en climat futur.

Avant de procéder à l'estimation des PME en climat futur, il est important toutefois de vérifier que les estimations obtenues du MRCC sont comparables aux estimations issues des données observées. Cette comparaison s'est effectuée en deux temps. Dans un premier temps, une comparaison tuile-station est réalisée où les estimations des PME obtenus des données observées sont comparées aux estimations pour la tuile correspondante. Dans un deuxième temps, les valeurs moyennes régionalisées des estimations des PME obtenus des données observées et des simulations sont comparées. La section 4.3 présente les résultats de la comparaison tuile-station alors que la section 4.5.5 décrit la procédure et les résultats dans le cas des valeurs régionalisées. Enfin, la section 4.6 reprend l'analyse pour les simulations en climat futur et présente la méthodologie d'estimation et les résultats des courbes IDF régionales en climat futur pour le sud Québec

## 4.1 Modélisation climatique

L'évaluation des conditions climatiques futures s'appuie sur les résultats de simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) (version 3.7.1). Le domaine de simulation utilisé par le MRCC couvre presque entièrement l'Amérique du Nord et est formé de 204 x 189 tuiles de taille 45 km x 45 km. Les simulations utilisées dans le cadre de ce projet considèrent deux périodes, l'une représentant le climat présent (période 1961-1990) et l'autre le climat futur (période 2041-2070). Le MRCC est alimenté par les résultats de simulation du « Canadian Global Coupled Climate Model » (CGCM2). Les résultats de Plummer *et al.* (2006) montrent que les résultats de simulation de cette version du MRCC en climat présent sont globalement en accord avec les données observées, tant pour les moyennes saisonnières régionales que pour la variabilité interannuelle saisonnière des précipitations et des températures. Il va sans dire que ce modèle est en constante évolution et que d'autres versions seront disponibles au cours des années à venir, voire des mois à venir.

### 4.1.1 Scénarios des gaz à effet de serre (GES)

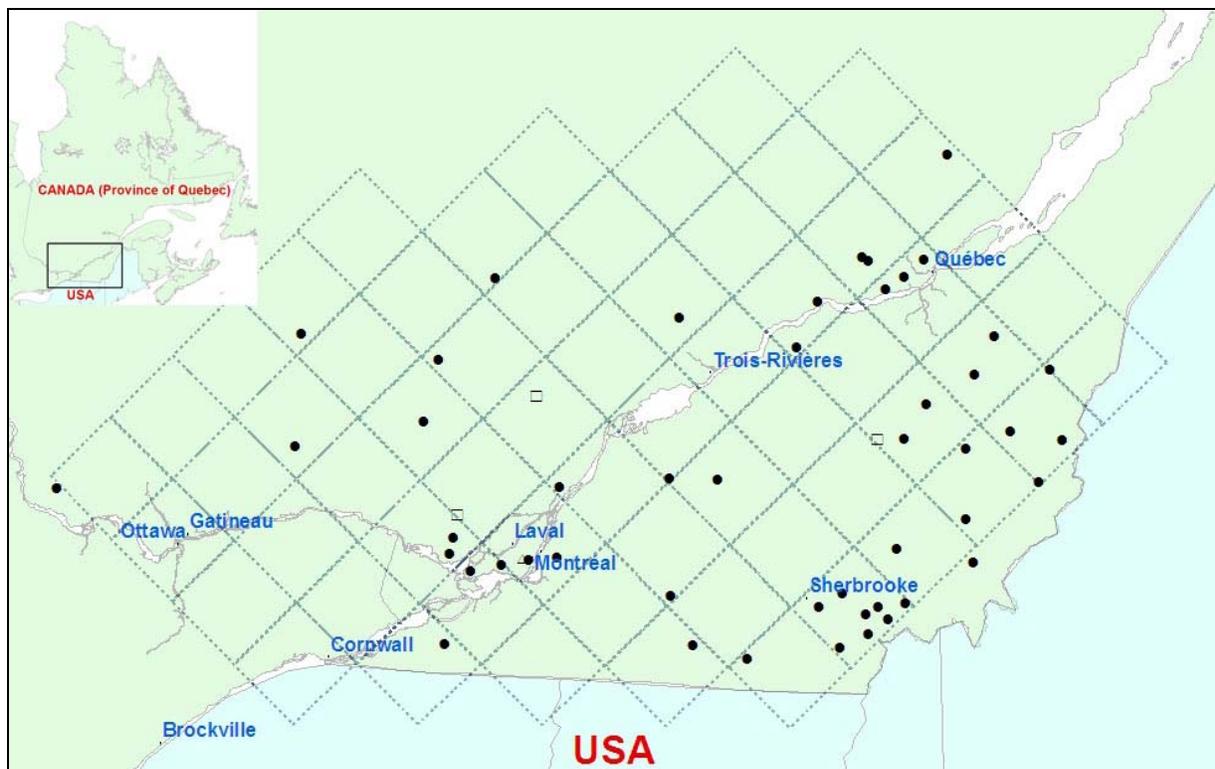
Les scénarios de gaz à effet de serre (GES) considérés par les deux modèles (MRCC et CGCM2), utilisent les niveaux historiques de GES jusqu'en 2000 pour le CGCM2 et 1990 pour le MRCC. Pour la période future (2000 à 2100 pour le CGCM2 et 2041 à 2070 pour le MRCC), le scénario SRES A2 de « International Panel on Climate Change » (IPCC) a été utilisé pour définir l'évolution future des concentrations de GES en atmosphère (Houghton *et al.*, 2001; ce scénario d'évolution des GES est très souvent considéré dans les simulations climatiques). Selon les concentrations historiques enregistrées, les concentrations effectives de CO<sub>2</sub> ont augmenté de 408 à 476 ppmv (partie par million pour les volumes) durant la période 1971-1990. Pour la période 2041-2070, les concentrations effectives de CO<sub>2</sub> augmenteront, conformément au scénario considéré, de 714 à 950 ppmv.

### 4.1.2 Variables et tuiles considérées

La figure 4.1 présente une carte où sont localisées les stations météorologiques, le site à l'étude et les tuiles utilisées dans le cadre de la présente étude. La région du sud du Québec ainsi couverte comprend 61 tuiles et regroupe 52 stations. C'est dire que des valeurs de variables météorologiques sont disponibles pour chacune des tuiles et la sélection de ces

dernières a été effectuée afin, d'abord, de couvrir le sud du Québec, et, ensuite, d'être en mesure d'apprécier la variabilité des résultats du MRCC à l'échelle de la région d'étude.

Les variables simulées utilisées pour l'étude sont les précipitations maximales simulées à chaque mois pour chaque tuile (et chaque station) pour des durées de 2 h, 6 h, 12 h et 24 h pour la période de mai à octobre inclusivement. Ces données sont disponibles pour les deux périodes de simulation, à savoir la période 1961-1990 pour le climat actuel (ou climat présent) et la période 2041-2070 pour le climat futur.



**Figure 4.1** Région sous étude. Les lignes pointillées délimitent les 61 tuiles; les 48 points représentent les stations pluviométriques utilisées pour les maximums sur les durées de 2, 6, 12 et 24 h; le triangle correspond à une station utilisée pour l'analyse sur la durée 24 h; les 3 carrés évidés correspondent à des stations utilisées pour les durées 2, 6 et 12 h.

### 4.1.3 Analyse préliminaire des résultats

Les précipitations maximales annuelles pour la période mai-octobre (désigné dans la suite par l'acronyme PME pour Précipitation Maximale Estivale) pour des durées de 2 h, 6 h, 12 h et 24 h ont été estimées pour chaque tuile. Les valeurs fournies par le modèle correspondent donc aux précipitations à survenir sur une tuile couvrant une superficie de 45 km x 45 km. Des tests statistiques de base ont par ailleurs été effectués afin de vérifier la stationnarité (absence de tendances historiques; test de Mann-Kendall), l'homogénéité (données issues d'une même distribution; test de Wilcoxon) et l'indépendance des données (données successives non corrélées; test de Wald-Wolfowitz). Le tableau 4.1 présente un résumé des résultats obtenus. Ces résultats confirment à un niveau de confiance de 5 % l'hypothèse voulant que les résultats soient stationnaires, homogènes et statistiquement indépendants pour les durées 2 h, 6 h, 12 h et 24 h. À noter particulièrement que, conformément à ces résultats, aucune tendance globale et significative n'est détectée sur les extrêmes de précipitations pour chacune des périodes présente et future (un nombre relativement important de tuiles (13 % des tuiles) présente cependant des séries non stationnaires en climat présent pour la durée 12 h). Bien que les séries de PME pour chaque période soient stationnaires, il n'en est cependant pas de même entre les périodes présentes et futures où, comme il sera montré plus loin, on constate un accroissement significatif des intensités des PME.

**Tableau 4.1 Nombre de tuiles ne satisfaisant par les tests d'homogénéité, d'indépendance ou de stationnarité (niveau de confiance de 5 %) pour les simulations en climats présent et futur.**

Simulation	Durée (heures)	Indépendance	Homogénéité	Stationnarité
Climat présent	24	2	4	3
	12	1	9	8
	6	4	2	3
	2	4	2	3
Climat futur	24	0	1	1
	12	1	2	2
	6	0	1	2
	2	3	4	3

## 4.2 Données observées aux stations

Les données historiques pour les stations météorologiques ont été fournies par Environnement Canada. Les données de 52 stations ont ainsi été colligées (voir Figure 4.1). Le tableau 4.2 présente les types de données disponibles à chacune de ces stations de même que les périodes pour lesquelles des données sont disponibles. Les stations retenues devaient comprendre minimalement 15 années de données complètes. Les données se présentaient sous forme de maximums journaliers pour différentes durées.

Pour les fins d'évaluation des intensités des pluies extrêmes, seuls les mois de mai à octobre sont considérés (mois pour lesquels les précipitations sont généralement sous forme liquide). Les précipitations maximales estivales (PME) considérées dans ce qui suit correspondent donc aux intensités maximums enregistrées à chaque année pour la période mai-octobre pour une durée donnée (2 h, 6 h, 12 h ou 24 h).

**Tableau 4.2 Données disponibles aux différentes stations météorologiques**

Numéro	Nom	Latitude (deg)	Longitude (deg)	# d'années données disponibles	
				24 h	2 h à 12 h
7011309	Charl. Parc-Orléans	46,9	-71,3	19	22
7011982	Deschambault	46,7	-71,9	18	16
7012240	Duchesnay	46,9	-71,7	19	19
7014160	L'Assomption	45,8	-73,4	38	31
7015730	Oka	45,5	-74,1	21	15
7016294	Québec Aéroport	46,8	-71,4	41	33
7016900	St-Augustin	46,7	-71,5	24	22
7016902	Ste-Béatrix	46,2	-73,6	-	17
7016906	St-Benoît	45,6	-74,1	17	16
7016932	Ste-Catherine	46,9	-71,6	23	25
7017100	St-Donat	46,3	-74,2	17	26
7018000	Shawinigan	46,6	-72,8	23	28

7020840	Brome	45,2	-72,6	19	24
7022160	Drummondville	45,9	-72,5	20	16
7022494	Fortierville	46,5	-72,0	17	21
7022720	Georgeville	45,1	-72,2	17	21
7022800	Granby	45,4	-72,7	21	26
7023312	Island-Brook	45,4	-71,5	16	17
7023677	Lac-Mégantic 2	45,6	-70,9	21	24
7024280	Lennoxville	45,4	-71,8	43	35
7024320	Lingwick	45,6	-71,4	22	27
7024624	Maple-Leaf East	45,3	-71,4	16	16
7025250	Montréal Int.-Dorval	45,5	-73,8	57	38
7025260	Montréal Jean-Brébeuf	45,5	-73,6	16	-
7025280	Montréal McGill	45,5	-73,6	28	26
7025745	Ormstown	45,1	-74,1	25	31
7026839	Ste-Anne-de-Bellevue	45,4	-73,9	27	21
7027120	Ste-Edwidge	45,2	-71,7	16	16
7027200	St-Éphrem	46,1	-71,0	23	24
7027248	St-Ferdinand	46,1	-71,5	-	20
7027283	St-Georges	46,2	-70,7	25	27
7027302	St-Guillaume	45,9	-72,8	18	22
7027320	St-Hubert A	45,5	-73,4	24	27
7027372	St-Isidore-d'Auckland	45,3	-71,5	16	16
7027656	St-Pierre-de-Broughton	46,3	-71,2	19	21
7027725	St-Sébastien	45,8	-71,0	18	23
7027750	St-Théophile	45,9	-70,5	23	28
7027785	St-Zacharie	46,1	-70,4	18	21
7027802	Sawyerville-Nord	45,4	-71,5	24	30
7028124	Sherbrooke	45,4	-71,7	28	33
7028441	Thetford-Mines	46,1	-71,4	24	26

7028676	Vallée-Jonction	46,4	-70,9	22	27
7028906	West-Ditton	45,4	-71,3	25	27
7031375	Chénéville	45,9	-75,1	17	22
7035290	Montréal Mirabel-A	45,7	74,0	-	20
7035520	Nomingue	46,4	-75,1	19	16
7036762	Ste-Agathe-des-Monts	46,1	-74,3	25	25
7038040	Shawville	45,6	-76,5	21	25
7042388	Forêt-Montmorency	47,3	-71,2	24	28
7057287	Ste-Germaine	46,4	-70,5	25	27
7057518	St-Malachie	46,6	-70,8	25	22
7077570	St-Michel-des-Saints	46,7	-73,9	20	25

#### 4.2.1 Analyse préliminaire des données aux stations

Les PME à chaque station ont d'abord été estimées. Le critère suivant, inspiré de Vincent et Mekis (2005), a été utilisé afin de déterminer si le maximum d'une année pour une durée donnée était retenu pour fin d'analyse lorsque certaines données étaient manquantes. Ainsi, pour que le maximum sur la période mai à octobre soit retenu, chaque mois de cette période ne devait pas compter de données manquantes sur plus 72 heures consécutives (ou 3 jours) ou sur plus de 120 heures (ou 5 jours) aléatoirement réparties dans le mois. Les précipitations maximales annuelles pour la période mai-octobre pour des durées de 2 h, 6 h, 12 h et 24 h ont été estimées à chaque station. Le graphique de la figure 4.2 montre l'évolution du nombre de stations comportant des données pour chaque année.

Des tests statistiques de base ont par ailleurs été effectués afin de vérifier la stationnarité (absence de tendances historiques; test de Mann-Kendall), l'homogénéité (les données ne sont pas homogènes, par exemple, lorsque la station de mesure a été déplacée; test de Wilcoxon) et l'indépendance des données (les données successives ne sont pas corrélées; test de Wald-Wolfowitz). Le tableau 4.3 présente un résumé des résultats obtenus des différents tests aux différentes stations. Ces résultats confirment à un niveau de confiance de 5 % l'hypothèse

voulant que les données soient stationnaires, homogènes et statistiquement indépendantes pour les durées 2 h, 6 h, 12 h et 24 h. À noter particulièrement que, conformément à ces résultats, aucune tendance à la hausse (ou à la baisse) des intensités de pluies n'est détectée. Il faut voir cependant que la variabilité interannuelle des PME est très grande et que la détection d'une tendance sera possible si l'historique disponible est long ou encore la tendance très marquée (voir à ce sujet Easterling et Evans 2000; Hegerl *et al.* 2004).

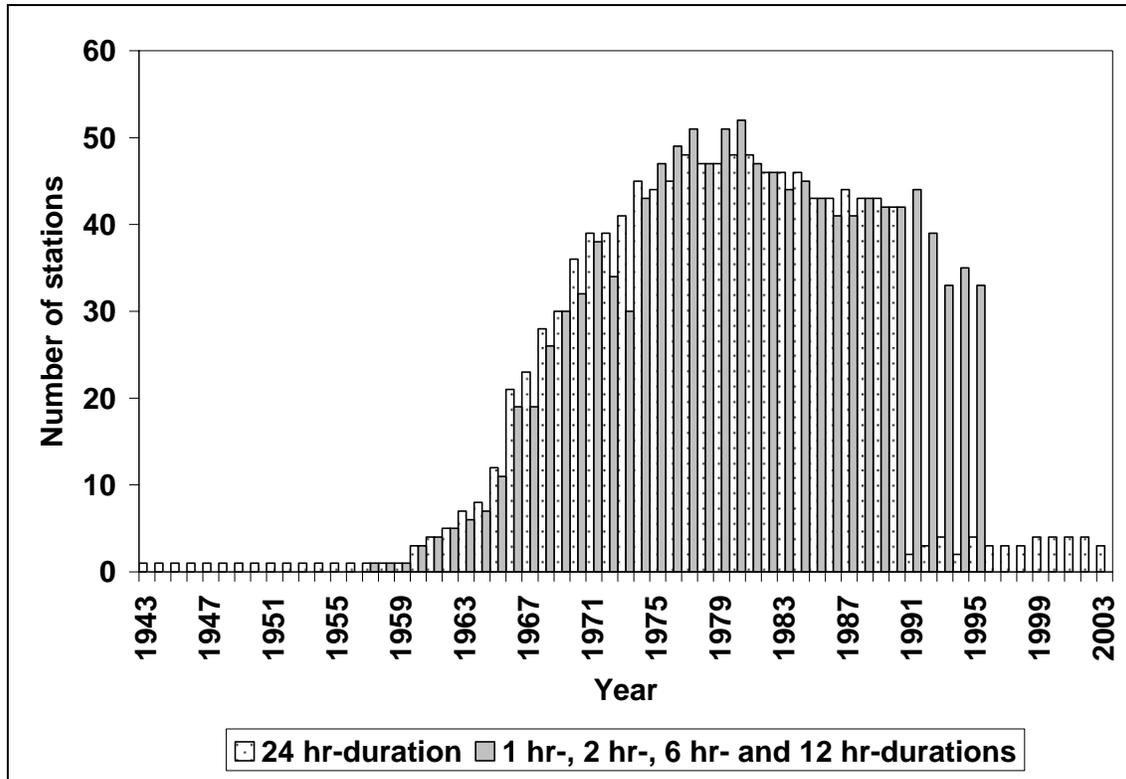


Figure 4.2 Nombre de stations disponibles en fonction des années.

Tableau 4.3 Nombre de stations ne satisfaisant pas l'un ou l'autre des tests statistiques au niveau de confiance de 5 %.

Durée (heures)	Nombre total de stations	Indépendance	Homogénéité	Stationnarité
24	49	3	0	0
12	51	3	1	1
6	51	0	4	3
2	51	2	2	1

### 4.3 Comparaison tuile-station en climat présent

La distribution GEV (voir section 3.2.1) a été considérée pour décrire les séries de PME disponibles à chaque station et pour chaque tuile. La méthode du  $\chi^2$  a été utilisée afin de vérifier que cette distribution représentait adéquatement les données disponibles aux stations. Ce test appliqué seulement aux stations comportant plus de 20 années de données montre que le choix de la distribution GEV est acceptable (niveaux de confiance de 5 % et 1 %) pour toutes les stations et toutes les durées. Cette distribution a donc été retenue et les valeurs des paramètres estimées en utilisant la méthode des L-moments. Pour les résultats de simulations aux tuiles, la méthode de ré-échantillonnage («bootstrap») a été utilisée pour générer diverses réalisations et un test de Kolmogorov-Smirnov a été appliqué à chacune et vérifié, sur la base de la comparaison des résultats de ce test pour les réalisations avec la valeur actuelle, si la distribution GEV (ou GLO) était acceptable. Les résultats montrent que, pour toutes les tuiles et toutes les durées, l'une ou l'autre de ces distributions est acceptable au niveau de 5 %. La distribution GEV a été retenue et les estimations des PME aux tuiles ainsi estimées.

Les figures 4.3 à 4.6 regroupent un ensemble de graphiques permettant de comparer les estimations des PME aux stations et sur les tuiles correspondantes. Les valeurs en ordonnées de ces graphiques correspondent aux PME issues des simulations du MRCC et les valeurs en abscisses aux PME issues des valeurs observées (un accord parfait entre ces estimations se traduirait par un ensemble de points localisés sur la droite de pente 1). Un certain nombre d'éléments se dégage de l'examen de ces figures :

- 1) Les PME estimées aux stations sont généralement inférieures aux valeurs correspondantes aux tuiles et cet écart croît lorsque la durée des PME diminue;
- 2) Pour toutes les durées, le rapport entre PME estimées aux stations et aux tuiles semble relativement constant en fonction de la période de retour;
- 3) La variabilité inter station est généralement plus grande que la variabilité inter tuile et cette différence entre variabilités est plus accentuée à mesure que la durée diminue.

En fait, l'ensemble de ces constats est cohérent avec le fait que le MRCC simule un climat à une échelle de 45 km x 45 km. Considérant que les événements donnant lieu aux PME sur 24 h seront plus étendus que les PME sur 6 h par exemple, il est normal que le rapport des PME stations et tuiles soient inférieures à un et plus près de un pour la durée 24 h que la durée 6 h.

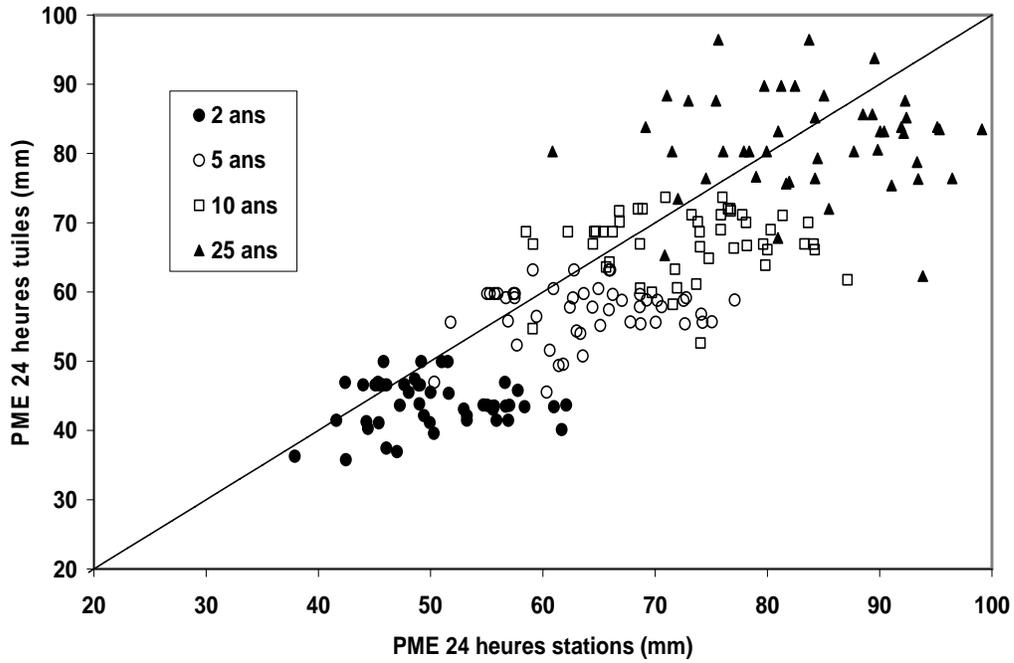


Figure 4.3 PME sur 24 h aux tuiles en fonction des PME sur 24 h aux stations correspondantes.

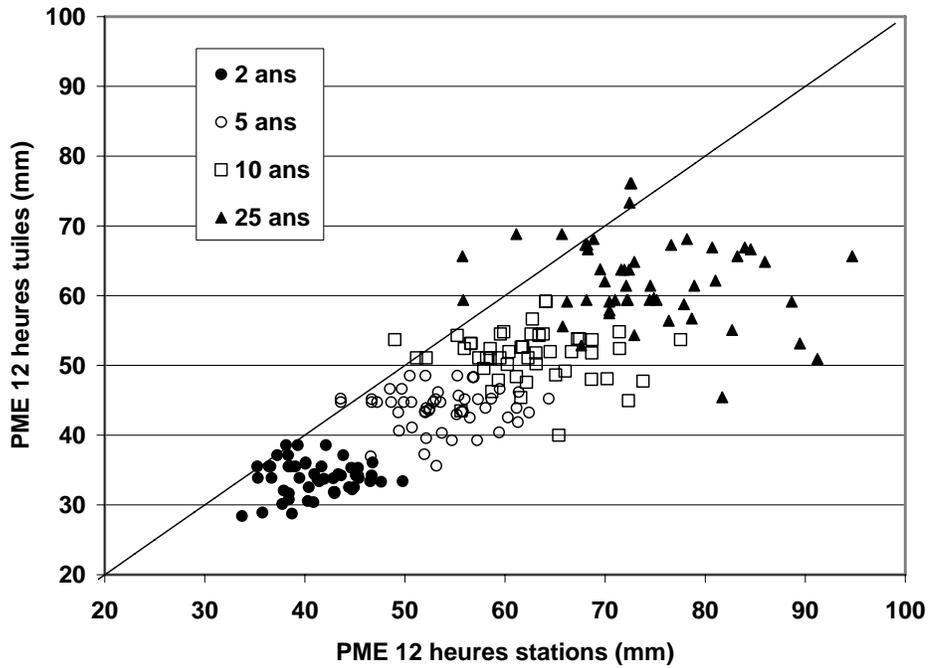


Figure 4.4 PME sur 12 h aux tuiles en fonction des PME sur 12 h aux stations correspondantes.

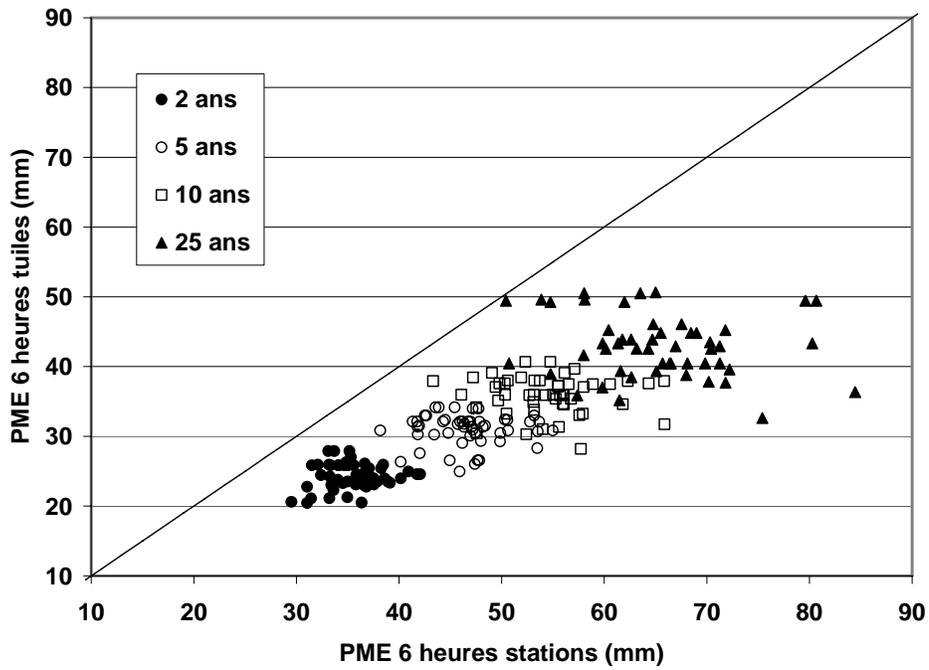


Figure 4.5 PME sur 6 h aux tuiles en fonction des PME sur 6 h aux stations correspondantes.

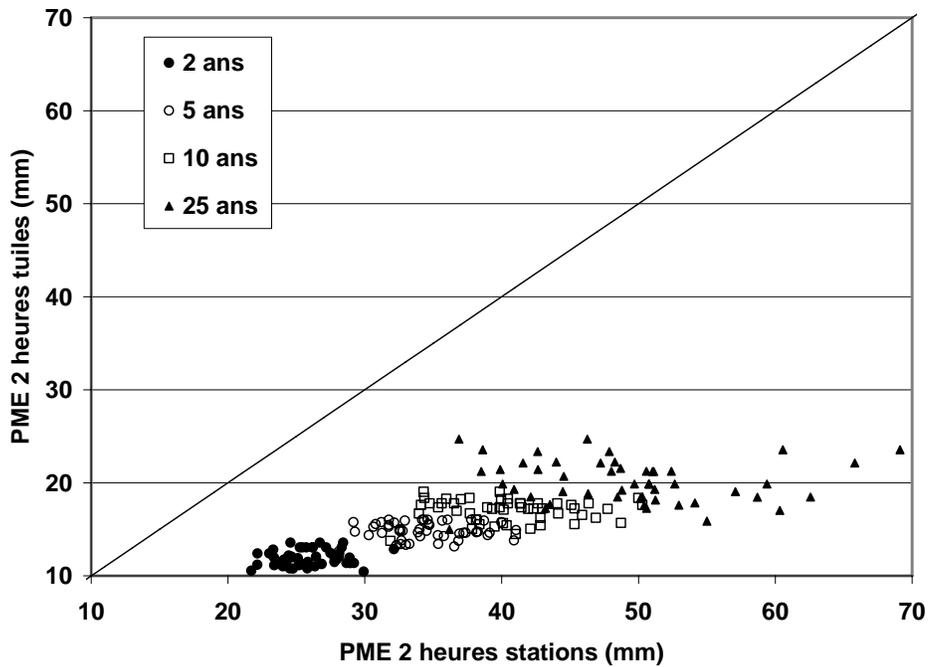


Figure 4.6 PME sur 2 h aux tuiles en fonction des PME sur 2 h aux stations correspondantes.

La moyenne des rapports entre valeurs des PME aux stations et pour les tuiles correspondantes a été calculée pour chaque période de retour et durée. Ce rapport, qui correspond à ce qui est communément appelé le « areal rainfall factor » (ou ARF), représente le rapport entre la hauteur de précipitation sur une surface donnée (dans notre cas une surface de 45 km x 45 km) et la hauteur équivalente à une station située à l'intérieur de cette surface (Srikanthan, 1995; Allen et DeGaetano 2002). L'ARF dépend donc, en principe, de la durée et de la période de retour considérées. Le tableau 4.4 présente un résumé des valeurs de ARF ainsi obtenues selon la durée et la période de retour considérées. On constate de fait que ce rapport diminue avec la durée (les événements intenses sur de plus courtes durées étant plus localisés) et reste relativement constant en fonction de la période de retour. Les systèmes météorologiques qui entraîneront les PME pour de courtes durées (moins d'un jour) seront davantage de type convectif, donc d'extension spatiale plus faible que les systèmes stratiformes associés aux événements entraînant des PME sur de plus longues durées. Ce faisant, les systèmes associés aux plus courtes durées ne couvriront pas l'ensemble de la tuile et les valeurs simulées par le MRCC sous-estimeront en toute logique les valeurs observées, et ce d'autant plus que la durée considérée sera petite. En fait, le MRCC simule des précipitations dont les caractéristiques sont celles des précipitations moyennes sur les tuiles (Osborn et Hulme, 1997; Fowler *et al.* 2005; Ekström *et al.* 2005).

**Tableau 4.4 Rapport moyen entre PME estimées à partir des données observées et des résultats de simulation du MRCC en fonction de la durée et de la période de retour.**

Durée (heures)	Période de retour (années)			
	2	5	10	25
24	0,88	0,90	0,93	0,97
12	0,83	0,82	0,83	0,85
6	0,69	0,67	0,66	0,67
2	0,46	0,43	0,42	0,42

#### 4.4 Estimations tuile par tuile en climats présent et futur

Les résultats en climats présent et futur ont d'abord été comparés tuile par tuile (Mailhot *et al.* 2006). Les figures 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 donnent une représentation graphique de cette comparaison pour les PME de durées 24, 12, 6 et 2 h respectivement. L'abscisse de ces graphiques correspond à l'estimation des PME en climat présent alors que l'ordonnée

représente ces mêmes variables en climat futur (les différents symboles sont associés aux différentes périodes de retour). Les augmentations relatives des intensités des PME entre climats présent et futur pour chaque tuile ont aussi été estimées. Le tableau 4.5 présente les moyennes et les écarts-types de ces augmentations sur l'ensemble des tuiles. On constate, à l'examen de ces tableaux et figures, que :

- 1) En moyenne, pour toutes les durées et les périodes de retour, le MRCC simule globalement une augmentation des intensités des PME (points majoritairement en deçà de la droite de pente 1);
- 2) Les augmentations demeurent relativement constantes pour les durées 2 h et 6 h en fonction de la période de retour alors qu'elles diminuent pour les durées de 12 h et 24 h. et ont tendance à être plus importantes pour les PME de plus courte durée;
- 3) Les écarts-types croissent avec la période de retour considérée mais, pour une période de retour donnée, sont très similaires quelle que soit la durée.

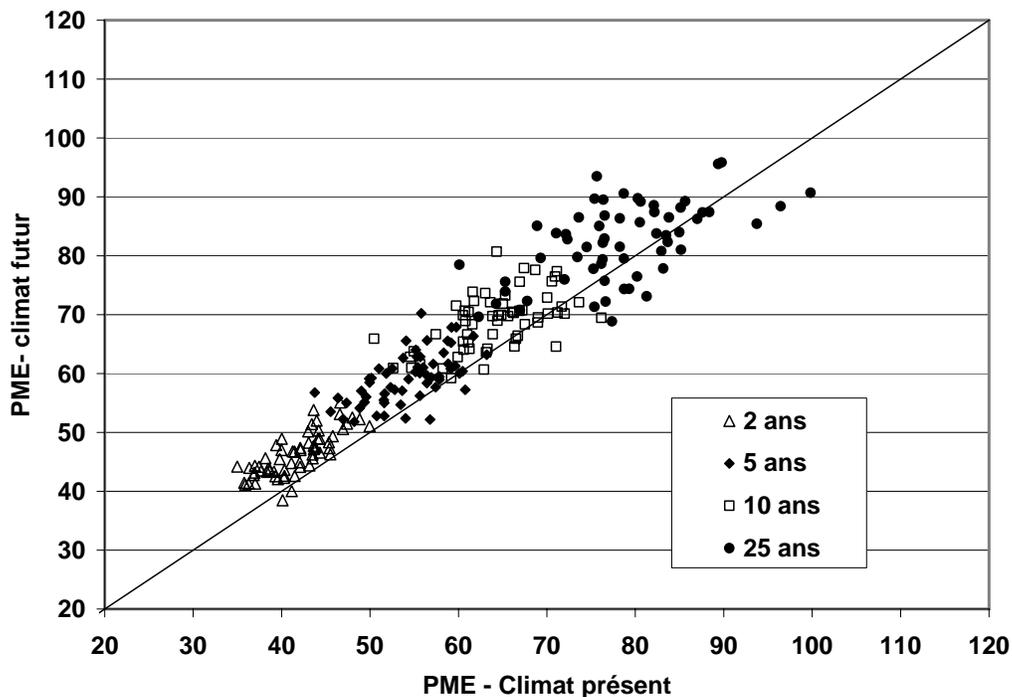


Figure 4.7 Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 24 h.

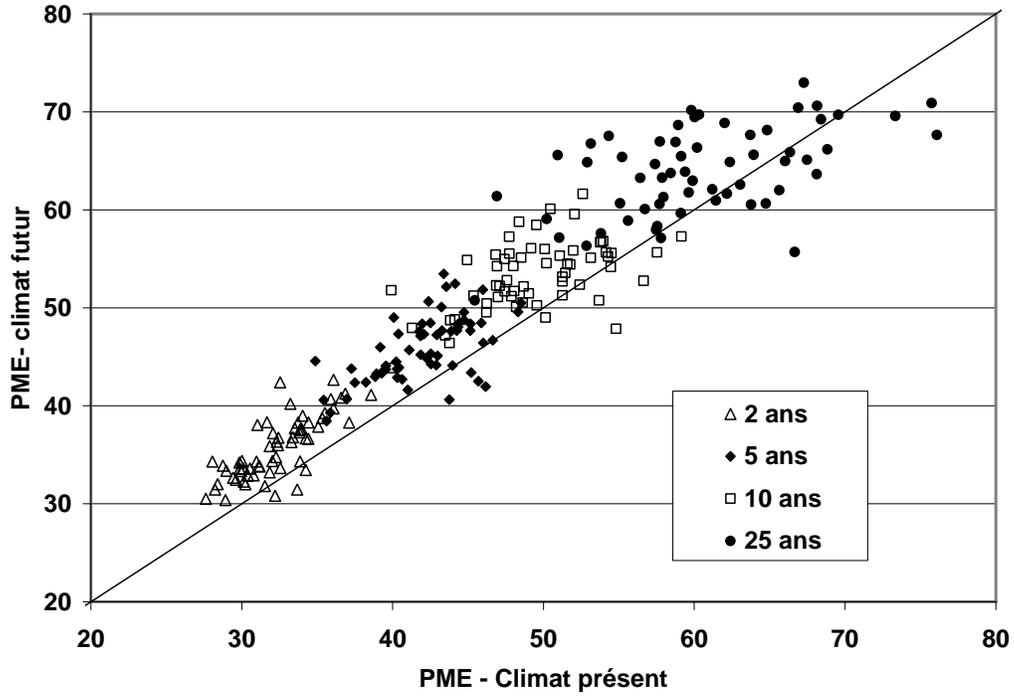


Figure 4.8 Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 12 h.

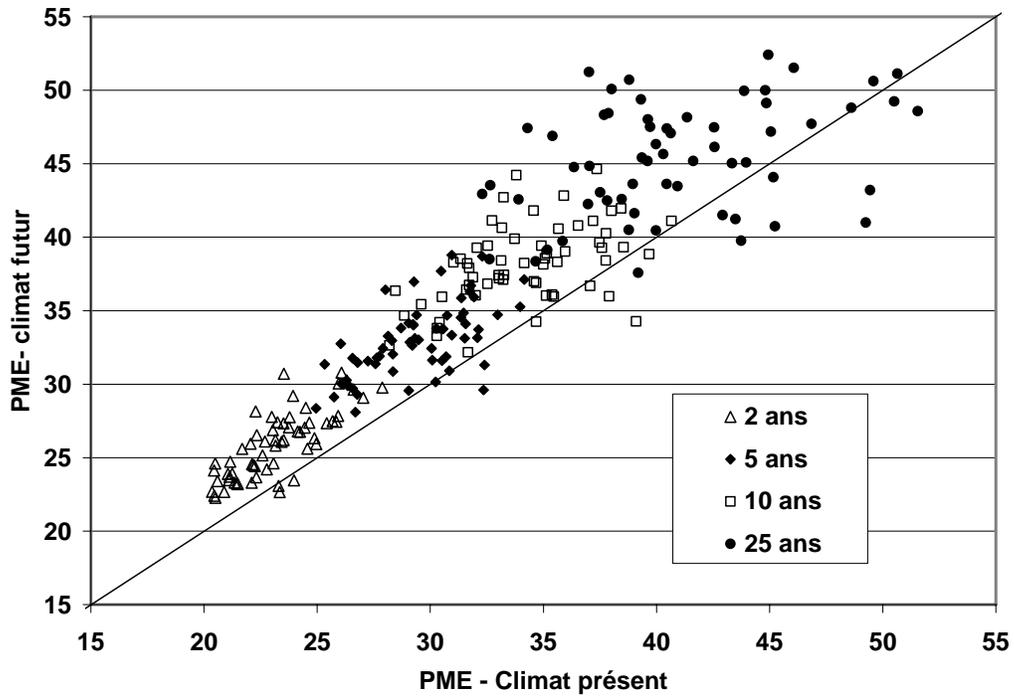


Figure 4.9 Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 6 h.

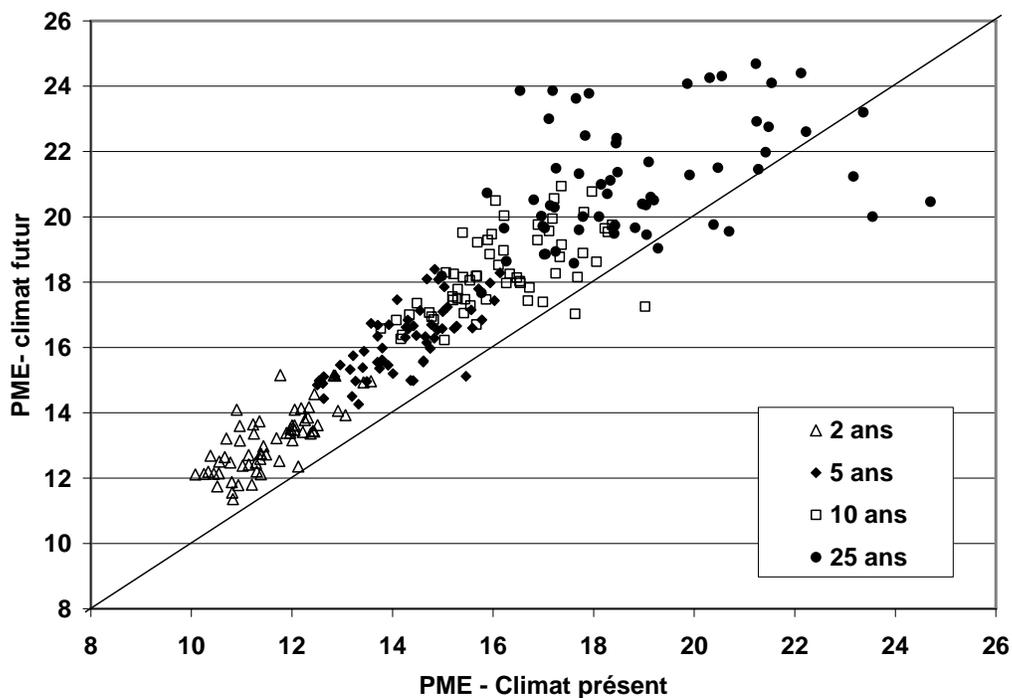


Figure 4.10 Comparaison climats présent et futur pour les PME simulées sur 2 h.

Tableau 4.5 Moyenne et écarts-types (entre parenthèses) des augmentations relatives (exprimées en pourcentage) des intensités des PME sur les 61 tuiles de la région du sud du Québec.

Période de retour (ans)	Durée (heures)			
	2	6	12	24
2	14 (6)	12 (6)	10 (6)	11 (6)
5	14 (5)	12 (7)	9 (7)	9 (7)
10	13 (7)	12 (9)	8 (8)	8 (8)
25	13 (12)	12 (13)	6 (10)	6 (9)

Bien que les valeurs du tableau 4.5 soient sensiblement du même ordre de grandeur que les valeurs estimées après régionalisation (voir section 4.5) (dans les deux cas les valeurs oscillent autour de 5 à 15 %), on peut noter une différence plus marquée pour les grandes périodes de retour pour la durée 2 h. Il faut noter aussi que la variabilité (écarts-types des distributions des augmentations) des résultats selon les tuiles augmente avec la période de retour (pour une durée donnée) et reste relativement constante (périodes de retour de 2, 5 et 10 ans) ou diminue légèrement (période de retour de 25 ans) en fonction de la durée.

## 4.5 Régionalisation des PME

La régionalisation des PME aux stations et aux tuiles a été effectuée conformément à la procédure décrite à la section 3.4. La section 4.5.1 rend compte des résultats obtenus pour les stations alors que la section 4.5.2 reprend l'analyse pour les tuiles de la région du sud du Québec.

### 4.5.1 Régionalisation des PME aux stations

La régionalisation vise à déterminer si les observations sont tirées de la même distribution-parente et correspondent à des réalisations possibles issues de cette distribution (voir section 3.4). L'avantage de l'analyse régionale est qu'elle permet de regrouper des données de différents sites, et donc d'améliorer, sous certaines conditions, les estimations statistiques. Les figures 4.11 à 4.14 présentent les diagrammes des ratios des L-moments  $t_3$  et  $t_4$  pour les différentes durées considérées. Les valeurs régionales ont été estimées en effectuant la somme pondérée en fonction du nombre d'observations des moments en chaque site (voir équation 11 au 3). Ces valeurs sont représentées par les carrés dans les figures 4.11 à 4.14. Le diagramme des ratios  $t_4$  et  $t_3$  des L-moments permet une première identification de la distribution la mieux à même de représenter les données à l'échelle régionale. Les courbes associées aux distributions GEV et logistique généralisée (GLO) sont aussi présentées. Le tableau 4.6 présente par ailleurs les résultats du test permettant de sélectionner la distribution régionale (voir section 3.4.1.1). Pour mémoire, rappelons que pour que le test soit concluant et qu'une distribution soit sélectionnée, l'on doit avoir  $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ . Ces résultats montrent donc, comme l'examen des figures 4.11 à 4.14 le suggère, que, sauf pour la durée 24 h où la

distribution GEV semble nettement mieux adaptée, les distributions GEV ou GLO peuvent indistinctement être utilisées comme distribution régionale pour les autres durées. De fait, la distribution GEV a été utilisée dans ce qui suit.

L'homogénéité des données a aussi été vérifiée (voir section 3.4.1.2). Le tableau 4.7 présente un résumé des tests effectués. Pour les durées 2, 6 et 12 h, la région peut être qualifiée de « raisonnablement homogène ». Dans le cas de 24 h, la région est « possiblement hétérogène » conformément aux indications de Hosking et Wallis (1997). Pour fin d'analyse, l'hypothèse que la région est homogène a toutefois été retenue dans ce qui suit.

**Tableau 4.6 Résultats du test pour la sélection de la distribution régionale pour les stations.**

Durée (heures)	$Z_{GEV}$	$Z_{GLO}$
24	0,41	3,76
12	-1,58	1,31
6	-1,21	1,44
2	-1,39	1,18

**Tableau 4.7 Résultats de la statistique H pour les valeurs aux stations.**

Durée (heures)	H1	H2	H3
24	1,34	1,48	0,78
12	-0,77	-1,12	-1,16
6	-0,99	-1,17	-0,46
2	0,19	-0,89	-0,97

**Tableau 4.8 Valeurs de la distribution GEV régionalisée.**

Durée (heures)	$\xi$	$\alpha$	$k$
24	45,9	12,4	0,01
12	37,2	10,8	-0,05
6	32,3	9,5	-0,06
2	23,3	7,2	-0,08

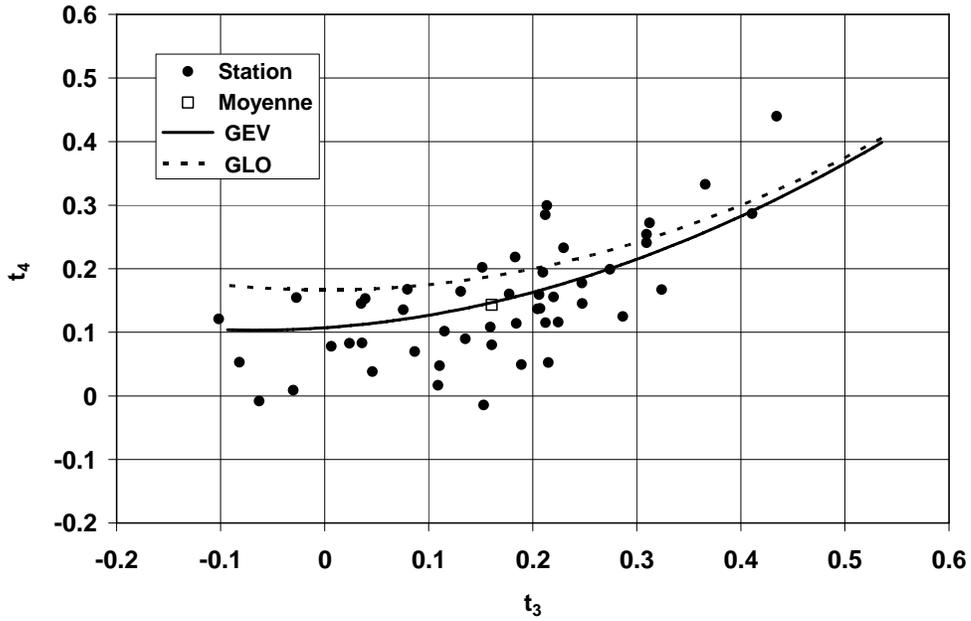


Figure 4.11 Diagramme des L-moments pour 24 h.

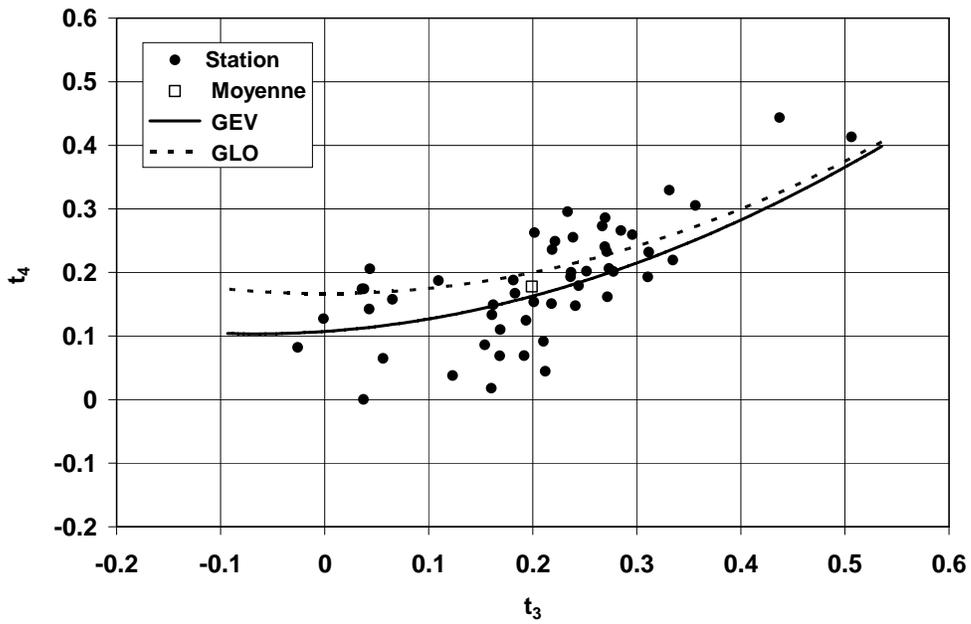


Figure 4.12 Diagramme des L-moments pour 12 h.

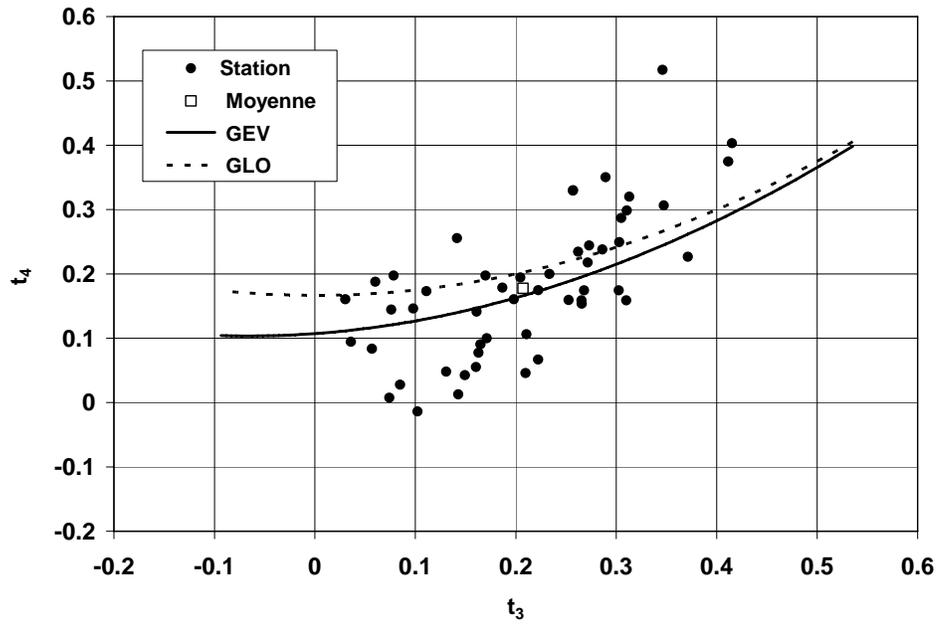


Figure 4.13 Diagramme des L-moments pour 6 h.

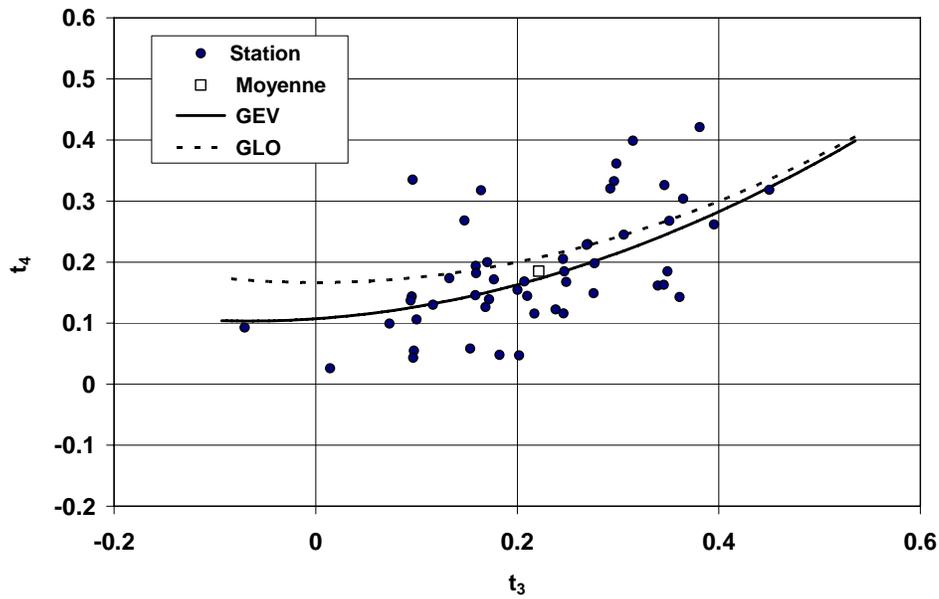


Figure 4.14 Diagramme des L-moments pour 2 heures.

#### 4.5.2 Courbes IDF moyennes régionales aux stations en climat présent

Les valeurs régionales de la distribution GEV ont été estimées à partir des valeurs de  $\bar{l}_1, t^R, t_3^R$  et ces valeurs sont présentées au tableau 4.8. La figure 4.15 présente la courbe IDF correspondante et le tableau 4.9 les valeurs des PME moyennes pour la région.

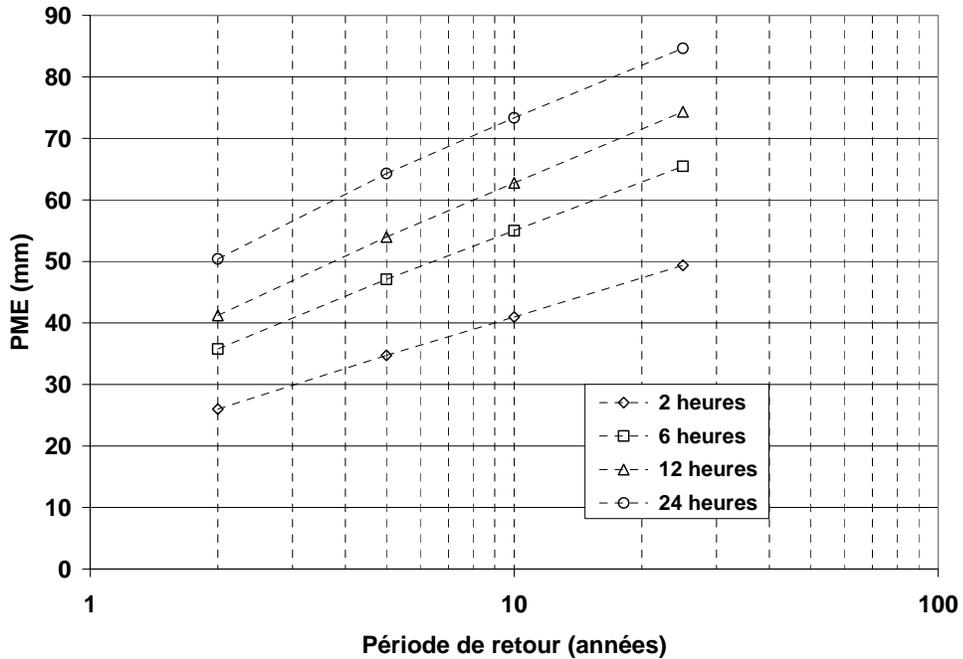


Figure 4.15 Courbes IDF moyennes régionales aux stations.

Tableau 4.9 Valeurs moyennes régionalisées des PME aux stations selon la durée et la période de retour.

Durée (heures)	Période de retour (années)			
	2	5	10	25
2	26,0	34,7	41,0	49,4
6	35,8	47,1	55,0	65,5
12	41,2	54,0	62,8	74,3
24	50,4	64,3	73,3	84,7

### 4.5.3 Régionalisation des PME aux tuiles (climats présent et futur)

Les ratios des L-moments associés aux PME pour chaque tuile ont été calculés. Les figures 4.16 à 4.19 présentent les diagrammes des ratios des L-moments correspondants ( $t_4$  vs  $t_3$ ) pour les durées 24, 12, 6 et 2 h respectivement pour les tuiles couvrant la région sous étude en climat présent. Les diagrammes en climat futur sont similaires et ne sont donc pas présentés. Le tableau 4.10 présente quant à lui les résultats du test visant à sélectionner la distribution parente. Il appert que la distribution GLO est la distribution à considérer en climat présent pour toutes les durées alors que la distribution GEV est à considérer en climat futur sauf pour la durée 2 h où le test suggère de retenir la distribution GLO.

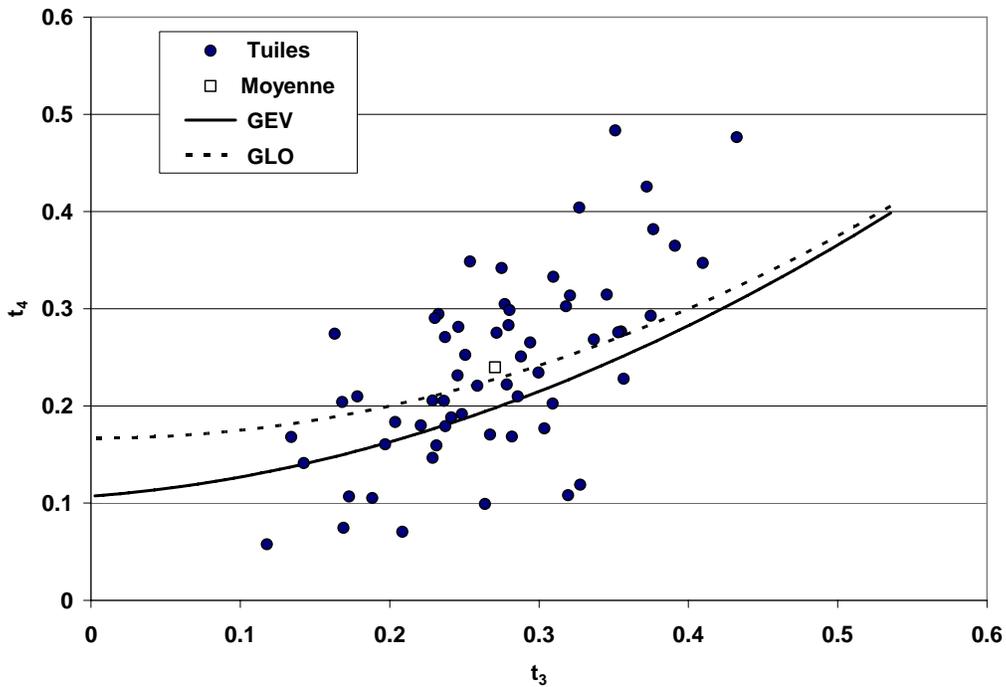


Figure 4.16 Diagramme des ratios des L-moments ( $t_4$  vs  $t_3$ ) pour les PME sur 24 h en climat présent.

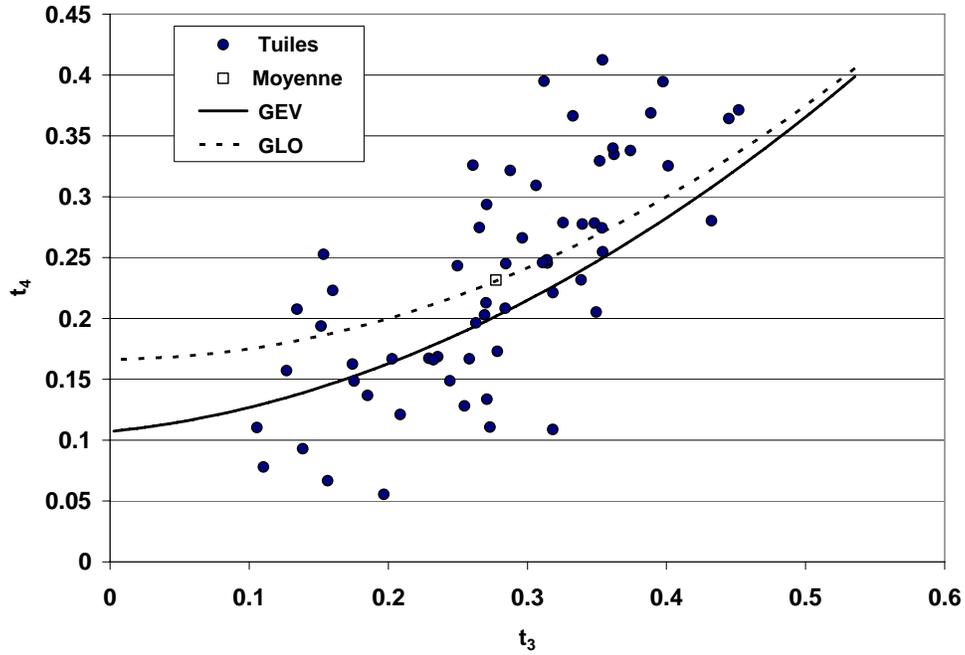


Figure 4.17 Diagramme des ratios des L-moments ( $t_4$  vs  $t_3$ ) pour les PME sur 12 h en climat présent.

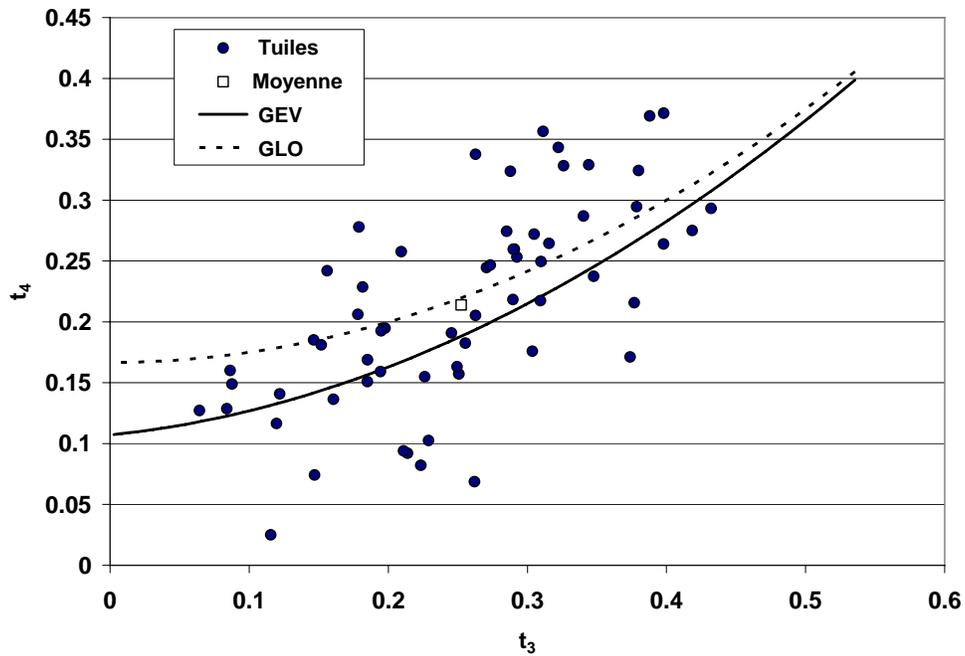


Figure 4.18 Diagramme des ratios des L-moments ( $t_4$  vs  $t_3$ ) pour les PME sur 6 h en climat présent.

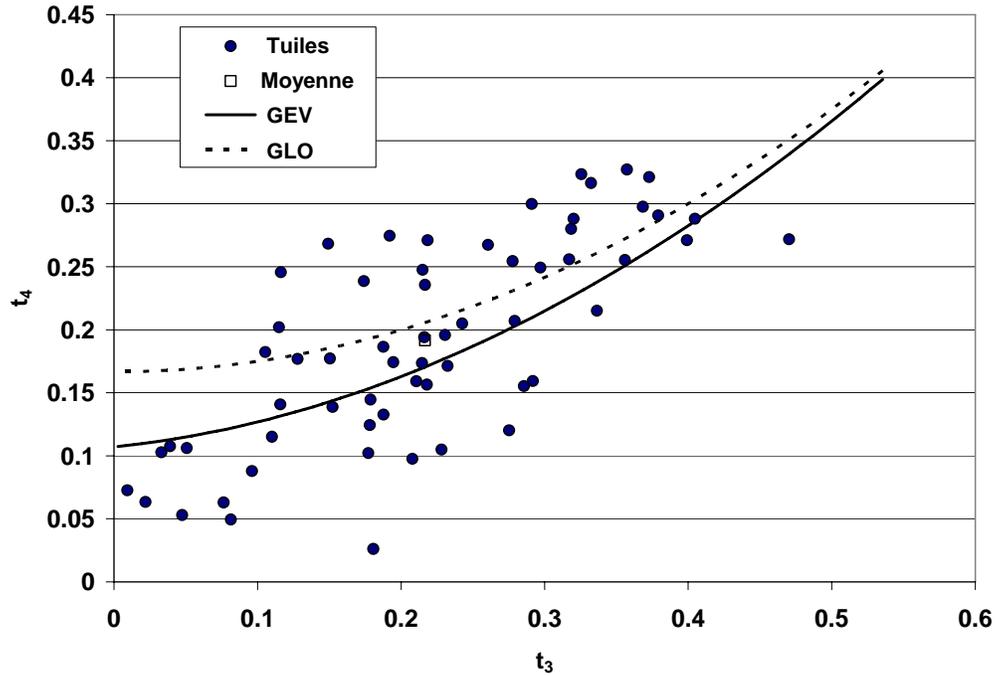


Figure 4.19 Diagramme des ratios des L-moments ( $t_4$  vs  $t_3$ ) pour les PME sur 2 heures en climat présent.

Tableau 4.10 Résultats du test pour la sélection de la distribution régionale pour les tuiles (climats présent et futur).

Simulation	Durées (heures)	$Z_{GEV}$	$Z_{GLO}$
Climat Présent	24	-3,35	<b>-1,17</b>
	12	-3,34	<b>-1,20</b>
	6	-2,91	<b>-0,40</b>
	2	-2,38	<b>0,67</b>
Climat futur	24	<b>-0,09</b>	2,76
	12	<b>1,38</b>	4,31
	6	<b>-0,71</b>	3,90
	2	-3,30	<b>0,15</b>

Pour le test sur l'homogénéité des données pour la région, le tableau 4.11 suggère que la région est « raisonnablement homogène » pour toutes les durées autant en climat présent que futur. Cependant, la présence de valeurs négatives (par exemple pour  $H_1$  en climat futur pour la durée 2 h) peut être une indication de la présence d'importantes corrélations des PME entre tuiles (Hoskings et Wallis 1997).

**Tableau 4.11 Résultats pour les tests H (homogénéité régionale des données) en climats présent et futur.**

Simulation	Durées (heures)	$H_1$	$H_2$	$H_3$
Climat présent	24	-1,67	-4,03	-2,76
	12	-1,09	-2,79	-2,12
	6	-0,24	-1,57	-1,57
	2	0,64	0,11	-0,18
Climat futur	24	-2,05	-2,36	-2,06
	12	-1,82	-2,15	-1,32
	6	-1,63	-0,32	-0,04
	2	-2,35	-0,18	-0,25

#### 4.5.4 Courbes IDF moyennes régionales aux tuiles en climats présent et futur

Le tableau 4.12 regroupe les valeurs moyennes des ratios des L-moments  $t^R, t^R, t^R$ . Le tableau 4.13 regroupe quant à lui les valeurs des paramètres obtenues selon les distributions parentes retenues en utilisant les valeurs de  $\bar{l}_1, t^R, t^R$ . Les courbes IDF régionales moyennes aux tuiles sont présentées à la figure 4.20 et les valeurs correspondantes se retrouvent au tableau 4.14.

**Tableau 4.12 Moyenne régionale des ratios des L-Moments pour les tuiles en climats présent et futur.**

Simulation	Durée (heures)	Moyenne régionale des ratios des L-Moments		
		$t^R$	$t_3^R$	$t_4^R$
Présent	2	0,138	0,217	0,192
	6	0,158	0,252	0,214
	12	0,174	0,277	0,232
	24	0,177	0,271	0,240
Futur	2	0,139	0,191	0,190
	6	0,161	0,233	0,167
	12	0,165	0,248	0,168
	24	0,164	0,239	0,177

**Tableau 4.13 Valeurs régionales des paramètres des distributions parentes en climats présent et futur.**

Simulation	Durée (heures)	Distribution parent	Valeurs des paramètres		
			$\xi$	$\alpha$	$k$
Climat présent	24	GLO	41,9	7,1	-0,27
	12	GLO	32,6	5,4	-0,28
	6	GLO	23,4	3,5	-0,25
	2	GLO	11,7	1,6	-0,22
Climat futur	24	GEV	42,3	10,6	-0,10
	12	GEV	32,6	8,1	-0,12
	6	GEV	23,7	5,8	-0,10
	2	GLO	13,2	1,8	-0,19

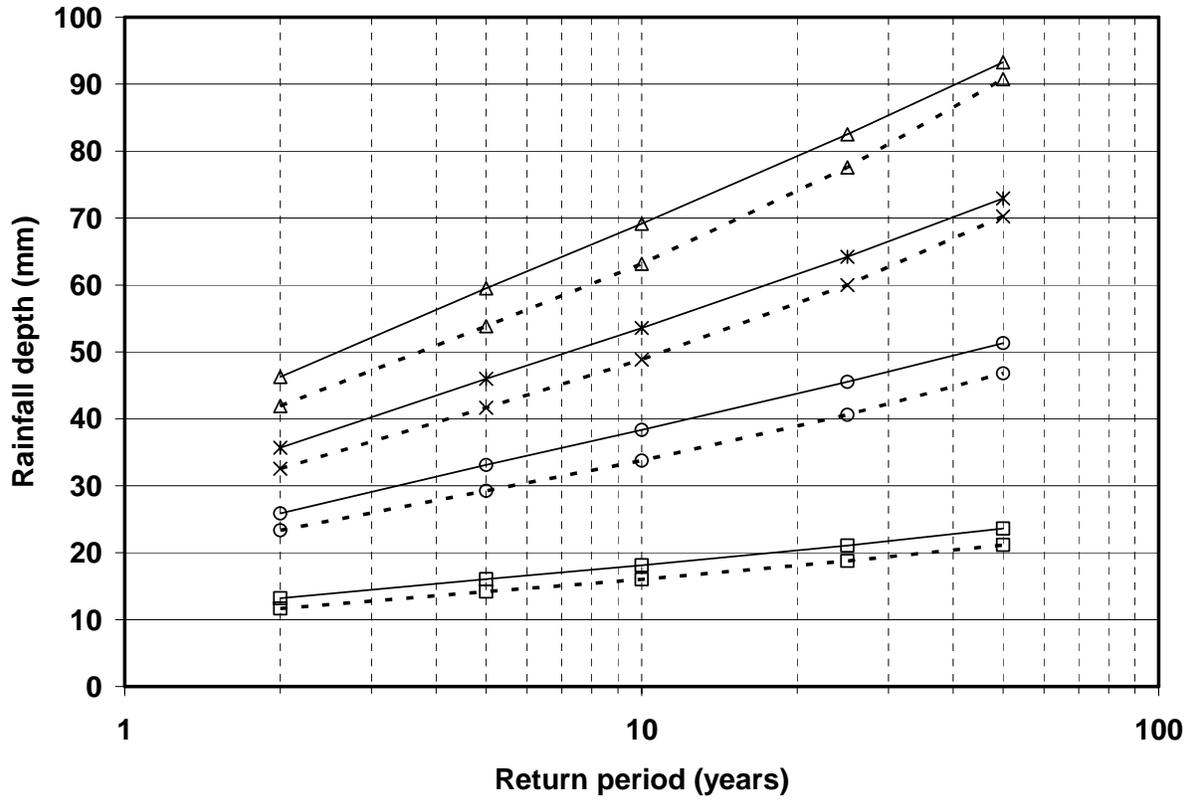


Figure 4.20 Courbes IDF moyennes régionales aux tuiles en climats présent et futur. La correspondance entre symboles et durées est la suivante : triangles = 24 h; croix = 12 h; cercles = 6 h et carré = 2 h. Les lignes pleines indiquent les résultats en climat futur alors que les lignes pointillées indiquent les résultats en climat présent.

**Tableau 4.14 PME moyenne (mm) pour la région du sud du Québec en climats présent (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des tuiles.**

Durées (heures)	Période de retour (années)	Climat présent	Climat futur	Pourcentage d'accroissement entre climats présent et futur
2	2	11,7	13,2	13,2
	5	14,2	16,1	13,3
	10	16,0	18,1	13,0
	25	18,8	21,1	12,3
6	2	23,4	25,9	10,8
	5	29,2	33,1	13,3
	10	33,8	38,4	13,6
	25	40,6	45,5	12,1
12	2	32,6	35,7	9,6
	5	41,7	46,0	10,3
	10	48,8	53,6	9,7
	25	60,0	64,2	7,0
24	2	41,9	46,3	10,3
	5	53,8	59,5	10,5
	10	63,2	69,2	9,5
	25	77,6	82,5	6,3

Les graphiques des figures 4.21 et 4.22 montrent l'évolution des augmentations, en pourcentages des valeurs en climat actuel et en valeurs absolues, des PME sur les tuiles en fonction de la période de retour selon les différentes durées considérées. Il est intéressant de noter que les augmentations relatives maximales sont observées aux faibles périodes de retour (moins de 10 ans) sauf pour la durée 2 h pour laquelle l'augmentation est relativement constante. Les augmentations relatives moyennes les plus importantes surviennent pour les PME de durée de 2 h et 6 h de faibles périodes de retour.

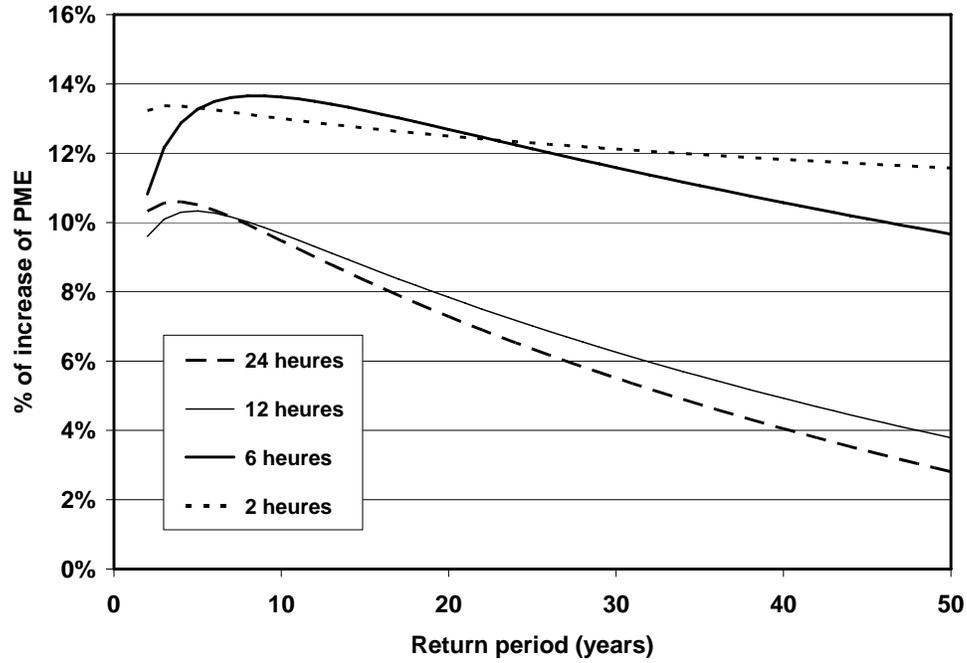


Figure 4.21 Pourcentages d'augmentation des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des tuiles.

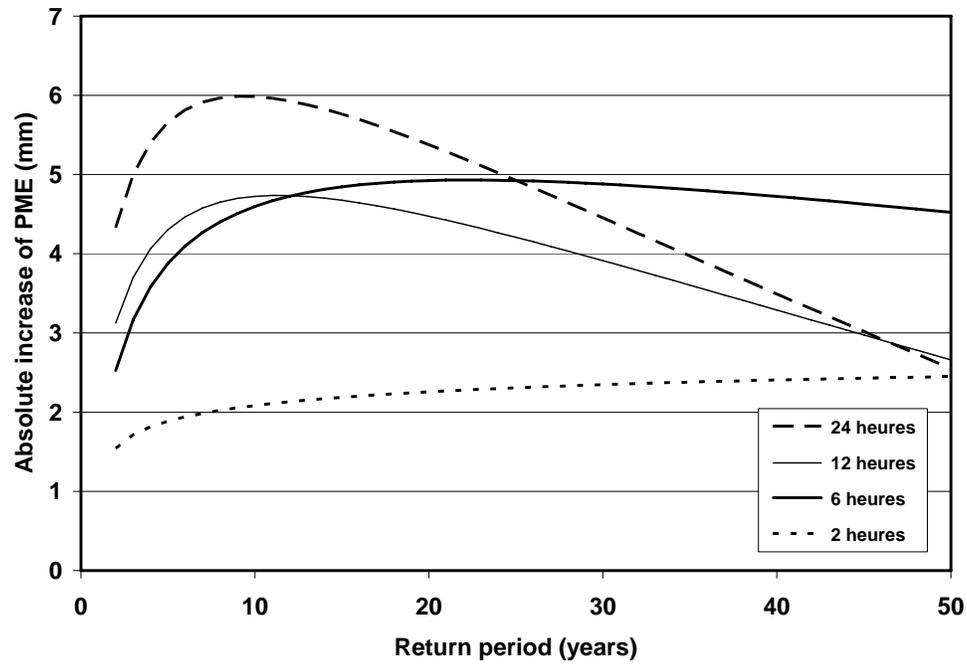


Figure 4.22 Augmentation absolue des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des tuiles.

## 4.6 Courbes IDF en climat futur à l'échelle des stations

L'estimation des courbes IDF en climat futur peuvent être réalisée en considérant trois approches distinctes :

1. Application à la moyenne régionalisée aux stations de l'augmentation moyenne sur les tuiles telle que simulée par le MRCC (tableau 4.5);
2. Application à la moyenne régionalisée aux stations de l'augmentation des valeurs moyennes régionalisées telles que simulées par le MRCC (tableau 4.14; section 4.6.1);
3. Transposition en climat futur de la valeur de l'ARF estimée en climat présent (section 4.6.2).

Les sections suivantes donnent des détails sur les méthodes 2 et 3 et présentent les résultats qui leur sont associées.

### 4.6.1 Invariance du ARF entre climats présent et futur (période de retour fixe)

En définissant  $I_p^t, I_f^t$  respectivement comme les intensités moyennes en climats présent et futur à l'échelle des tuiles pour une durée et une période de retour donnée, et  $I_p^s, I_f^s$ , les intensités moyennes en climats présent et futur à l'échelle des stations pour la même durée et période de retour, on a pour  $\Delta_{pf}$  l'augmentation relative entre climats présent et futur à l'échelle des tuiles :

$$\Delta_{pf} = \frac{I_f^t - I_p^t}{I_p^t} \quad (17)$$

et la valeur en climat futur à l'échelle des stations est définie par :

$$I_f^s = I_p^s (1 + \Delta_{pf}) \quad (18)$$

Et donc :

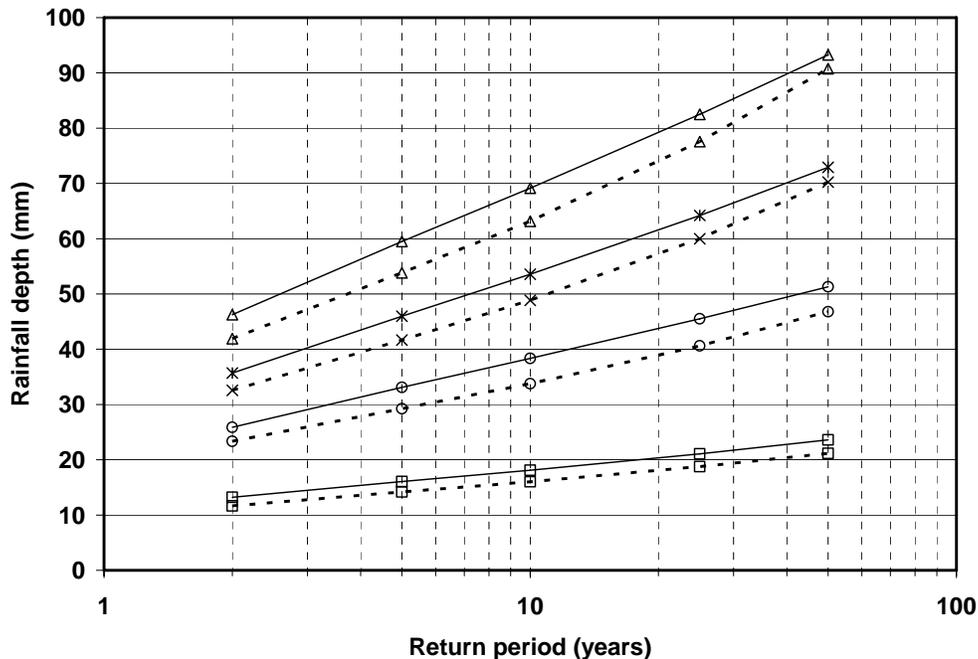
$$I_f^s = I_p^s \frac{I_f^t}{I_p^t} \quad (19)$$

Exprimé en fonction des  $ARF$  en climats présent  $ARF_p$  et futur  $ARF_f$ , on a donc :

$$ARF_f = ARF_p \quad (20)$$

Cette expression signifie que, pour un quantile donné (donc pour des intensités dont les périodes de retour en climats présent et futur sont les mêmes) et une durée donnée, les valeurs de ARF sont égales. Le pourcentage d'augmentation au niveau des tuiles est transposé à l'échelle des stations conformément à l'expression 18.

Le graphique de la figure 4.23 présente les courbes IDF correspondantes aux stations en climats présent et futur.



**Figure 4.23** Courbes IDF moyennes régionales aux stations tuiles en climats présent et futur (méthode ARF fonction du quantile). La correspondance entre symboles et durées est la suivante : triangles = 24 h; croix = 12 h; cercles = 6 h et carré = 2 h. Les lignes pleines indiquent les résultats en climat futur alors que les lignes pointillées indiquent les résultats en climat présent).

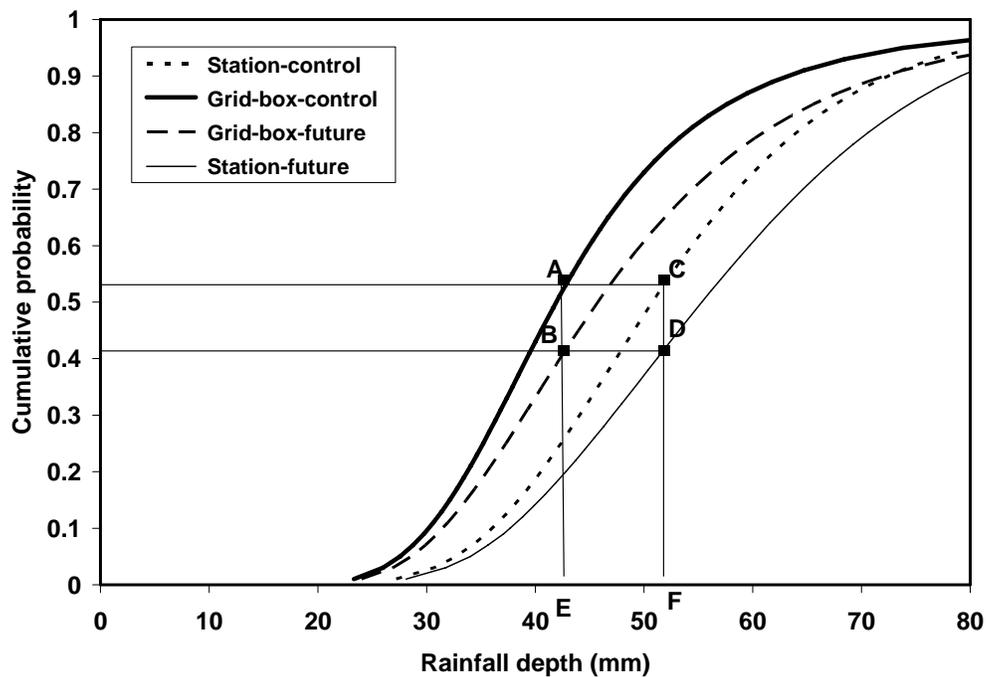
**Tableau 4.15 PME régionale moyenne (mm) en climats actuel (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des stations (méthode ARF dépendant du quantile).**

Durée (heures)	Période de retour (années)	Présent	Futur	Accroissement présent-futur (%)
2	2	26,0	29,4	13,2
	5	34,7	39,4	13,3
	10	41,0	46,3	13,0
	25	49,4	55,45	12,3
6	2	35,8	39,65	10,8
	5	47,1	53,3	13,3
	10	55,0	62,5	13,6
	25	65,5	73,4	12,1
12	2	41,2	45,2	9,6
	5	54,0	59,5	10,3
	10	62,8	68,8	9,7
	25	74,3	79,5	7,0
24	2	50,4	55,6	10,3
	5	64,3	71,05	10,5
	10	73,35	80,3	9,5
	25	84,7	90,0	6,35

#### 4.6.2 Invariance du ARF entre climats présent et futur (à intensité donnée)

Suivant cette approche, l'on suppose que les facteurs ARF demeurent inchangés en climat futur pour une intensité de PME donnée et une durée donnée. En d'autres mots, les valeurs du ARF en climat présent correspondant à une intensité donnée des PME simulées en climat futur à l'échelle des tuiles sont utilisées pour transposer ces valeurs à leur valeurs correspondantes à l'échelle des stations en climat futur. L'hypothèse sous-jacente peut se formuler comme suit : l'extension spatiale des systèmes générant une PME d'intensité donnée en climat futur sera, en moyenne, similaire à l'extension spatiale pour un événement de même intensité en climat

présent pour une durée donnée. Ce faisant, c'est dire que le rapport entre les intensités des PME à l'échelle des tuiles et des stations demeure inchangé pour une intensité et une durée donnée. Seule la probabilité d'occurrence des événements sera modifiée conformément à cette hypothèse. Cette hypothèse est certes questionnable mais nécessaire et justifiée considérant le fait que l'on ne possède aucune information sur l'évolution de la dimension des systèmes en climat futur. On peut s'attendre en effet à ce que la composante convective des systèmes responsables des événements extrêmes soit plus importante en climat futur, et donc que ces systèmes soient plus localisés. De ce fait, pour un total de pluie équivalent à l'échelle des tuiles, il serait possible d'avoir des intensités à une échelle locale beaucoup plus importantes. En ce sens les estimés présentés dans ce qui suit pourrait représenter une limite inférieure aux augmentations appréhendés à l'échelle locale.



**Figure 4.24** Construction des courbes IDF en climat futur à l'échelle des stations à partir des courbes IDF régionalisées aux tuiles (climats présent et futur) et de la courbe IDF régionalisée en climat présent aux stations.

Le développement mathématique appuyant cette hypothèse est le suivant. Soit  $ARF_p$ , le  $ARF$  en climat présent, qui s'exprime sous la forme (voir figure 4.24) :

$$ARF_p = \frac{I_p^t}{I_p^s} \quad (21)$$

où  $I_p^s$  est la valeur de la PME en climat présent à l'échelle des stations pour un quantile et une durée donné, et  $I_p^t$ , la valeur correspondante de PME (même quantile, même durée) en climat présent à l'échelle des tuiles. Soit  $I_f^t$  la valeur simulée à l'échelle des tuiles en climat futur pour laquelle l'on souhaite estimer la valeur correspondante à l'échelle des stations  $I_f^s$ . On suppose que le  $ARF_f$  applicable dans ce cas est le même que pour les événements de mêmes intensités à l'échelle des tuiles en climat présent, et on a donc :

$$ARF_f(I_f^t) = ARF_p(I_p^t = I_f^t) \quad (22)$$

et donc :

$$I_f^s = \frac{I_f^t}{ARF_f(I_f^t)} = \frac{I_f^t}{ARF_p(I_f^t)} \quad (23)$$

Étant donné  $I_f^t$  (point B), le quantile associé à cette valeur en climat présent à l'échelle des tuiles est  $F_p^t(I_f^t)$  (point A) et la valeur correspondante (même quantile) en climat présent à l'échelle des stations est donnée par (point C) :

$$I_p^s [F_p^t(I_f^t)] \quad (24)$$

Et alors :

$$ARF_f(I_f^t) = ARF_p(I_p^t = I_f^t) = \frac{I_f^t}{I_p^s [F_p^t(I_f^t)]} \quad (25)$$

et finalement on a pour  $I_f^t$  (point D) :

$$I_f^s = I_p^s \left[ F_p^t \left( I_f^t \right) \right] \quad (26)$$

Il est important de noter la différence entre cette approche ( $ARF$  fonction de l'intensité) avec celle décrite à la section précédente ( $ARF$  fonction du quantile). Suivant cette dernière, la valeur des  $ARF$  dépend du quantile et demeure donc inchangée entre climats présent et futur pour un quantile donné alors que, suivant l'approche décrite à la section précédente, la valeur des  $ARF$  dépend de l'intensité et demeure inchangée entre climats présent et futur pour une intensité donnée.

L'utilisation de ces approches a permis d'estimer les courbes IDF des PME moyennes aux stations pour la région du sud du Québec (figure 4.25 et tableau 4.16 pour l'hypothèse  $ARF$  dépendant de l'intensité, et figure 4.23 et tableau 4.15 pour l'hypothèse  $ARF$  dépendant du quantile). L'estimation des augmentations pour les différentes durées et périodes de retour montrent que les augmentations relatives les plus marquées pour les PME de durées comprises entre 2 et 6 h surviendraient pour les périodes de retour comprises entre 5 et 20 ans, alors que pour les PME de durée 12 h et 24 h, l'augmentation relative la plus importante survient pour les PME de faibles périodes de retour (voir figures 4.27 et 4.28).

La comparaison de résultats obtenus selon les deux méthodes d'estimation ( $ARF$  dépendant de l'intensité ou du quantile) montre que les deux méthodes conduisent à des résultats relativement similaires.

**Tableau 4.16 PME régionale moyenne (mm) en climat actuel (période 1961-1990) et futur (période 2041-2070) à l'échelle des stations (méthode *ARF* dépendant de l'intensité)**

Durée (heures)	Période de retour (années)	Présent	Futur	Accroissement présent-futur (%)
2	2	26,0	31,4	20,6
	5	34,7	41,0	18,1
	10	41,0	47,45	15,8
	25	49,4	55,8	13,0
6	2	35,8	40,7	13,9
	5	47,1	53,9	14,5
	10	55,0	62,2	13,1
	25	65,5	72,1	10,1
12	2	41,2	45,8	11,0
	5	54,0	59,4	10,0
	10	62,8	67,9	8,2
	25	74,3	78,1	5,1
24	2	50,4	55,7	10,6
	5	64,3	70,0	8,8
	10	73,35	78,4	6,9
	25	84,7	87,95	3,9

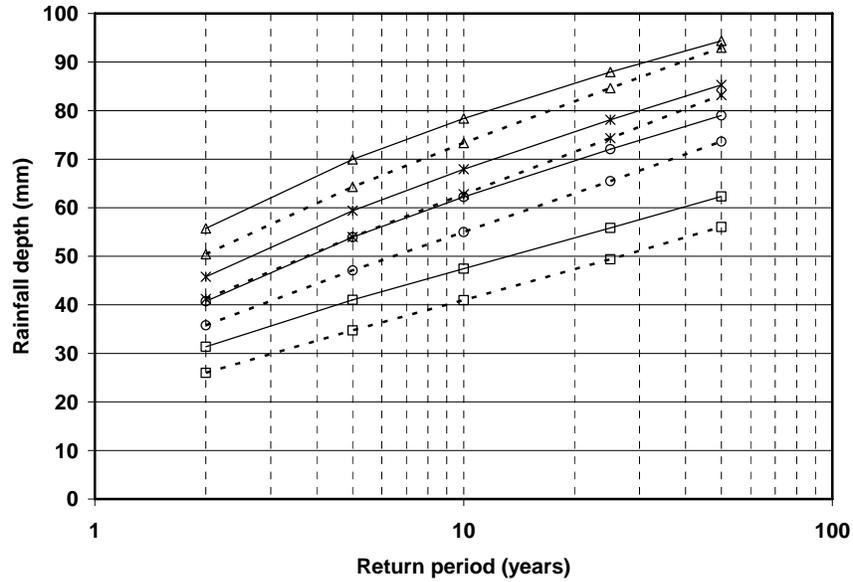


Figure 4.25 Courbes IDF moyennes régionales aux stations en climats présent et futur (méthode ARF dépendant de l'intensité). La correspondance entre symboles et durées est la suivante : triangles = 24 h; croix = 12 h; cercles = 6 h et carré = 2 h. Les lignes pleines indiquent les résultats en climat futur alors que les lignes pointillées indiquent les résultats en climat présent.

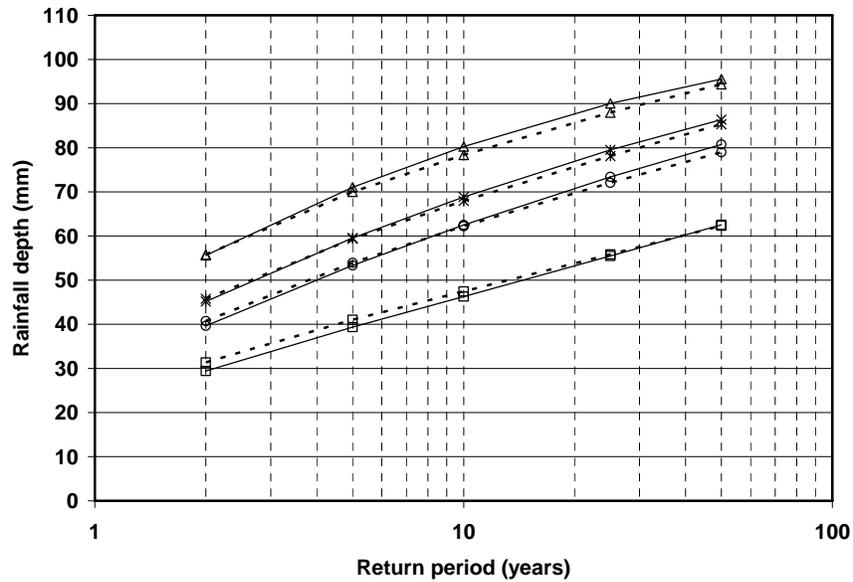


Figure 4.26 Courbes IDF moyennes régionales aux stations en climat futur selon les deux méthodes d'estimation utilisée. La correspondance entre symboles et durées est la suivante : triangles = 24 h; croix = 12 h; cercles = 6 h et carrés = 2 h. Les lignes pleines indiquent les résultats obtenus à l'aide de la méthode ARF dépendant du quantile alors que les lignes pointillées indiquent les résultats obtenus à l'aide de la méthode ARF dépendant de l'intensité.

Les résultats précédents reposent donc sur les hypothèses suivantes :

- 1) La moyenne des écarts entre PME de différentes durées en climats futur et présent telle que simulée sur la région par le MRCC est représentative des changements à survenir pour cette région;
- 2) Les différences observées en climat présent entre valeurs des PME estimées à partir des observations et celles issues des valeurs simulées résultant de la combinaison de plusieurs facteurs (par exemple, erreurs d'échantillonnage statistique, représentation discrétisée du domaine de simulation, inexactitude de la représentation de certains processus au sein du modèle climatique, etc.). Toutefois, l'on suppose que la correction de ces différences entre valeurs simulées et observées n'affectera pas de façon significative les écarts entre climats présent et futur tels que simulés par la version actuelle du MRCC, et donc que ces écarts peuvent être utilisés comme estimations des modifications à venir;
- 3) Le MRCC, compte tenu de la résolution spatiale des tuiles, simule un climat à une échelle de 45 km x 45 km. Les précipitations générées par le modèle sont donc interprétées comme les PME à survenir sur des tuiles de cette dimension. Le fait que les PME simulées par le modèle soient plus intenses en climat futur signifie qu'à l'échelle des tuiles les PME seront plus intenses. Cependant, rien à l'heure actuelle ne permet de dire si les événements donnant lieu à ces PME auront la même extension spatiale en climat futur qu'en climat présent et le modèle est incapable de nous renseigner sur ce sujet puisqu'il travaille à une échelle beaucoup plus grande que la dimension des systèmes météorologiques en jeu (et ce d'autant plus que la dimension en question diminue lorsque l'on considère des événements de précipitations intenses de plus courtes durées). L'utilisation des résultats « bruts » du modèle suppose donc que les événements générateurs de PME en climat futur auront la même extension spatiale qu'en climat présent. Or, de l'avis de plusieurs, un climat plus chaud et instable, tel que celui appréhendé, pourrait signifier des événements convectifs plus importants, plus violents et plus localisés. Dans ce cadre d'hypothèse, c'est dire que les augmentations estimées par le MRCC seraient minimalement celles auxquelles nous serions en droit de nous attendre.

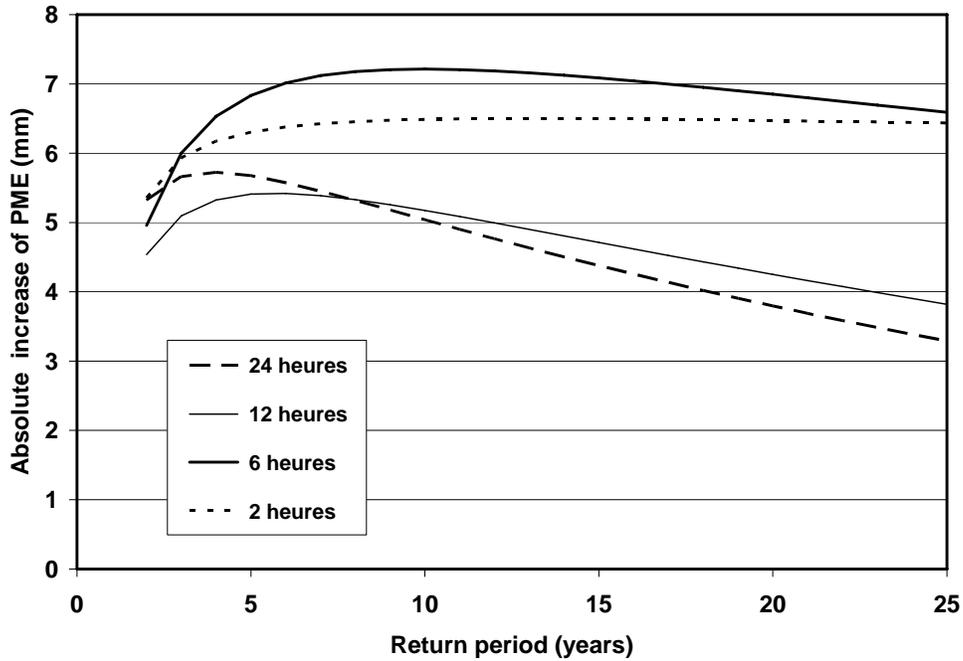


Figure 4.27 Augmentations absolues des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des stations (ARF dépendant de l'intensité).

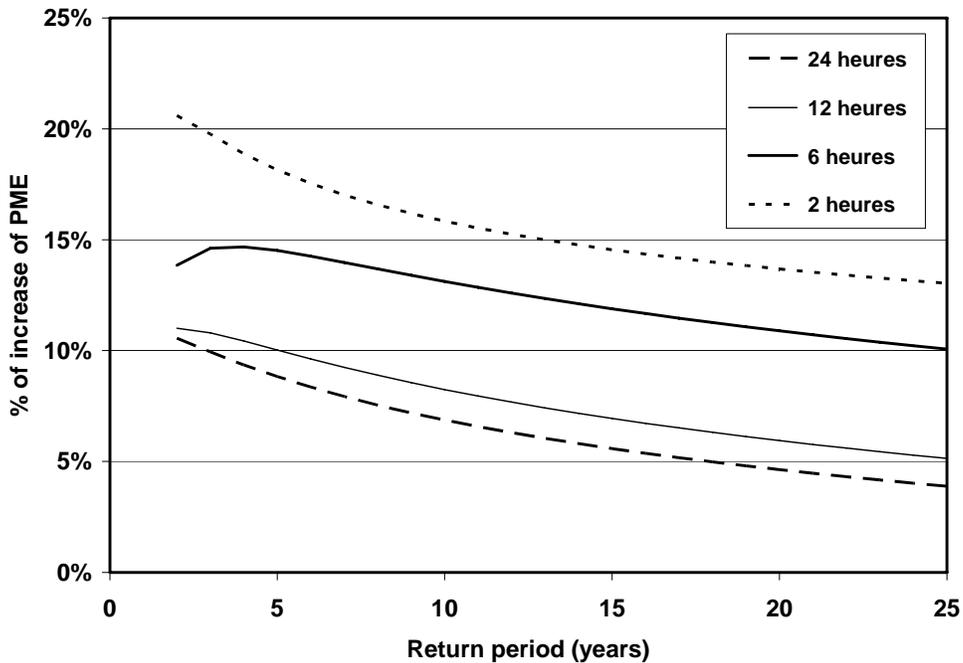


Figure 4.28 Pourcentages d'augmentation des PME régionalisées en fonction de la période de retour pour les différentes durées à l'échelle des stations (ARF dépendant de l'intensité).

## 5. Analyse des impacts des CC en milieu urbain

---

Le chapitre précédent a permis l'élaboration de courbes IDF moyennes en climat futur à l'échelle des stations pour le sud du Québec. Afin de voir l'impact que ces modifications sont susceptibles d'avoir à l'échelle des bassins de drainage urbains, l'analyse s'est développée en quatre temps :

- 1. Classification des pluies** : Les pluies observées à Dorval ont été classées afin de construire des profils types de pluie selon le type d'aménagement urbain considéré (voir section 5.2).
- 2. Élaboration des profils types pour chaque classe** : Une fois les pluies associées aux différentes classes, un profil type a été défini pour chaque classe (voir section 5.3).
- 3. Identification des aménagements types** : Un ensemble de bassins versants urbains a été considéré représentant les cas types généralement rencontrés. Les caractéristiques de ces aménagements ont été définies (voir section 5.4).
- 4. Simulation SWMM des pluies sur les bassins types** : Un ensemble de simulations des pluies (dans le cas présent à Dorval) a été réalisé pour l'ensemble des bassins retenus à l'aide du logiciel SWMM. Les volumes et débits de ruissellement dans chaque cas ont été estimés et une analyse statistique réalisée afin de déterminer les probabilités d'occurrence des divers événements (voir section 5.5).
- 5. Simulation SWMM des profils types de pluie sur les bassins types** : Les divers profils de pluie élaborés seront ensuite utilisés afin de sélectionner celui qui fournira les récurrences de débit et de ruissellement pour chaque aménagement les plus près de celles obtenues en considérant l'ensemble des pluies. Chaque profil est considéré et simulé en considérant l'intensité de pluie correspondant à une durée et une période de retour données. Ainsi, par exemple, pour le profil de la classe 1, l'on pourra considérer les intensités sur 1 ou 3 h pour des périodes de retour de 2 à 50 ans. La combinaison classe-durée, dont les statistiques de récurrence des volumes et débits de ruissellement seront les mieux en accord avec celles obtenues en considérant l'ensemble des pluies, sera sélectionnée. Ce faisant, pour chaque aménagement, une combinaison profil-durée sera identifiée, pluie de conception critique pour cet aménagement et dont les

caractéristiques statistiques des volumes et débits de ruissellement s'apparentent à celles obtenues lorsque toutes les pluies historiques sont considérées.

- 6. Évaluation des modifications aux débits et volumes de ruissellement en contexte de CC :** Les intensités des pluies de conception ainsi identifiées seront par la suite modifiées conformément aux scénarios de CC élaborés. La simulation des débits et volumes de ruissellement correspondants permettra d'évaluer l'ampleur des changements attribuables aux CC, et ce pour chaque type d'aménagement.

Avant de présenter la méthode d'estimation et les résultats des impacts des CC en matière de drainage urbain, la section suivante présente différentes considérations générales relatives aux pluies et à la conception des réseaux de drainage.

## 5.1 Pluie et drainage urbain

L'élaboration d'une classification des types d'averse les plus critiques pour les réseaux de drainage urbain permettra d'établir un cadre d'analyse général pour évaluer subséquemment les impacts que les changements climatiques pourront avoir en matière de drainage urbain. Cette classification doit par ailleurs se faire en reconnaissant que différents types de réseau (combiné, séparatif ou pseudo-séparatif, fonctionnant avec des mécanismes d'infiltration) et différents éléments d'un réseau (conduites ou bassins de rétention) réagiront de façon plus critique à certains types d'événement possédant des caractéristiques spécifiques.

L'examen des cas répertoriés indique que les événements qui ont produit des dommages importants en milieu urbain (excluant les crues printanières) peuvent être regroupés en trois groupes (Rivard 2006) :

1. Pluie hivernale et fonte accélérée;
2. Pluies de type orageux (convectif), le plus souvent durant les mois d'été;
3. Pluies de type cyclonique (fronts), habituellement durant l'automne et souvent associées avec des ouragans qui remontent la côte est et atteignent la province.

Les pluies hivernales avec fonte sont très complexes à analyser puisqu'on doit prendre en considération la neige au sol au moment de la pluie, les températures pour la fonte, et la pluie elle-même. Les probabilités conjointes d'occurrence de ces différentes variables déterminent

l'ampleur de l'événement. Ce type d'événement, qui demeure actuellement relativement rare, pourrait l'être de moins en moins dans un contexte de changements climatiques (des travaux ont été entrepris à ce sujet afin d'analyser les tendances historiques en matière de pluie hivernale; voir Groleau *et al.* 2006 et Talbot *et al.* 2006).

Les pluies de type orageux associées à des phénomènes de convection produisent des averses intenses, souvent de durée relativement courte et d'étendue également habituellement faible. À cause de leur forte intensité, elles engendrent des inondations locales en surchargeant de façon importante les réseaux (l'exemple le plus typique est la pluie du 14 juillet 1987 à Montréal, où la répartition spatiale de la pluie sur le territoire était très hétérogène). Les cellules orageuses de plus petits diamètres peuvent parfois être regroupées dans un groupe (« mesoscale convective complex » ou « squall lines ») et couvrir un plus grand territoire.

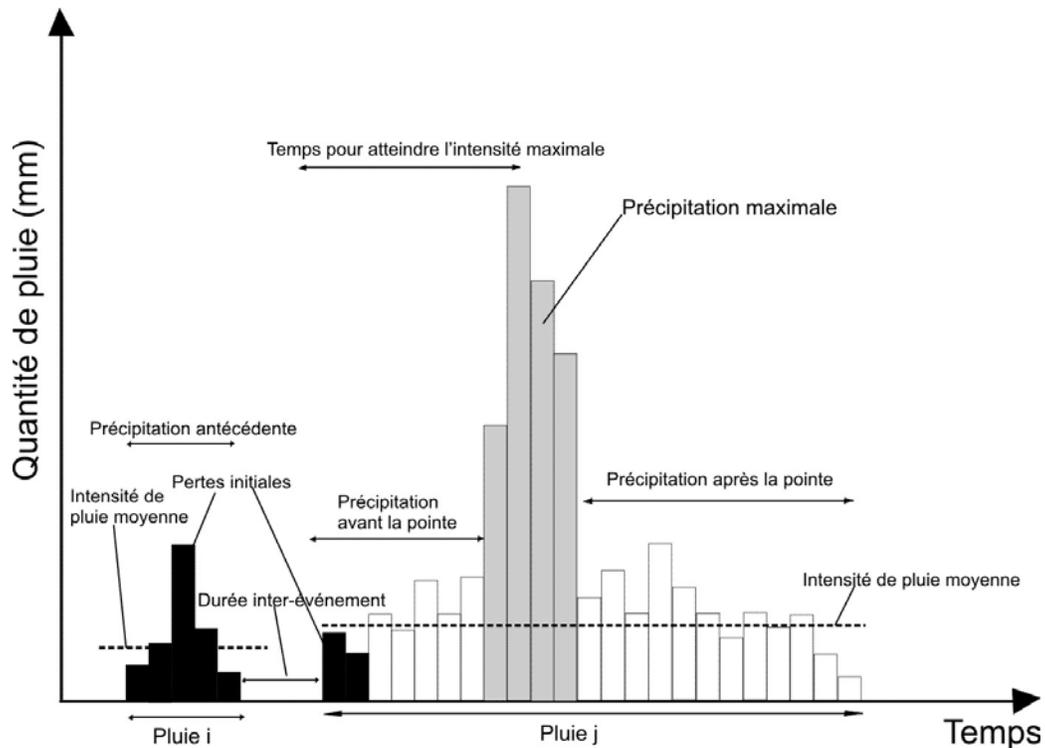
Finalement, les précipitations de type cyclonique peuvent affecter des superficies importantes aux périodes de transition (comme le printemps ou l'automne). Elles sont associées à des inondations à plus grande échelle, affectant les cours d'eau vers lesquels se drainent les réseaux urbains. Des exemples typiques récents sont les événements de juillet et novembre 1996 et les tempêtes touchant un grand territoire où, comme le soulignent Perrier et Slivitzky (1999), l'on retrouve toujours les mêmes ingrédients fondamentaux, à savoir :

1. Un apport soutenu et abondant d'air chaud et humide provenant du sud des USA, du golfe du Mexique, des Antilles;
2. Un mécanisme de transport, de soulèvement et condensation rapide de cet air chaud et humide (généralement un système dépressionnaire);
3. Un mécanisme de blocage qui ralentit, immobilise ou dévie la dépression de sa trajectoire la forçant à déverser sa précipitation sur une région restreinte plutôt que sur une étendue plus vaste;
4. Un quatrième facteur, plus local mais souvent présent, est la topographie qui joue un rôle dans la répartition de la pluie. C'est un facteur physique non météorologique qui accentue la chute des précipitations sur les versants exposés aux vents qui prévalent durant la tempête.

En se basant sur ces observations générales pour les types de pluie, une classification des averses devrait également tenir compte des différents types de réseau de drainage qu'on retrouve en milieu urbain, des différents types de mécanisme impliqués et des paramètres spécifiques de la pluie.

La figure 5.1 donne une représentation schématique des principales caractéristiques d'un événement pluvieux. Pour la conception des réseaux, et comme le soulignaient Pilgrim et Cordery (1975), certains éléments fondamentaux ne sont pas toujours pris en compte pour analyser des profils temporels de pluie ou l'utilisation des données de base comme les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) pour les réseaux urbains. Tout d'abord, on doit considérer qu'une certaine quantité de pluie s'abat sur le territoire avant l'arrivée de la portion la plus importante, ce qui affectera le degré de saturation des sols lorsque l'averse principale arrivera. Il devient donc important de prendre en compte la forme de l'hyétogramme et la répartition des précipitations dans le temps.

Deuxièmement, on assume habituellement qu'une pluie de période de retour donnée produira un débit de la même période de retour; la réalité est toutefois beaucoup plus complexe. Comme le notent Adams et Papa (2000), un événement pluvieux possède des caractéristiques intrinsèques et des caractéristiques globales. Les caractéristiques intrinsèques sont très nombreuses et complexes; elles incluent, par exemple, le temps requis pour atteindre les différentes pointes de fortes intensités, le nombre de pointes au sein de l'événement pluvieux, la distribution de la quantité de pluie totale par rapport aux pointes, etc. D'un autre côté, les caractéristiques globales d'une averse sont sa quantité totale de pluie, sa durée, son intensité moyenne et la durée interévénement ou le temps écoulé depuis la pluie précédente.



**Figure 5.1** Représentation schématique d'un événement pluvieux.

Un système de drainage urbain est constitué de différentes composantes qui réagissent chacune à certaines caractéristiques des événements pluvieux : les éléments de transport comme les conduites et les canalisations sont généralement plus sensibles à l'intensité et la durée puisque ces caractéristiques influencent fortement l'ampleur des débits de pointe. D'un autre côté, la conception des éléments d'emménagement comme les bassins de rétention est plutôt influencée par la quantité de pluie, la durée interévénement (qui peut être importante pour de grands bassins se vidant lentement) et certaines caractéristiques internes. Dans ce contexte, on constate donc qu'il est difficilement justifiable de spécifier pour tous les problèmes l'utilisation d'un seul événement pluvieux de conception. On devrait donc, en principe, tenir compte de ces considérations pour la classification et l'analyse des événements pluvieux pour la conception des réseaux de drainage.

## 5.2 Classification des pluies

De façon à pouvoir évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur divers types de réseau de drainage urbain, la méthodologie envisagée consiste, dans un premier temps, à analyser les profils temporels pour les événements pluvieux les plus significatifs qui se sont produits pour certaines stations du Québec. Les données de la station de Dorval ont été considérées dans un premier temps. Ainsi, tous les enregistrements d'événements avec une intensité supérieure à 10 mm/h ont été colligés pour la période de 1943 à 1992 (voir annexe F de Rivard 2006 pour les données non traitées) pour un total de 199 pluies. Les durées des événements pluvieux sélectionnés étaient, de façon générale, inférieures à 6 h. D'autres stations pourront éventuellement être utilisées afin de couvrir d'autres régions du Québec.

L'analyse des profils temporels de pluie est documentée dans plusieurs études (Bonnin et al. 2004; Huff 1967 et 1990; Hogg 1980 et 1982; NERC 1975; Pilgrim et Cordery 1975; Rivard 1995). Le cumul de pluie tombée et la durée totale de chaque événement sont estimés. Le cumul de pluie et la durée de chaque événement sont ensuite exprimés en fraction du cumul de pluie total et en fonction de la fraction de la durée écoulée (toutes les pluies peuvent ainsi être comparées sur une échelle commune). La durée totale est séparée en quatre périodes de durée égale (voir figure 5.2). Ce type d'approche a été proposé par Huff (1967) et a également été choisi pour la mise à jour des représentations des profils de pluie aux États-Unis (Bonnin et al. 2004). Pour chaque pluie, la fraction du cumul de pluie tombée durant chaque période est estimée (fraction du cumul tombé pendant le premier quart de la pluie, le deuxième quart, etc.). La classe à laquelle est associée une pluie donnée correspond à la période pendant laquelle le cumul de pluie le plus important est tombé. Ainsi, les pluies de classe 1 sont les pluies pour lesquelles la fraction du cumul de pluie le plus important est tombée pendant le premier quart, et de façon similaire pour les autres classes. Le tableau 5.1 donne un exemple de classification.

**Tableau 5.1 Exemple de classification de pluie (durée totale  $D = 1$  h, et hauteur totale de  $H = 10$  mm (la pluie est associée à la classe 1).**

Quart	Intervalle de temps	Hauteur de pluie tombée	Cumul de pluie par période
1	[0 - 0,25 D]	4 mm	40 %
2	[0,25 D – 0,5 D]	2,5 mm	25 %
3	[0,5 D – 0,75 D]	2 mm	20 %
4	[0,75 D – D]	1,5 mm	15 %

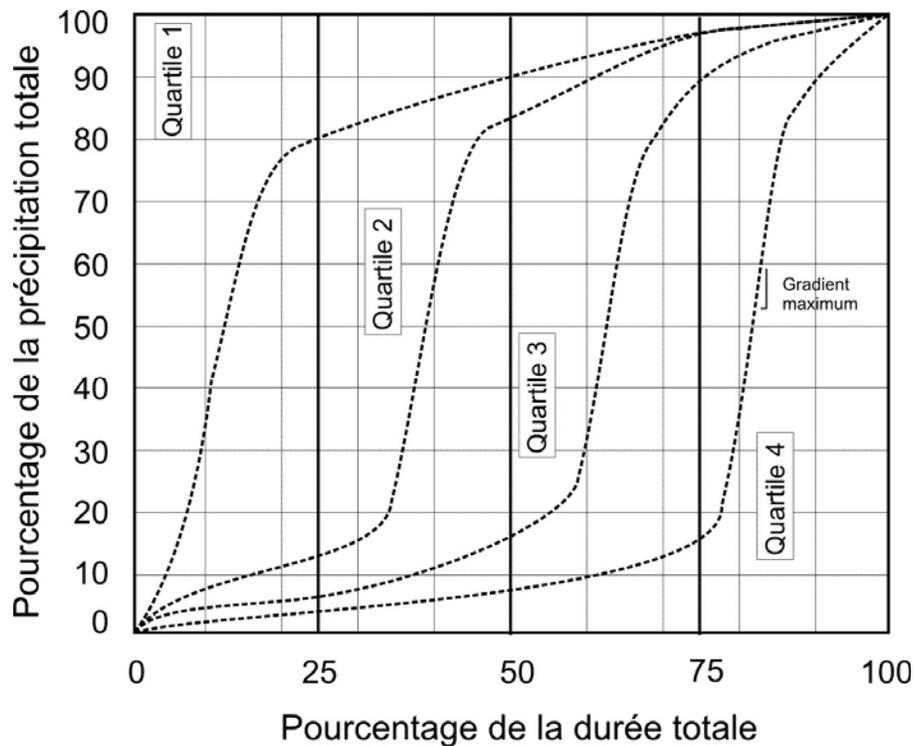


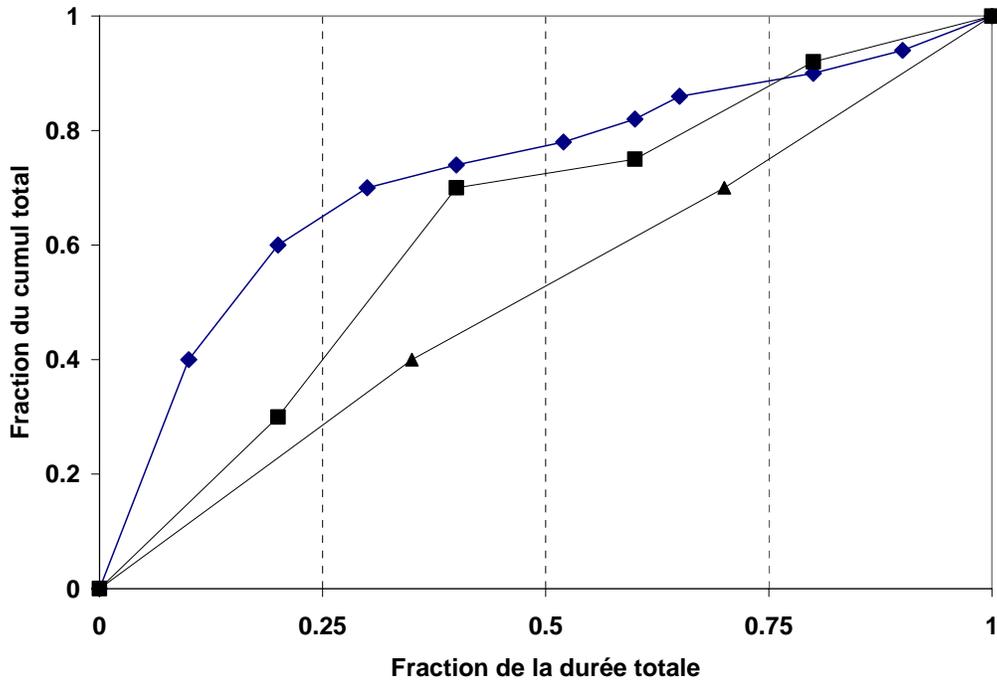
Figure 5.2 Taxonomie des profils temporels pour l'analyse des réseaux urbains.

### 5.3 Élaboration des profils types pour chaque classe

Les profils types sont construits en définissant à chaque pas de temps le cumul correspondant à un quantile précis. Les profils types de quantiles 10 %, 50 % (médian) ou 90 % peuvent ainsi être construits. Puisque les différentes pluies ne sont pas de même durée, c'est dire qu'une fois que toutes les durées des pluies sont normalisées entre 0 et 1, les pluies de plus longues durées comporteront plus de points. Afin d'expliquer la procédure utilisée pour construire les profils types, considérons par exemple le cas où l'intervalle des durées  $[0,1]$  est subdivisé en 25 sous-intervalles, chaque sous-intervalle correspondant à  $0,04 D$  où  $D$  est la durée totale de l'averse. Deux méthodes ont été considérées.

### 5.3.1 Première approche : tri des cumuls par sous-intervalle

Suivant cette première approche, les données dans chaque sous-intervalle sont triées en ordre croissant. Le cumul au 10<sup>e</sup> centile, au 50<sup>e</sup> centile, et au 90<sup>e</sup> centile de chaque sous-intervalle est estimé et associé au profil correspondant.



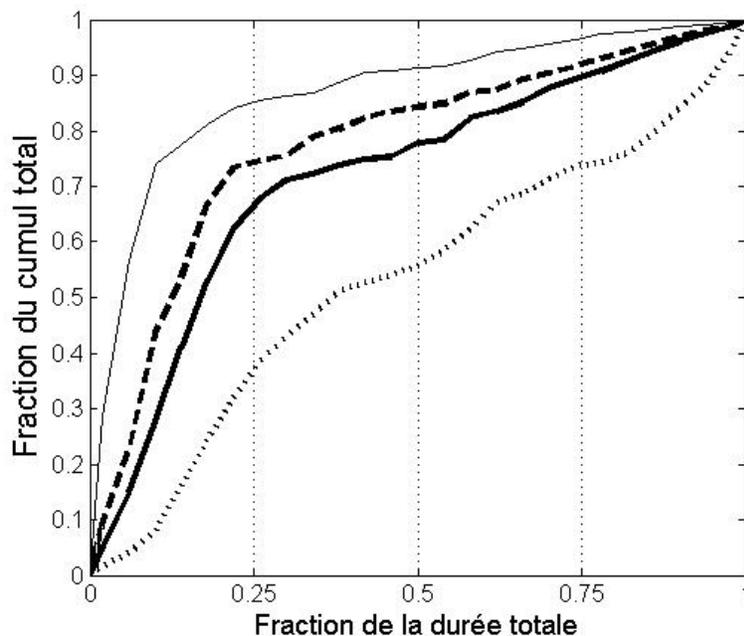
**Figure 5.3** Exemple d'application de la première méthode d'estimation des profils types par classe. Les différentes courbes correspondent à différentes pluies.

Dans l'exemple de la figure 5.3, quatre sous-intervalles sont considérés, chacun correspondant au quart de la durée totale. Le troisième sous-intervalle comporte trois données pour l'une des séries (série losange). Le poids associé à cette série, lorsque l'on trie les données des séries présentes dans un sous-intervalle, est donc trois fois plus important que pour les deux autres, ce qui montre que, bien que très simple d'application, cette façon de procéder accorde un poids plus important aux pluies de plus longue durée (plus de pas de temps, donc plus de données lorsque la durée est exprimée en fraction de la durée totale).

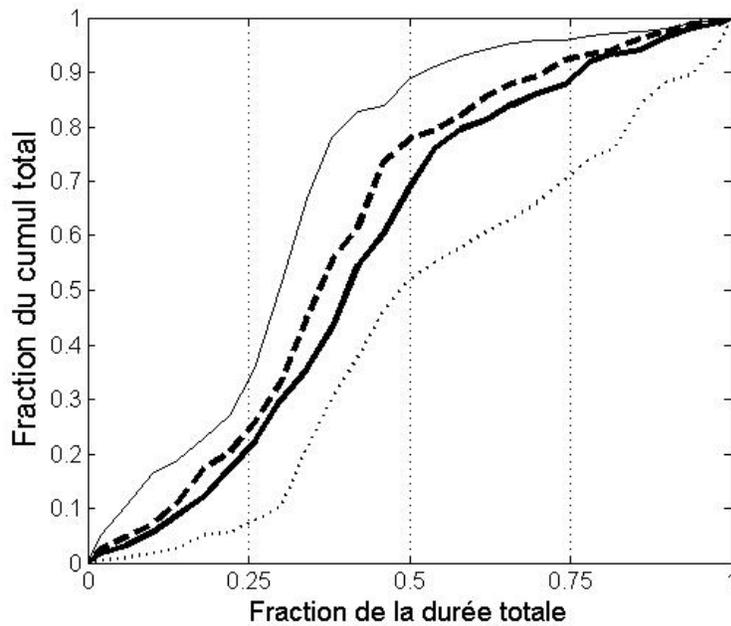
### 5.3.2 Deuxième approche : Interpolation des cumuls

L'alternative au problème exposé à la section précédente consiste alors à représenter chaque pluie par un seul point au sein de chaque sous-intervalle. Dans le cas où une pluie ne présente pas de cumul dans un sous-intervalle, le cumul est interpolé linéairement et associé au milieu du sous-intervalle. Dans le cas où plusieurs valeurs de cumul se trouvent dans un même sous-intervalle, ces valeurs sont moyennées et associées au milieu du sous-intervalle. Une fois les valeurs de chaque intervalle estimées, les valeurs sont triées et le cumul associé au centile considéré est associé au sous-intervalle. Cette méthode a été préférée à celle décrite à la section précédente pour les raisons évoquées plus haut.

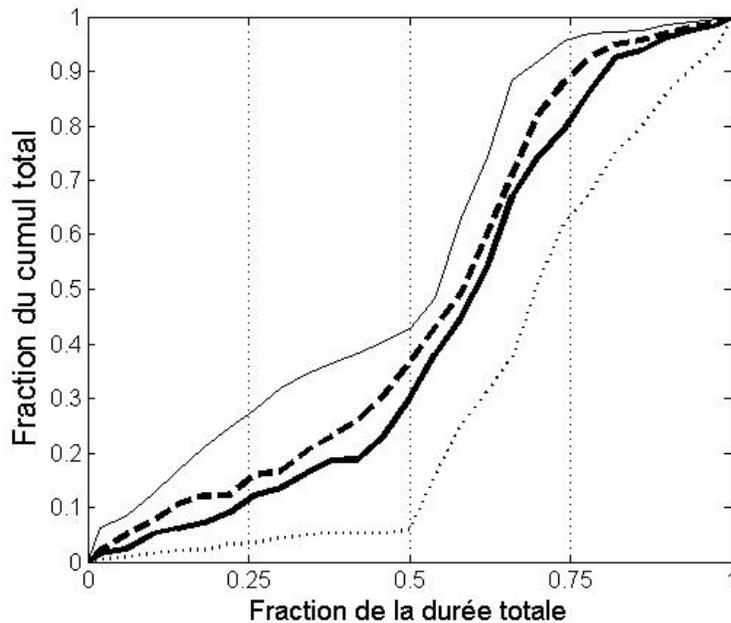
Les figures 5.4 à 5.7 présentent les profils ainsi obtenus à partir des données de la station de Dorval pour chacune des classes.



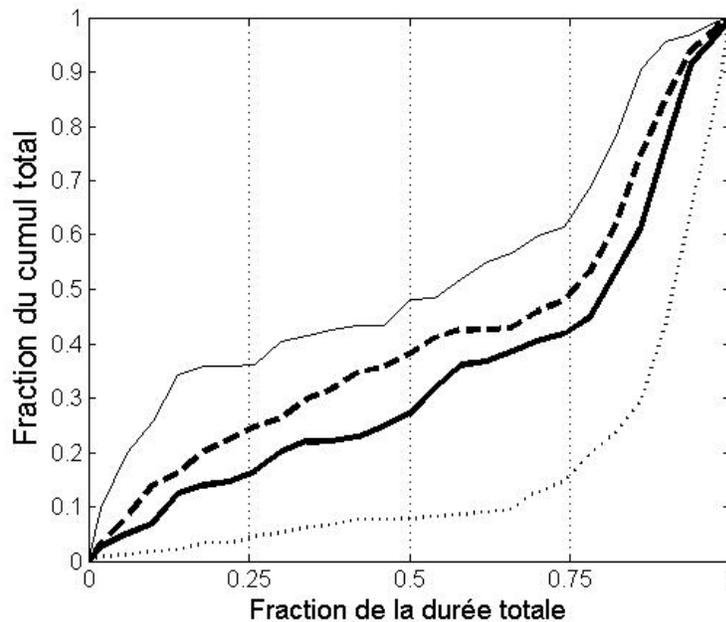
**Figure 5.4** Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 1 (aéroport de Dorval). Les différentes courbes correspondent aux différents centiles : trait gras pour la médiane (centile 50), trait pointillé pour le centile 10, trait hachuré pour le centile 65 et trait fin pour le centile 90.



**Figure 5.5** Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 2 (aéroport de Dorval). Les différentes courbes correspondent aux différents centiles : trait gras pour la médiane (centile 50), trait pointillé pour le centile 10, trait hachuré pour le centile 65 et trait fin pour le centile 90.



**Figure 5.6** Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 3 (aéroport de Dorval). Les différentes courbes correspondent aux différents centiles : trait gras pour la médiane (centile 50), trait pointillé pour le centile 10, trait hachuré pour le centile 65 et trait fin pour le centile 90.



**Figure 5.7** Profils des pluies de centiles 10, 50, 65 et 90 pour la classe 4 (aéroport de Dorval). Les différentes courbes correspondent aux différents centiles : trait gras pour la médiane (centile 50), trait pointillé pour le centile 10, trait hachuré pour le centile 65 et trait fin pour le centile 90.

En résumé, les paramètres de cette classification des profils types de pluie déterminent différentes caractéristiques des pluies :

1. La classe de la pluie détermine le moment où le cumul de pluie le plus important survient (par exemple en début de pluie, à la fin, etc.). Cet aspect a une incidence directe sur l'infiltration par exemple.
2. Le centile de pluie considéré pour une classe donnée détermine l'intensité de pluie maximale atteinte durant l'événement. Cette caractéristique a un impact direct sur les débits de ruissellement maximum atteints.
3. La durée et la période de retour retenues déterminent le volume total de pluie généré durant l'événement.

## 5.4 Aménagements urbains types considérés

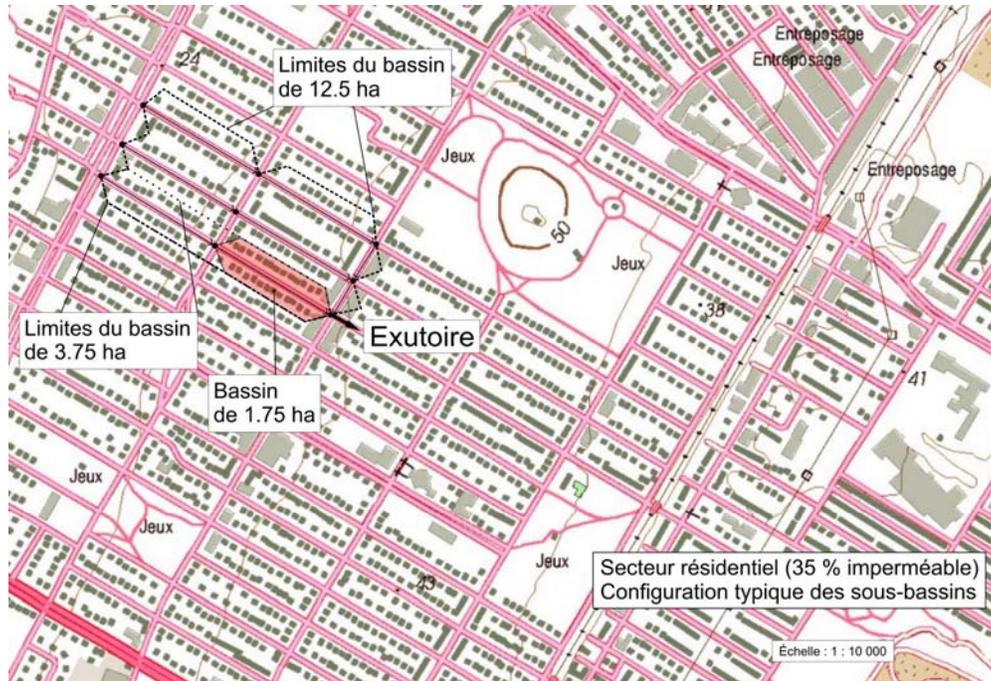
Un certain nombre de bassins urbains types ont été considérés dans ce qui suit. Le tableau 5.2 en dresse la liste et précise les caractéristiques de chacun de ces bassins, à savoir leur superficie et leur pourcentage de surface imperméable. Ces bassins sont représentatifs des types de bassin dont le comportement hydrologique doit être analysé en pratique. Différentes superficies doivent être analysées puisqu'un effet d'échelle fait varier les débits unitaires (pour un type de bassin, l'augmentation de la superficie faisant diminuer les débits unitaires exprimés en  $m^3/s/ha$ ).

**Tableau 5.2 Bassins urbain types analysés.**

Type de bassin	Pourcentage imperméable	Superficies considérées (ha)
Stationnement / route	100 %	0,5 ha pour un stationnement 0,5 ha pour une route de 11 m de large (demi-largeur)
Secteur résidentiel de densité moyenne	35 %	0,5, 1,75, 3,5 et 12,5
Secteur résidentiel de densité élevée	65 %	1 et 5
Conditions non-développées	0 %	5, 20 et 50

En ce qui concerne les secteurs résidentiels de densité moyenne, les caractéristiques pour les simulations ont été établies en s'appuyant sur un bassin réel de la ville de Montréal. Comme on peut le voir à la figure 5.8, la forme des bassins choisis est plus ou moins rectangulaire, avec des rues rectilignes se coupant à angle droit; de nouveaux secteurs avec des rues aux formes plus variées pourraient avoir une réponse hydrologique légèrement différente (pour une même superficie). Le bassin avec une superficie de 0,5 ha est simplement un sous-bassin du bassin de 1,75 ha.

Les secteurs résidentiels de densité élevée correspondent à des aménagements de blocs appartements avec aires de stationnement intégrées. Les conditions non développées doivent finalement être souvent évaluées dans les études de drainage urbain pour établir les débits de contrôle lorsqu'on veut aménager un secteur et limiter les débits et volumes de ruissellement à ce qui prévalait avant le développement.

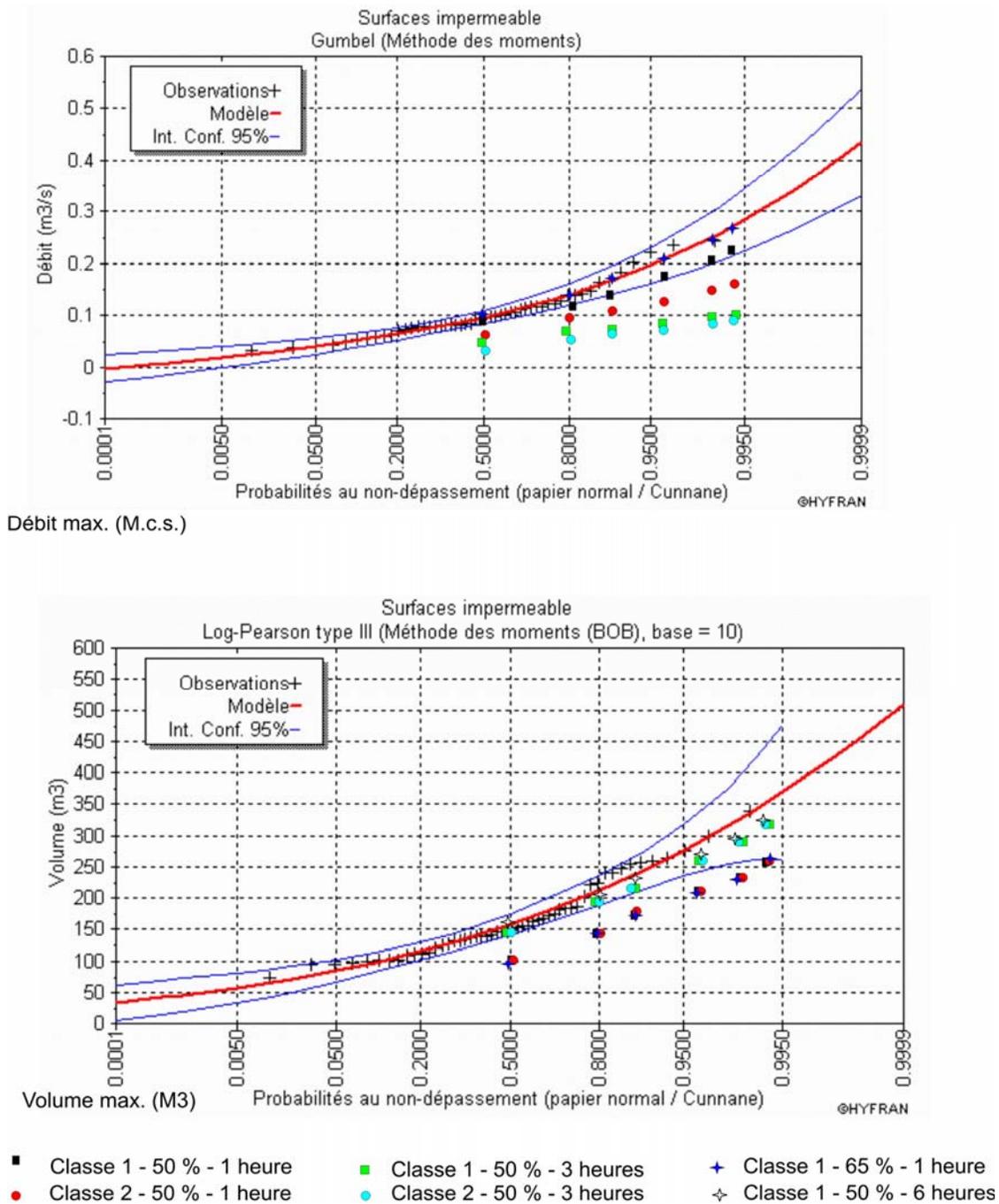


**Figure 5.8** Caractérisation des bassins pour un secteur résidentiel type de densité moyenne.

## 5.5 Simulations hydrologiques des pluies sur les bassins types

Le logiciel SWMM (Huber et Dickinson, 1988), version 4.4H, a été utilisé afin d'estimer les débits et les volumes de ruissellement selon les différents bassins urbains types définis à la section précédente. Seuls les résultats pour les bassins 100 % imperméables et de type résidentiel (35 % imperméable) pour une superficie de 0,5 ha dans les deux cas seront présentés dans ce qui suit. Les 199 pluies de la station Dorval ont d'abord été simulées sur ces bassins. Les débits et volumes de ruissellement ont été estimés pour différentes superficies. Les débits et volumes maximaux annuels ont été extraits de ces séries et une analyse des probabilités de récurrence de ces événements a été réalisée pour les débits et volumes de ruissellement. Les distributions Gumbel et Log Pearson III (méthode des moments) sont celles fournissant le meilleur ajustement.

En utilisant les profils temporels de pluie pour les différentes classes de pluie et avec différentes durées, des simulations ont été complétées avec différentes combinaisons de classe et de durée. La figure 5.9 montre les résultats pour le bassin 100 % imperméable (0,5 ha) pour différentes pluies alors que les figures 5.10 et 5.11 montrent les résultats pour le bassin 35 % imperméable (résidentiel de densité moyenne), pour des durées de 1 h et 3 h respectivement.



**Figure 5.9** Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits (graphique du haut) et volumes de ruissellement maximaux annuels (graphique du bas) pour un secteur 100 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare obtenues en utilisant les 199 pluies de la station Dorval (période [1943-1992]) (courbe continue) et les différentes pluies synthétiques (points de diverses formes et couleurs).

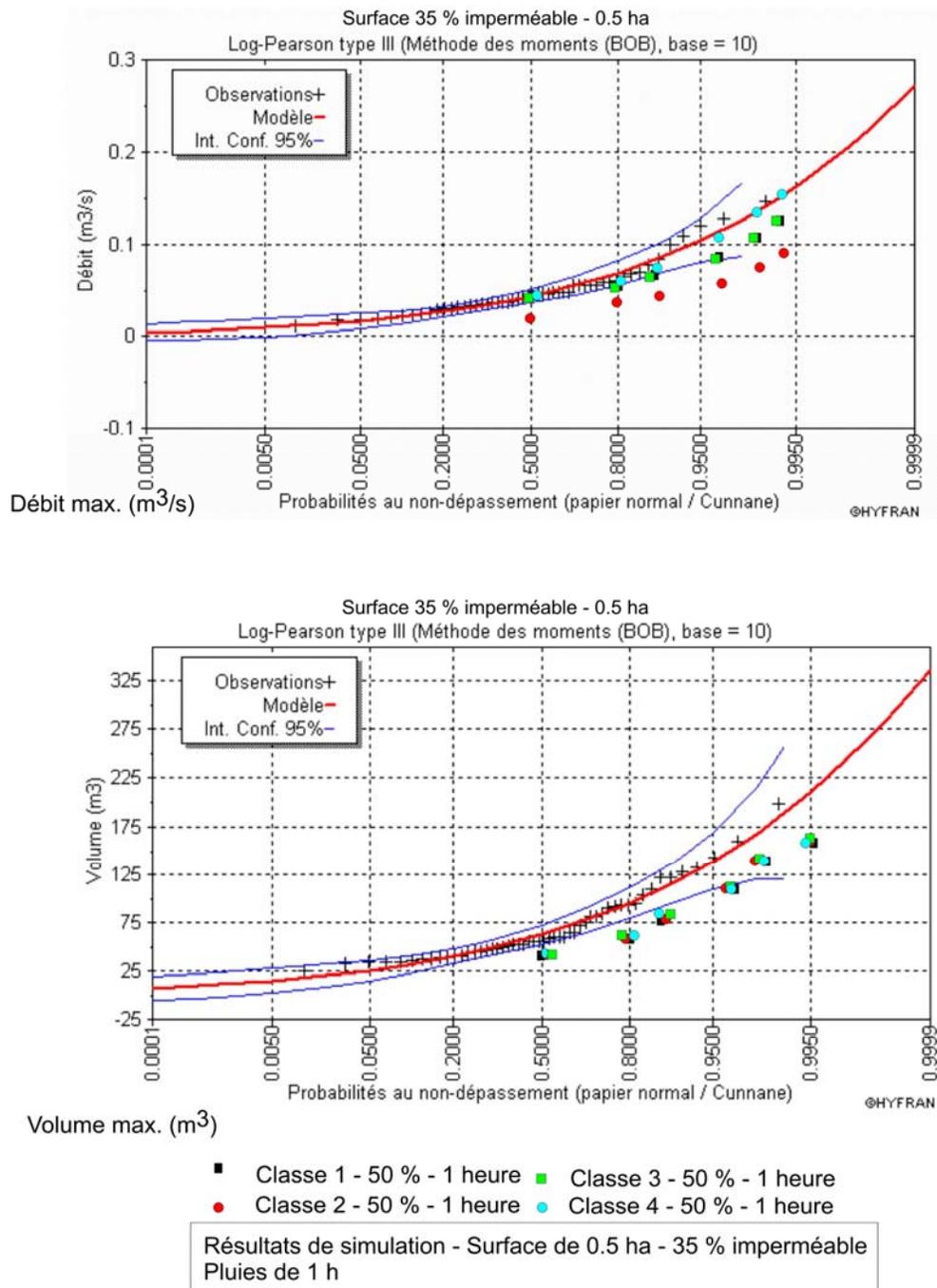
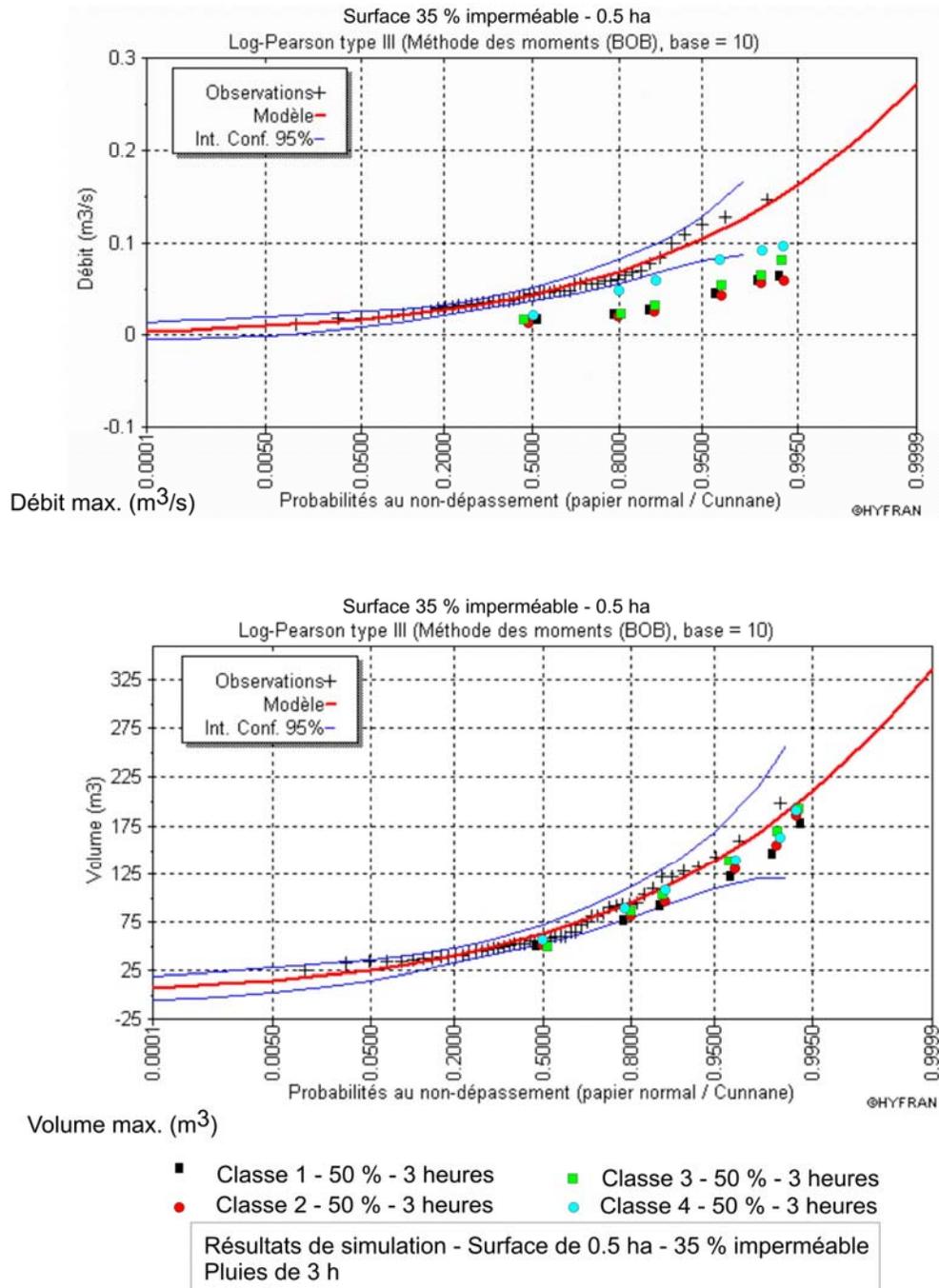


Figure 5.10 Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits et volumes de ruissellement totaux maximaux annuels pour un secteur résidentiel à 35 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare obtenues en utilisant les 199 pluies de la station Dorval (période [1943-1992]) (courbe continue) et les différentes pluies synthétiques (durées de 1 h).



**Figure 5.11** Courbes des probabilités au non-dépassement pour les débits et volumes de ruissellement totaux maximaux annuels pour un secteur résidentiel à 35 % imperméable d'une superficie de 0,5 hectare obtenues en utilisant les 199 pluies de la station Dorval (période [1943-1992]) (courbe continue) et les différentes pluies synthétiques (durées de 3 h).

L'examen des différents graphiques montre que certains profils temporels permettent de mieux reproduire les résultats obtenus en considérant les séries historiques de pluie (voir tableau 5.3).

**Tableau 5.3 Types de pluie sélectionnés pour chacun des types de bassin urbain considérés**

Type de bassin	Débit	Volume
Stationnement (100 % imperméable, 0,5 hectare)	Classe 1 – 1 h – 65 %	Classe 1 – 6 heures – 50 %
Secteur résidentiel (35 % imperméable; 0,5 hectare)	Classe 4 – 1 h – 50 %	Période de retour de 2 à 10 ans : Classe 4 – 3 h – 50 % Période de retour de 25 à 100 ans : Classe 3 – 3 h – 50 %

Finalement, les pourcentages d'augmentation prévus pour les conditions futures ont été appliqués aux quantités de précipitation pour chaque pluie et, en utilisant les mêmes profils temporels, on a pu établir par modélisation les débits et volumes de ruissellement qui pourraient être anticipés dans chaque cas. Les pourcentages d'augmentation appliqués sont de 23 %, 19,7 %, 17 % et 13,8 % pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 25 ans respectivement. Ces pourcentages correspondent approximativement à ceux anticipés pour une durée de 2 h (voir tableau 4.16). Ces augmentations ont été appliquées aux durées 1 h, 2 h et 3 h. Pour des durées de 6 h, les pourcentages d'augmentation considérés sont de 13,5, 18,2, 17,8 et 15,3 pour les mêmes périodes de retour. Le pourcentage de 13,8 % a également été appliqué aux périodes de retour de 50 ans et 100 ans, même si les analyses climatologiques qui ont été réalisées ne fournissaient pas explicitement ces pourcentages.

Les résultats sont montrés aux figures 5.12 à 5.14 et les tableaux 5.4 et 5.5 résument ces résultats en faisant ressortir les pourcentages d'augmentation correspondant des débits et des volumes de ruissellement.

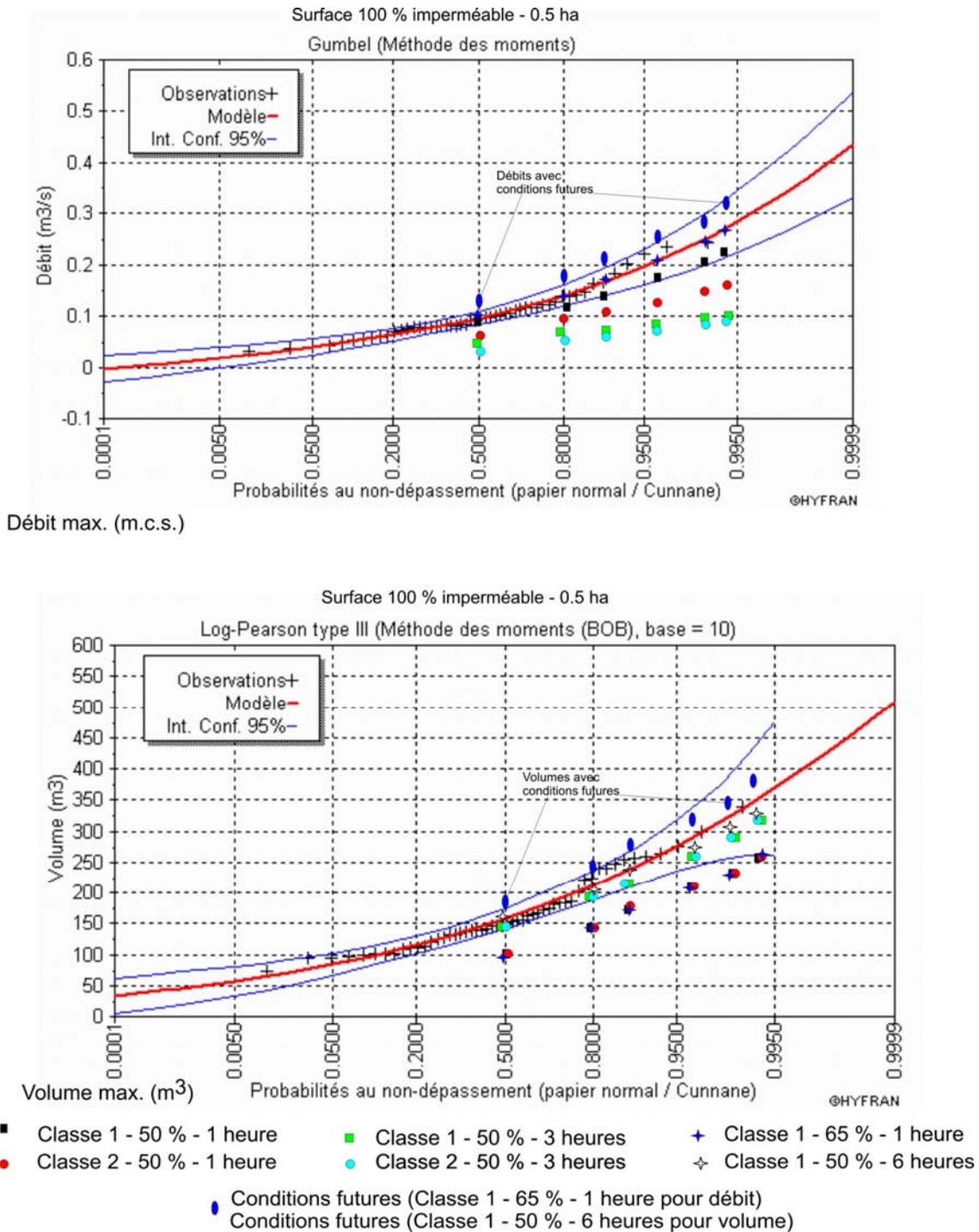


Figure 5.12 Résultats des simulations pour les conditions futures (stationnement de 0,5 ha).

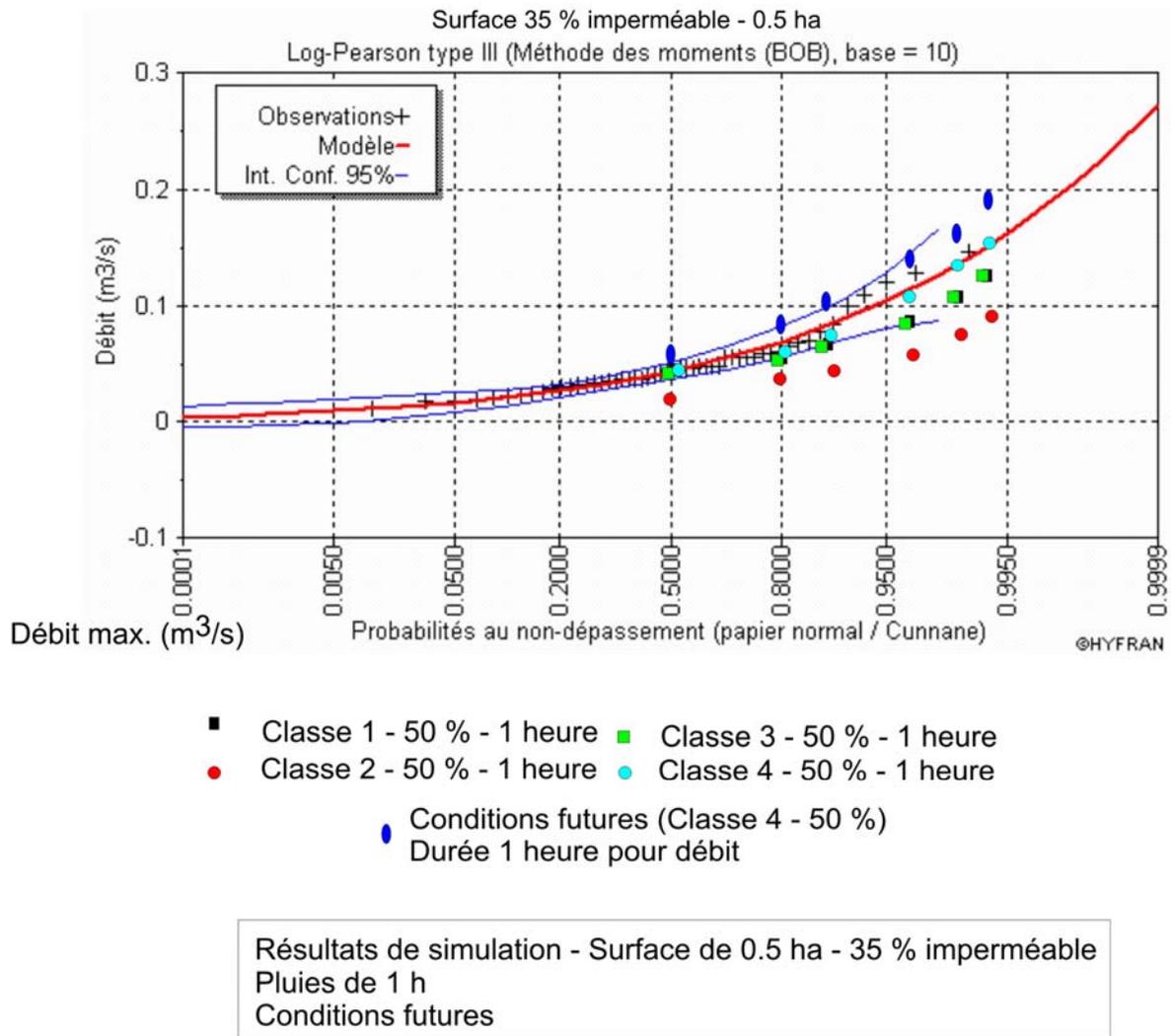
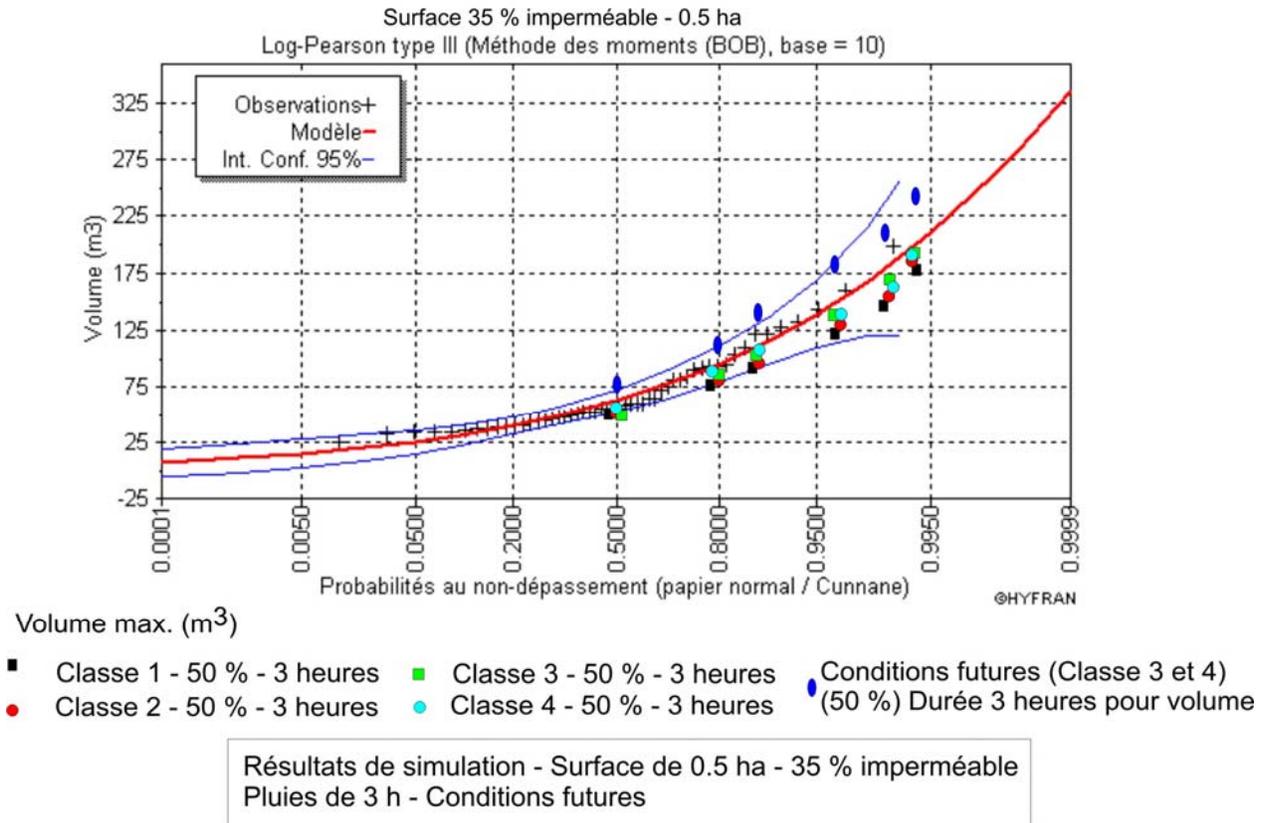


Figure 5.13 Résultats des simulations pour les débits pour les conditions futures (secteur résidentiel de densité moyenne de 0,5 ha, 35 % imperméable).

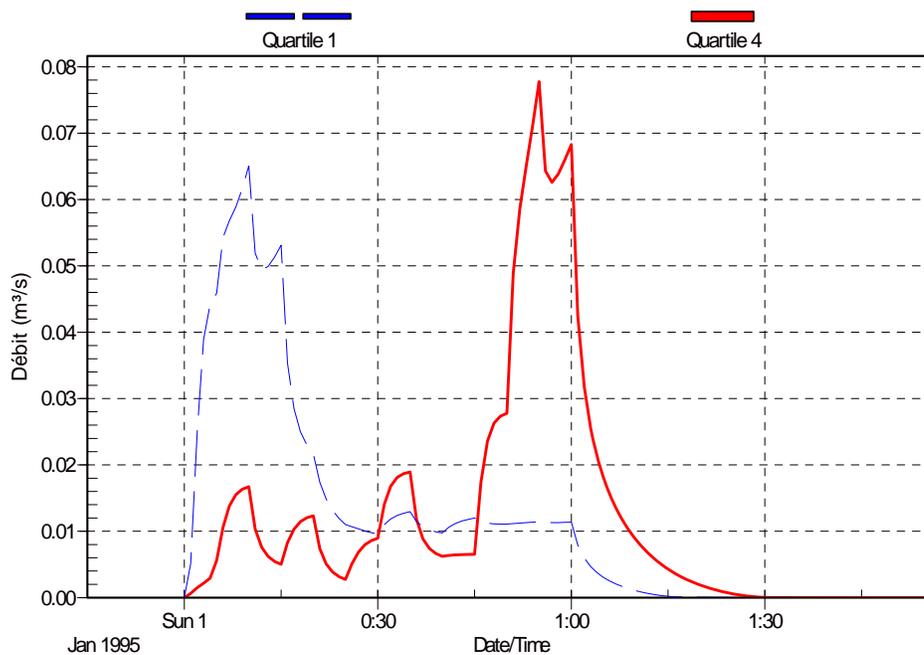


**Figure 5.14 Résultats des simulations pour les volumes de ruissellement pour les conditions futures (secteur résidentiel de densité moyenne de 0,5 ha, 35 % imperméable).**

### 5.5.1 Discussion des résultats

Un premier constat qui s'impose est que les augmentations de débit et volume de ruissellement ne sont pas linéairement reliées aux augmentations de précipitation. Le tableau 5.5 permet de mieux mettre en relief cette non-linéarité et on peut se rendre compte que les changements pour la réponse hydrologique des bassins sont plus prononcés pour les bassins où la portion perméable est plus importante (secteur de type résidentiel de moyenne densité) que pour les secteurs plus imperméabilisés. De plus, toujours pour les bassins de type résidentiel (35 % imperméable), les augmentations de débit et volume ne sont pas semblables pour les différentes périodes de retour, les changements en pourcentage étant plus importants pour les événements fréquents (période de retour de 2 ans) que pour les événements plus rares (100 ans). Pour les bassins 100 % imperméables, on constate également que les pourcentages d'augmentation pour les débits et volumes de ruissellement se rapprochent des pourcentages d'augmentation de la précipitation.

L'ampleur des impacts est reliée évidemment à la répartition temporelle des pluies. Si on considère, par exemple, le bassin à 35 % imperméable (secteur résidentiel de faible densité), la figure 5.15 permet de comparer les hydrogrammes obtenus pour des pluies de 1 h et pour une répartition temporelle du premier ou du quatrième quartile (avec dans les deux cas un pourcentage de dépassement de 50 %). On constate que le fait qu'une certaine quantité de pluie soit tombée avant l'arrivée de la pointe (quartile 4) a un impact direct sur les débits de pointe puisque le sol aura été saturé par la première partie de la pluie.



**Figure 5.15** Hydrogrammes pour un bassin de 0,5 ha de type résidentiel à faible densité (35 % imperméable) avec des pluies du quartile 1 (trait hachuré) et du quartile 4 (trait continu), 50 % de dépassement (durée de 1 h – période de retour de 1 dans 10 ans).

**Tableau 5.4 Résumé des résultats pour l'augmentation des débits et volumes de ruissellement pour les conditions actuelles et futures<sup>1</sup>.**

Type de bassin	Variables	Période de retour (ans)											
		2			5			10			100		
		Actuel	Futur	% aug.	Actuel	Futur	% aug.	Actuel	Futur	% aug.	Actuel	Futur	% aug.
Stationnement <sup>1</sup>	Débit (m <sup>3</sup> /s)	0,098	0,12	21,2	0,137	0,171	24,8	0,167	0,205	22,8	0,273	0,318	16
	Volume (m <sup>3</sup> )	161	184	14,3	206	245	18,9	236	280	18,6	329	381	15,8
Résidentiel <sup>2</sup>	Débit (m <sup>3</sup> /s)	0,036	0,048	33,3	0,058	0,08	37,9	0,078	0,103	32,0	0,158	0,196	24,1
	Volume (m <sup>3</sup> )	51	76	49,0	87	118	35,6	112	142	26,7	199	241	21,1

1. 100 % imperméable, superficie de 0,5 ha

2. Densité moyenne, 35 % imperméable, superficie de 0,5 ha

**Tableau 5.5 Pourcentages d'augmentation de quantité de pluie pour les conditions futures et pourcentages d'augmentation pour les débits et volumes de ruissellement pour différents types d'occupation du sol.**

Types de bassin	Variable	Période de retour			
		2	5	10	100
Stationnement	Précipitation	23 (pour débit) 13,5 (pour volume)	19,7 (pour débit) 18,2 (pour volume)	17 (pour débit) 17,8 (pour volume)	13,8 (pour débit) 15,3 (pour volume)
	Débit	21,2	24,8	22,8	16
	Volume	14,3	18,9	18,6	15,8
Résidentiel	Précipitation	23	20	17	14
	Débit	33,3	37,9	32,0	24,1
	Volume	49,0	35,6	26,7	21,1

## 5.6 Mesures d'adaptation envisageables

Puisqu'il apparaît que les pourcentages d'augmentation pour les débits et volumes de ruissellement qui peuvent être anticipés sont relativement importants, il devient donc nécessaire dans ce contexte de prévoir certaines mesures qui pourront permettre d'atténuer ces modifications. Ces mesures peuvent prendre plusieurs formes et peuvent être considérées dans le cadre d'une filière de contrôle comme l'illustre la figure 5.16, avec des interventions pouvant se faire plus près de la source et d'autres plus en aval dans les réseaux.

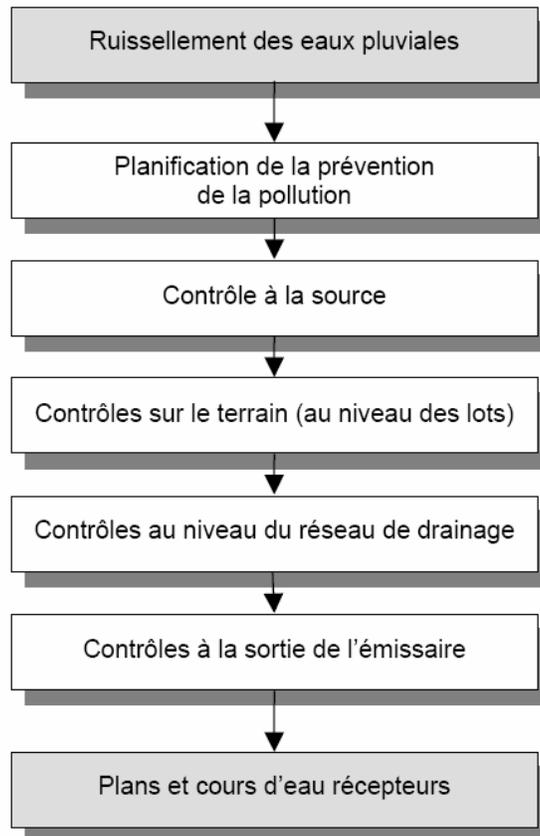


Figure 5.16 Chaîne de traitement pour le contrôle du ruissellement urbain (CNRC, 2003).

Ces mesures doivent par ailleurs être définies en prenant en compte un certain nombre de principes pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain :

- Les débits plus fréquents (période de retour de 2 ans ou légèrement inférieure) sont généralement associés à l'érosion dans les cours d'eau puisque ces débits sont reconnus pour contribuer dans une large part à la définition de la section hydraulique des cours d'eau (Leopold, 1968; MOE, 2003; CNRC, 2003; MPCA, 2005; Schueler, 1987; Horner *et al.*, 1994). L'augmentation de ces débits pourra donc engendrer une augmentation significative de l'érosion et une dégradation des écosystèmes, d'autant plus que pour des secteurs de type résidentiel (35 % imperméable), l'augmentation peut aller jusqu'à 33 % pour les débits;
- De façon traditionnelle, le contrôle des eaux pluviales se fait moins souvent pour les secteurs de type résidentiel (surtout lorsqu'il n'y a pas de sous-capacité hydraulique des réseaux existants en aval) alors qu'il est actuellement plus commun pour de grandes surfaces pavées qui sont associées aux secteurs commerciaux et industriels. Or, comme les augmentations qui peuvent être anticipées pour les secteurs résidentiels sont substantielles, on devra intégrer davantage de contrôles pour pouvoir compenser ces augmentations. Une redéfinition des concepts de développement impliquant l'urbanisme, l'aménagement paysager et l'ingénieur concepteur des réseaux de drainage devra donc être entreprise et mieux disséminée dans la pratique. Dans ce contexte, les contrôles à la source ne sont plus une technique alternative mais devraient plutôt être une approche de base pour les nouveaux réseaux afin de compenser les effets à plus long terme des changements climatiques, même lorsqu'il n'y a pas de problème de surcharge des réseaux observée pour les conditions actuelles;
- Une des tendances actuelles pour la conception d'un programme de gestion des eaux pluviales est d'effectuer un contrôle pour la gamme complète des événements (fréquents et plus rares), tant pour les débits que pour les volumes de ruissellement. Pour le contrôle des événements plus fréquents, des installations impliquant des processus d'infiltration sont utilisées. Puisque les augmentations de débit et volume sont importantes pour les événements fréquents (période de retour de 2 ans), on devrait donc prévoir un ajustement à la hausse des dimensions des ouvrages ou l'ajout d'un facteur de sécurité plus important. Pour les événements plus rares (période de retour de 100 ans), il est relativement commun aujourd'hui de construire des bassins de rétention pour étaler dans le temps les débits de sortie et minimiser les impacts sur les réseaux en

aval. Les volumes de rétention à prévoir pour ces bassins devraient être majorés si les données pluviométriques actuelles continuent d'être utilisées.

D'un autre côté, les types de mesure qui peuvent être envisagés seront nécessairement différents selon que l'on considère un réseau existant (avec une trame urbaine plus ou moins dense) ou un réseau projeté. Dans le cas d'un réseau projeté, il est évidemment plus facile de planifier adéquatement les réseaux avec les contrôles qui s'imposent de façon à ce que l'augmentation des débits et volumes puissent être compensée. La plupart des mesures inscrites au schéma de la figure 5.16 peuvent ainsi s'appliquer seules ou en combinaison, en gardant à l'esprit qu'il est souvent moins coûteux de contrôler les débits et volumes le plus possible en amont, près de la source.

Dans le cas de réseaux existants, l'utilisation de certaines mesures peut par ailleurs être limitée par l'espace disponible ou par d'autres contraintes physiques propres aux réseaux qu'on cherche à réhabiliter. On doit cependant prendre en compte que la solution simpliste consistant à augmenter les dimensions des conduites existantes est rarement une bonne solution (ou la solution la plus optimale en matière d'efficacité et de coûts), particulièrement si le tronçon à réhabiliter se trouve en amont, loin du cours d'eau servant d'exutoire. Une première approche dans ce cas demeure toujours de considérer un contrôle plus local ou en réseau, qui pourra au besoin être complété par d'autres interventions sur les réseaux ou avec l'addition de bassins de rétention. D'un autre côté, un certain nombre de mesures pour les réseaux existants peuvent davantage être rattachées à une approche préventive :

- Meilleur suivi de l'état structural des réseaux et meilleur entretien des réseaux afin d'éviter les accumulations de sédiments et de débris qui peuvent entraîner des refoulements;
- Instauration d'un programme d'entretien et de sensibilisation pour les clapets anti-refoulement, qui peut être assorti de subventions ou d'une participation financière de la Ville pour mettre à niveau les installations;
- Élaboration d'un plan d'urgence en cas de pluie majeure s'abattant en secteur urbain;
- Densification des réseaux de pluviomètre en milieu urbain et suivi suite à chaque événement de pluie important survenu en milieu urbain (ayant ou non causé des dégâts et réclamations);

- Définition et uniformisation des normes de conception pour les réseaux de drainage et la gestion des eaux pluviales en milieu urbain;
- Resserrement des contraintes et de la réglementation concernant les zones inondables et meilleur contrôle afin de le faire respecter.

Plus globalement, les mesures qu'il serait utile de prendre pour compenser les effets appréhendés du changement climatique sur le drainage urbain sont essentiellement de deux ordres : 1) procéder à une révision des critères de conception et 2) modifier les façons de faire pour la conception et la mise en place des réseaux, en intégrant davantage de contrôles à la source et avec une approche plus globale faisant appel à une meilleure intégration des espaces verts en milieu urbain.

Concernant tout d'abord les critères de conception, ils sont fondamentalement rattachés aux périodes de retour choisies et aux données pluviométriques. Deux approches peuvent être ici choisies comme mesures d'adaptation. Si on continue d'utiliser les informations actuelles provenant des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence), on peut utiliser pour la conception une période de retour plus longue. Au Québec, comme dans plusieurs endroits en Amérique du Nord d'ailleurs, la période de retour qui est la plus souvent utilisée pour la conception de réseaux selon une approche traditionnelle est de 5 ans. Pour maintenir ce niveau de service, il y aurait donc lieu, à la lumière des résultats obtenus, de rehausser à 10 ans cette période de retour si les données pluviométriques actuelles sont utilisées pour la conception. Ainsi, si on désire conserver un niveau de service de 1 dans 5 ans pour une situation envisagée dans 50 ans (donc en deçà de la durée de vie utile des réseaux), on pourrait prendre (en se basant sur les données actuelles) une période de retour de 10 ans pour la conception. De la même façon, les volumes de rétention à prévoir pour différentes périodes de retour devraient être majorés. Une autre approche serait de considérer, au cas par cas, les pourcentages d'augmentation de pluie qui ont été définis par la modélisation climatique.

Évidemment, la révision des critères de conception peut plus difficilement être une mesure d'adaptation adéquate dans le cas de réseaux existants puisque le comportement de ces réseaux est souvent tributaire de portions de réseau situées plus en amont et que les coûts de réhabilitation peuvent rapidement devenir prohibitifs. Une approche plus globale, faisant appel à une vision plus holistique du drainage urbain, d'application plus large, peut dans ce cas s'avérer nécessaire pour permettre de compenser les changements hydrologiques associés aux changements climatiques. La section suivante discutera de façon plus approfondie de cette

approche et des différentes techniques qui peuvent être utilisées, tant pour des réseaux existants que pour des réseaux projetés, avec des exemples concrets d'application.

### **5.6.1 Approche générale et description des mesures d'adaptation**

La pratique au Québec en ce qui a trait au drainage urbain devrait intégrer davantage les approches qui sont de plus en plus généralisées un peu partout en Amérique du Nord (MOE, 2003; MPCA, 2005, CNRC, 2003; MWLAP, 2002). Ces documents recommandent un changement de paradigme pour la conception des réseaux de drainage et décrivent des approches plus holistiques qui permettent de minimiser les impacts du développement urbain. Les tendances qui sont décelables sont les suivantes :

- Nouveau paradigme fondamental : tendre à reproduire les processus naturels et minimiser les impacts hydrologiques totaux (au lieu d'une évacuation rapide et efficace des eaux);
- Filière de traitement pour un contrôle de la qualité des eaux (en plus du contrôle usuel de la quantité);
- Gamme complète des pluies à contrôler (événements fréquents et événements plus rares);
- Contrôle du volume de ruissellement.

La figure 5.17, tirée du guide de la Colombie-Britannique (MWLAP, 2002), fournit une bonne illustration de la nouvelle approche où toute la gamme de pluies est intégrée aux analyses. Concrètement, ce schéma fournit un encadrement pour la définition des différentes mesures qui devraient faire partie d'un plan intégré de gestion des eaux pluviales. Les pluies fréquentes peuvent, dans un premier temps, être contrôlées par des mesures près de la source, en maximisant l'utilisation d'espaces verts et en favorisant l'infiltration des eaux de ruissellement. La période de retour pour ces événements est généralement de 2 ans ou encore plus fréquente; ces pluies constituent une partie importante de la pluie totale annuelle et leur contrôle permettra donc le traitement d'une portion significative du ruissellement annuel. Pour des pluies intermédiaires et plus rares (période de retour de 5 ans ou 10 ans), un certain contrôle peut être effectué en réseau, soit en surface des rues, dans des conduites surdimensionnées ou des fossés. Finalement, pour des événements très rares (période de retour jusqu'à 100 ans), des

basins de rétention de dimensions plus importantes peuvent être mis en place et des vérifications additionnelles peuvent être effectuées pour s'assurer que les écoulements dans le réseau majeur sont adéquatement contrôlés (par exemple en vérifiant les vitesses d'écoulement et profondeurs d'eau dans les rues). Ces mesures et la filière de contrôle qu'elles sous-tendent sont également schématisées à la figure 5.16 déjà présentée, où les techniques sont classifiées selon qu'elles se trouvent plus près de la source ou plus en aval, près de l'exutoire vers le milieu récepteur. Les différents guides INFRA (2003, 2004a et 2004b) suivent également cette classification générale des mesures applicables.

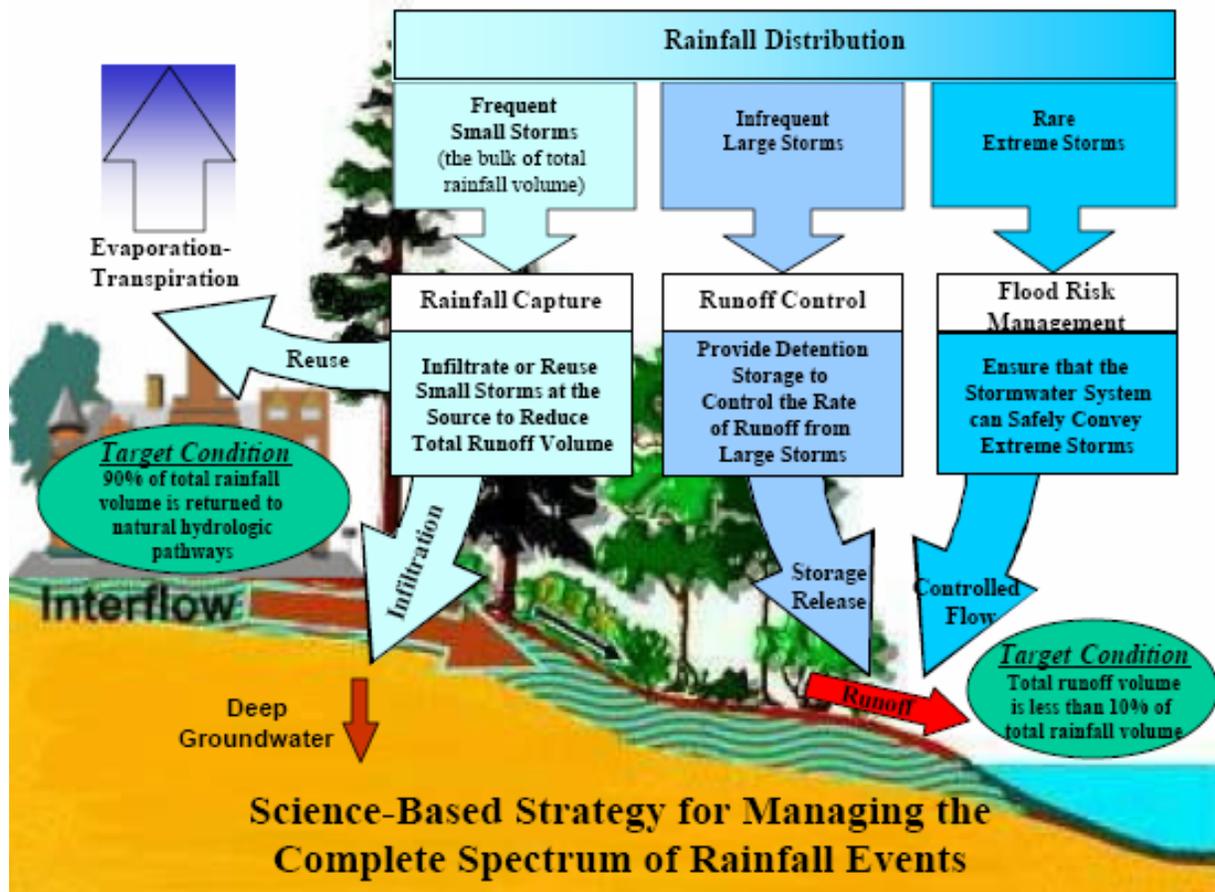


Figure 5.17 Prise en compte des différents événements pluvieux pour la gestion des eaux pluviales (tiré de MWLAP, 2002).

Ces tendances ont des implications profondes pour la planification, la conception ainsi que les aspects financiers et opérationnels des réseaux de drainage. Ainsi, on doit, dans ce contexte, planifier les ouvrages de façon plus intégrée, en faisant appel à des équipes multidisciplinaires (ingénieur concepteur, urbaniste, aménagiste paysager, biologiste), en cherchant à définir des solutions mieux adaptées à chaque cas et en utilisant des approches différentes pour les aspects financiers et opérationnels.

Il va sans dire que les augmentations de débit et de volume de ruissellement associées aux changements climatiques pourraient, pour des réseaux projetés, être compensées entièrement par l'ajout de bassins de rétention situés en aval des réseaux ou encore par le choix d'une période de retour plus longue pour les données pluviométriques utilisées dans la conception (ce qui se traduit par des infrastructures de dimensions plus importantes). Globalement, cette approche n'est pas optimale pour plusieurs raisons :

- La construction de bassins de rétention plus importants, de même que la mise en place de conduites de plus grands diamètres, conduiront nécessairement à une augmentation des coûts;
- Le contrôle de la qualité des eaux ruisselées ainsi que des volumes de ruissellement, en plus des débits, est de plus en plus imposé dans les nouvelles réglementations nord-américaines (MDE, 2000; MOE, 2003; MPCA, 2005, CNRC, 2003 et 2004a; MWLAP, 2002). Or, ces types de contrôle, particulièrement pour les volumes, impliquent nécessairement une augmentation de l'infiltration des débits ruisselés, ce qui peut difficilement être accompli avec l'utilisation exclusive de bassins de rétention situés en aval;
- Pour des réseaux existants dans une trame urbaine plus dense, il peut devenir difficile d'intégrer des ouvrages de rétention plus imposants.

Dans ce contexte, le contrôle à la source, qui est souvent moins privilégié dans l'approche traditionnelle de conception des réseaux de drainage, peut devenir un élément-clé pour mettre en œuvre ces nouvelles approches avec un contrôle des volumes et de toute la gamme d'événements pluvieux, en particulier pour les événements fréquents. En ce qui concerne les mesures d'adaptation aux changements climatiques, l'utilisation de contrôles à la source est doublement intéressante puisqu'elle permet, dans le cas de réseaux existants qu'on veut réhabiliter, de maintenir à moindre coût le niveau de service et, dans le cas de nouveaux réseaux, d'intégrer des techniques qui permettront de réduire les impacts écologiques associés

au développement urbain. De plus, les contrôles à la source sont généralement moins coûteux que les autres éléments plus en aval et ils peuvent se fondre avantageusement dans le milieu et minimiser ainsi les espaces qui sont exclusivement dédiés à la gestion des eaux et à la rétention. De plus, considérant les plus faibles débits et volumes qu'ils sont appelés à recevoir (les surfaces tributaires étant plus petites à cette échelle), les ouvrages de contrôle à la source deviennent un élément essentiel pour la réduction des volumes de ruissellement.

L'intégration de contrôles à la source dans le milieu urbain sous-tend également une redéfinition des concepts d'aménagement et de construction de rues. Les figures 5.18 à 5.20, tirées d'une référence récente australienne (Engineers Australia, 2006), donnent des exemples d'aménagement qui fournissent un contrôle à la source pour des secteurs résidentiels. Le terme «*Water Sensitive Urban Design*» est utilisé en Australie pour décrire ce type d'approche plus globale. Ces exemples ne sont toutefois pas spécifiques à l'Australie et rejoignent ce qui se fait un peu partout dans le monde, avec des appellations légèrement différentes mais qui regroupent les mêmes types de techniques. Les termes « techniques compensatoires » ou « techniques alternatives » en France, « BMPs » (*Best Management Practices*) ou, plus récemment, LID (*Low Impact Development*) aux États-Unis et au Canada anglais traduisent les mêmes techniques et le même cadre de gestion plus holistique. Les photos des figures 5.21 à 5.23 montrent des applications où ces concepts ont été mis en œuvre pour des secteurs résidentiels.

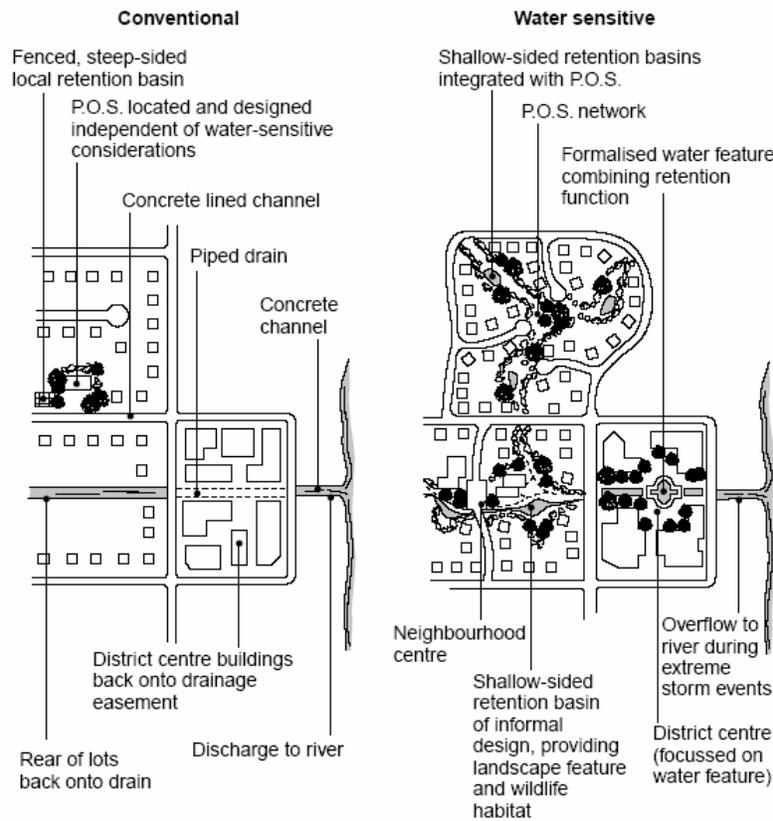


Figure 5.2 Networked public open space incorporated in development.

Figure 5.18 Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).

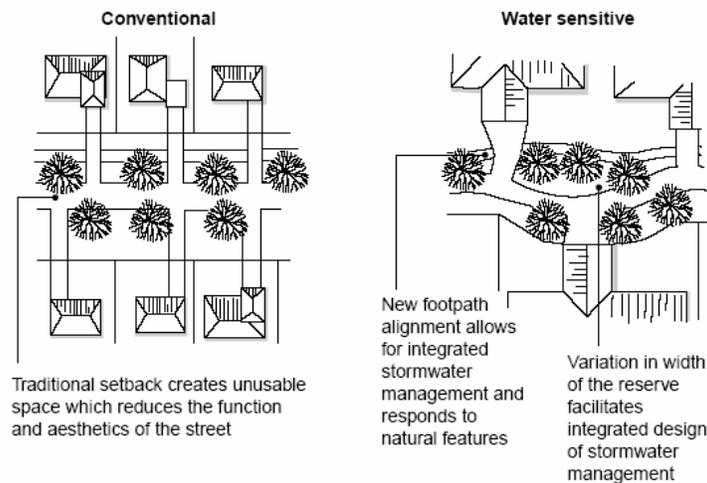


Figure 5.4 Conventional versus water sensitive road layout.

Figure 5.19 Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).

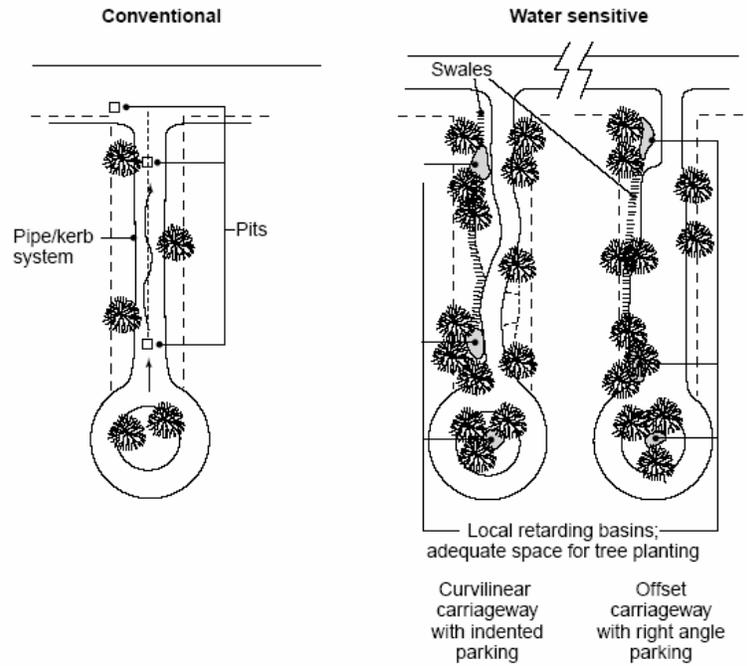


Figure 5.6 Road verge design and management.

Figure 5.20 Exemple d'aménagement de secteurs résidentiels (Engineers Australia, 2006).



Figure 5.21 Fossé aménagé avec biofiltration dans un terre-plein de boulevard.



**Figure 5.22** Aménagement de rues résidentielles pour maximiser le contrôle à la source et l'infiltration.



**Figure 5.23** Exemple d'aménagement de rues résidentielles permettant d'augmenter l'infiltration.

L'objectif est ici de favoriser l'infiltration et de contrôler localement les débits et volumes pour les événements fréquents. Pour des événements plus rares, d'autres mesures devront évidemment être envisagées puisque les volumes de stockage disponibles sont limités. On peut toutefois souligner que des volumes de stockage non négligeables sont disponibles aux points bas des rues, qui peuvent être nombreux dans des secteurs plats. Un contrôle additionnel pourra donc être utilisé ainsi, en utilisant des restricteurs de débits et en stockant des volumes en surface. Un exemple d'une telle application est décrit dans Walesh (1999) et cette approche a également été utilisée pour certaines municipalités de la rive sud de Montréal.

Pour les stationnements et les aménagements autour de bâtiments commerciaux ou industriels, on peut avoir recours à différents aménagements dont des bandes filtrantes (figure 5.24), un fossé de rétention avec ou sans biofiltration (figure 5.25), l'aménagement d'espaces verts (figure 5.26) ou l'utilisation de toits verts (figure 5.27).



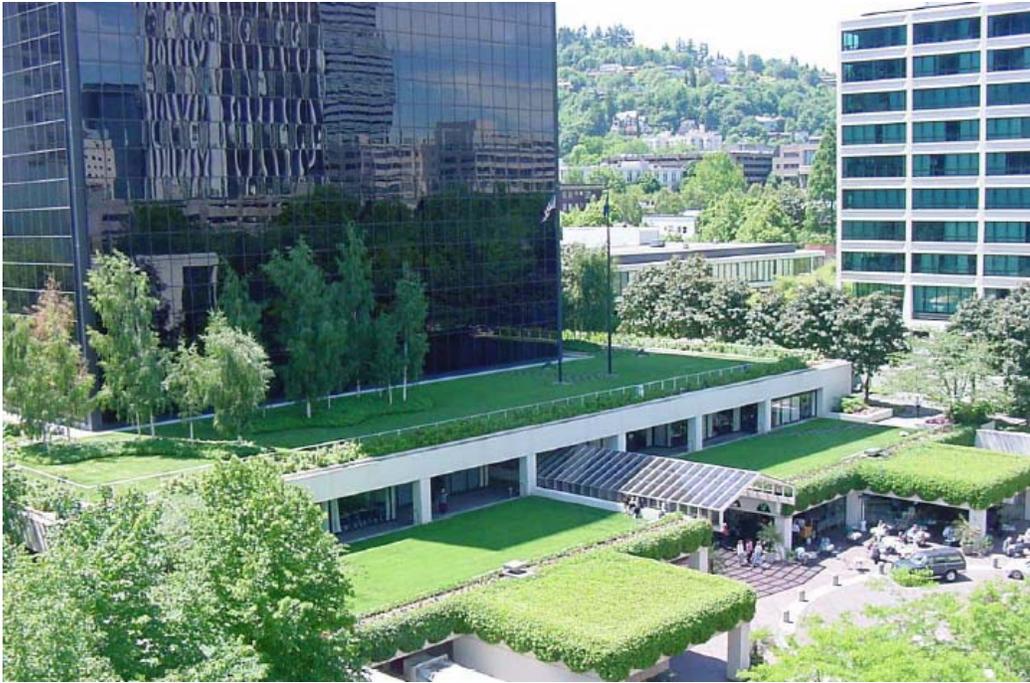
**Figure 5.24** Exemple d'aménagement de bandes filtrantes et de fossé de rétention pour un stationnement.



**Figure 5.25** Exemple d'aménagement de fossé de rétention pour un stationnement (avec biofiltration).



**Figure 5.26** Exemple d'aménagement d'espaces verts pour un bâtiment commercial ou multi-résidentiel.



**Figure 5.27 Exemple d'aménagement de toits verts.**

De façon générale, les contrôles à la source s'appuient sur de grands principes généraux :

- Préservation dans la mesure du possible des aires naturelles;
- Débranchement et redistribution du ruissellement (débranchement de toits, utilisation de fossés engazonnés, aménagement de paysage intégré);
- Réduction des surfaces imperméables (rues et trottoirs plus étroits, aires de stationnement réduites).

Pour un secteur résidentiel, les principales méthodes pour contrôler à la source le ruissellement sont de diriger les gouttières vers un endroit gazonné, de maximiser l'infiltration sur le terrain et d'aménager les rues de façon à redonner des espaces verts (exemple de la figure 5.23) ou en utilisant les volumes de stockage aux points bas.

### **5.6.2 Bénéfices potentiels et faisabilité des différentes mesures de contrôle**

La question qui se pose maintenant, dans un contexte de changement climatique et en considérant les pourcentages d'augmentation de débits et de volumes de ruissellement qui peuvent être anticipés, est de savoir dans quelle mesure et avec quelle efficacité les différents types de contrôle pourront être utilisés. Deux aspects doivent ici être considérés. Dans un premier temps, on doit établir l'ampleur des bénéfices que peut apporter une mesure en particulier et évaluer si cette mesure, seule ou en combinaison avec d'autres, peut permettre de compenser les augmentations qui sont envisagées. Deuxièmement, on doit évaluer la faisabilité d'avoir recours ou non aux différentes techniques pour un cas spécifique, en prenant en compte les particularités et les contraintes du secteur à l'étude. Ainsi, il va sans dire que le concepteur aura habituellement moins de flexibilité pour des réseaux existants dans un milieu densément urbanisé que pour des secteurs projetés avec une occupation du sol pour des habitations unifamiliales et une plus faible densité. Le manque d'espace et des contraintes physiques d'aménagement rendront par exemple plus difficile l'utilisation de certaines mesures en surface pour le centre des villes plus importantes.

En utilisant la nomenclature donnée à la filière de contrôle montrée à la figure 5.16, les mesures peuvent être globalement classées avec les catégories suivantes :

1. Contrôles à la source ou sur les terrains;
2. Contrôles en réseaux;
3. Contrôles à la sortie de l'émissaire.

Plusieurs références donnent une discussion détaillée des différentes mesures qui sont applicables (CNRC, 2003; CNRC, 2004a; CNRC, 2004b; MOE, 2003; Schueler, 1987; MPCA, 2005; ASCE/WEF, 1998). Les contrôles en réseaux comprennent notamment le recours à la rétention en fossés ou en conduites surdimensionnées ainsi que l'utilisation de réseaux de conduites perforées avec de la pierre nette; les contrôles à la sortie de l'émissaire incluent les différents types de bassin qui peuvent être mis en place (bassin sec, en eau (lac), marais épurateur, etc.). De façon générale, les augmentations de débit et volume de ruissellement qui ont été établies dans la présente étude (qui sont pour des secteurs résidentiels à 35 % imperméable de l'ordre de 38 % pour le débit de période de retour 5 ans et 36 % pour le volume) pourront vraisemblablement être compensées par la mise en place de mesures en

réseaux et avec des bassins de rétention, en assumant bien entendu que l'espace soit disponible et qu'il n'y ait pas de contraintes physiques.

Généralement, le recours à ces mesures ne permettra pas cependant d'obtenir une conception optimale si le contrôle à la source ou sur les terrains n'est pas également considéré. Dans certains cas, des contrôles à la source utilisés seuls pourront permettre d'atteindre les objectifs visés ici; dans d'autres cas, ils pourront au moins permettre de diminuer les dimensions pour les autres ouvrages (en réseaux ou à la sortie de l'émissaire) et de diminuer les volumes de ruissellement (en maximisant localement l'infiltration). Dans ce contexte, et puisque les bénéfices qui peuvent être associés à ce type de mesure sont moins bien connus, la discussion qui suit se concentrera sur les contrôles à la source.

#### **5.6.2.1 Contrôles à la source**

Plusieurs types de contrôle à la source peuvent être envisagés et adaptés pour différents types de secteurs. Pour des secteurs commerciaux, industriels ou institutionnels, des aires de rétention locale peuvent facilement être aménagées, soit en surface des stationnements, en périphérie (à ciel ouvert dans des bassins engazonnés) ou sous le stationnement (conduites surdimensionnées ou bassin en béton). En surface du stationnement, un contrôle à un taux de 50 ou 35 L/s/ha est commun et a peu de répercussions pour les usagers. L'ajout au besoin de bassins souterrains ou en périphérie ainsi que des surfaces engazonnées peut permettre d'abaisser davantage le taux de contrôle et le pourcentage du ruissellement qui est contrôlé. Un stockage sur les toits peut également être envisagé pour stocker temporairement l'eau; l'aménagement de toits verts peut en plus favoriser l'infiltration et réduire le ruissellement global. Pour mettre ces chiffres en perspective avec les augmentations associées au changement climatique, les taux unitaires d'augmentation qu'on peut déduire des tableaux déjà présentés (pour un stationnement) sont de 44 L/s/ha (période de retour de 2 ans) et de 90 L/s/ha (période de retour de 100 ans).

Pour des secteurs résidentiels, les contrôles peuvent se faire sur les lots privés ou sur le domaine public (les rues). Sur les lots privés, les mesures les plus intéressantes sont le débranchement des gouttières, l'ajout d'aménagement de sol absorbant et la réutilisation de l'eau de pluie. Sur les rues, un réaménagement comme ceux montrés aux figures 5.22 et 5.23 pourra permettre un certain niveau de contrôle pour les pluies plus fréquentes. Pour les secteurs avec des rues avec faibles pentes longitudinales, on pourra également utiliser les volumes

disponibles aux points bas, avec un contrôle aux puisards qui pourra limiter l'entrée d'eau vers le réseau. À titre d'exemple, les figures 5.28 et 5.29 illustrent les volumes qui sont disponibles à des points bas. Walesh (1999) a utilisé cette approche en augmentant même les volumes disponibles en surface par l'ajout de bermes sur le pavage, de façon à créer des bassins d'accumulation plus importants. Les figures 5.30 à 5.33 illustrent ces approches. Il faut toutefois, dans ce type d'application, faire des validations sur le terrain afin de s'assurer que des problèmes ne seront pas créés ou aggravés (entrées en contre-pente, terrains surbaissés, etc.).

Par ailleurs, des analyses effectuées en Colombie-Britannique (MWLAP, 2002) permettent d'apporter des éléments de réponse quant au niveau des bénéfices pouvant être associés à certains types de contrôle à la source sur les lots. Quatre types de contrôles ont été analysés :

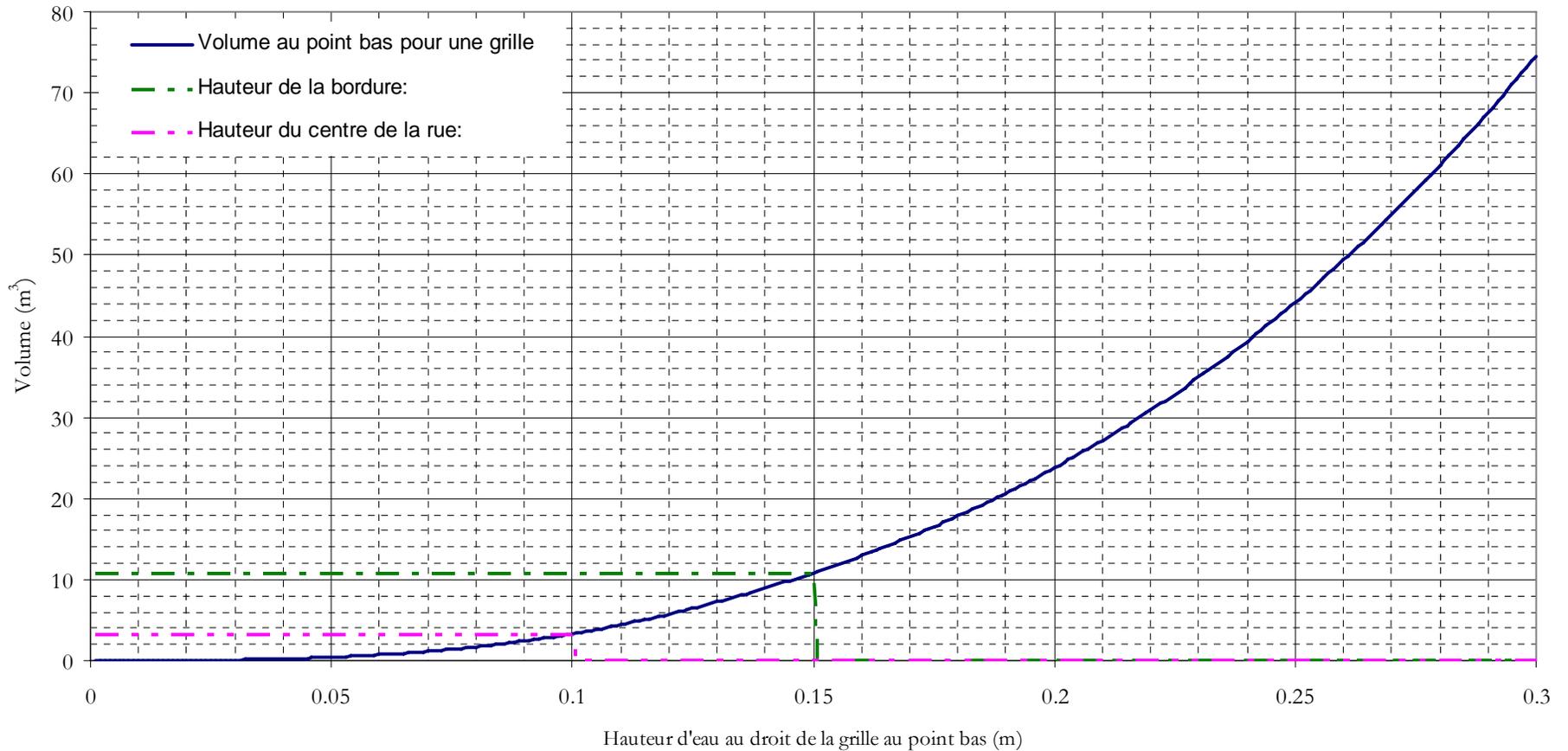
1. Aménagement avec un sol absorbant;
2. Infiltration (sur les lots et pour les rues);
3. Toits verts;
4. Réutilisation de l'eau de pluie.

Les résultats obtenus pour les types de contrôle 1 à 3 sont discutés plus en détails aux paragraphes qui suivent.

**Volume total au point bas avec 2 grilles -**

Rue Bishop avec 2 grilles (1 de chaque côté de la rue)

Largeur de la rue:	10	m	Devers:	0.02	m/m
Pente du terrain privé:	0.02	m/m	Pente longitudinale de la rue:	0.01	m/m

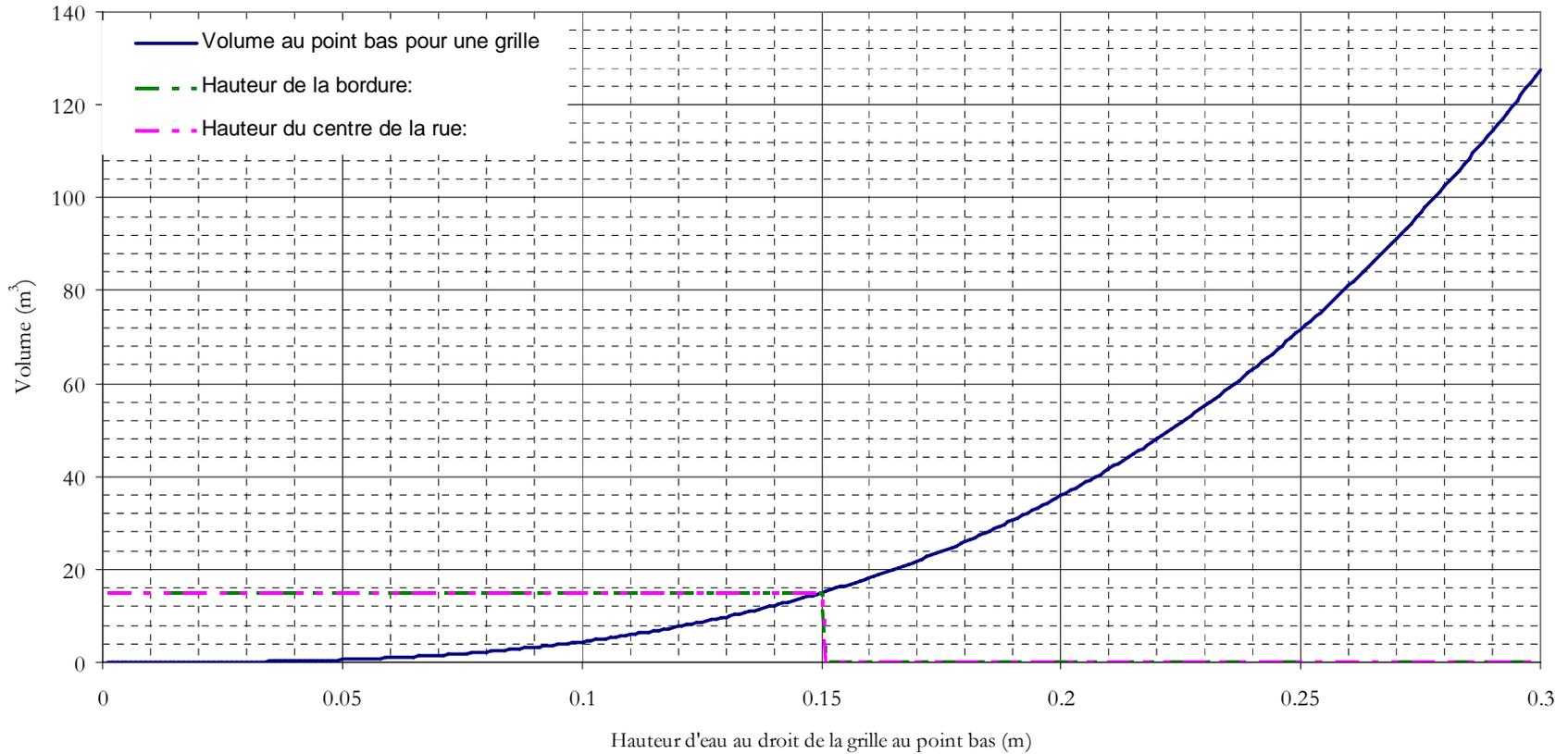


**Figure 5.28 Volumes disponibles à un point bas d'une rue résidentielle de 10 m de large, avec un devers latéral de 2 % et une pente longitudinale de 1 %.**

**Volume total au point bas avec 2 grilles -**

Rue Bishop avec 2 grilles (1 de chaque côté de la rue)

Largeur de la rue:	10	m	Devers:	0.03	m/m
Pente du terrain privé:	0.02	m/m	Pente longitudinale de la rue:	0.005	m/m



**Figure 5.29 Volumes disponibles à un point bas d'une rue résidentielle de 10 m de large, avec un devers latéral de 3 % et une pente longitudinale de 0,5 %.**

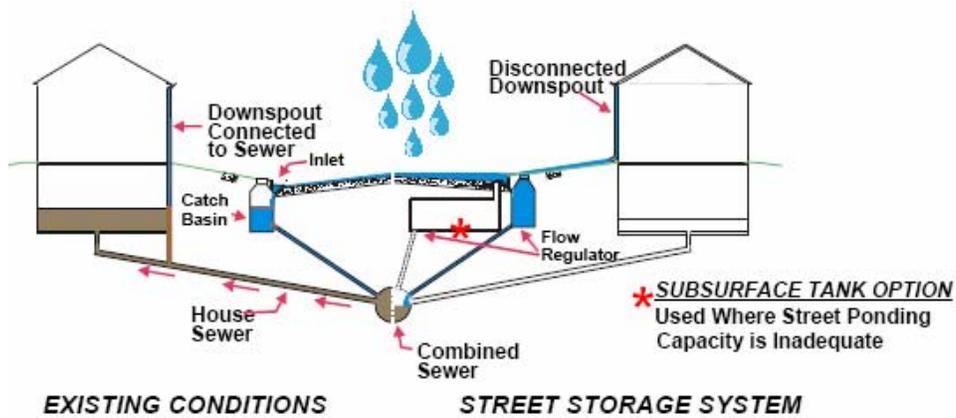
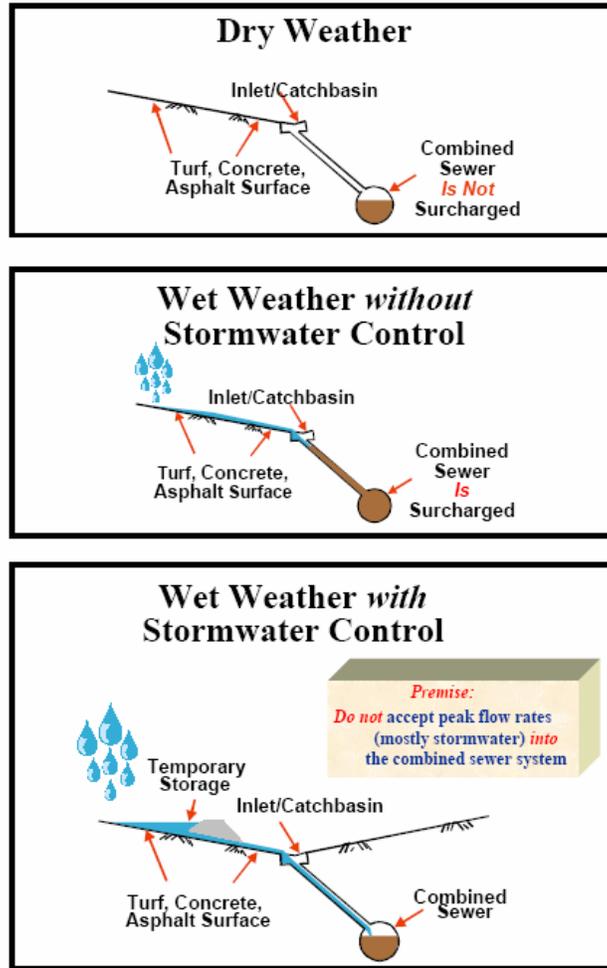


Figure 5.30 Concept général de rétention en surface des rues (tiré de Welsh, 1999).

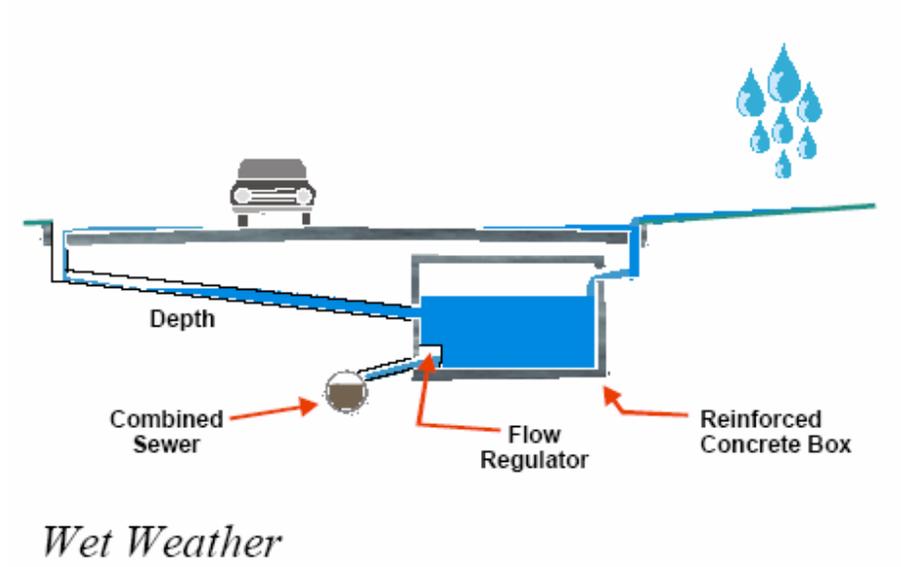


Figure 5.31 Stockage additionnel sous les rues avec des conduites surdimensionnées (tiré de Welsh, 1999).

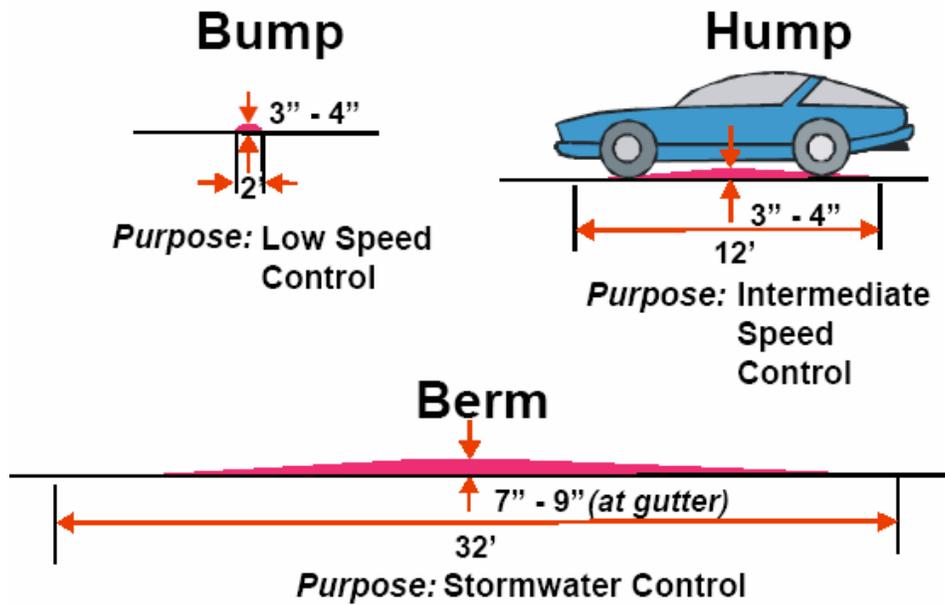


Figure 5.32 Berme pour augmenter la rétention en surface des rues (tiré de Welsh, 1999).

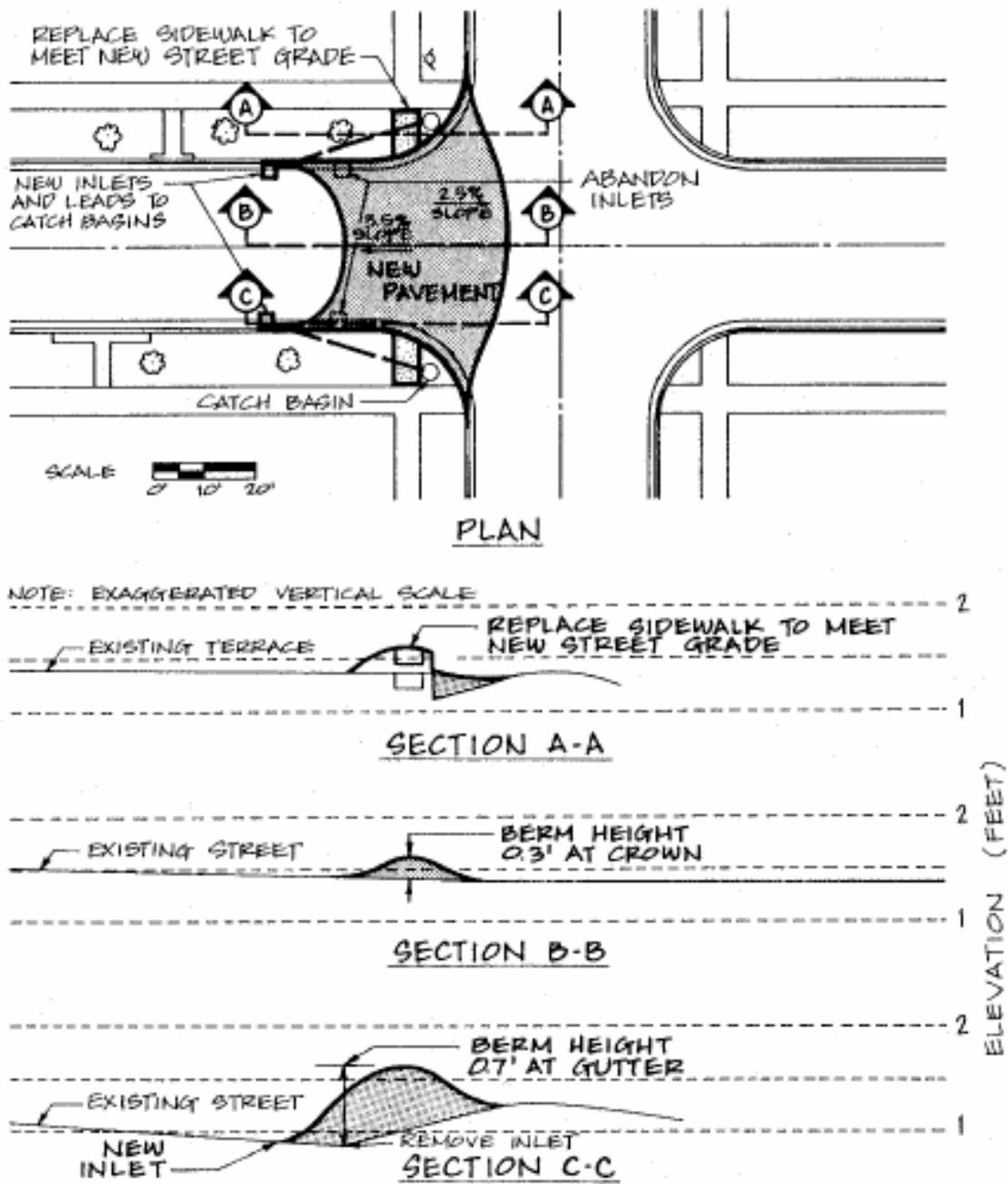


Figure 5.33 Exemple d'application avec stockage en surface des rues avec berme pour augmenter la rétention en surface (tiré de Welsh, 1999).

## 5.6.2.1.1 Aménagement avec sol absorbant

Ce type de contrôle part du principe qu'un aménagement avec de la végétation et de la matière organique permettra de favoriser et de maintenir les capacités d'infiltration et d'évaporation qui sont souvent observables pour des sols non remaniés. La figure 5.34 montre par exemple qu'une épaisseur de 300 mm de sol absorbant avec un aménagement réduirait de façon sensible le ruissellement provenant de ces surfaces. La figure 5.35 montre par ailleurs les débits et volumes de ruissellement en comparant les cas où un aménagement type avec du gazon est utilisé (« disturbed soil ») et un aménagement avec un sol absorbant de 300 mm d'épaisseur. On constate que l'effet sur les débits est relativement prononcé, en particulier pour les secteurs résidentiels à plus faible densité. Les résultats montrés sont tirés d'une simulation en continu pour l'année 1999, au cours de laquelle le plus important événement avait une période de retour de l'ordre de 5 ans. Durant un événement de cette ampleur, le sol remanié générera un ruissellement du même ordre de grandeur qu'une surface imperméable alors qu'un aménagement avec un sol absorbant pourra continuer d'absorber la pluie.

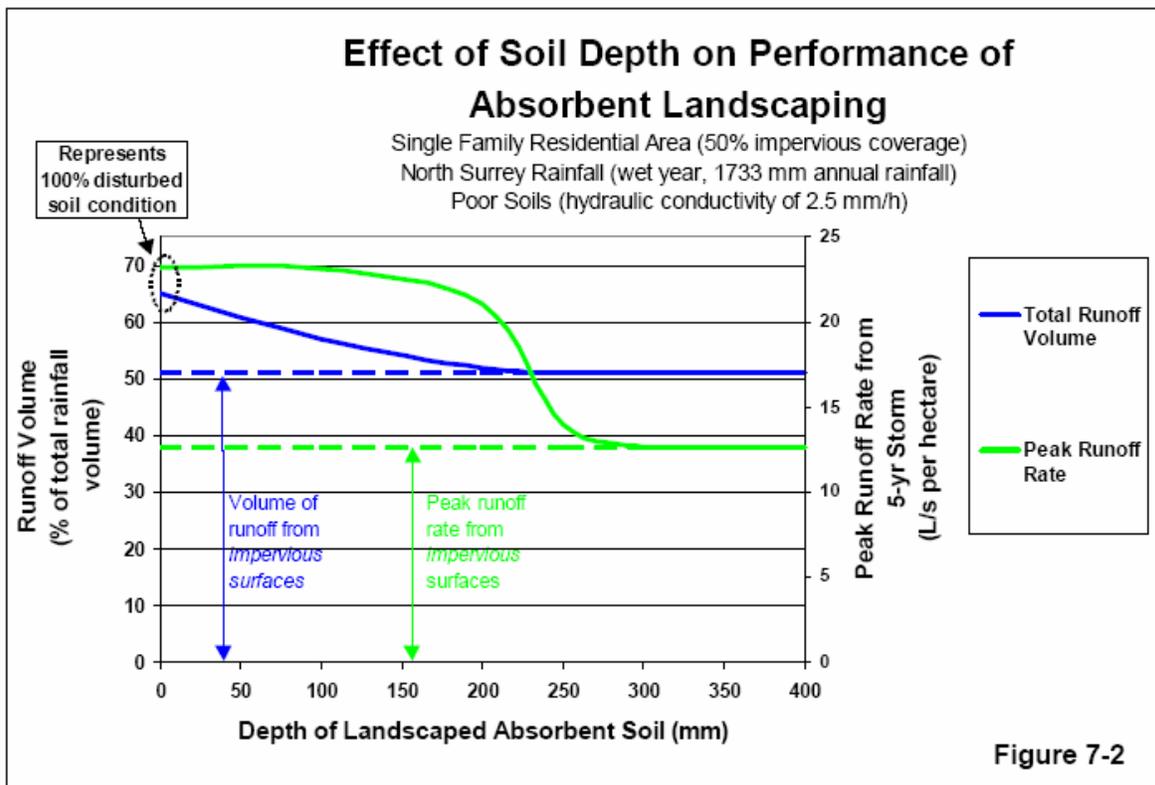
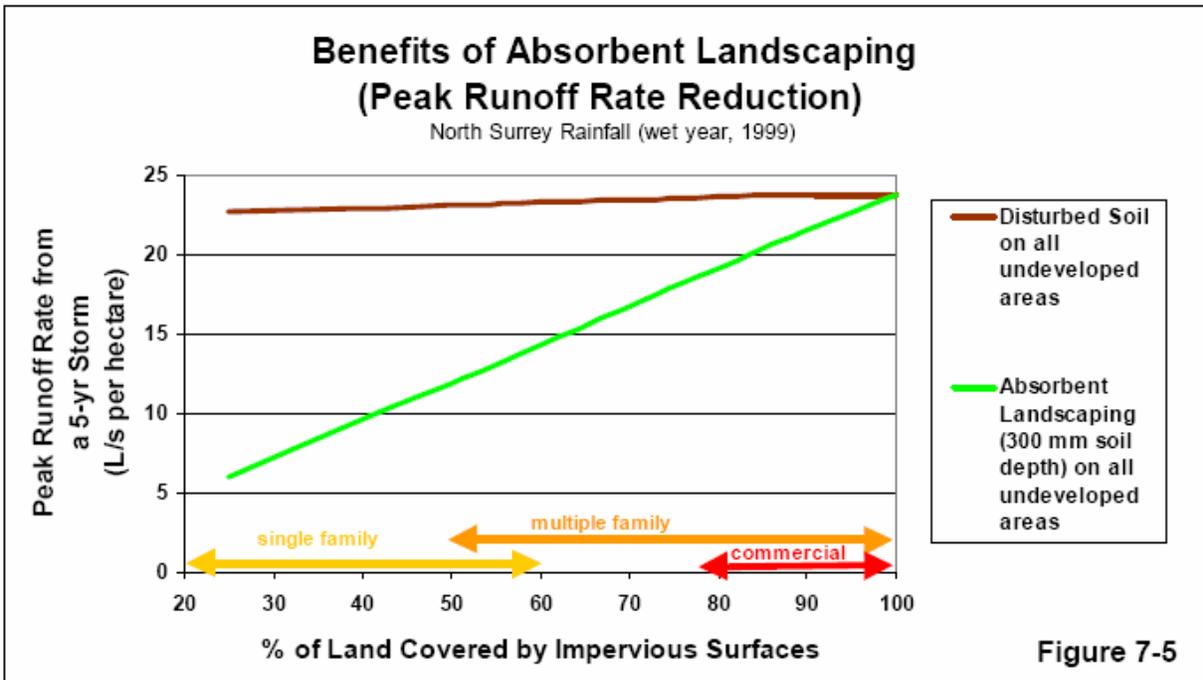
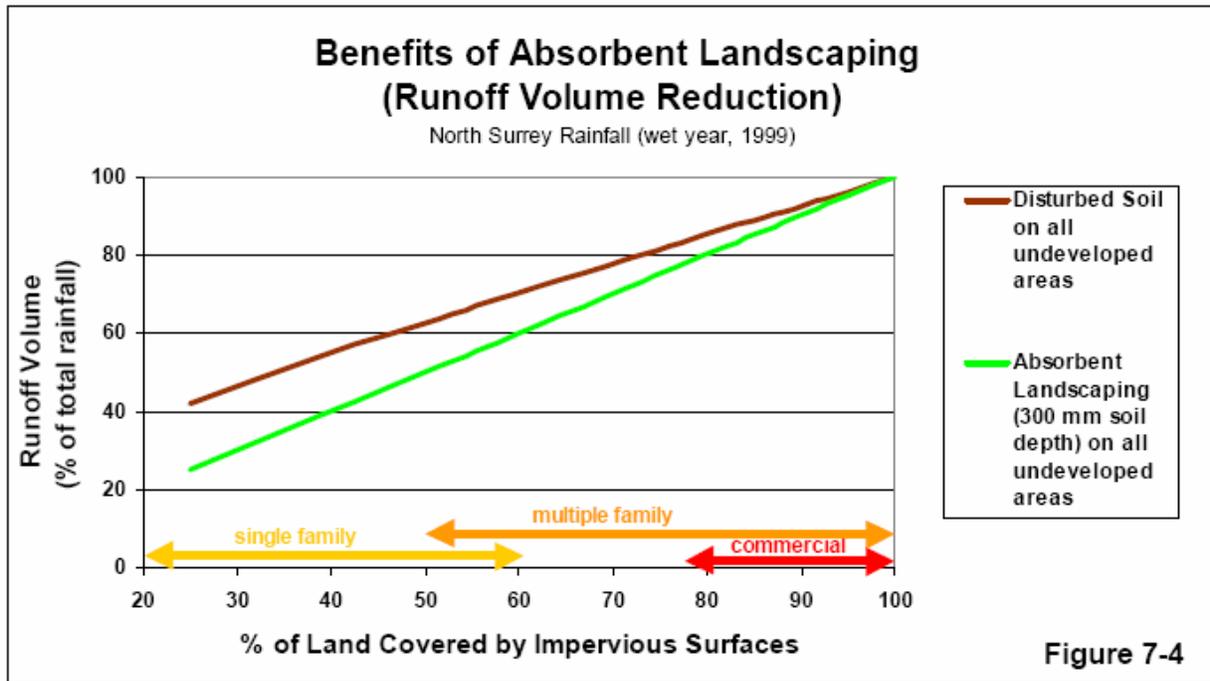


Figure 5.34 Effet de l'épaisseur du sol sur la performance d'un aménagement absorbant avec de la végétation (tiré de MWLAP, 2002).



**Figure 5.35** Bénéfices en matière de réduction de volume de ruissellement et de débit avec un couvert de végétation d'une épaisseur de 300 mm (tiré de MWLAP 2002).

#### 5.6.2.1.2 Infiltration

Le ruissellement direct des surfaces imperméables (toits, entrées d'auto et stationnements) peut être éliminé ou réduit en grande partie par infiltration des eaux de ruissellement. Pour les secteurs résidentiels avec des maisons unifamiliales, la figure 5.35 illustre les effets de l'infiltration sur les volumes et les débits. On constate que les bénéfices peuvent varier avec le type de surface et avec la dimension des surfaces disponibles pour l'infiltration. Le rejet des eaux provenant des gouttières sur un terrain remanié (avec gazon) ne permettra pas de gain important pour les événements rares et le rejet vers une zone avec sol absorbant et végétation (voir section précédente) sera sensiblement plus efficace.

Les différents facteurs qui peuvent influencer la performance des contrôles avec infiltration incluent l'utilisation du sol (plus difficile lorsque la part de terrain imperméable est plus importante), le type de sol, les caractéristiques de la pluie (la performance diminuant pour des pluies plus fortes et soutenues), la profondeur et le type de contrôle et la profondeur de la nappe phréatique.

À titre d'exemple, les graphiques de la figure 5.36 montrent l'influence du type de sol et de la surface allouée pour l'infiltration, dans le cas d'un lot avec maison unifamiliale. Ainsi, si 10 % de la surface du lot était utilisé pour l'infiltration et que les sols présentaient une bonne conductivité hydraulique (13 mm/h et plus), environ 10 % du volume de pluie reçu aurait ruisselé et le débit pour la pluie de période de retour 5 ans serait réduit d'environ 45 %. Toutefois, si on a des sols de moins bonne conductivité hydraulique (1 mm/h), les volumes ruisselés seraient de l'ordre de 35 % du volume de pluie tombé mais il n'y aurait pratiquement pas de réduction sur le débit de pointe de période de retour 5 ans.

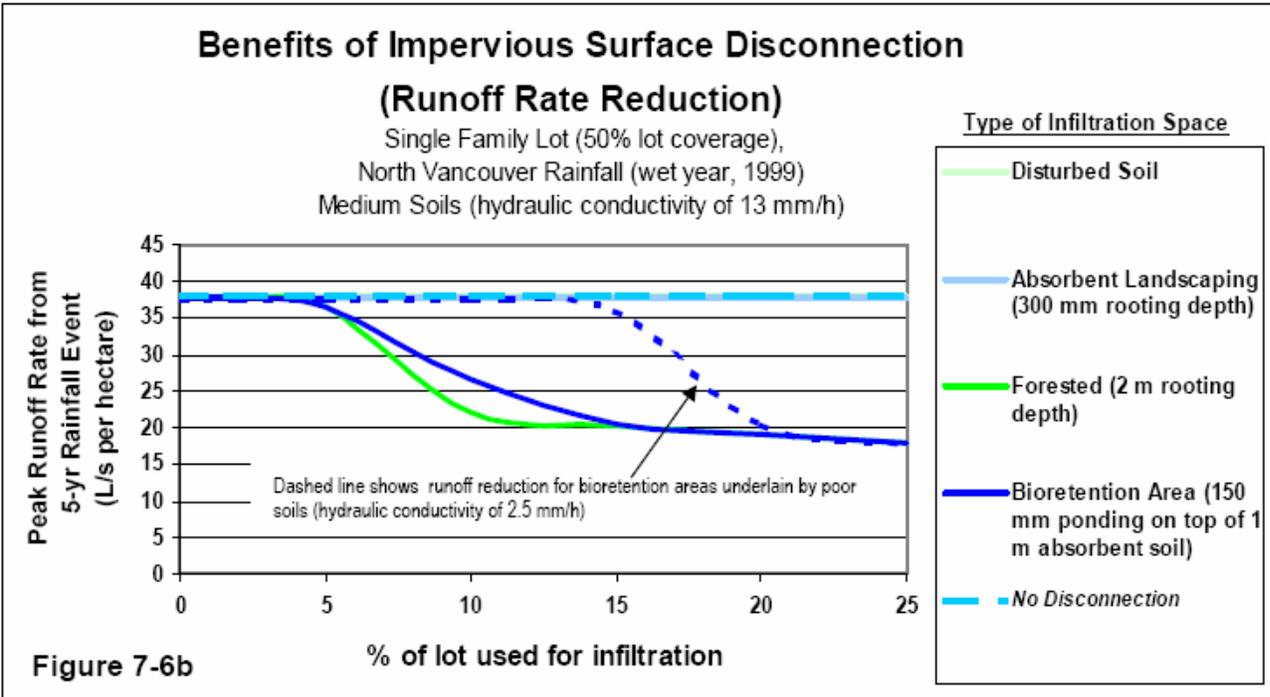
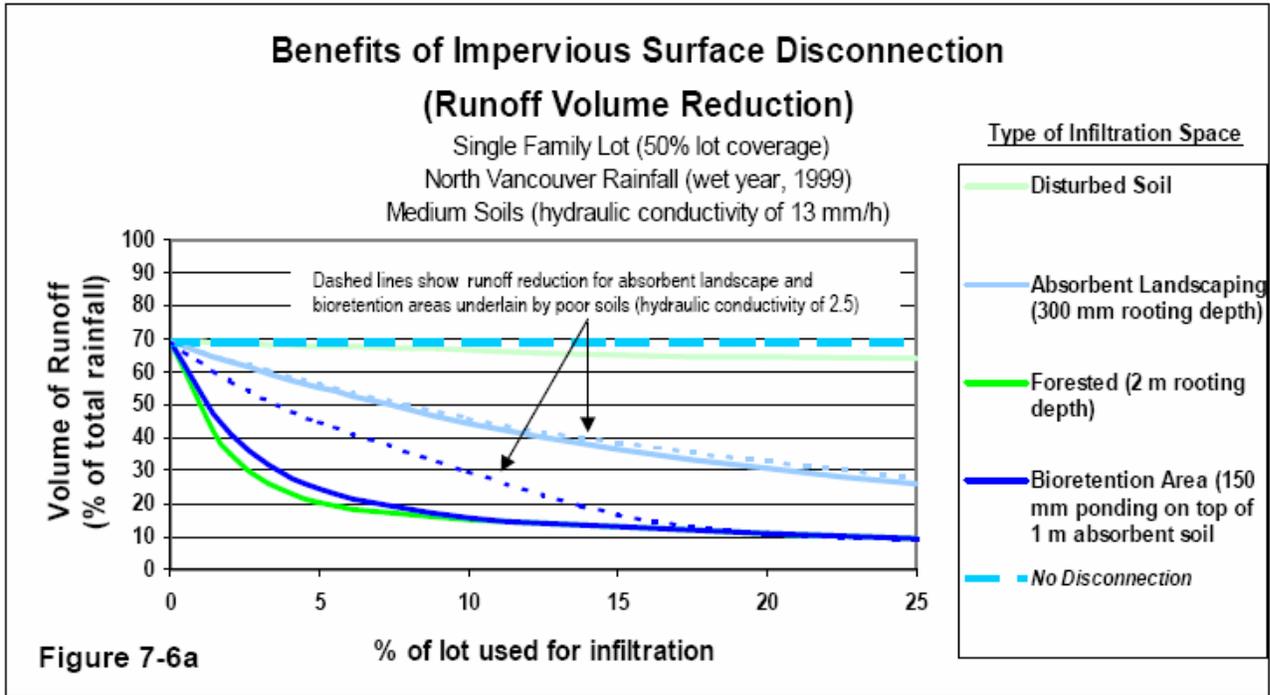
Pour ce type d'aménagement, la faisabilité dépend des contraintes physiques sur chaque lot (« *feasibility thresholds* ») et de la volonté d'assumer les coûts (« *affordability thresholds* ») (MWLAP, 2002). Les seuils associés aux coûts devraient être un reflet de la capacité ou la volonté de payer des communautés. Quant aux seuils associés à la faisabilité, ils doivent être un reflet des contraintes physiques locales liées à la mise en place des aménagements et dépendent fortement des conditions locales. Par exemple, les surfaces disponibles pour infiltration dépendront de la portion de la surface imperméabilisée. Il va sans dire qu'une certaine subjectivité est rattachée à l'évaluation des différents seuils.

La figure 5.37 illustre à titre d'exemple les seuils pour un lot avec une maison unifamiliale, avec un ordre de grandeur pour les estimations de coûts. Il est jugé peu réaliste de pouvoir utiliser

dans ce cas plus de 25 % de la surface totale du lot pour mettre en place des ouvrages pour de l'infiltration (seuil de faisabilité); par ailleurs, si on assume qu'un coût de 3 000 \$ constituerait un seuil pour la volonté de payer une somme additionnelle pour l'aménagement, on constate que ce coût permettrait l'aménagement de 5 à 25 % du terrain selon les conditions locales.

La figure 5.38 donne quant à elle les seuils pour un lot avec un pourcentage imperméable plus appréciable (secteur commercial, industriel ou multi-résidentiel). Dans ce dernier cas, on constate que les seuils pour la faisabilité sont plus bas que ceux pour les coûts et que ces derniers contrôlent donc l'aménagement qui pourra être fait. Les graphiques de la figure 5.38 indiquent que le pourcentage de pluie qui ruisselle peut varier de 10 % à 60 % dépendant du type de sol mais que les débits de période de retour 5 ans ne peuvent pas être réduits seulement avec des aménagements favorisant l'infiltration. On doit donc avoir recours dans ce cas à d'autres mesures.

Un dernier exemple, montré à la figure 5.39, illustre l'efficacité des mesures visant l'infiltration pour les rues. Les différentes courbes de cette figure indiquent, par exemple, que le ruissellement provenant de la rue peut être pratiquement éliminé en envoyant le ruissellement vers un fossé ou tranchée d'infiltration de 2 m de large (ou 2 fossés de 1 m). Règle générale, l'infiltration sur les routes est plus efficace que sur les lots parce que le rapport entre les surfaces imperméables et les surfaces disponibles pour l'infiltration tend à être plus bas dans le premier cas.



**Figure 5.36** Bénéfices obtenus suite à une réduction des surfaces imperméables (par exemple suite au débranchement des gouttières de toit) pour un lot résidentiel typique (tiré de MWLAP 2002).

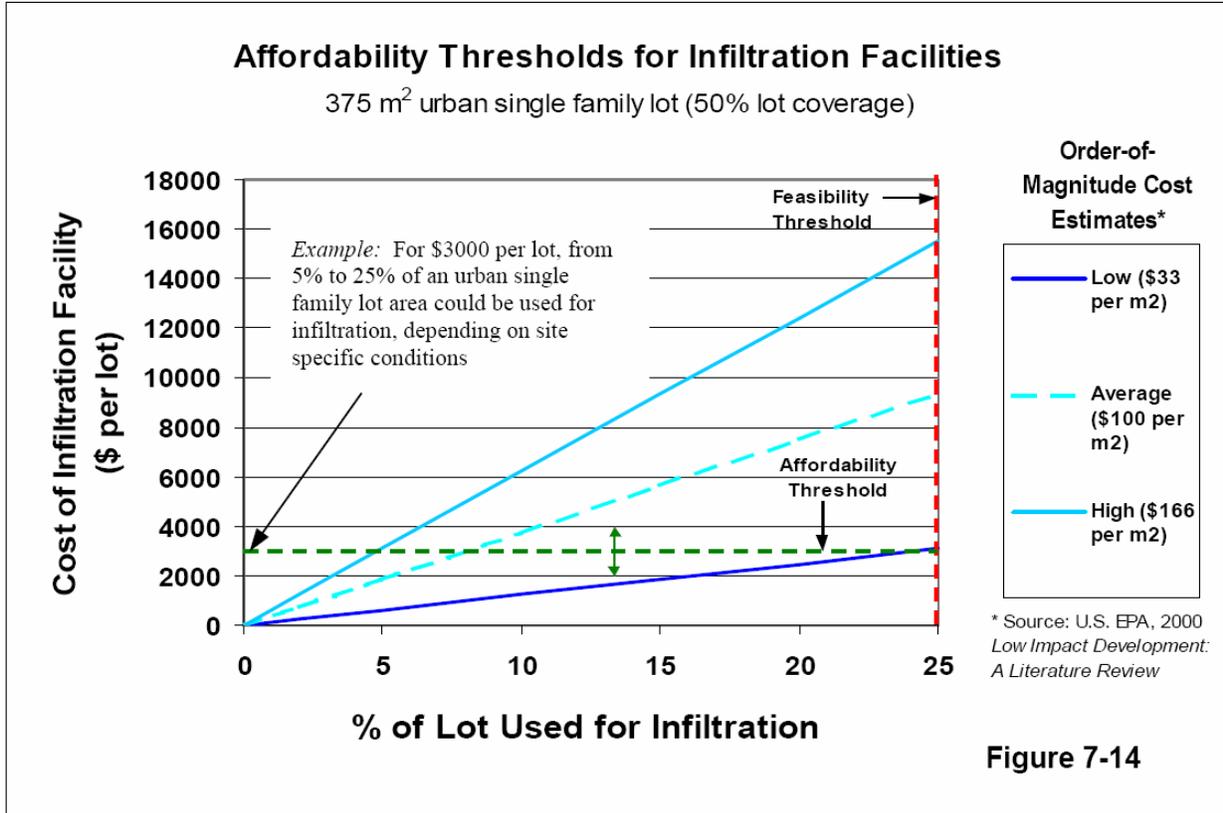


Figure 5.37 Seuils en matière de coût pour des contrôles par infiltration sur un lot résidentiel (tiré de MWLAP, 2002).

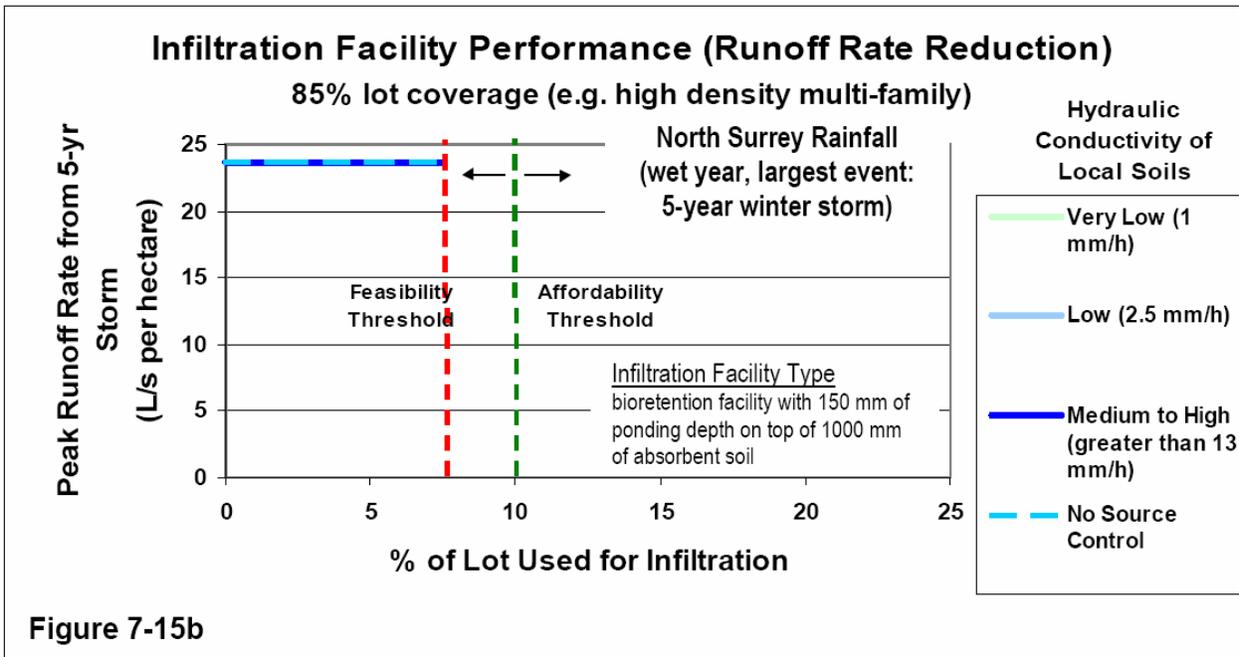
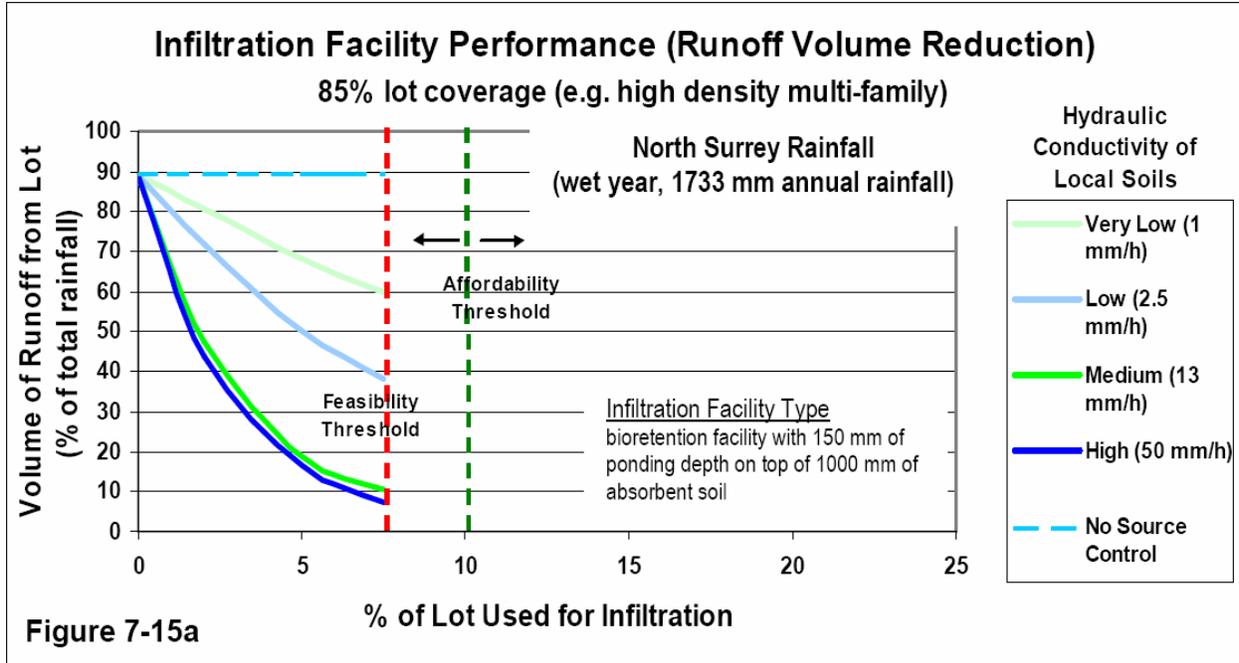
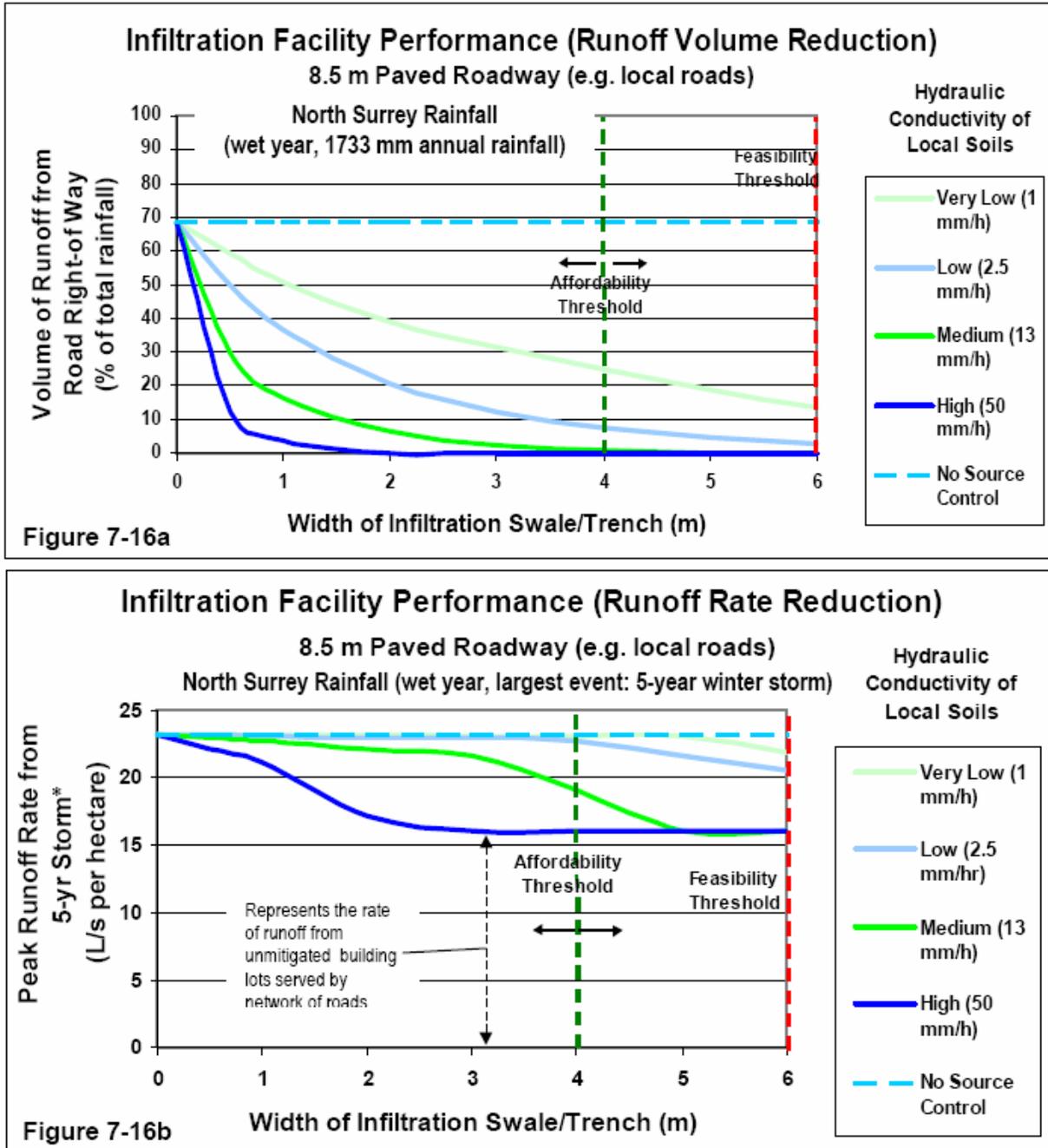


Figure 5.38 Seuils pour des contrôles par infiltration sur un lot commercial ou industriel (tiré de MWLAP, 2002).



\* refers to the rate of runoff from an entire development area (i.e. building lots and the roads serving these lots).

Figure 5.39 Bénéfices en matière de réduction de volume de ruissellement et de débit pour ouvrage d'infiltration dans une rue (tiré de MWLAP, 2002).

#### 5.6.2.1.3 Toits verts

Les toits verts sont de plus en plus utilisés en Amérique du Nord (ils sont plus communs en Europe) et ils peuvent contribuer de façon importante à la réduction des débits et volumes de ruissellement, en plus de fournir d'autres bénéfices reliés au chauffage et aux besoins en climatisation, à l'esthétisme et à la réduction des effets d'îlot de chaleur. Les toits verts sont plus intéressants pour des bâtiments commerciaux, industriels ou multi-résidentiels.

Les figures 5.40 et 5.41 illustrent respectivement l'influence de l'épaisseur du sol et des différents types d'occupation du sol sur les débits et volumes disponibles pour ruissellement. On constatera à la figure 5.40 qu'une épaisseur de 300 mm est idéale pour contrôler de longues pluies alors qu'une couche de 100 mm peut apporter une bonne réduction pour des averses courtes et intenses. La figure 5.42 illustre par ailleurs le fait que les toits verts sont plus intéressants pour des lots avec des toits de grandes dimensions.

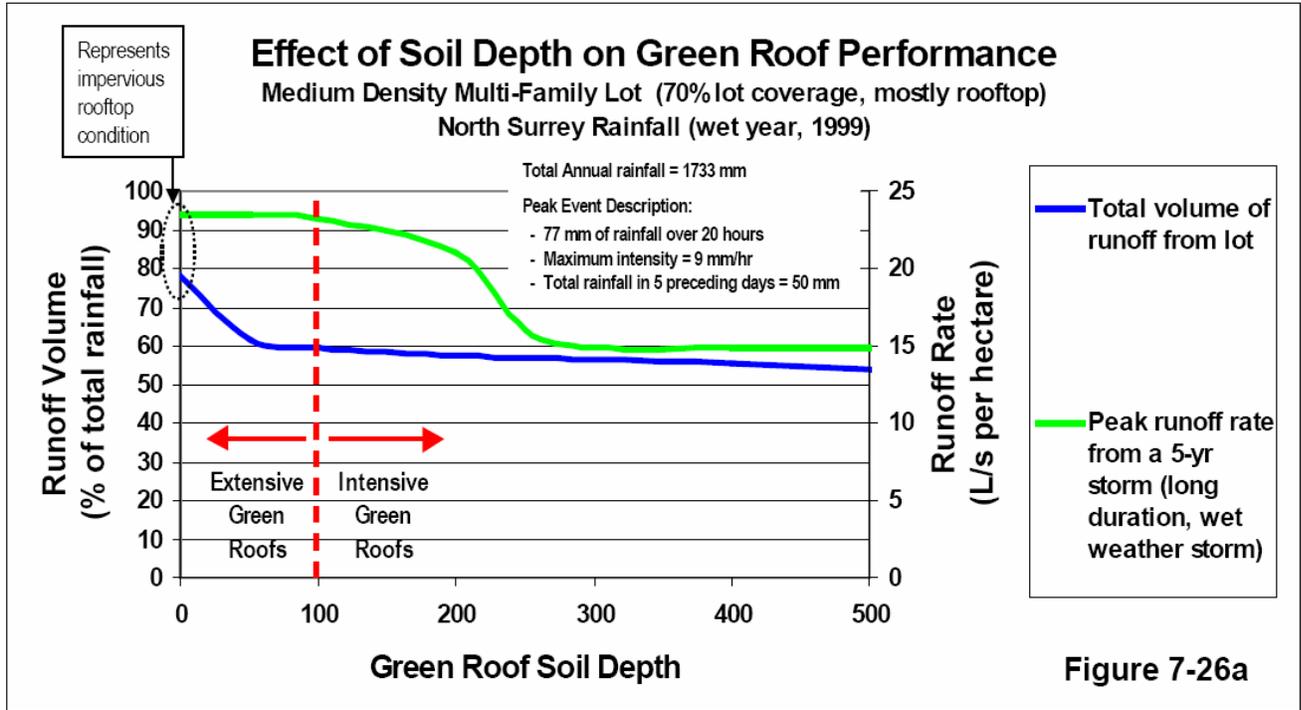


Figure 7-26a

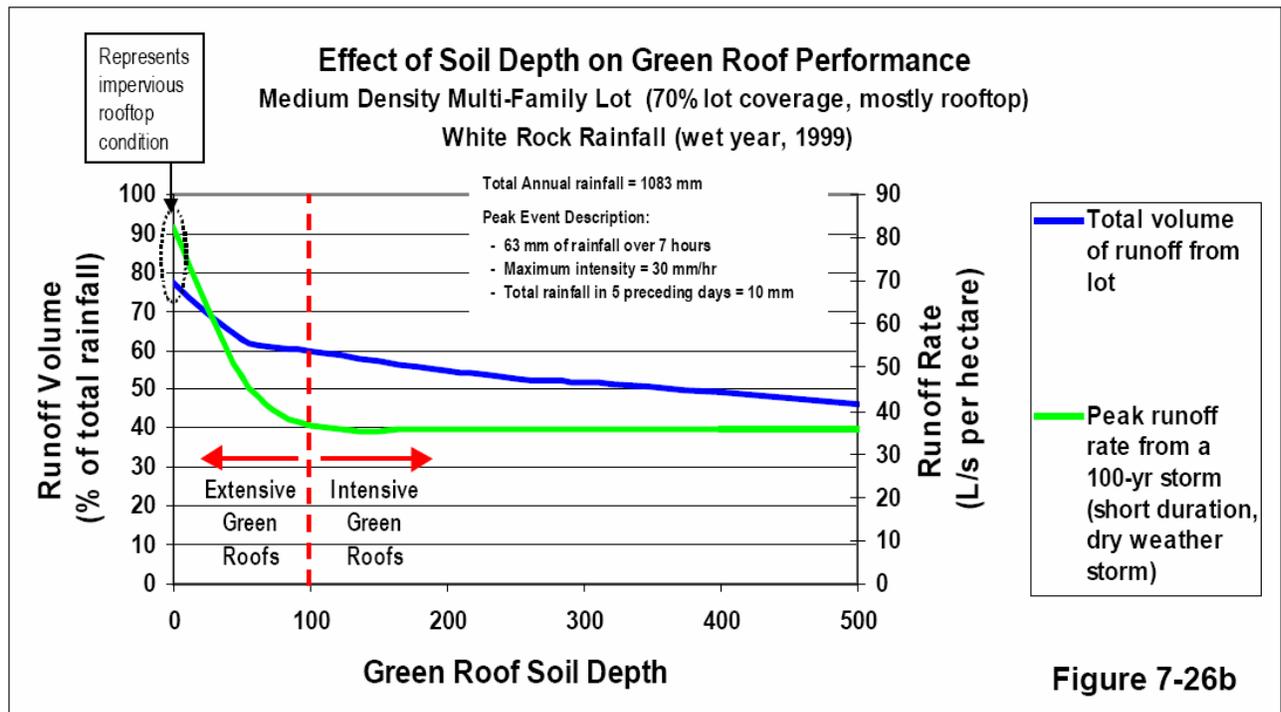


Figure 7-26b

Figure 5.40 Bénéfices pour un toit vert en fonction de l'épaisseur du sol (tiré de MWLAP 2002).

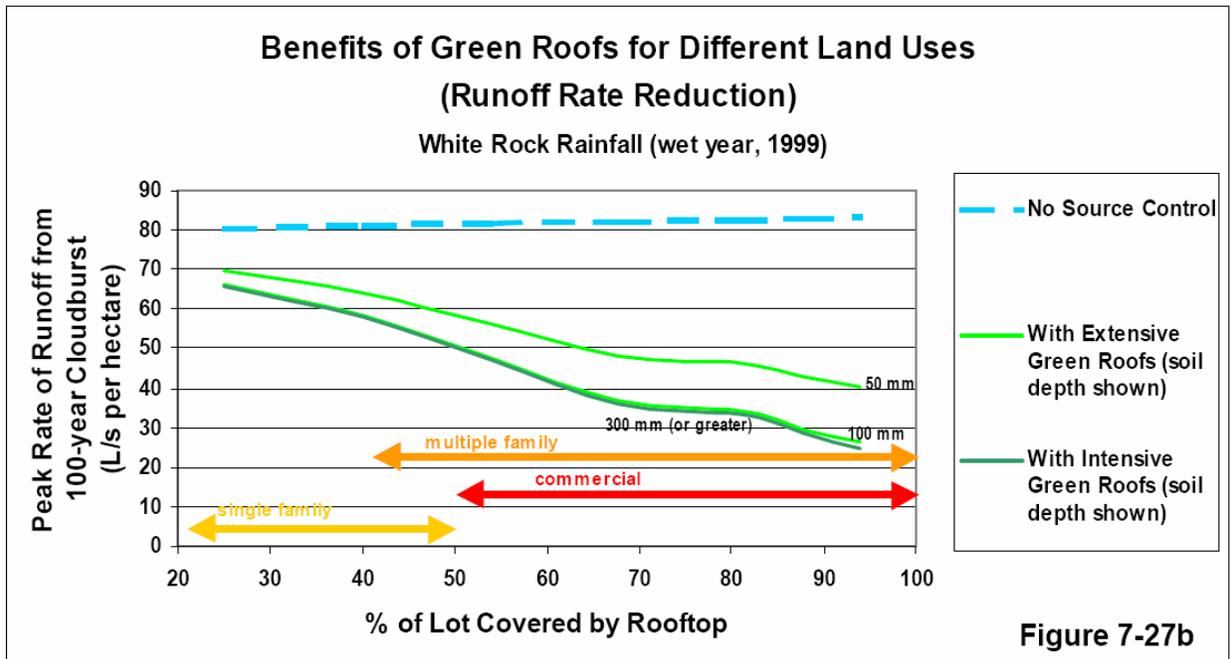
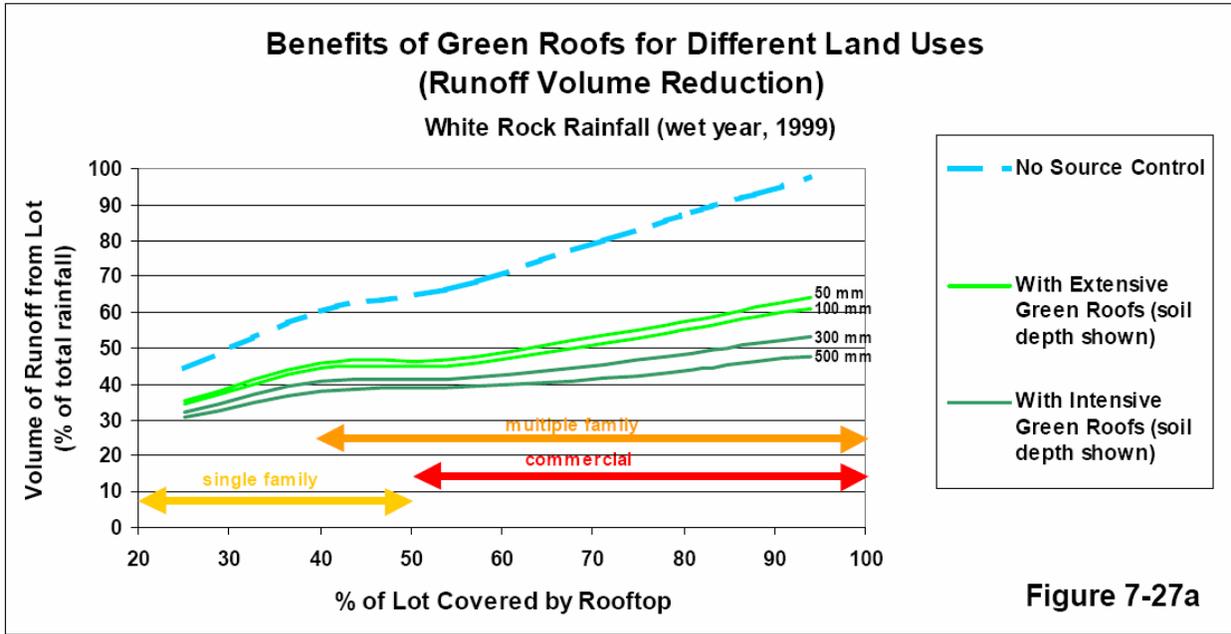


Figure 5.41 Bénéfices pour un toit vert en fonction de l'occupation du sol (tiré de MWLAP 2002).

#### 5.6.2.1.4 Effets combinés de plusieurs mesures de contrôle

La figure 5.42 présente un résumé des bénéfices potentiels pour un secteur d'habitations multifamiliales lorsque plusieurs mesures de contrôle sont combinées. Les résultats de simulation pour une pluie courte et intense ayant causé des dommages (période de retour de 100 ans; MWLAP (2002)) y sont présentés. Cinq différents scénarios ont été analysés :

1. Sans contrôle à la source;
2. Avec un sol absorbant (300 mm d'épaisseur);
3. Avec un sol absorbant (300 mm d'épaisseur) et de l'infiltration sur le lot couvrant 10 % de la surface totale;
4. Idem au scénario 2 mais avec des toits verts (300 m d'épaisseur de sol);
5. Idem au scénario 4 mais avec de l'infiltration pour les débits générés par la rue.

On constate en examinant les différents hydrogrammes qu'il serait effectivement possible de réduire de façon suffisante les débits et volumes de ruissellement pour compenser les augmentations anticipées à cause des changements climatiques puisque les pourcentages de réduction varient de 27 % pour le scénario 2 à 92 % pour le scénario 5. Évidemment, ces résultats dépendent du site et de telles analyses devraient être reprises sur des sites pilotes québécois afin d'en vérifier l'exactitude.

Une autre référence où les pourcentages de réduction associés à différentes mesures ont été évalués est le rapport de Watt *et al.* (2003). Une augmentation de 15 % avait été considérée pour la pluie dans cette étude et l'impact du débranchement des gouttières (toit en totalité ou seulement la partie arrière), d'une augmentation de l'emménagement en surface et de l'installation de restricteurs de débit a été analysé. Le tableau 5.6 résume les principaux résultats de cette étude dans laquelle on concluait que le débranchement de toits était la mesure la plus efficace en matière de rendement et de coûts. Par ailleurs, en comparant ces pourcentages de réduction aux pourcentages d'augmentation obtenus dans le cadre de la présente étude (augmentations pour une période de retour de 5 ans de 38 % pour le débit et de 36 % pour le volume), on constate que le débranchement de toits serait effectivement la mesure la plus intéressante. En pratique, toutefois, il est souvent difficile de débrancher l'ensemble des maisons et c'est pourquoi cette mesure doit être combinée à d'autres mesures. Le tableau 5.7 résume par ailleurs les coûts associés à chacune des mesures étudiées par Watt *et al.* (2003) pour la région de Toronto.

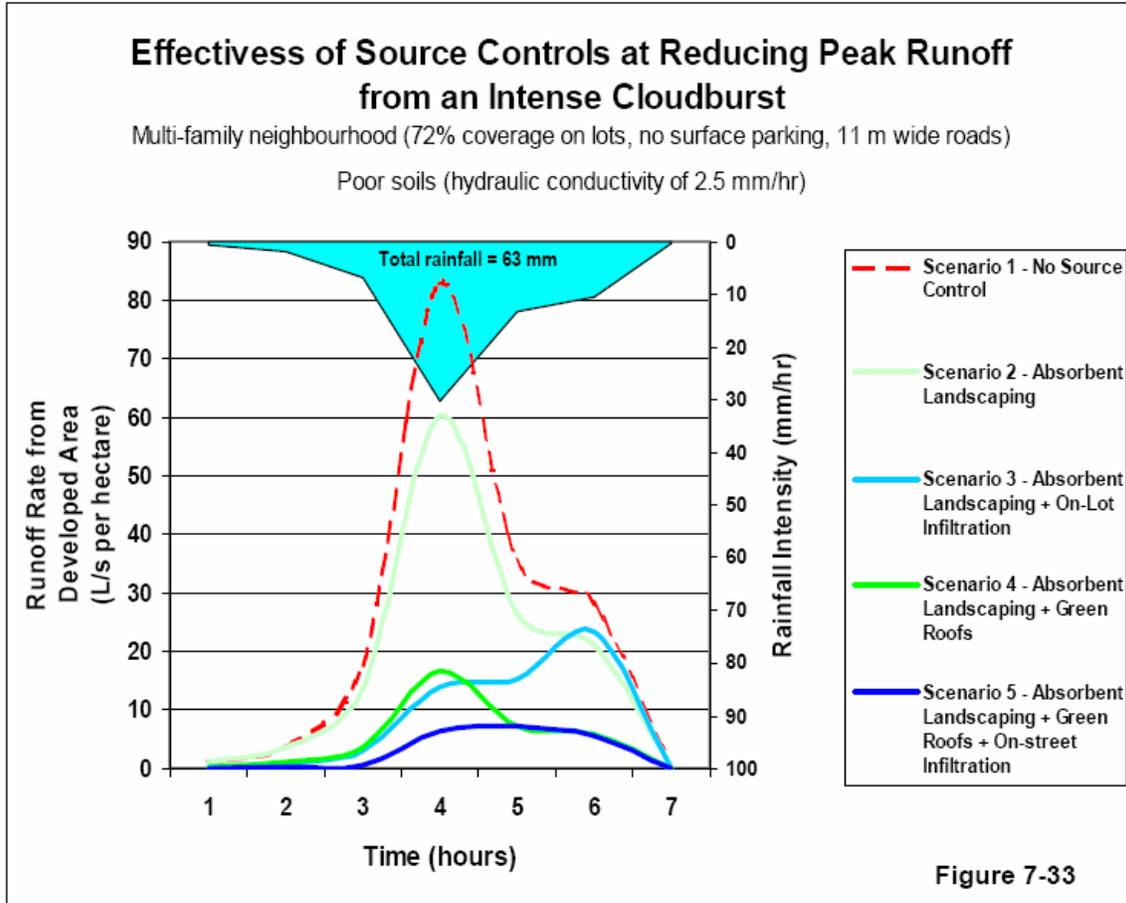


Figure 7-33

Figure 5.42 Bénéfices globaux en matière de réduction de débit avec différents contrôles (tiré de MWLAP 2002).

Tableau 5.6 Résultats de simulation pour le bassin Malvern pour différentes mesures de contrôle (tiré de Watt *et al.* 2003).

Case	Runoff Volume ( $10^3 \text{ m}^3$ ) <sup>1</sup>	Peak Discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) <sup>1</sup>	Time to Peak Discharge (min) <sup>1</sup>
Present Rainfall (24.5 mm)	1.9	1.5	22
Present Rainfall + 15% (28.2 mm)	2.3	1.7	22
Roof Disconnection (Full Roof)	1.4 (-39%)	1.0 (-39%)	22 (no change)
Roof Disconnection (Back Roof Only)	1.8 (-20%)	1.4 (-18%)	22 (no change)
Increased Surface Storage	1.8 (-19%)	1.5 (-14%)	22 (no change)
Install ICDs (orifice induced ponding)	2.3 (no change)	1.5 (-12.5%)	26 (+18%)

<sup>1</sup>percent change values relative to 'Present Rainfall+15% case

**Tableau 5.7 Coûts des différentes mesures de contrôle pour le bassin Malvern (tiré de Watt *et al.*, 2003).**

Option	Unit Procedure/Device	Unit Cost (\$)	Reference
Pipe Replacement	Materials only, per metre length	40-1100	Benedict-Centennial Concrete, Cotton (2001)-Westburne Supply
Downspout disconnect	Disconnect one-half or all of roof, per house	300-500	Georgopoulos (2001) - City of Toronto
Reduction in rate of stormwater input	Materials and installation, 1 ICD per catchbasin	75-500	Tait (2001)-City of Moncton, Lane (2001)-Maple Agencies, Elliott (2001)-IPEX
Increase Pond Size	Capacity of pond is increased	variable	
Re-route flow	Public property	variable	
Infiltration	Trenches, per m <sup>3</sup>	80-100	See Waters (2001)

## 5.7 En résumé

Essentiellement, on peut distinguer deux cas de figure pour l'application de différentes techniques permettant de compenser les effets rattachés au changement climatique : le cas de réseaux projetés et le cas de réseaux existants qu'on désire réhabiliter. Comme on l'a déjà souligné, la planification et la conception de réseaux projetés offrent plus de flexibilité puisque plusieurs des différentes mesures qui sont disponibles seront très souvent applicables. Il s'agit donc dans ce cas de considérer lors de la conception les augmentations qui sont prévues et de prévoir les infrastructures en conséquence. Soulignons encore une fois qu'on devrait porter une attention particulière aux contrôles à la source, qui sont peu utilisés dans la pratique actuelle de façon élargie mais qui offrent plusieurs avantages. Par exemple, Watt *et al.* (2003) ont examiné le cas d'un réseau projeté avec une augmentation de 15 % pour la pluie et on trouvé que l'augmentation des coûts pour les conduites était dans ce cas de l'ordre de 23 %. En considérant toutefois un contrôle à la source, cette augmentation de coûts pouvait être passablement diminuée. En modifiant simplement les types d'aménagement projetés pour favoriser une infiltration locale et un contrôle à la source sous plusieurs formes, on pourrait en arriver à compenser les impacts hydrologiques des changements climatiques sans avoir à augmenter les dimensions des réseaux projetés.

La réhabilitation pour des réseaux existants peut être d'un autre côté plus problématique puisqu'on doit ici composer avec une trame urbaine déjà en place, ce qui peut entraîner des

restrictions ou des limitations quant à l'application de certaines mesures. Les mesures pouvant être spécifiquement appliquées dans ce cas sont les suivantes :

1. Remplacement de conduites;
2. Débranchement des gouttières;
3. Redirection des écoulements vers des surfaces perméables, actuelles ou projetées, pour favoriser l'infiltration;
4. Bandes filtrantes et tranchées d'infiltration;
5. Utilisation et augmentation du stockage en surface;
6. Limitation des volumes acheminés au réseau (souvent utilisée avec la mesure 3);
7. Augmentation des volumes de rétention souterrains (conduites surdimensionnées en réseau ou hors réseau, bassins souterrains en réseau ou hors réseau).

Le remplacement de conduites ne devrait évidemment pas être considéré comme unique solution puisque cette mesure est coûteuse et qu'elle peut, dans certains cas, déplacer le problème vers l'aval. De plus, cette approche va globalement à l'encontre des nouvelles tendances qui ne privilégient plus un drainage rapide et efficace qui est souvent la cause de problèmes observés dans les milieux récepteurs.

Le débranchement de gouttières apparaît comme une mesure présentant un très bon rapport bénéfices/coûts et elle devrait donc être examinée en priorité. Puisqu'en pratique on ne pourra pas, pour diverses raisons, débrancher l'ensemble des toits dans un bassin versant, on devra toutefois combiner cette mesure avec d'autres approches.



## 6. Conclusion

---

Les principaux travaux réalisés dans le cadre du projet financé par le Fonds d'Action sur les Changements Climatiques (FACC) de Ressources naturelles Canada et portant sur la problématique de l'impact des changements climatiques (CC) sur le drainage urbain au Québec ont été présentés dans le présent rapport. Ce projet, amorcé en avril 2004, s'est officiellement terminé le 31 mars 2006. Les principales étapes du projet ont été les suivantes :

- 1) Analyser les événements historiques de pluies intenses à s'être abattues en milieu urbain sur le territoire sud du Québec;
- 2) Élaborer les courbes Intensité-Durée-Fréquence pour le sud du Québec en climat futur;
- 3) Estimer les changements à survenir pour les débits de pointe et les volumes de ruissellement en milieu urbain considérant les changements appréhendés pour les intensités et récurrences de pluie intense en climat futur;
- 4) Identifier les mesures d'adaptation à mettre en place afin de maintenir un niveau de vulnérabilité acceptable en matière de drainage urbain.

L'analyse des événements de pluies intenses en milieu urbain survenus au Québec au cours des récentes décennies avait pour principal objectif de déterminer, si possible, dans quelle mesure le caractère extrême des événements pluvieux expliquait l'ampleur des dommages. Plusieurs obstacles se sont toutefois dressés qui n'ont pas permis l'établissement d'une relation aussi nette entre dommages et caractéristiques de l'événement pluvieux, même si l'on peut soupçonner en toute logique qu'une telle relation puisse exister sous une forme ou une autre. Le principal obstacle est sans aucun doute la difficulté de colliger des informations et données sur les dommages causés par les inondations. Ces données sont en effet souvent confidentielles et les municipalités sont très réticentes à les communiquer de peur qu'elles soient utilisées par la suite dans d'autres recours. Plusieurs poursuites sont par ailleurs encore pendantes devant les tribunaux, et ce de nombreuses années après que l'inondation comme telle ait eu lieu. D'autre part, ces données sont parfois fragmentaires, et même disponibles elles ne rendent pas toujours un juste reflet des dommages. Par ailleurs, si l'estimation des dommages pose souvent problème, il en est de même de la caractérisation des événements de pluie qui ont engendré les inondations. Seules les données de quelques pluviomètres

disséminés sur le territoire, parfois même à l'extérieur du territoire comme tel où la pluie a frappé avec le plus d'intensité, sont disponibles. Ces données donnent une vision très tronquée de la réalité puisque les systèmes météorologiques en jeu sont souvent très localisés et les intensités de pluie très hétérogènes. Les données aux pluviomètres ne permettent évidemment pas, à moins de disposer d'un réseau très dense de pluviomètres, d'apprécier la dimension et de l'extension spatiale du système.

Les chroniques historiques des inondations en milieu urbain qui ont été colligées (ces données ne concernent que les événements les plus importants à être survenues dans la région montréalaise) ont permis toutefois de montrer que plusieurs événements de pluie majeurs se sont produits dans la grande région de Montréal au cours des années 1980-1990 contribuant au sentiment généralement répandu que les inondations en milieu urbain sont de plus en plus fréquentes. Les analyses des données de pluies ne permettent toutefois pas de montrer que les pluies plus intenses sont plus fréquentes, quoiqu'une telle tendance puisse exister mais demeure pour le moment indétectable. D'autres facteurs liés à l'évolution récente des réseaux eux-mêmes peuvent et doivent aussi être considérés afin d'expliquer les nombreuses inondations des années 1980-1990, que l'on pense à l'augmentation des surfaces imperméables et à l'extension des réseaux (étalement urbain) notamment. Autre élément à souligner est la baisse importante observée depuis 1996 des cas d'inondation dans la région de Montréal. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ceci outre le fait que possiblement moins de pluies très intenses aient frappé ce territoire. Parmi ceux-ci il ne faut pas négliger que plusieurs aménagements et corrections ont été apportés aux réseaux suite aux nombreuses situations problématiques survenues au cours des années antérieures. L'accès à des données plus complètes sur les dommages encourus, notamment sur les coûts totaux des réclamations, serait sans doute un atout majeur susceptible d'aider à mieux évaluer l'évolution des dommages à venir attribuables aux CC.

Un autre élément à considérer dans l'évolution récente des pratiques sociales urbaines concerne la vulnérabilité accrue des résidences advenant une inondation (voir Changnon *et al.* 2000 sur la question plus générale de l'augmentation de la vulnérabilité des sociétés face aux aléas climatiques). La richesse collective aidant, il est en effet monnaie courante dorénavant de « finir » les sous-sols des résidences, d'y installer bureau, ordinateur et équipements de toutes sortes. Cette pratique était beaucoup moins courante dans les années 60 et 70. Cette modification dans l'aménagement des résidences a pour conséquence une plus grande

vulnérabilité face aux inondations des sous-sols et une augmentation concourante des coûts des dommages et des réclamations.

La deuxième grande étape de cette étude a consisté en l'analyse des résultats de simulation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) afin d'établir l'ampleur des modifications appréhendées pour les extrêmes de précipitations pour le sud du Québec à l'horizon 2041-2070. Les courbes Intensité-Durée-Fréquence en climat futur ont pu être élaborées et comparées aux courbes en climat actuel. Les estimations statistiques pour les pluies intenses en climat actuel obtenues des simulations ont par ailleurs été comparées à celles issues des données observées. Cette comparaison, sans être une validation *stricto sensu* du modèle climatique, montre tout de même que ces deux ensembles de résultats sont cohérents considérant que le MRCC simule le climat d'un monde découpé en tuiles de 45 km x 45 km. Plusieurs outils statistiques (dont la régionalisation des précipitations) ont été utilisés et les intensités maximales pour la période mai à octobre pour les durées 2, 6, 12 et 24 h et les périodes de retour de 2, 5, 10 et 25 ans pour la région du sud du Québec ont pu être calculées.

Les estimations des intensités maximales en climat futur montrent que celles-ci augmenteront pour toutes les durées considérées, et ce autant à l'échelle des tuiles que des stations. Ces augmentations seront en moyenne de l'ordre de 8 à 18 % pour les tuiles, les augmentations les plus importantes survenant pour les événements de durées de 6 h. À l'échelle des stations, les accroissements seront de 7 à 23 % (selon la méthode ARF dépendant de l'intensité), les augmentations étant plus importantes pour les durées plus courtes. 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'instabilité et conséquemment à l'origine d'événements de pluies extrêmes plus intenses et plus fréquents.

L'estimation des conséquences que ces augmentations des intensités des événements de pluies intenses auront en matière de drainage urbain a été réalisée en considérant des profils de pluie types développés à partir de 199 pluies réelles enregistrées à l'aéroport de Dorval (d'autres ensembles de pluies pourront être utilisés pour générer des ensembles équivalents de pluies types pour d'autres régions du Québec). Un (et parfois plusieurs, selon la durée considérée) profil type a été associé à chacun des secteurs urbains types analysés. Deux secteurs types ont été analysés dans le cadre du présent travail, à savoir un secteur résidentiel (surface de 0,5 ha à 35 % imperméable) et un stationnement (surface de 0,5 ha à 100 % imperméable). Les profils types retenus pour un secteur donné correspondent à ceux qui

reproduisent le mieux les distributions des débits de pointe et les volumes simulés à partir des 199 pluies originelles. Ainsi, l'intensité associée à une durée et à une période de retour donnée est appliquée au profil type associé au secteur et à la variable sous étude (débit de pointe ou volume de ruissellement). Le débit (ou volume) simulé correspond alors au débit (ou volume) de période de retour égale à la période de retour de la pluie utilisée au départ.

Les débits et volumes en climat futur sont estimés en utilisant les intensités de pluie en climat futur. Suivant cette approche, l'on suppose que les intensités de pluie changeront en climat futur mais que, globalement, les profils de pluie resteront inchangés. Les simulations ainsi réalisées montrent que des augmentations substantielles des débits de pointe et des volumes de ruissellement sont à prévoir selon les bassins types envisagés. Pour les débits de pointe, ces augmentations varient, selon la période de retour considérée (de 2 à 100 ans), de 20 à 25 % pour le stationnement et de 24 à 38 % pour le secteur résidentiel. Pour les volumes, les augmentations correspondantes sont de 14 à 19 % pour les débits de pointe et de 21 à 49 % pour les volumes.

Ces accroissements substantiels montrent, s'il en est, l'importance de mettre en place diverses mesures d'adaptation susceptibles de ramener à un niveau acceptable le risque associé aux événements extrêmes en milieu urbain. Il est à craindre que, si rien n'est fait, les risques d'inondation en milieu urbain augmenteront au cours des années à venir, conséquence directe de l'incapacité des réseaux de drainage à absorber et évacuer adéquatement les eaux déversées sur leur territoire au passage de ces systèmes plus actifs. Tout indique que les pertes économiques de toutes sortes qui en résulteront seront importantes (voir Kunkel *et al.* 1999 pour une discussion de ce sujet). Et ceci sans compter les impacts sociaux importants (par exemple détresse psychologique des personnes sinistrées) et les problèmes de santé publique (par exemple, apparition de moisissure dans les résidences des sinistrés) qui s'ajouteraient aux pures pertes économiques. Les incidences économique, sociale et sur la santé publique des défaillances plus fréquentes des réseaux de drainage urbain suite aux CC n'ont pu être estimées dans le cadre de ce travail même si l'on peut escompter qu'elles seront significatives compte tenu de l'ampleur des changements appréhendés. Il va de soi que les inondations en milieu urbain ne sont pas le seul fait des événements de pluie eux-mêmes et que plusieurs autres facteurs peuvent contribuer à accroître la fréquence des inondations en milieu urbain. Ainsi, comme mentionné précédemment, l'étalement urbain, l'augmentation des surfaces imperméables et un entretien déficient des réseaux peuvent contribuer à une éventuelle augmentation de la fréquence des inondations en milieu urbain. L'examen sommaire

des épisodes passés d'inondations en milieu urbain montre à quel point il peut être difficile d'identifier les ou la cause des problèmes même si, dans plusieurs cas, l'ampleur de l'événement météorologique lui-même suffit à expliquer les dommages encourus. Toutefois, malgré ce caractère multidimensionnel des causes possibles aux inondations en milieu urbain, il appert que l'ampleur des changements escomptés en matière de récurrence de pluies de forte intensité aura une incidence très significative sur la fréquence et la récurrence d'inondations en milieu urbain. Les conséquences très dommageables à plusieurs égards, tant économiquement, socialement qu'en matière de santé publique, de tels épisodes sont telles qu'il est impératif que nos sociétés mettent en place diverses mesures susceptibles d'atténuer les effets négatifs des CC et de maintenir à un niveau acceptable le risque associé à l'apparition de tels événements.

Plusieurs mesures d'adaptation ont été proposées dans le cadre de ce travail. Les considérations relatives à ces mesures d'adaptation, qui semblaient aux auteurs les plus prometteuses, sont restées générales puisque leurs conditions d'implantation dépendent d'une foule de particularités locales impossibles à appréhender dans le cadre d'une étude comme celle-ci. Ces mesures d'adaptation existent et, comme nous le mentionnions plus tôt, ont fait l'objet d'études et d'essais pilotes. Leur transposition au sein des municipalités du Québec ne peut se faire sans que ne soit entreprise une analyse plus exhaustive permettant d'en estimer la faisabilité technique et la performance. En effet, les diverses régions du Québec présentent plusieurs particularités tant au niveau du climat, de la conception des réseaux, de la topographie, de l'occupation du territoire, particularités qui rendent essentiel ce travail. L'analyse des coûts de mise en place doit aussi être effectuée.

De l'avis des auteurs, cette problématique des CC doit être l'occasion de revoir et d'uniformiser les façons de faire en matière de drainage urbain. Ce constat vaut particulièrement pour le Québec qui souffre à plusieurs égards d'un retard certain et où les questions relatives au drainage urbain ont été reléguées à l'arrière scène depuis de nombreuses années. Il suffit pour s'en convaincre de regarder les autres provinces canadiennes où plusieurs initiatives très intéressantes ont vu le jour (le chapitre 5 rend compte de plusieurs de celles-ci). La reprise de ce retard ne doit pas se faire uniquement sur les volets techniques mais aussi s'accompagner d'une prise de conscience des enjeux majeurs que sous-tend toute la question du drainage urbain au Québec.

Les auteurs du présent rapport espèrent que les données et résultats techniques issus de ce projet convaincront les autorités de l'urgence d'examiner cette question et de mettre en place les structures susceptibles d'appuyer les actions à venir. L'adaptation aux CC en matière de

drainage urbain au Québec pourrait s'effectuer, dans un premier temps, par la 1) mise sur place d'un comité d'experts à l'initiative du gouvernement québécois (avec pour mandat entre autres de revoir la directive 004) et 2) l'instauration de plusieurs sites pilotes visant à analyser techniquement l'efficacité de diverses mesures d'adaptation (par exemple mesures de contrôle à la source).

Le comité d'experts pourrait être formé d'ingénieurs conseils, de représentants municipaux et de chercheurs universitaires, le tout chapeauté par des représentants des ministères du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et des Affaires municipales et des Régions. Plusieurs intervenants des secteurs municipaux, du génie conseil et des ministères gouvernementaux sont conscients des lacunes actuelles en matière de drainage urbain au Québec (conception et approches). Ces intervenants souhaitent ardemment qu'un travail de mise à jour soit réalisé. La mise en place d'un tel comité pourrait être la bougie d'allumage que plusieurs attendent depuis longtemps et qui permettrait au Québec d'enclencher une dynamique à grande échelle lui permettant, à terme, de se doter des outils et de l'expertise essentiels pour faire face aux aléas climatiques et aux risques accrus que ceux-ci font peser en matière de drainage urbain. Ce comité aurait pour tâches, entre autres, de :

1. Engager un processus de révision de la directive 004;
2. Coordonner et faire le suivi technique des essais pilotes;
3. Sensibiliser les autorités municipales aux enjeux des CC en matière de drainage;
4. Assurer la diffusion des résultats et, le cas échéant, faire la promotion des mesures d'adaptation les plus adéquates.

Les essais pilotes à mettre en place devraient servir à documenter divers éléments techniques à considérer pour l'implantation de diverses mesures d'adaptation. Un programme pourrait être mis en place visant à encourager les municipalités à participer et devrait s'étendre aux moyennes et petites municipalités. La diffusion et la mise en commun des connaissances et de l'expertise ainsi acquises seraient assurées par ce comité et les ministères québécois.

Il va sans dire que, parallèlement à ce travail visant la sensibilisation, la diffusion des connaissances et la promotion de nouvelles façons de faire mieux à même de contrer les effets néfastes des CC, le travail à caractère plus scientifique doit se poursuivre afin d'en arriver à

mieux comprendre la portée et la nature des CC à venir et à mieux évaluer leur conséquence en matière de drainage urbain. Parmi les travaux futurs à envisager, soulignons les suivants :

1. **Prise en compte des résultats de plusieurs simulations climatiques** : Plusieurs combinaisons de modèle climatique, domaine de simulation, conditions aux frontières, scénarios de gaz à effet de serre sont possibles, fournissant chacune une réalisation possible du climat futur. L'intégration de ces différents résultats permettrait d'avoir une meilleure évaluation des incertitudes inhérentes aux projections climatiques;
2. **Réduction de l'échelle spatiale de simulation des MRC** : Les résultats utilisés dans le cadre du présent projet utilisent une représentation spatiale où le domaine est divisé en tuiles de 45 km x 45 km. Des simulations sur un domaine avec des tuiles de 10 km x 10 km devraient être disponibles d'ici un an ou deux. L'analyse des résultats de ces simulations suivant la méthodologie utilisée dans le présent rapport devrait permettre de préciser l'ampleur des changements pour les durées inférieures à 2 h;
3. **Élaboration de profils types de pluie pour d'autres régions** : Seules les pluies de Dorval ont été analysées dans le cadre du présent projet. L'analyse des séries de pluie en d'autres régions du Québec est à souhaiter mais il faut voir qu'un travail très important peut être nécessaire puisque les 199 pluies de Dorval disponibles étaient discrétisées à un pas de temps de 5 minutes;
4. **Simulations fines de divers aménagements en secteurs urbains** : Parallèlement aux essais pilotes qui pourraient avoir lieu sur le terrain, un travail de documentation et de simulation pourrait être entrepris afin de mieux comprendre les facteurs à considérer pour la mise en place et ceux qui déterminent l'efficacité des aménagements;
5. **Analyse et caractérisation de l'étendue spatiale des événements de pluie** : À l'heure actuelle, il est très difficile de caractériser l'extension spatiale des événements de pluie qui ont frappé ou qui sont susceptibles de frapper un territoire urbain. Cet état de fait s'explique en partie par la nature des instruments de mesures utilisés pour mesurer les intensités de pluie (pluviomètres mesurant en un point). Il n'est pas rare dans un tel contexte qu'un événement « échappe » aux pluviomètres disséminés sur un territoire et produise des dommages beaucoup plus importants que la seule donnée des enregistrements aux différents pluviomètres laissait entrevoir. Dans un tel contexte, il y a lieu de se demander s'il ne serait pas possible d'intégrer la dimension spatiale à l'analyse en utilisant par exemple les données de radar de plus en plus disponibles;

**6. Analyse des tendances historiques concernant les pluies hivernales et projection en climat futur :** Parmi les types d'événements météorologiques susceptibles d'avoir des impacts en milieu urbain et qui, selon toute vraisemblance, seront plus fréquents en climat futur, il y a lieu de mentionner les pluies hivernales. Des travaux à cet effet ont été entrepris depuis peu visant, dans un premier temps, à analyser les tendances historiques de ce type d'événement puisqu'il y a lieu de penser que le « signal » de changement climatique pourrait être assez fort et donc « détectable » à partir des données actuellement disponibles. Dans un deuxième temps, les résultats de simulation des modèles climatiques pourraient être analysés afin d'estimer l'ampleur des changements à venir. Des mesures d'adaptation devront être proposées advenant une augmentation marquée des probabilités d'occurrence de ce type d'événement.

## 7. Références bibliographiques

---

- Adams B.J. et F. Papa (2000). Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models. John Wiley and Sons, New York.
- Allen R.J. et A.T. DeGaetano (2002). Re-evaluation of extreme rainfall areal reduction factors. In: 13<sup>th</sup> Conf. *Applied Meteorology*, American Meteorological Society, May 13-14, 2002, Oregon.
- ASCE/WEF (1998). Urban Runoff Quality Management, WEF Manual of Practice No. 23, ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 87, Alexandria et Reston, (Virginie) É.-U.
- Bergeron L., Vigeant G. et J. Lacroix (1997). Chapitre québécois de l'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Tome V. Environnement Canada, 269 p.
- Bonnin, G.M., D. Martin, B. Lin, T. Parzybok, M. Yekta et D. Riley (2004). NOAA Atlas 14 – Precipitation – Frequency Atlas of the United States, Volume 2. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service, Silver Spring, Maryland.
- Changnon S. A., Pielke R. A., Changnon D., Sylves R. T. et R. Pulwarty (2000). Human factors explain the increased losses from weather and climate extremes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81(3), 437-442.
- CNRC (2004a). Mesures de contrôles des eaux pluviales au niveau de l'adduction ou à la sortie de l'émissaire. Guide national pour des infrastructures municipales durable, Ottawa, Canada
- CNRC (2004b). Planification de la gestion des eaux pluviales. Guide national pour des infrastructures municipales durable, Ottawa, Canada.
- CNRC (2003). Contrôle à la source et sur le terrain pour les réseaux de drainage municipaux. Guide national pour des infrastructures municipales durable, Ottawa, Canada.
- Coles S. (2001). An Introduction to statistical modeling of extreme values, Springer Series in Statistics, 208 p.
- Easterling D.R., Evans J.L., Groisman P. Ya., Karl T.R., Kunkel K.E. et P. Ambenje (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 81(3): 417-425.
- Ekström M., Fowler H.J., Kilsby C.G. et P.D. Jones (2005). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. *J. Hydrol.* 300: 234-251.
- Engineers Australia (2006). Australian Runoff Quality – A guide to Water Sensitive Urban Design, Melbourne, Australie.
- Environnement Canada (1998). Caractérisation des pluies du 7 au 10 novembre 1996 sur le sud du Québec. Rapport rédigé par la Direction des services scientifiques du Programme

de l'environnement atmosphériques, services climatologiques, Environnement Canada – Région du Québec, Montréal.

- Fowler H.J., Ekström M., Kilsby C.G. et P.D. Jones (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. et C.G. Kilsby (2003). A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *Int. J. Climatol.* 23: 1313-1334, 2003.
- Groleau, A., A. Mailhot et G. Talbot (2006). Trend Analysis of Winter Rainfall over Southern Quebec (Canada). Soumis à *Atmosphere-Ocean*, septembre 2006.
- Hegerl G.C., Zwiers F.W., Stott P.A. et V.V. Kharin (2004). Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *J. Climate*, 17, 3683-3700.
- Hogg, W.D. (1982). Distribution of rainfall in time: design consideration. In: Chapman Conf. on Rainfall Rates, American Geophysical Union, Urbana, Illinois, USA.
- Hogg, W.D. (1980). Time distribution of short duration storm rainfall in Canada. In: Proc. Canadian Symposium of Hydrology, Toronto, Ontario.
- Horner R.R., Skupien J.J., Livingston E.H. et E.H. Shaver (1994). Fundamentals of Urban Runoff Management: Technical and Institutional Issue, Terrene Institute et U.S. Environmental Protection Agency, Washington (D.C.).
- Hosking J.R.M. et J.R. Wallis (1997). Regional Frequency Analysis: An approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- Hosking J.R.M. (1994). The four-parameter kappa distribution. *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 38 (3), 251-258.
- Hosking J.R.M., Wallis J.R. et J.R. Wood (1985). Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments. *Technometrics* 27: 251-261, 1985.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer N., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. et C.A. Johnsons (2001). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, UK, 881 p.
- Huber W. C. et R.E. Dickinson (1988). Stormwater management model user's manual, version 4. EPA/600/3-88-001a (NTIS PB88-236641/AS), Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Huff F.A. (1990). Time distribution of heavy rainstorms in Illinois. Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois.
- Huff F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.* 3(4): 1007-1019.
- IPCC (2001). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Houghton, J.T. ed. Cambridge University Press, 881p.

- Kunkel K.E., Pielke R.A. Jr. et S.A. Changnon (1999). Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80(6): 1077-1099.
- Leopold L. B. (1968). Hydrology for urban planning – a guidebook on the hydrologic effects of urban land use, US Geological Survey, circ. 554, 18 pp.
- Mailhot A., Duchesne S., Rivard G., Nantel È., Caya D. et J.-P. Villeneuve (2006). Climate change impacts on the performance of urban drainage systems for Southern Quebec. *EIC Climate Change Technology Conference*, 9-12 mai 2006, Ottawa, Ontario, Canada.
- MDE (Maryland, Department of the Environment), 2000. Maryland Stormwater Design Manual, volumes I and II, préparé par le Center for Watershed Protection. Baltimore, MD.
- MOE (Ministry of Ontario Environment), (2003). Stormwater Management Planning and Design Manual, Ministère de l'Environnement de l'Ontario, Toronto (Ontario).
- MPCA (Minnesota Pollution Control Agency) (2005). Minnesota Stormwater Manual, Minnesota Pollution Control Agency, Saint Paul, MN.
- MWLAP (Ministry of Water, Land, and Air Protection, Colombie-Britannique) (2002). Stormwater Planning – A guidebook for British Columbia, Vancouver, B.C.
- NERC (1975). Flood Studies Report – Volume II – Meteorological Studies. Natural Environment Research Council, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Osborn T.J. et M. Hulme (1997). Development of a relationship between station and grid-box rainfall frequencies for climate model validation. *J. Climate* 10: 1885-1908.
- Perreault L. et B. Bobée (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.
- Perrier R. et M. Slivitzky (1999). Survol des cas de pluies abondantes au Québec. Rapport scientifique SEC-Q99-02, dans le cadre de la Série sur les extrêmes climatiques au Québec, Environnement Canada, Région du Québec.
- Pilgrim D.H. et I. Cordery (1975). Rainfall temporal patterns for design floods. *J. Hydr. Eng. Div.-ASCE* 101(HY1): 81-95.
- Plummer D.A., Caya D., Frigon A., Côté H., Giguère M., Paquin D., Biner S., Harvey R. et R. de Elia (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Climate*, 19(13): 3112-3132.
- Rivard, G. (2006). Impacts et adaptations liés aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec : Documentation d'événements pluvieux historiques ayant causé des dommages en milieu urbain, Rapport d'étape 1, AquaPraxis Inc., 27 p + annexes.
- Rivard, G. (1995). Design storm events for urban drainage based on historical rainfall data : a conceptual framework for a logical approach. Conference on Stormwater and water quality modeling, Toronto, Ontario. .
- Schueler T.R. (1987). Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs, Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.

- Srikanthan R. (1995). A review of the methods for estimating areal reduction factors for design rainfalls, Report 95/3, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Australia, 36 p.
- Talbot G., Mailhot A. et A. Groleau (2006). Detection of step-changes in winter rainfall indices over Southern Quebec using a non-parametric Bayesian approach. Soumis à *Hydrol. Sc. J.*, septembre 2006.
- Vincent L.A. et É. Mekis (2005). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the 20<sup>th</sup> Century. Soumis à *Atmos. Ocean*.
- Walesh S.G. (1999). Street storage system for control of combined sewer surcharge – Retrofitting stormwater storage into combined sewer systems. Contract 8C-R416-NTSX, EPA, Edison, NJ.
- Watt E., Waters D. et R. McLean (2003). Climate change and urban stormwater infrastructure in Canada: Context and case studies. Toronto-Niagara Region study report and working paper series, Report 2003-1. Meteorological Service of Canada, Waterloo, Ontario, 27 p., 2003.