

ANALYSE DE LA PLUVIOMÉTRIE RÉCENTE SUR LE TERRITOIRE DE LA VILLE DE QUÉBEC ET PRONOSTICS D'ÉVOLUTION DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport final

Rapport de recherche 911-f

31 août 2007

Rapport présenté à la Ville de Québec

par
Jean-Pierre Villeneuve
Sophie Duchesne
Alain Mailhot

 **INRS Eau, Terre et Environnement**

Québec
Août 2007

ISBN : 978-2-89146-549-6

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	7
2. NOTIONS DE BASE	9
2.1 Types d'événements pluvieux	9
2.2 Récurrence des événements extrêmes.....	10
3. DONNÉES DISPONIBLES	15
3.1 Récolte et compilation des données.....	15
3.2 Validation des données de pluviomètres à auget.....	18
3.2.1 Recommandation pour la validation des données.....	21
4. ANALYSES DESCRIPTIVES.....	23
4.1 Pluviométrie moyenne	23
4.2 Maxima annuels.....	26
5. ANALYSES DE TENDANCES.....	41
5.1 Pluie annuelle totale.....	41
5.2 Pluie hivernale totale	44
5.3 Précipitations annuelles et neige annuelle.....	47
5.4 Maximum annuel de pluie tombée en une journée	49
5.5 Maximum hivernal (décembre à mars) de pluie tombée en une journée	51
5.6 Maximum de pluie tombée sur différentes durées en saison estivale	52
5.7 Évolution de diverses caractéristiques du régime pluvieux dans la région de Québec ...	53
6. MÉTHODOLOGIE POUR LA PRODUCTION DES COURBES IDF.....	59
6.1 Méthode standard	59
6.2 Analyse fréquentielle régionale	61
6.2.1 Homogénéité statistique	61
6.2.2 Détermination de la distribution régionale et de ses paramètres	62
6.2.3 Estimation des hauteurs de pluie pour différentes périodes de retour	62
6.2.4 Intervalles de confiance des intensités données par l'analyse fréquentielle régionale ...	63

6.3	Prolongation des courtes séries de données	63
6.4	Courbes IDF en climat futur	64
7.	RÉSULTATS DES ANALYSES IDF	67
7.1	Courbes IDF pour la saison de mai à octobre en climat actuel.....	67
7.1.1	Courbes locales calculées par la méthode standard.....	68
7.1.2	Courbes obtenues par analyse régionale.....	72
7.1.3	Comparaison des mesures concomitantes à la station S921 et à la station de l'aéroport Jean-Lesage	81
7.1.4	Interpolation spatiale à la station S921.....	83
7.1.5	Choix d'un ensemble de courbes représentatif pour le territoire de la ville de Québec ..	85
7.2	Courbes IDF pour la saison de mai à octobre en climat futur.....	90
7.3	Courbes IDF pour la saison de décembre à mars en climat actuel	93
8.	ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS MAJEURS DE 2004, 2005 ET 2006	97
9.	CONCLUSION	109
10.	RÉFÉRENCES	113
ANNEXE 1 -	Méthode des L-moments	115
ANNEXE 2 -	Analyse fréquentielle régionale	117
ANNEXE 3 -	Maxima annuels utilisés pour l'analyse régionale	121
ANNEXE 4 -	Relations Hauteur-Durée-Fréquence données par l'analyse fréquentielle régionale	133
ANNEXE 5 -	Réponses aux questions et commentaires émis dans la lettre du 31 juillet 2007	149
ANNEXE 6 -	Extrapolation des accroissements de précipitations en climat futur pour des durées de 5 à 30 minutes.....	153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1	Stations météorologiques d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de Québec	16
Tableau 3-2	Années disponibles pour les pluviomètres à auget de la ville de Québec	17
Tableau 5-1	Données et résultats de l'analyse de tendance pour la pluie annuelle totale (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)	42
Tableau 5-2	Données et résultats de l'analyse de tendance pour la pluie hivernale totale (décembre, janvier, février et mars) (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance).....	45
Tableau 5-3	Données et résultats de l'analyse de tendance pour les précipitations annuelles totales (pluie et neige) (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)	48
Tableau 5-4	Données et résultats de l'analyse de tendance pour la neige annuelle totale (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)	48
Tableau 5-5	Données et résultats de l'analyse de tendance pour le maximum annuel de pluie enregistré au cours d'une même journée (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance).....	49
Tableau 5-6	Données et résultats de l'analyse de tendance pour le maximum hivernal de pluie enregistré au cours d'une même journée (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance).....	51
Tableau 5-7	Synthèse des données des analyses de tendance pour le maximum annuel de pluie tombée sur différentes durées	52
Tableau 6-1	Accroissement moyen de la hauteur des précipitations estivales entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2041-2070) pour la région du Sud du Québec à l'échelle des stations, selon la méthodologie de Mailhot <i>et al.</i> (2006 et 2007)	64
Tableau 7-1	Hauteur des précipitations estivales extrêmes (mm) et intervalles de confiance à 95 % calculés à partir des maxima annuels à l'aéroport Jean-Lesage sur la période 1961-2005 (analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode de L-moments).....	69
Tableau 7-2	Hauteur des précipitations estivales extrêmes (mm) et intervalles de confiance à 95 % calculés à partir des maxima annuels à la station Québec Ville sur la période 1914-1943 (analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode de L-moments).....	71
Tableau 7-3	Stations initialement retenues pour l'analyse fréquentielle régionale et nombre d'années prises en compte pour les différentes durées.....	74

Tableau 7-4	Valeurs de H_k calculées en considérant toutes les stations listées au Tableau 7-3	75
Tableau 7-5	Stations retenues pour l'analyse fréquentielle régionale des événements de durée 24 h et nombre d'années prises en compte	77
Tableau 7-6	Valeurs de Z calculées en considérant toutes les stations listées au Tableau 7-3 (sauf pour les durées de 5 min et 10 min pour lesquelles seules les stations d'Environnement Canada ont été retenues et pour la durée 24 h pour laquelle les stations listées au Tableau 7-5 ont été retenues)	78
Tableau 7-7	Paramètres de la distribution GEV régionale pour un maximum annuel moyen de 1 mm de pluie (analyse fréquentielle régionale; méthode des L-moments)	78
Tableau 7-8	Hauteur des pluies estivales extrêmes (mm) issue de la moyenne pondérée des hauteurs calculées par l'analyse fréquentielle régionale, pour la saison de mai à octobre en climat actuel (distribution GEV; méthode des L-moments)	80
Tableau 7-9	Résultats de la comparaison entre les mesures de la station de l'aéroport Jean-Lesage et celles de station S921 (Beauport)	83
Tableau 7-10	Stations utilisées pour la reconstitution des données manquantes par krigeage.....	84
Tableau 7-11	Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat actuel pour la saison de mai à octobre à Québec	86
Tableau 7-12	Origine des hauteurs sélectionnées pour les courbes IDF proposées	87
Tableau 7-13	Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat actuel pour la saison de mai à octobre à Québec et intervalles de confiance à 95 % de chaque valeur sélectionnée pour composer ces courbes	89
Tableau 7-14	Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat futur (période 2041-2070) pour la saison de mai à octobre à Québec	90
Tableau 7-15	Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat futur pour la saison de mai à octobre à Québec et incertitudes (intervalles de confiance à 95 %) provenant des hauteurs de pluie calculées en climat actuel	92
Tableau 7-16	Stations retenues pour l'analyse fréquentielle régionale de la pluie hivernale journalière et nombre d'années prises en compte	94
Tableau 7-17	Paramètres de la distribution GEV régionale pour la pluie hivernale journalière, pour un maximum annuel moyen de 1 mm de pluie (analyse fréquentielle régionale; méthode des L-moments)	95
Tableau 7-18	Hauteur de pluie sur une même journée en période hivernale, selon les résultats de l'analyse fréquentielle régionale (mm) (distribution GEV; méthode des L-moments)	95

Tableau 7-19 Hauteur de pluie maximale sur 24 h en période hivernale (mm) pour la station 7011309 et intervalles de confiance à 95 % (analyse fréquentielle régionale; distribution GEV; méthode des L-moments).....	96
Tableau 8-1 Maximum annuel de pluie enregistré sur 24 h à la station 7016280 (Québec Ville)	99
Tableau 8-2 Pluviométrie des événements de 2004 et 2005 analysés	99

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1	Localisation des stations.....	18
Figure 4-1	Distribution spatiale de la pluie annuelle moyenne dans la région de Québec (mm) (pluviomètres d'Environnement Canada)	24
Figure 4-2	Distribution spatiale de la pluie hivernale moyenne (décembre à mars) dans la région de Québec (mm) (pluviomètres d'Environnement Canada).....	25
Figure 4-3	Maximum annuel moyen de pluie sur 24 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	27
Figure 4-4	Maximum annuel moyen de pluie sur 12 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	28
Figure 4-5	Maximum annuel moyen de pluie sur 6 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	29
Figure 4-6	Maximum annuel moyen de pluie sur 2 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	30
Figure 4-7	Maximum annuel moyen de pluie sur 1 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	31
Figure 4-8	Maximum annuel moyen de pluie sur 30 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	32
Figure 4-9	Maximum annuel moyen de pluie sur 15 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	33
Figure 4-10	Maximum annuel moyen de pluie sur 10 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	34
Figure 4-11	Maximum annuel moyen de pluie sur 5 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)	35
Figure 4-12	Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 1989 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec).....	37
Figure 4-13	Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 2004 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec).....	38
Figure 4-14	Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 2005 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec).....	39
Figure 5-1	Évolution de la pluie annuelle totale aux stations pour lesquelles une tendance significative à été détectée (stations Québec Aéroport, Québec Ville et Valcartier Fes)	43
Figure 5-2	Pluie annuelle à Québec - valeurs annuelles (points) et tendances (lignes pleines); les lignes pointillées représentent l'intervalle de confiance à 95 % de	

	la pluie annuelle à chacune des deux stations (stations Québec Ville et Québec Aéroport)	44
Figure 5-3	Évolution de la pluie hivernale totale (décembre, janvier, février et mars) aux stations pour lesquelles une tendance significative à été détectée (stations Québec Aéroport et Valcartier Fes) (les points représentent les observations et les droites, les tendances)	46
Figure 5-4	Évolution du maximum annuel de pluie enregistré au cours d'une même journée, aux stations pour lesquelles une tendance significative a été détectée (stations Lauzon et Québec Ville) (les points représentent les observations et les droites, les tendances)	50
Figure 5-5	Moyenne mobile sur 15 ans de la pluie annuelle totale (stations Québec Aéroport et Québec Ville).....	54
Figure 5-6	Moyenne mobile sur 15 ans de la pluie hivernale totale (décembre à mars) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)	55
Figure 5-7	Moyenne mobile sur 15 ans des précipitations annuelles totales (stations Québec Aéroport et Québec Ville)	55
Figure 5-8	Moyenne mobile sur 15 ans de la neige annuelle totale (stations Québec Aéroport et Québec Ville).....	56
Figure 5-9	Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en une journée (stations Québec Aéroport et Québec Ville)	56
Figure 5-10	Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en une journée en période hivernale (décembre à mars) (stations Québec Aéroport et Québec Ville).....	57
Figure 5-11	Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en période estivale (mai à octobre approximativement) sur des durées de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min et 1 h (courbes respectives de bas en haut) (stations Québec Aéroport et Québec Ville).....	57
Figure 5-12	Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en période estivale (mai à octobre approximativement) sur des durées de 2h, 6 h, 12 h et 24 h (courbes respectives de bas en haut) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)	58
Figure 7-1	Courbes IDF de l'aéroport Jean-Lesage (période 1961-2005), telles que calculées par ajustement de distributions GEV à l'aide de la méthode des L-moments (analyse fréquentielle locale)	70
Figure 7-2	Courbes IDF de la station Québec Ville (période 1914-1943), telles que calculées par ajustement de distributions GEV à l'aide de la méthode des L-moments (analyse fréquentielle locale)	72
Figure 7-3	Courbes IDF proposées en climat actuel pour la ville de Québec	88
Figure 7-4	Comparaison entre les courbes IDF proposées et celles obtenues par analyse locale des données de l'aéroport Jean-Lesage (distribution GEV; méthode des L-moments).....	88

Figure 7-5	Comparaison des courbes IDF proposées en climats actuel et futur pour la ville de Québec	91
Figure 8-1	Pluviométrie enregistrée le 9 septembre 2004 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec..	100
Figure 8-2	Pluviométrie enregistrée le 9 septembre 2004 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments).....	100
Figure 8-3	Pluviométrie enregistrée le 31 août 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec.....	101
Figure 8-4	Pluviométrie enregistrée le 31 août 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)	101
Figure 8-5	Pluviométrie enregistrée le 26 septembre 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec..	102
Figure 8-6	Pluviométrie enregistrée le 26 septembre 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments).....	102
Figure 8-7	Pluviométrie enregistrée le 17 juillet 2006 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec.....	103
Figure 8-8	Pluviométrie enregistrée le 17 juillet 2006 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)	103
Figure 8-9	Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 9 septembre 2004 (pluviomètres de la Ville de Québec)	104
Figure 8-10	Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 31 août 2005 (pluviomètres de la Ville de Québec)	105
Figure 8-11	Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 26 septembre 2005 (pluviomètres de la Ville de Québec)	106
Figure 8-12	Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 30 min (mm) le 17 juillet 2006 (pluviomètres de la Ville de Québec)	107

Sommaire

Au début de l'année 2006, la Ville de Québec a mandaté le centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE) pour analyser les précipitations mesurées dans le passé sur le territoire de la ville, en saisons estivale et hivernale, et pour estimer les conditions de pluviométrie attendues au cours des 60 prochaines années. Ce rapport présente la méthodologie et les résultats des travaux réalisés dans le cadre de ce mandat.

Nous avons dans un premier temps dressé un portrait rapide du type d'événements pluvieux pouvant causer des problèmes de drainage urbain à Québec. Ces événements sont de deux types, soit les événements intenses et de courtes durées, se produisant généralement pendant les mois de juillet et août à Québec, et les événements longs engendrant des volumes de pluie élevés, dont les plus sévères à Québec se déploient habituellement au cours des mois d'août, septembre et octobre. Nous avons par la suite fait le point sur le concept de « période de retour » ou de « récurrence » des événements pluvieux extrêmes ainsi que sur la notion de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Les principaux éléments à retenir sont que :

1. La période de retour exprime la probabilité de mesurer, au cours d'une année, une hauteur de pluie donnée.
2. Il existe toujours une certaine probabilité que deux événements rares se produisent deux années de suite ou même au cours d'une seule année.
3. Les courbes IDF donnent la relation entre l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux en un point de l'espace; lorsqu'on considère conjointement tous les événements pouvant survenir sur l'ensemble d'un territoire étendu, tel celui de la ville de Québec, la fréquence de dépassement d'une certaine intensité de pluie sur une durée définie est par conséquent plus élevée que la fréquence donnée par les courbes IDF.
4. Les courbes IDF donnent une relation entre l'intensité de pluie et la fréquence des événements pour différentes durées, variant de 5 minutes à 24 heures, en supposant l'indépendance des maxima annuels sur ces différentes durées; les événements ayant

produit des hauteurs de pluie exceptionnelles sur des durées différentes doivent donc être considérés de façon totalement indépendante.

Les données utilisées lors des analyses présentées dans ce rapport proviennent 1) des stations pluviométriques d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de Québec, 2) du nouveau réseau de pluviomètres de la ville, 3) de pluviomètres autrefois opérés par la Communauté urbaine de Québec (CUQ) et 4) de pluviomètres opérés par les consultants BPR lors de la réalisation de travaux spécifiques. Les données sont issues autant de pluviomètres encore en opération que de pluviomètres ayant cessé leurs opérations. Les enregistrements de pluie ont été validés selon un processus défini en détail dans le rapport, puis seules les années possédant un certain nombre minimum de données valides ont été conservées pour les analyses. Les stations pour lesquelles les séries de données valides se sont avérées trop courtes ont dû être écartées des analyses. Des recommandations pour la validation routinière des enregistrements de pluie ont finalement été énoncées.

Les premières analyses descriptives, réalisées à partir des données provenant des stations possédant un historique de pluviométrie quotidienne d'au moins 10 ans, ont permis de constater que la pluie annuelle moyenne est manifestement plus élevée à la station Charlesbourg Parc-Orléans qu'aux autres stations prises en compte. Cependant, aucune station ne nous permet d'évaluer la pluviométrie annuelle moyenne dans le secteur de Beauport. Des analyses de tendances ont par la suite été complétées en vue de caractériser l'évolution temporelle du profil des précipitations sur le territoire de la ville de Québec, tant en ce qui concerne les hauteurs totales de pluies annuelle et hivernale que l'intensité des événements extrêmes (maxima annuels). Les principales conclusions de cette analyse de tendance sont :

1. Au cours de la période 1944-1995, il existe à Québec une tendance significative à la hausse des précipitations annuelles totales (pluie + neige), de la pluie annuelle totale et de la pluie hivernale totale (décembre à mars).
2. Au cours de la période 1873-1958, il existe à Québec une tendance significative à la hausse dans la pluie annuelle totale, mais pas dans les précipitations annuelles totales (pluie + neige). Cette tendance à la hausse de la pluie annuelle provient vraisemblablement d'un réchauffement des températures hivernales sur cette période, qui se traduit par une tendance significative à la baisse de la neige annuelle totale.
3. Les maxima annuels de pluie sur des durées variant de 5 minutes à 24 heures n'étaient pas plus élevés à la fin du XX^e siècle qu'ils ne l'étaient au début du XX^e siècle.

Les données de pluviométrie disponibles sur le territoire de la ville de Québec ont été mises à profit pour la construction de courbes IDF par la méthode d'analyse locale standard, puis par l'analyse fréquentielle régionale. Cette dernière méthode d'analyse possède l'avantage d'intégrer toute l'information disponible concernant la pluviométrie des événements rares dans la région de Québec. Les données disponibles ne nous ont pas permis de détecter de façon formelle une disparité spatiale significative dans l'intensité des maxima annuels de pluie sur le territoire de la ville, ce qui, précisons-le, ne signifie pas pour autant qu'une telle disparité spatiale n'existe pas. Pour conclure sur ce sujet, il faudrait disposer de séries de mesures s'étalant sur plusieurs années en différentes stations couvrant l'ensemble du territoire de la ville. Une comparaison des mesures concomitantes à la station S921 (Beauport) et à la station de l'aéroport Jean-Lesage a cependant indiqué que les maxima annuels sur des durées de 1 h à 24 h pourraient être jusqu'à 9 % plus élevés à Beauport qu'à l'aéroport. Ces considérations ont été prises en compte lors de la proposition des courbes IDF représentatives du régime pluvieux de la ville de Québec, bien qu'elles aient eu peu d'influence sur le résultat final. En effet, suite à la réalisation de diverses analyses, nous avons finalement choisi de retenir, comme hauteurs de pluie représentatives des événements pluvieux exceptionnels sur tout le territoire de la ville, *le maximum des valeurs suivantes*, pour chaque durée d'événement : 1) la hauteur maximale issue de l'analyse régionale parmi les hauteurs calculées aux stations pour lesquelles on dispose d'au moins 20 ans de données (et donc pour lesquelles les incertitudes demeurent acceptables); 2) la moyenne pondérée des hauteurs issues de l'analyse régionale; 3) les résultats de l'analyse régionale à la station de l'aéroport Jean-Lesage majorés de 5 % pour les durées de 1 h à 6 h et de 10 % pour les durées de 12 h et 24 h, afin de tenir compte des disparités observées avec la station de Beauport; et 4) les résultats de l'analyse locale à la station de l'aéroport Jean-Lesage. De cette façon, on obtient les hauteurs de pluie données au Tableau S-1. Ces hauteurs constituent les courbes IDF que nous proposons comme étant représentatives de la pluviométrie en climat actuel sur le territoire de la ville de Québec. Notons que, puisque les pluviomètres à auget (dont proviennent les données à partir desquelles les courbes IDF sont calculées) sont fermés pendant la saison hivernale, les courbes proposées représentent la pluviométrie de la période de mai à octobre.

Tableau S-1 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat actuel pour la saison de mai à octobre à Québec

	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
5 min	7,7	10,0	11,4	13,3	14,9	16,6
10 min	11,2	14,8	17,1	20,1	22,3	24,5
15 min	13,7	18,2	21,3	25,2	28,2	31,3
30 min	18,5	24,9	29,0	34,1	37,8	41,5
1 h	22,1	29,8	35,1	42,1	47,5	53,0
2 h	26,9	36,0	42,4	51,2	58,3	66,0
6 h	40,3	54,0	64,2	78,6	90,4	103,3
12 h	49,5	66,1	77,5	92,3	103,7	115,3
24 h	64,3	82,7	93,9	106,9	115,8	124,1

Les courbes IDF en climat futur (période 2041-2070) ont été obtenues en majorant les courbes IDF en climat actuel, dont les valeurs apparaissent au tableau précédent, par les accroissements donnés par la méthodologie développée par Mailhot *et al.* (2006 et 2007). Par l'analyse des résultats du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) et de la pluviométrie enregistrée à une cinquantaine de stations du Sud du Québec, ces auteurs ont estimé l'accroissement des hauteurs de précipitations estivales extrêmes entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2041-2070), pour des événements de 2 à 24 h et des périodes de retour de 2 à 50 ans. Ces accroissements ont permis de calculer les courbes IDF que nous proposons pour représenter la pluviométrie en climat futur (2041-2070) sur le territoire de la ville de Québec, alors que les accroissements pour les événements de durée 1 h et pour la période de retour de 100 ans (durées de 1 h à 24 h) ont été calculés en appliquant la même méthodologie; ces courbes IDF sont présentées au Tableau S-2. Le calcul des hauteurs de pluie données dans ce tableau repose sur de nombreuses hypothèses, concernant notamment la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère en climat futur. Le scénario retenu pour ces estimations est le SRES A2 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il est entendu que, en fonction de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre qui surviendra réellement dans l'atmosphère au cours du XXI^e siècle, les relations IDF données au Tableau S-2 pourront survenir avant 2041 ou après 2070.

Tableau S-2 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat futur (2041-2070) pour la saison de mai à octobre à Québec

	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
1 h	26,7	35,5	41,7	50,1	56,8	63,8
2 h	32,4	42,5	49,3	57,9	64,8	72,3
6 h	45,9	61,8	72,6	86,5	97,0	107,8
12 h	54,9	72,7	83,9	97,0	106,3	115,3
24 h	71,0	90,0	100,4	111,1	117,6	124,1

Une autre partie du mandat confié à l'INRS-ETE par la Ville de Québec consistait à analyser la relation entre l'intensité et la fréquence des événements pluvieux en période hivernale. Par la méthode d'analyse fréquentielle régionale, nous avons calculé les hauteurs de pluie sur 24 h pouvant être dépassées une fois tous les 2 à 100 ans, en moyenne, pendant les mois de décembre, janvier, février et mars à Québec. Les données retenues pour ce calcul proviennent des stations d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de la ville de Québec et pour lesquelles on dispose d'au moins 15 années de données valides. Le Tableau S-3 donne les résultats obtenus à la station pour laquelle les hauteurs de pluie hivernale calculées sont les plus élevées.

Tableau S-3 Hauteur de pluie maximale sur 24 h en période hivernale (décembre à mars) pour la station Charlesbourg Parc-Orléans

Réurrence	Hauteur sur 24 h (mm)
2 ans	31,3
5 ans	45,0
10 ans	53,1
25 ans	62,6
50 ans	69,0
100 ans	75,0

La dernière section du rapport présente une analyse de certains événements ayant causé des problèmes de refoulements et d'inondations à Québec au cours des années 2004, 2005 et

2006, soit les événements du 9 septembre 2004, des 30 et 31 août 2005, des 25 et 26 septembre 2005 et du 17 juillet 2006. Il ressort tout d'abord de cette analyse que l'événement du 17 juillet 2006 est un événement court et intense, pour lequel la hauteur de pluie maximale enregistrée sur 30 min à Beauport a atteint une récurrence de 50 ans. Cet événement a provoqué des problèmes de refoulement dans le secteur est de la Ville, où les intensités les plus importantes ont été enregistrées. Quant aux trois autres événements analysés, ils se sont tous révélés critiques pour les longues durées, ce qui signifie que ce sont des événements longs ayant engendré des hauteurs de pluie importantes. Pour chaque événement, la hauteur de pluie maximale enregistrée sur 24 h, parmi tous les pluviomètres alors en fonction, dépasse la hauteur d'un événement se produisant en moyenne une fois tous les 50 ans. La hauteur maximale enregistrée à Beauport le 31 août 2005 dépasse même la hauteur de récurrence une fois dans 100 ans. Or, il est important de spécifier que, lors de chacun de ces événements, les intensités maximales n'ont pas été enregistrées aux mêmes pluviomètres et qu'il existait une grande disparité spatiale des intensités maximales observées. Ainsi, les hauteurs sur 24 h les plus importantes ont été enregistrées dans le nord de la ville le 9 septembre 2004, dans l'est le 31 août 2005 et plus principalement dans l'ouest et le sud le 26 septembre 2005. Lors de ces trois événements, la hauteur maximale sur 24 h n'a même pas dépassé la hauteur de récurrence une fois dans 5 ans en certains endroits de la ville, ni même celle d'un événement une fois dans 2 ans le 9 septembre 2004. Or, on sait que les courbes IDF donnent la probabilité qu'une certaine hauteur de pluie soit dépassée *localement*, à l'échelle des stations d'observation. Sur un territoire étendu tel celui de la ville de Québec, on s'attend à ce que le dépassement d'une certaine hauteur de pluie soit *au total* plus fréquent que la récurrence donnée par les courbes IDF. Qui plus est, on dispose maintenant à Québec d'un réseau de 28 pluviomètres couvrant tout le territoire, ce qui augmente les chances de capter des intensités de pluie élevées.

Il est par ailleurs intéressant de noter que, avec un seul pluviomètre en opération, on a enregistré à Québec pendant la période 1935-1942 quatre événements lors desquels la hauteur maximale de pluie sur 24 h a dépassé 100 mm. Or, ces événements étant survenus avant la mise en opération de la station de l'aéroport Jean-Lesage, ils n'entrent pas dans le calcul des courbes IDF traditionnellement utilisées dans la région de Québec. Pour leur part, l'analyse fréquentielle régionale réalisée au cours de ce mandat ainsi que la méthode de sélection des courbes IDF proposées dans ce rapport tiennent compte de cette information.

1. Introduction

Au cours des trois dernières années, plusieurs événements pluvieux ont entraîné des inondations et refoulements d'égout sur le territoire de la ville de Québec, causés par un dépassement de capacité des ouvrages de drainage. Les conséquences de ces événements ont été telles en matière de dommages aux propriétés et aux équipements, qu'ils furent l'objet d'une attention médiatique soutenue. On peut penser, à titre d'exemple, à l'événement des 25 et 26 septembre 2005, lequel a mené à l'évacuation de plus de 200 maisons et commerces ainsi que, selon le Bureau d'assurance du Canada (2005), au versement de plus de 16 millions de dollars en indemnités. C'est dans ce contexte que plusieurs se demandent si les changements climatiques récents ont pu entraîner une augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des événements pluvieux extrêmes et si cette augmentation, le cas échéant, se poursuivra au cours des prochaines années pour provoquer des inondations urbaines de plus en plus fréquentes et/ou intenses. Afin d'apporter les premiers éléments de réponse à ces questions, la Ville de Québec a mandaté le centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE) pour analyser les précipitations mesurées dans le passé sur le territoire de la ville, en saisons estivale et hivernale, et pour estimer les conditions de pluviométrie attendues au cours des 60 prochaines années. On souhaite du même coup intégrer les mesures issues d'un tout nouveau réseau de 28 pluviomètres, dont les plus récents sont entrés en opération au printemps 2004, dans la description des caractéristiques pluviométriques de la région de la ville de Québec. Les objectifs particuliers du projet sont de :

1. analyser les précipitations mesurées dans le passé sur le territoire de la ville de Québec, en saisons estivale et hivernale;
2. produire des courbes IDF spécifiques pour le territoire de la ville de Québec, en tenant compte des données mesurées jusqu'en 2005;
3. produire des courbes IDF représentant les caractéristiques du climat prévu pour les 60 prochaines années dans la région de Québec;

4. produire des sommaires et des cartes thématiques à l'intention des élus afin de dresser un portrait d'ensemble des risques associés aux précipitations sur le territoire de la ville de Québec.

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats des activités 1 à 3. Des chiffriers (tableaux de données et graphiques) sont également fournis sous format électronique au Service de l'ingénierie de la Ville de Québec en même temps que ce rapport.

2. Notions de base

2.1 Types d'événements pluvieux

Deux types d'événements pluvieux peuvent causer des problèmes particuliers en matière de drainage urbain, soit les événements intenses, généralement de courte durée (moins d'une heure), et les événements de longues durées s'étalant sur plusieurs heures, voire plusieurs jours.

Les événements intenses sont surtout problématiques pour les petits bassins de drainage urbains majoritairement composés de surfaces imperméables (stationnements, rues, toits, etc.). Sur de tels bassins, l'infiltration est marginale et les précipitations sont rapidement transportées vers le réseau de drainage par ruissellement; des précipitations intenses vont donc y engendrer de forts débits de ruissellement qui peuvent dépasser la capacité d'évacuation des réseaux, provoquant refoulements vers les sous-sols et/ou inondations des surfaces urbaines. Les événements intenses résultent de la brusque élévation de masses d'air chargées d'humidité, suite au réchauffement diurne de l'air en contact avec la surface du sol. Ils sont généralement localisés (s'étalant sur quelques kilomètres carrés à peine), mais peuvent parfois être regroupés (complexe convectif à mésoéchelle) pour couvrir un plus grand territoire. À Québec, ce type d'événement se produit le plus souvent en fin de journée pendant les mois les plus chauds, soit juillet et août, bien que des événements de forte intensité peuvent aussi se produire à d'autres moments de l'année.

Quant aux événements longs engendrant des volumes de pluie élevés, ils sont plutôt problématiques pour les bassins de drainage de plus grande taille, pour les bassins où l'infiltration et/ou le stockage sont significatifs ainsi que pour les réseaux dont la capacité d'évacuation peut devenir limitée par un rehaussement du niveau de l'eau dans le cours d'eau récepteur. En saturant les sols, les ouvrages de stockage (réservoirs, etc.) et les conduites de drainage, les volumes de pluie importants engendrés par ces événements peuvent causer de sérieux problèmes de rétention de l'eau en surface et/ou de refoulement. Dans certains secteurs, ces problèmes peuvent être aggravés par une réduction de la capacité d'évacuation

du réseau de drainage lorsque celui-ci se déverse dans un cours d'eau dont le niveau augmente de façon significative sous l'effet des précipitations. Dans la plupart des cas, les événements pluvieux de longue durée sont causés par la rencontre de masses d'air de température et d'humidité contrastantes (fronts) et peuvent affecter des superficies importantes aux périodes de transition (printemps et automne). La majorité des événements à plus fort volume trouve son origine dans des fronts qui se combinent à des cyclones tropicaux (ouragans). La plupart des ouragans qui peuvent affecter le Québec se développent en août, septembre et octobre, lorsque la surface de l'océan Atlantique est plus chaude.

2.2 Récurrence des événements extrêmes

Le dimensionnement des ouvrages de drainage urbain est souvent basé sur le concept de « période de retour » ou de « récurrence » des événements pluvieux. Ainsi, selon certains critères variant notamment en fonction du type d'ouvrage et de la nature des infrastructures à protéger contre les inondations, la pluie de conception utilisée est celle qui surviendra **en moyenne** une fois toutes les X années, la valeur de X variant généralement de 5 ans (pour les conduites d'égout pluvial) à 100 ans (pour les composantes du réseau majeur, c.-à-d. rues, bassins, etc.). Ceci dit, il faut retenir qu'un événement de récurrence 100 ans, à titre d'exemple, sera dépassé *en moyenne* tous les 100 ans et qu'il existe une probabilité, quoique faible, que deux événements de récurrence supérieure à 100 ans se produisent deux années consécutives. En fait, cette notion peut être exprimée de façon inverse en stipulant que, à chaque année, il existe une chance sur 100 (probabilité de $1/100 = 0,01$) qu'un événement de récurrence 100 ans soit dépassé.

La façon la plus courante d'exprimer l'intensité des événements pluvieux extrêmes en fonction de leur période de retour en hydrologie urbaine est sous forme de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Les courbes IDF sont construites par l'analyse statistique de données pluviométriques; dans le cas de la méthode standard d'analyse, ces données proviennent d'une seule station météorologique. Puisque les divers ouvrages de drainage et bassins urbains (qui se distinguent par leur type de surface, taille, pente, etc.) ne sont pas tous sensibles au même type d'événements pluvieux, la relation entre l'intensité et la fréquence de ces événements est déterminée pour des événements de durées variées. Une des principales hypothèses qui sous-tend la production de courbes IDF est que les maxima annuels de pluie (sur des durées de 5 minutes à 24 heures) sont stationnaires, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune tendance à la

hausse ni à la baisse de ces valeurs dans le temps. Ceci signifie donc que les mesures passées reflètent le climat actuel ainsi que celui qui prévaudra pendant toute la durée de vie utile des aménagements ou ouvrages conçus sur la base des courbes IDF. De plus, puisque les courbes IDF sont construites sur la base des données disponibles en une station de mesure, elles ne peuvent être que le reflet de la période au cours de laquelle cette station était en opération. Ainsi, à titre d'exemple, on pourrait disposer, pour une station en particulier, de 20 années de données. Or, s'il s'avère que ces années aient été particulièrement sèches et qu'aucun événement pluvieux majeur n'ait été enregistré sur cette période, les courbes IDF construites à partir de ces seules données ne pourraient tenir compte de la variabilité du climat prévalant dans cette région. Également, on conçoit aisément que le calcul d'intensités de pluie pour des périodes de retour élevées (ex. récurrence 50 ans ou 100 ans) est empreint d'incertitudes plus importantes que le calcul des intensités des événements plus fréquents (ex. récurrence de 2 ou 5 ans) et que, quelle que soit la récurrence, les incertitudes associées aux intensités estimées sont d'autant plus élevées que la série de mesures sur laquelle sont basées ces évaluations est courte. En effet, bien que l'on dispose aujourd'hui de méthodes statistiques éprouvées pour le calcul de probabilités au dépassement, ces méthodes ne peuvent aller au-delà de ce que révèlent les données sur lesquelles elles s'appuient et sont donc tributaires de la qualité et du nombre de données disponibles (longueur des séries et nombre de stations) sur ce territoire. Cependant, cette incertitude peut être quantifiée sur la base des analyses statistiques réalisées et certaines techniques permettent par ailleurs de tirer le maximum d'information des données disponibles (par exemple, en combinant les données provenant de plusieurs stations).

L'interprétation de l'information fournie par les courbes IDF doit nécessairement tenir compte de l'ensemble des hypothèses inhérentes à la construction de ces courbes, dont quelques-unes ont été mentionnées précédemment. À ces hypothèses viennent s'ajouter deux facteurs particuliers qui peuvent devenir source de confusion : le caractère local de l'information donnée par les courbes IDF et la notion de « durée » des événements. Concernant le premier de ces facteurs, on doit toujours garder en tête que les courbes IDF donnent la relation entre l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux en un point, soit l'emplacement de la station de mesure ayant servi au calcul des courbes. Ainsi, la probabilité qu'un événement de récurrence 100 ans soit dépassé en n'importe quel point d'une grande surface, telle par exemple sur le territoire d'une ville entière, est plus élevée que 0,01 à chaque année, puisque cette probabilité a été calculée à partir de mesures provenant d'une seule station. Or, on a déjà mentionné que les orages violents sont souvent fortement localisés. Ainsi, les hauteurs de pluie

enregistrées sur une heure en deux stations distantes de quelques kilomètres à peine peuvent être totalement différentes lors de certains événements, ou encore partiellement reliées lors de certains autres. C'est pourquoi plus le territoire est étendu, plus le risque d'observer un événement d'une récurrence donnée au cours d'une même année est élevé.

Le second facteur qui vient souvent embrouiller la perception qu'on peut avoir de l'occurrence des événements pluvieux face à l'information fournie par les courbes IDF est que la relation intensité/fréquence est donnée pour différentes durées (de 5 minutes à 24 heures), en supposant l'indépendance des maxima annuels de pluie sur ces différentes durées. On peut mieux comprendre les fondements de cette hypothèse en se rappelant que, au cours d'une même année, le maximum de pluie enregistré sur 5 minutes ne se produit pas nécessairement lors du même événement que le maximum enregistré sur 24 heures. Ceci est d'autant plus vrai que ces maxima sont généralement causés par des événements pluvieux de nature différente. Ainsi, il existe en un point, à chaque année, une probabilité de 0,01 que la hauteur de pluie de récurrence 100 ans de durée 15 minutes soit dépassée, mais aussi une probabilité de 0,01 que la hauteur de récurrence 100 ans soit dépassée pour la durée 1 heure, et une probabilité de 0,01 que la hauteur centennale soit dépassée pour la durée 2 heures, et ainsi de suite jusqu'à la durée 24 heures. Pour illustrer ce propos, citons à titre d'exemple l'événement des 25 et 26 septembre 2005, lors duquel les hauteurs de pluie enregistrées sur 24 heures ont dépassé en plusieurs pluviomètres la hauteur d'un événement de récurrence une fois dans 100 ans (selon les courbes IDF de l'aéroport Jean-Lesage), mais pour lequel les hauteurs enregistrées sur des durées d'une heure ou moins n'ont pas dépassé, en aucun pluviomètre, l'événement de récurrence une fois dans 2 ans. On peut aussi citer l'exemple du 16 juin 1979, journée au cours de laquelle on a enregistré 60 mm de pluie en une heure à l'aéroport Jean-Lesage, ce qui dépasse l'événement de récurrence une fois dans 100 ans à cette station, tandis que la hauteur maximale enregistrée sur 24 heures à cette même station au cours de la même journée est de 78 mm, hauteur qui équivaut seulement à l'événement de récurrence une fois dans 10 ans. Ces deux exemples illustrent que les événements pouvant s'avérer critiques en matière de drainage urbain ne sont pas nécessairement les mêmes pour différentes durées d'analyse.

Ainsi, on comprend mieux pourquoi certains observateurs peuvent avoir l'impression que certains événements pluvieux dits « extrêmes » se produisent plus souvent que la récurrence donnée par les courbes IDF. Outre le fait que les récurrences données par ces courbes sont des périodes de retour **moyennes**, et donc qu'il existe un certain risque qu'un événement centennal se produise deux années de suite, une mauvaise interprétation des courbes IDF peut

résulter de la prise en compte d'événements ayant produit des hauteurs de pluie exceptionnelles sur des durées différentes, ou encore d'événements ayant eu lieu en des endroits différents d'un territoire étendu. S'ajoute à ces considérations le fait que les courbes IDF ne peuvent refléter que les caractéristiques statistiques des événements pluvieux qui se sont produits au cours de la période d'enregistrement des données considérées dans l'analyse statistique. De là l'importance d'insister sur le maintien en opération des stations pluviométriques existantes, mais surtout sur la mise à jour régulière des courbes IDF en fonction des nouvelles informations disponibles à ces stations.

Il est également possible que l'hypothèse de non-stationnarité, implicitement liée à la démarche IDF standard, ne puisse plus être vérifiée dans un contexte de changement climatique. On sait en effet que la température moyenne du globe s'est accrue de 0,3 à 0,6 °C depuis le XIX^e siècle et qu'elle continuera d'augmenter au cours des prochaines décennies (IPCC, 2001). Au Canada, la température moyenne pourrait augmenter de 2 à 10 °C, selon les régions, d'ici 2100 (Hengeveld, 2000). Or, ce réchauffement entraînera nécessairement des répercussions significatives sur le climat, dont une modification du cycle hydrologique se traduisant par un changement dans l'amplitude et la fréquence des événements pluvieux. Dans la région du Sud du Québec, on prévoit une augmentation de 0 à 10 % des précipitations moyennes en été et de 10 à 35 % en hiver entre les périodes 1960-1990 et 2080-2100 (Hulme et Sheard, 1999, cité dans Ouranos, 2004). Quant à l'intensité des précipitations estivales de récurrence 25 ans, elle devrait s'accroître de 4 à 13 %, selon les durées d'événement considérées, au cours des prochaines décennies (Mailhot *et al.*, 2007). Ces prédictions, basées sur l'analyse des résultats de modèles climatologiques, indiquent clairement que l'intensité des précipitations extrêmes augmentera de façon significative au cours de la durée de vie utile des ouvrages de drainage actuellement en place et/ou de ceux qui seront conçus au cours des prochaines années. On saisit donc l'importance de tenir compte des changements climatiques futurs lors du dimensionnement de ces ouvrages. Bien qu'il soit impossible à l'heure actuelle de quantifier de façon exacte l'ampleur des changements qui surviendront dans l'intensité des précipitations à l'échelle locale, les travaux de Mailhot *et al.* (2006 et 2007), basés sur l'analyse des résultats du Modèle Régional Canadien du Climat, donnent une estimation des modifications attendues dans l'intensité des événements de récurrences de 2 à 50 ans, de durées 2 h, 6 h, 12 h et 24 h pour la région du Sud du Québec. L'estimation de ces modifications, combinée à l'analyse des mesures de pluviométrie existantes sur le territoire de la ville de Québec, permettront de proposer des courbes IDF reflétant les conditions futures de pluviométrie sur ce territoire.

3. Données disponibles

Ce chapitre présente les sources de données utilisées pour nos analyses, ainsi que le critère de sélection de ces données et le processus mis en place pour leur validation.

3.1 Récolte et compilation des données

Tous les efforts ont été déployés afin de recueillir le maximum de données pluviométriques dans la région de la ville de Québec. Les données de pluie ont été récoltées auprès d'Environnement Canada, des consultants BPR et du Service de l'ingénierie de la Ville de Québec; ces données proviennent autant de pluviomètres encore en opération que de pluviomètres ayant cessé leurs opérations.

Les données d'Environnement Canada donnent, pour tous les mois de l'année sur une base quotidienne, la pluie et la neige totales tombées. Des données de pluviomètre à auget, donnant le maximum quotidien ou annuel de pluie tombée pour diverses durées variant de 5 minutes à 24 heures, sont également disponibles à certaines de ces stations pour la période estivale (approximativement de mai à octobre), bien que ces séries de données soient toujours plus courtes que les séries de totaux quotidiens. Le Tableau 3-1 dresse la liste de l'ensemble des stations d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de Québec pour lesquelles des mesures de pluie sont disponibles (voir Figure 3-1 pour la localisation des stations). Il est à noter que plusieurs de ces stations ne sont plus en opération.

Les données fournies par les consultants BPR et par la Ville de Québec proviennent de pluviomètres à auget et donnent la hauteur de pluie tombée à toutes les 5 ou 15 minutes, selon le jeu de données. Cependant, ces données ne couvrent que la période estivale (approximativement de mai à octobre) et, même sur cette période, plusieurs mois ne sont pas couverts pour certains pluviomètres. Le Tableau 3-2 résume, pour chaque pluviomètre, les années pour lesquelles des séries de données à première vue complètes sont disponibles pour la saison estivale (une validation subséquente des données, voir section 3.2, viendra modifier cette liste). La localisation de ces pluviomètres est illustrée à la Figure 3-1, de même que celle des stations d'Environnement Canada possédant un historique de données d'au moins 10 ans.

À l'examen du Tableau 3-2, il est important de noter que le nombre d'années pour lesquelles des données sont disponibles est très faible pour tous les pluviomètres. Les séries de mesures de ces pluviomètres ne peuvent donc pas être directement utilisées pour le calcul d'intensités de pluie pour les événements rares (récurrence de 25 à 100 ans). C'est pourquoi il faudra développer des méthodes permettant de combiner l'information fournie par ces pluviomètres avec celle provenant de stations possédant de plus longs historiques.

Tableau 3-1 Stations météorologiques d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de Québec

No	Nom	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Début	Fin
7010566	Beauport	46,8	-71,2	84	1982	1985
7020567	Beauséjour	46,7	-71,2	107	1975	2003
7011170	Cap-Rouge	46,8	-71,3	12	1911	1940
7011308	Charlesbourg Jar Zoo	46,9	-71,3	152	1963	1977
7011309	Charlesbourg Parc Orléans	46,9	-71,3	114	1971	1997
7041330	Château-Richer	47,0	-71,0	15	1980	2003
7011950	Courville	46,9	-71,2	76	1963	1964
701A9E0	Courville de Poissy	46,9	-71,2	114	1974	1982
7012040	Domaine-de-Maizerets	46,8	-71,2	6	1991	1994
7012232	Duburger	46,8	-71,3	15	1971	1993
701LF83	La Courvilloise	46,9	-71,2	114	1988	1991
7024254	Lauzon	46,8	-71,1	69	1978	2003
7014298	Les Saules	46,8	-71,3	26	1973	1973
7014329	Loretteville	46,9	-71,4	130	1977	1982
7015417	Neufchâtel	46,9	-71,4	91	1973	1977
7016280	Québec Ville	46,8	-71,2	90	1872	1959
7016281	Québec 2	46,8	-71,3	76	1956	1968
7016294	Québec Aéroport	46,8	-71,4	74	1943	2005
7016900	St-Augustin	46,7	-71,5	58	1964	1989
7017265	Ste-Foy	46,8	-71,3	91	1958	1972
7017BFN	Ste-Foy (Pie XII)	46,8	-71,3	79	1972	1996
7017B65	Ste-Foy Matapédia	46,8	-71,3	46	1971	1984
7027391	St-Jean-Chrysostome	46,7	-71,2	53	1968	1985
7047442	St-Laurent-Île-d'Orléans	46,9	-71,1	61	1964	1974
7027700	St-Romuald	46,8	-71,2	38	1963	1968
7018574	Valcartier A	46,9	-71,5	168	1978	1981
7018577	Valcartier Fes	47,0	-71,5	184	1955	1977
7018762	Villeneuve	46,9	-71,2	2	1985	1988

Tableau 3-2 Années disponibles pour les pluviomètres à auget de la ville de Québec

Nom	'85	'86	'87	'88	'89	'95	'96	'97	'98	'99	99-04	04-05	Nb années
P1					X								1
P2	X	X	X	X	X								5
PCML						X		X					2
PVALB							X	X	X				3
S003										X		X	3
S015												X	2
S018								X	X	X		X	5
S019												X	2
S027	X	X	X	X	X	X			X		X	X	14
S046											X	X	7
S050												X	2
S060											X	X	7
S14B											X	X	7
S370												X	2
S433												X	2
S80A							X		X		X	X	9
S901												X	2
S902											X	X	7
S903											X	X	7
S904											X	X	7
S905											X	X	7
S906											X	X	7
S907											X	X	7
S908											X	X	7
S909											X	X	7
S910											X	X	7
S911											X	X	7
S920												X	2
S921					X				X	X		X	5
S922												X	2
S923												X	2
S924												X	2

NOTE : Les années identifiées dans ce tableau ne sont pas nécessairement constituées de données « valides » pour le calcul de caractéristiques statistiques; une validation postérieure des données (voir section 3.2) a réduit le nombre d'années considérées dans les calculs pour certaines stations.

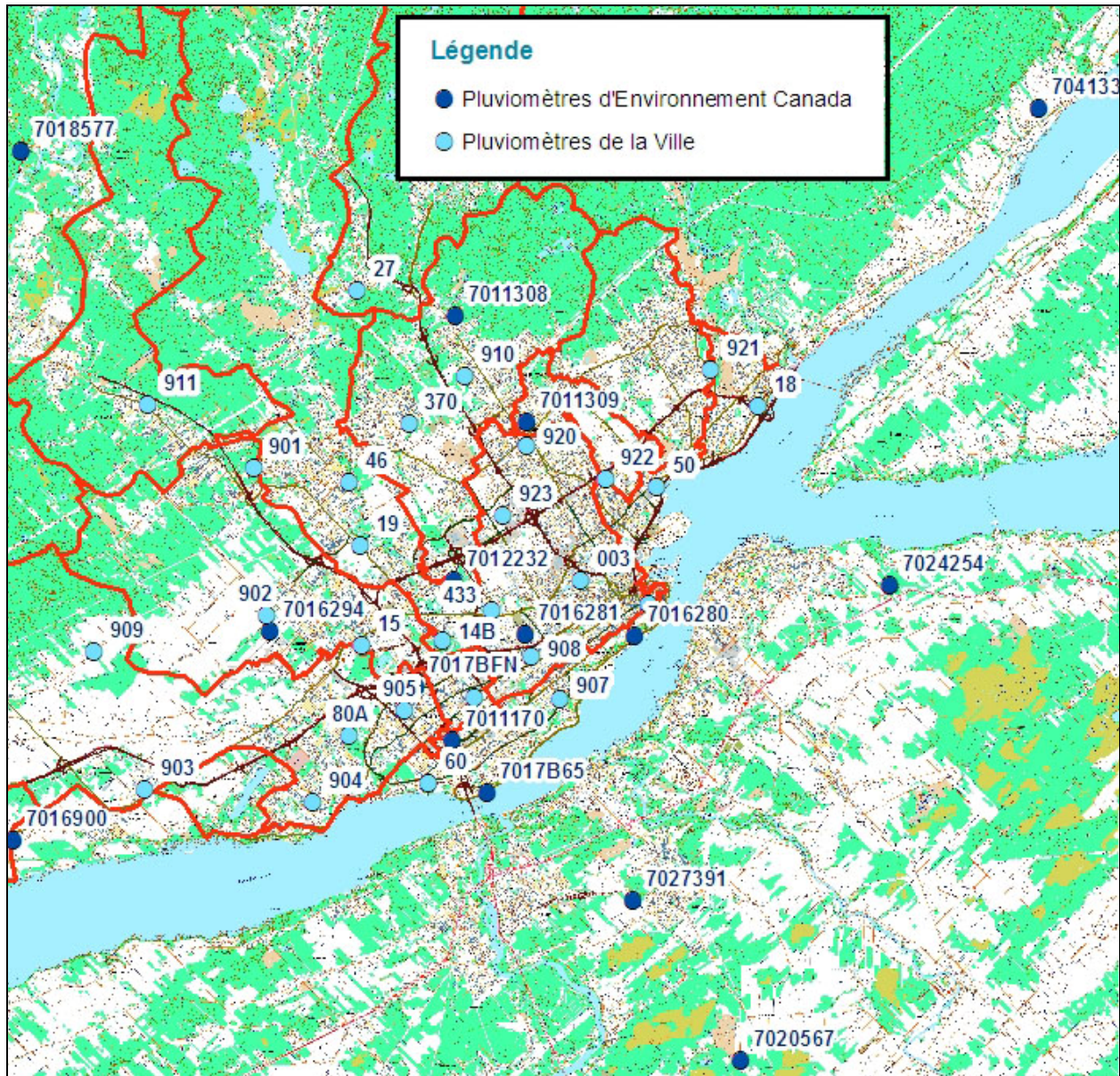


Figure 3-1 Localisation des stations

3.2 Validation des données de pluviomètres à auget

Afin de s'assurer de la représentativité des maxima annuels calculés à partir des données provenant des pluviomètres à auget, on a tout d'abord compilé le nombre de données manquantes ou non valides à chaque année, pour chaque pluviomètre, puis seules les années pour lesquelles un total d'au moins 150 jours de données étaient disponibles sur la période de mai à octobre ont été retenues. Étant donné la période d'opération des pluviomètres à augets,

on doit garder en tête que les maxima qui seront calculés ne sont pas réellement des maxima annuels, mais plutôt des maxima estivaux (mai à octobre). Notons que, bien que rarement prise en compte, cette remarque s'applique également aux courbes IDF fournies par Environnement Canada. En effet, la majorité des pluviomètres d'où proviennent les données utilisées pour la construction de ces courbes sont fermés au début du mois de novembre de chaque année et ne reviennent en fonction qu'à la fin du mois d'avril de l'année suivante.

Ainsi, pour tous les pluviomètres à augets (tant ceux d'Environnement Canada que de la Ville de Québec), on a rejeté toutes les années pour lesquelles moins de 150 jours de données valides étaient disponibles sur la période de mai à octobre (sur un total possible de 184 jours). Ensuite, on n'a retenu pour les analyses que les stations ayant au moins 5 années de données « valides » (≥ 150 jours de données). Cette première sélection nous a conduits à retenir 9 stations d'Environnement Canada (sur 28) et 12 stations de la ville de Québec (sur 32).

Cependant, les premiers calculs réalisés avec ces données ont rapidement mis en évidence des problèmes au niveau de la validité de certaines données identifiées comme « valides » dans les bases de données fournies par la Ville. À titre d'exemple, plus de 450 mm de pluie auraient été enregistrés en cinq minutes par les pluviomètres S902, S903, S904, S905 et S910 le 22 septembre 2004 !! Bien que ce type d'erreur soit relativement facile à détecter, d'autres sont plus subtiles à découvrir. C'est pourquoi une procédure de validation visant à retirer tout enregistrement suspect des bases de données a été mise en place. Les principales étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. calcul, pour chaque journée disponible et pour chaque pluviomètre, du maximum de pluie tombée sur des durées de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1h, 2 h, 6 h, 12 h et 24h;
2. extraction du maximum annuel pour chaque pluviomètre et pour chaque durée mentionnée au point 1. (de 5 min à 24 h);
3. pour chaque année et pour toutes les durées de 5 min à 24 h, calcul de la moyenne et de l'écart-type des maxima annuels sur toutes les stations retenues;
4. si pour une année et une durée en particulier, le ratio écart-type / moyenne des maxima annuels est supérieur à 30 %¹, on s'interroge sur la validité des données :

¹ Ce seuil de 30 % a été fixé sur la base de l'analyse des données des stations d'Environnement Canada

- a. pour ce faire, on analyse de façon détaillée la journée du maximum annuel pour chaque station et on tente de relever les incohérences;
 - b. si, pour une station, les données d'une journée particulière semblent incohérentes (ex. des centaines de mm de pluie enregistrés en quelques minutes seulement), ces données sont identifiées comme « non valides » dans la base de données;
5. les étapes 1. à 4. sont répétées jusqu'à ce que plus aucune incohérence ne puisse être identifiée.

Cette procédure itérative nous a conduits à identifier comme « non valides » les données suivantes :

1. le 4 mai 2004, pour la station S14B (2 232 mm de pluie en 5 min);
2. le 13 mai 2004, pour la station S14B (52 mm de pluie en 5 min);
3. le 22 septembre 2004, pour les stations S902, S903, S904, S905 et S910 (plus de 450 mm de pluie en 5 min);
4. la période du 12 au 21 mai 2004 pour la station S027 (valeurs aberrantes, souvent plus de 3 600 mm de pluie en 5 min);
5. la période du 21 au 22 septembre 2004, pour la station S060 (valeurs aberrantes, souvent plus de 1 000 mm de pluie en 5 min);
6. le 4 mai 2004, pour la station S060 (186 mm de pluie en 5 min);
7. la période du 19 au 22 septembre 2004, pour la station S80A (valeurs aberrantes, souvent plus de 2 000 mm de pluie en 5 min);
8. la période du 1^{er} au 4 mai 2004, pour la station S902 (pendant cette période, des données de pluie sont enregistrées presque en continu à ce pluviomètre, conduisant à un total de 178 mm de pluie en 24 h, alors qu'aucune des autres stations n'a enregistré de pluie significative sur cette période);
9. pour l'année 2001, toutes les données des stations S060 et S80A ont été éliminées (pour ces stations, le maximum de pluie tombée sur 24 h pendant l'année 2001, selon

les données enregistrées, serait respectivement de 9,1 mm et 5,4 mm, alors que la moyenne pour les autres stations est de 35 mm).

Suite à l'application de la procédure mentionnée plus haut, pour chaque station, seules les années pour lesquelles 150 jours ou plus de données valides étaient disponibles sur la période de mai à octobre ont été retenues; ensuite, seules les stations pour lesquelles il restait au moins cinq années de données ont été retenues pour les analyses. De cette façon, on conserve donc 9 pluviomètres à auget d'Environnement Canada et 10 pluviomètres à auget de la ville de Québec pour les calculs concernant les événements extrêmes (courbes IDF). Les stations retenues et leurs caractéristiques sont présentées plus en détail à la section 7.1.

3.2.1 Recommandation pour la validation des données

À la lumière des observations présentées précédemment, il apparaît évident que certaines données identifiées comme « valides » dans la base de données de pluviométrie de la ville seraient en réalité « non valides ». Si on prévoit dans le futur que les données enregistrées aux 28 pluviomètres à auget actuellement en opération à la ville soient utilisées à des fins d'analyse, il est impératif de mettre en place des mécanismes adéquats de validation de ces données. Ainsi, avant l'analyse des données enregistrées au cours d'une année, il s'avère indispensable de s'assurer de la cohérence des enregistrements. Une façon de procéder pourrait être de calculer, pour chaque journée et pour chaque pluviomètre, le maximum de pluie enregistré sur diverses durées variant de 5 minutes à 24 heures. Puis, tel que suggéré à la section précédente, chacune de ces valeurs maximales pourrait être comparée à la moyenne des maxima calculés pour toutes les autres stations. Un message d'alerte pourrait alors être émis dès que l'écart relatif entre un maximum, pour une durée et une station, et la moyenne du maximum correspondant aux autres stations dépasse un certain seuil prédéfini. Pour chaque station et pour chaque journée pour lesquelles un message d'alerte aura été émis, il faudrait alors s'interroger sur le bon fonctionnement de chaque équipement (auget, enregistreur, système de transmission de données, etc.) et finalement statuer sur la validité ou non de l'enregistrement. Cependant, puisque la méthode de validation appliquée revêtira nécessairement une certaine subjectivité, les données brutes devraient tout de même être archivées dans leur intégralité.

4. Analyses descriptives

4.1 Pluviométrie moyenne

Afin d'illustrer la variation spatiale de la pluviométrie dans la région de Québec, les moyennes de pluies annuelle et hivernale ont été calculées pour les stations d'Environnement Canada ayant un historique de pluviométrie quotidienne d'au moins 10 ans² (pour calculer une moyenne qui soit significative). Les Figures 4-1 et 4-2 présentent les résultats de cette analyse. La première constatation qui émane de ces figures est que la pluie annuelle moyenne à la station de Charlesbourg-Parc-Orléans (7011309) est manifestement plus élevée qu'aux autres stations; des vérifications statistiques (test de Student) montrent par ailleurs que la pluie annuelle moyenne est significativement plus élevée à la station de Charlesbourg-Parc-Orléans qu'à 10 des 14 autres stations considérées. Également, on peut voir à la Figure 4-2 que la pluie hivernale moyenne varie sensiblement d'une station à l'autre (de 63 à 118 mm), ce qui peut en partie être expliqué par la grande variabilité interannuelle de la pluie hivernale totale et par les différences d'altitude, mais aussi par les différentes périodes couvertes par chacune des stations. En effet, les analyses de tendances (voir section 5.2) montrent que la pluie hivernale totale a augmenté de façon importante entre les années '50 et '80 dans la région de Québec. Ainsi, une station dont les enregistrements couvrent seulement la dernière partie du XX^e siècle a plus de chance de présenter une moyenne de pluie hivernale plus élevée qu'une station couvrant une période antérieure. Par ailleurs, la variabilité interannuelle de la pluie hivernale totale est telle que seules quatre stations (7011170, 7016280, 7016281 et 7016294) présentent une pluie hivernale moyenne significativement différente de la pluie hivernale moyenne la plus élevée, soit celle de la station de Ste-Foy-Matapédia (7017B65).

² Soit les stations 7020567, 7011170, 7011308, 7011309, 7041330, 7012232, 7024254, 7016280, 7016281, 7016294, 7016900, 7017BFN, 7017B65, 7027391 et 7018577.

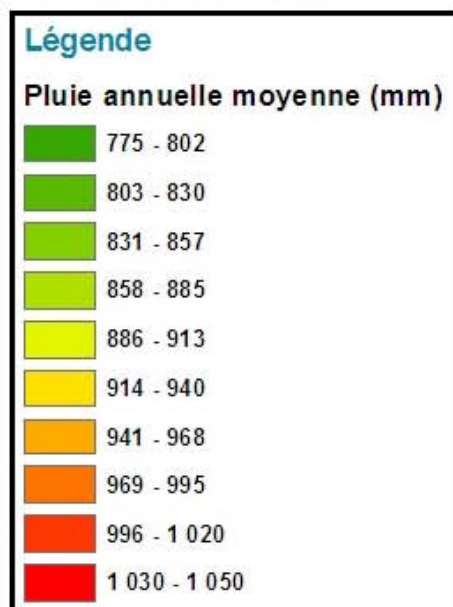
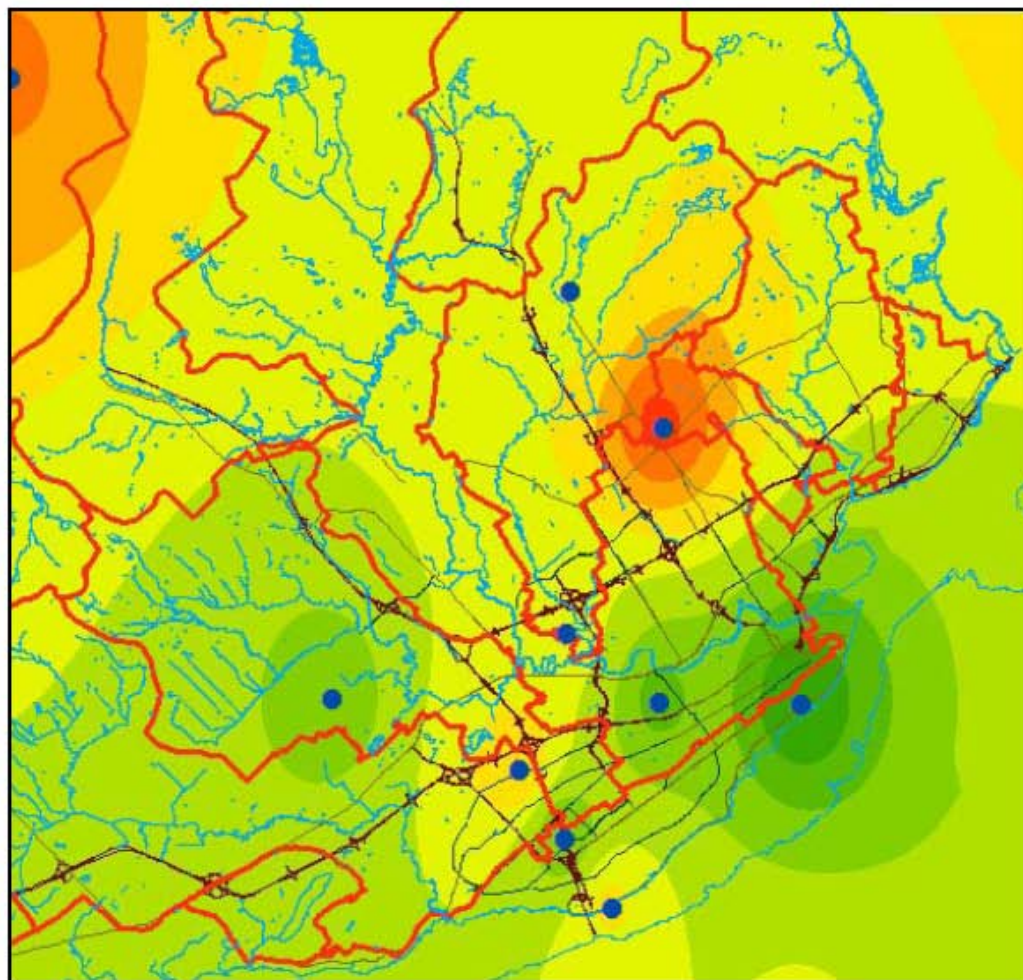


Figure 4-1 Distribution spatiale de la pluie annuelle moyenne dans la région de Québec (mm)
(pluviomètres d'Environnement Canada)

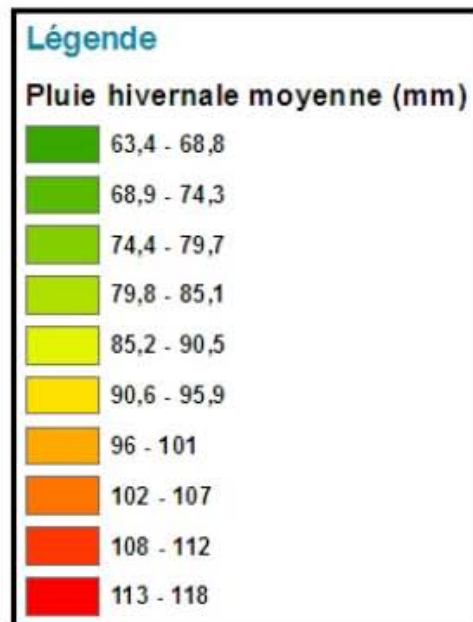
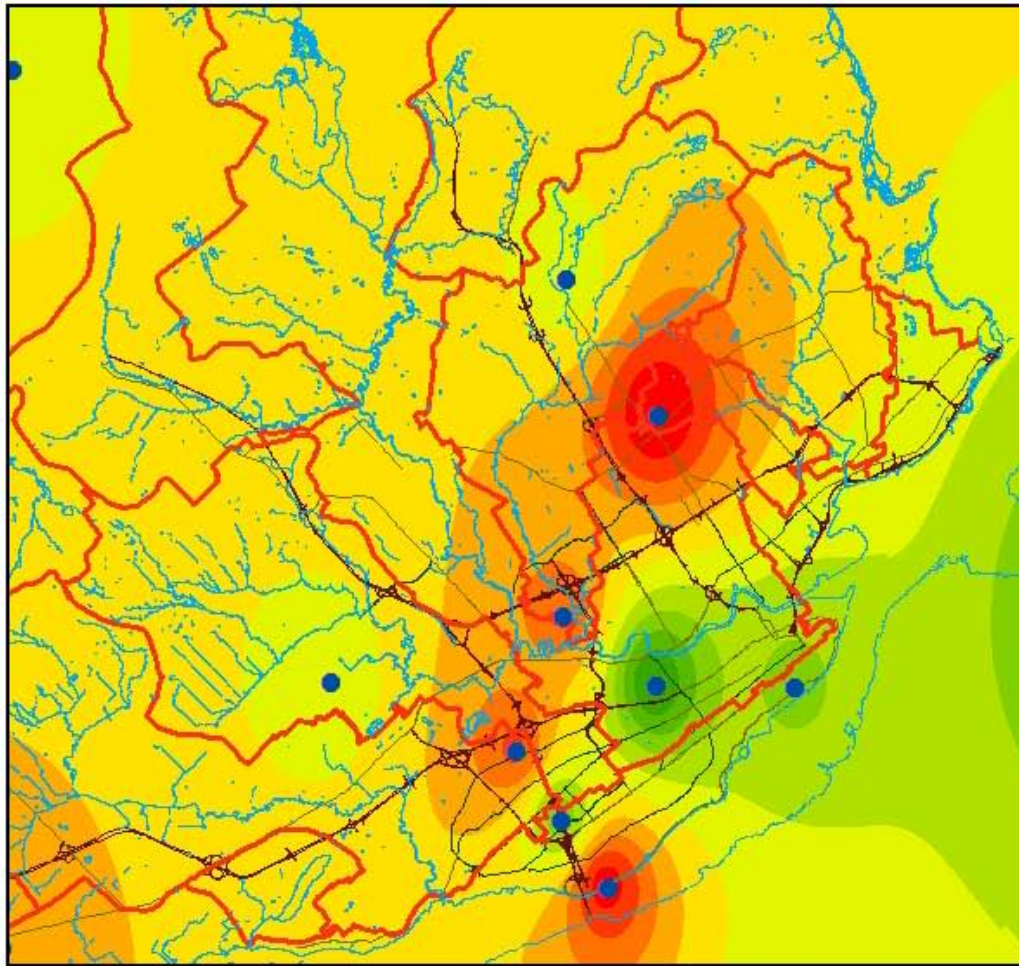


Figure 4-2 Distribution spatiale de la pluie hivernale moyenne (décembre à mars) dans la région de Québec (mm) (pluviomètres d'Environnement Canada)

4.2 Maxima annuels

Afin de donner un aperçu de la répartition spatiale de l'intensité des événements pluvieux majeurs sur le territoire de la ville de Québec, il est possible de tracer la carte de la moyenne des maxima annuels de pluie pour des durées 5 minutes à 24 heures. À titre informatif, ces cartes sont données aux Figures 4-3 à 4-11. On doit cependant interpréter ces cartes avec une certaine réserve puisqu'elles sont réalisées à partir de pluviomètres à auget dont les périodes d'enregistrement varient considérablement d'un pluviomètre à l'autre. Ainsi, puisque la variabilité interannuelle des maxima annuels est importante, ces cartes peuvent donner une fausse idée de la réalité. En effet, supposons qu'une station ait une série de mesures qui s'étale sur cinq années seulement, parmi lesquelles on retrouve deux années ayant connu des événements pluvieux beaucoup plus intenses que la normale. Supposons maintenant qu'une autre station, située à quelques kilomètres de la première, possède également une courte série de mesures, couvrant cette fois-ci une période ayant connu moins d'événements intenses que la normale. Une carte illustrant la variabilité spatiale de l'intensité des événements extrêmes qui aurait été tracée à partir des données de ces deux stations pourrait indûment faire croire que l'intensité des événements est en moyenne plus élevée dans le voisinage de la première station que dans celui de la seconde. Or, il est fort probable que les différences entre les maxima annuels à ces deux stations soient principalement causées par la variabilité des précipitations entre les périodes couvertes par les séries de mesures de chaque station, plutôt que par leur différente localisation sur le territoire. Ainsi, les cartes des Figures 4-3. à 4-11 ne reflètent que les données disponibles³ sans pour autant être représentatives de la réelle distribution spatiale des événements pluvieux intenses sur le territoire de la Ville de Québec.

³ Les maxima annuels utilisés pour produire ces cartes sont présentés en détails à l'Annexe 3.

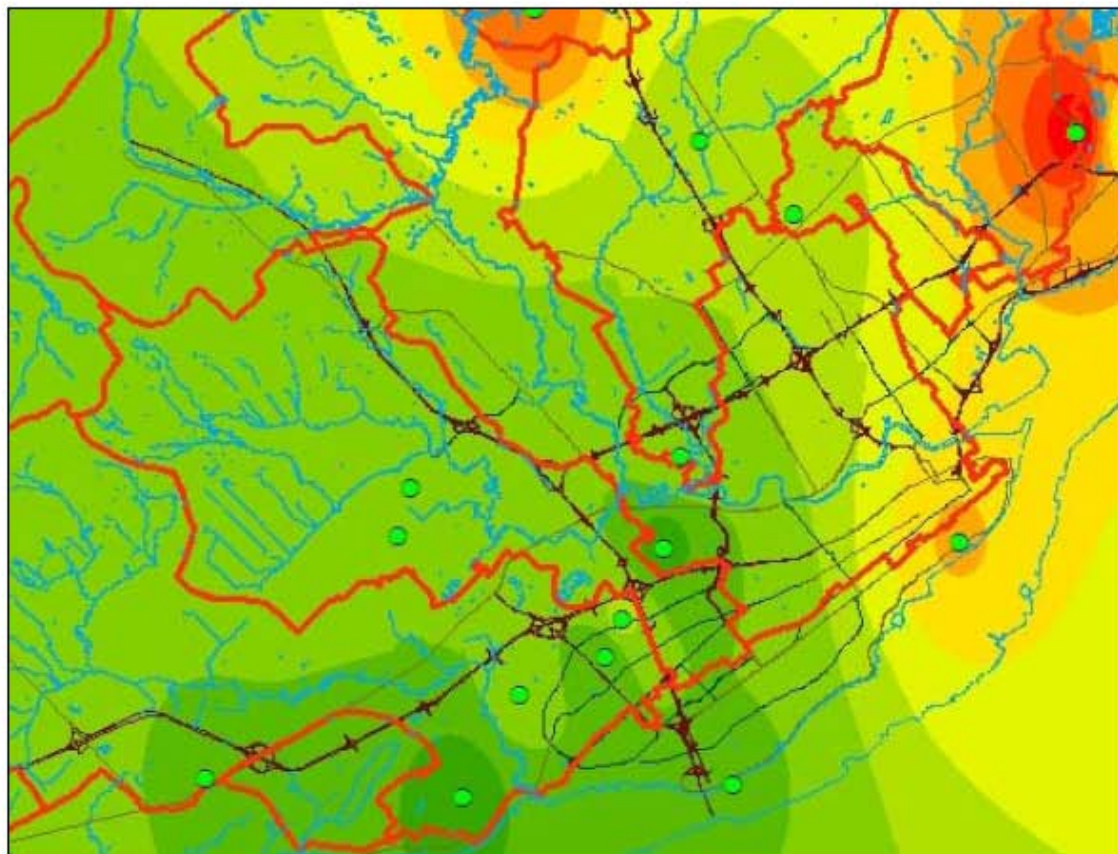


Figure 4-3 Maximum annuel moyen de pluie sur 24 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

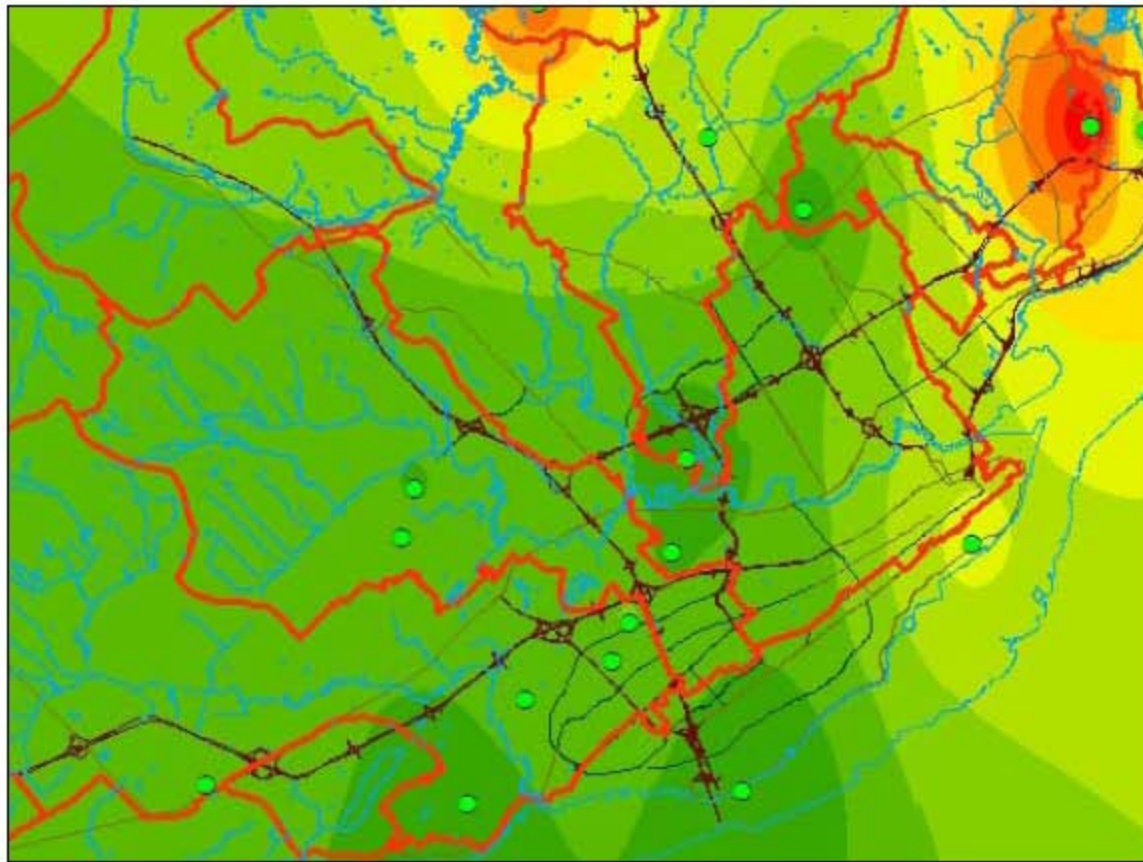


Figure 4-4 Maximum annuel moyen de pluie sur 12 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

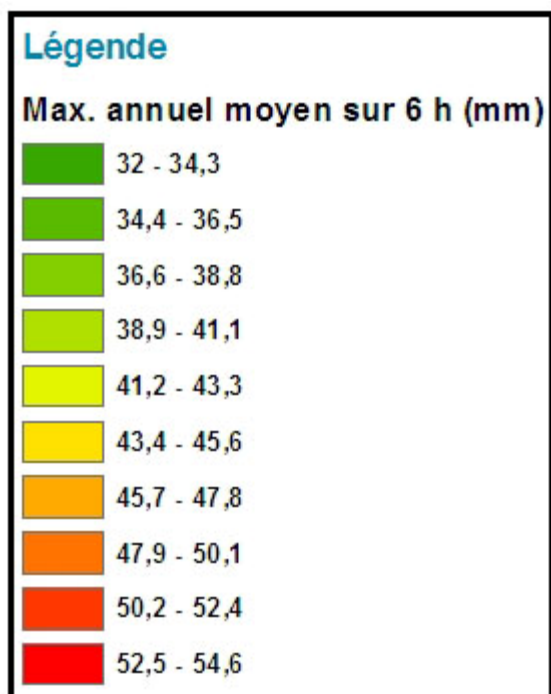
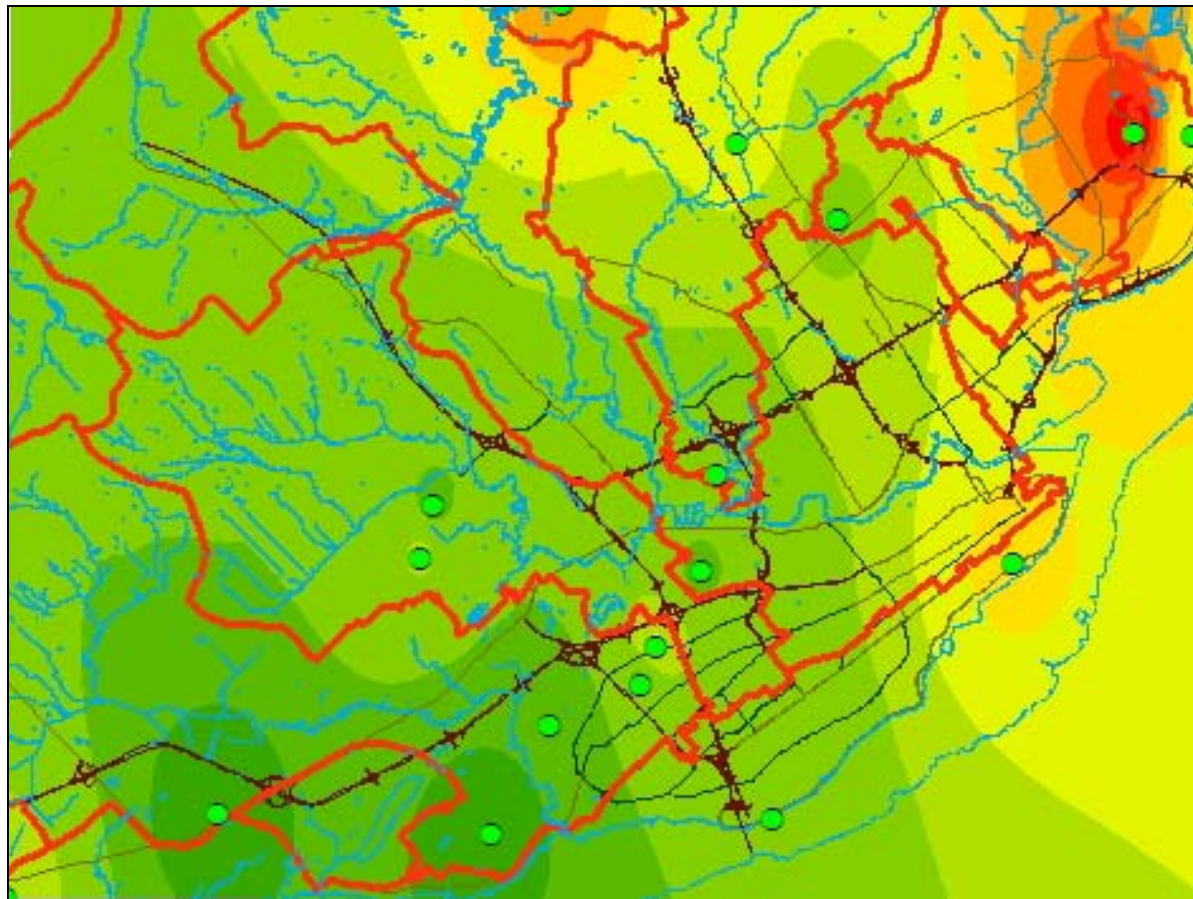


Figure 4-5 Maximum annuel moyen de pluie sur 6 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

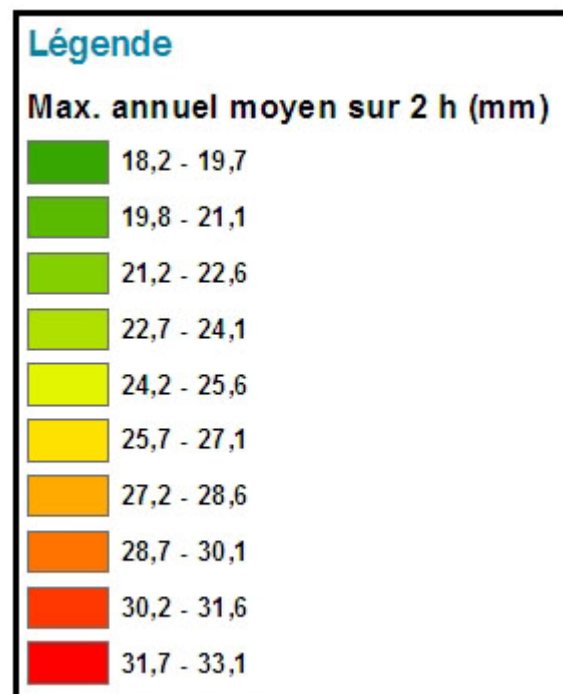
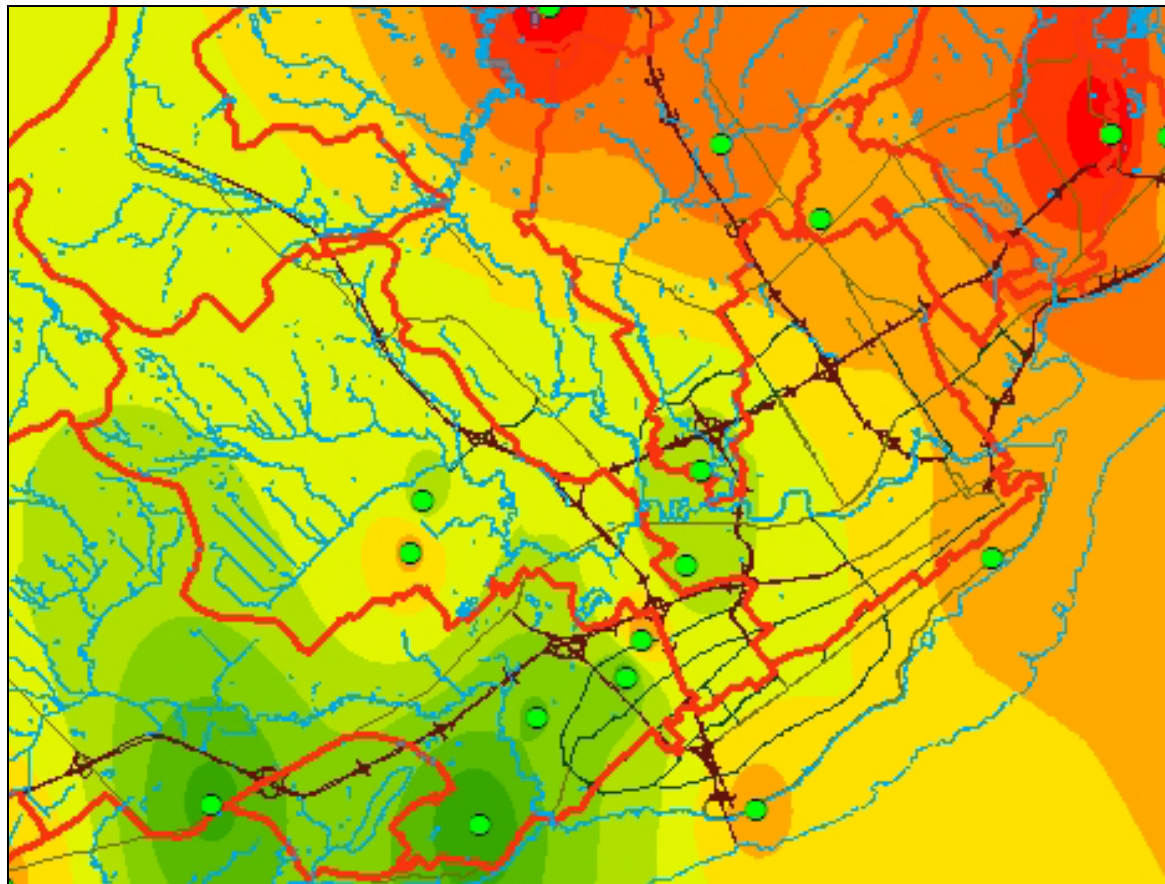


Figure 4-6 Maximum annuel moyen de pluie sur 2 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

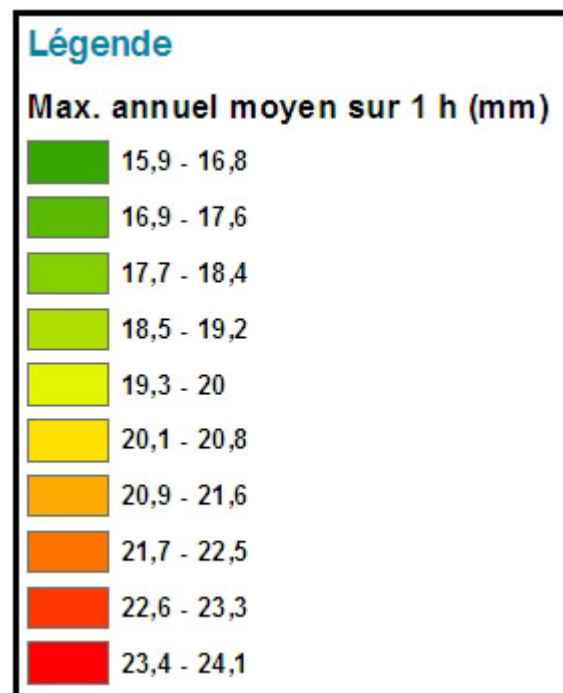
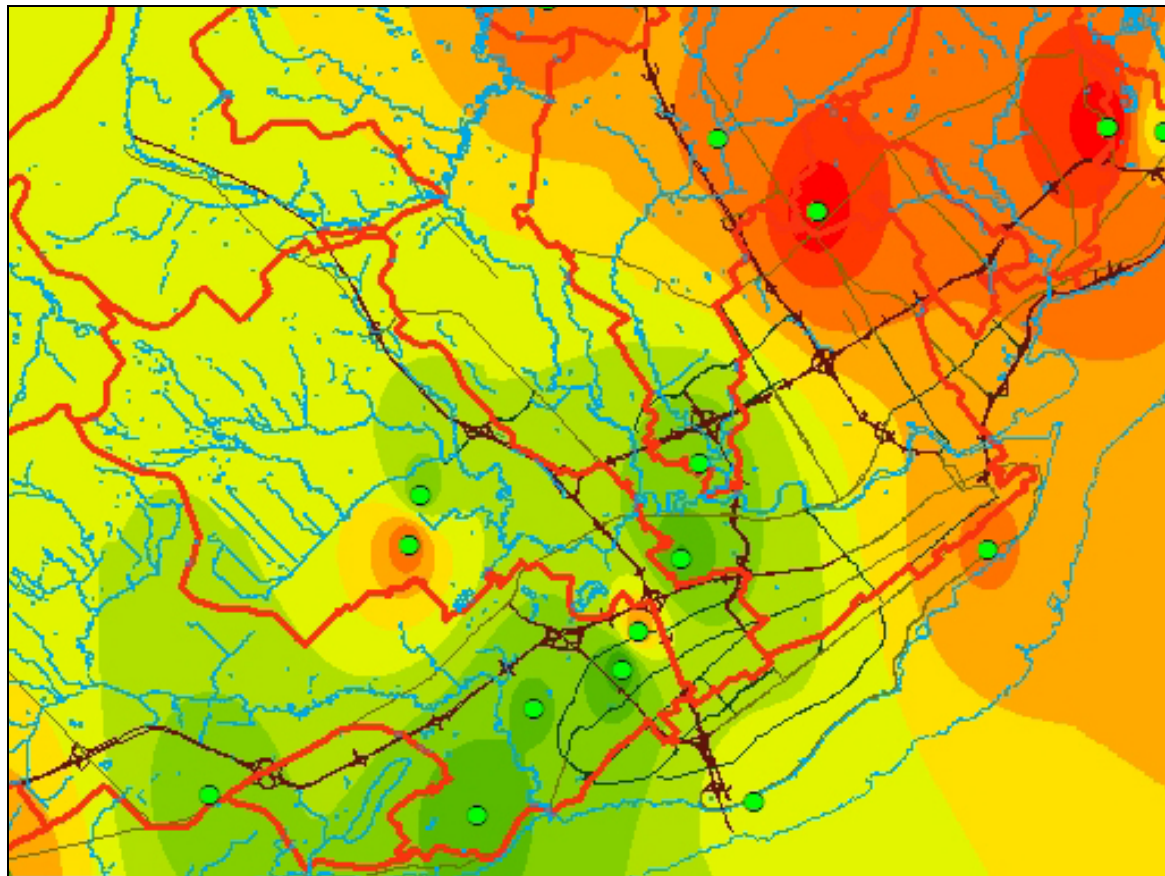


Figure 4-7 Maximum annuel moyen de pluie sur 1 h (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

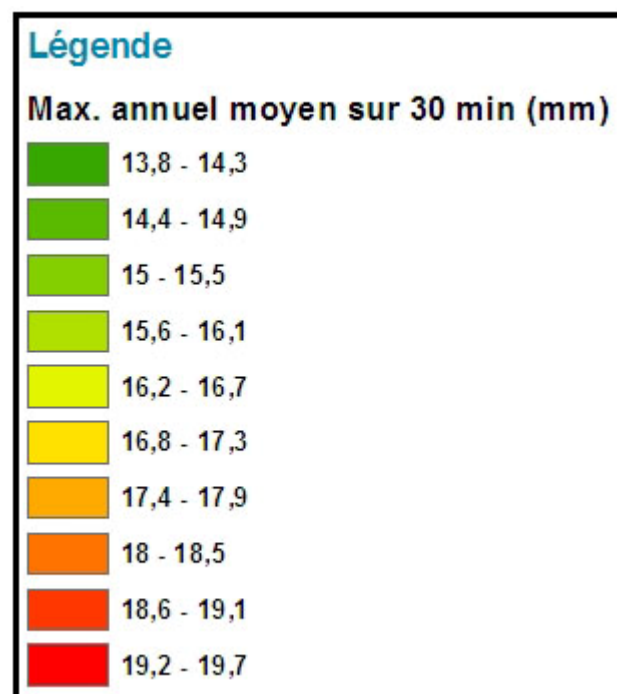
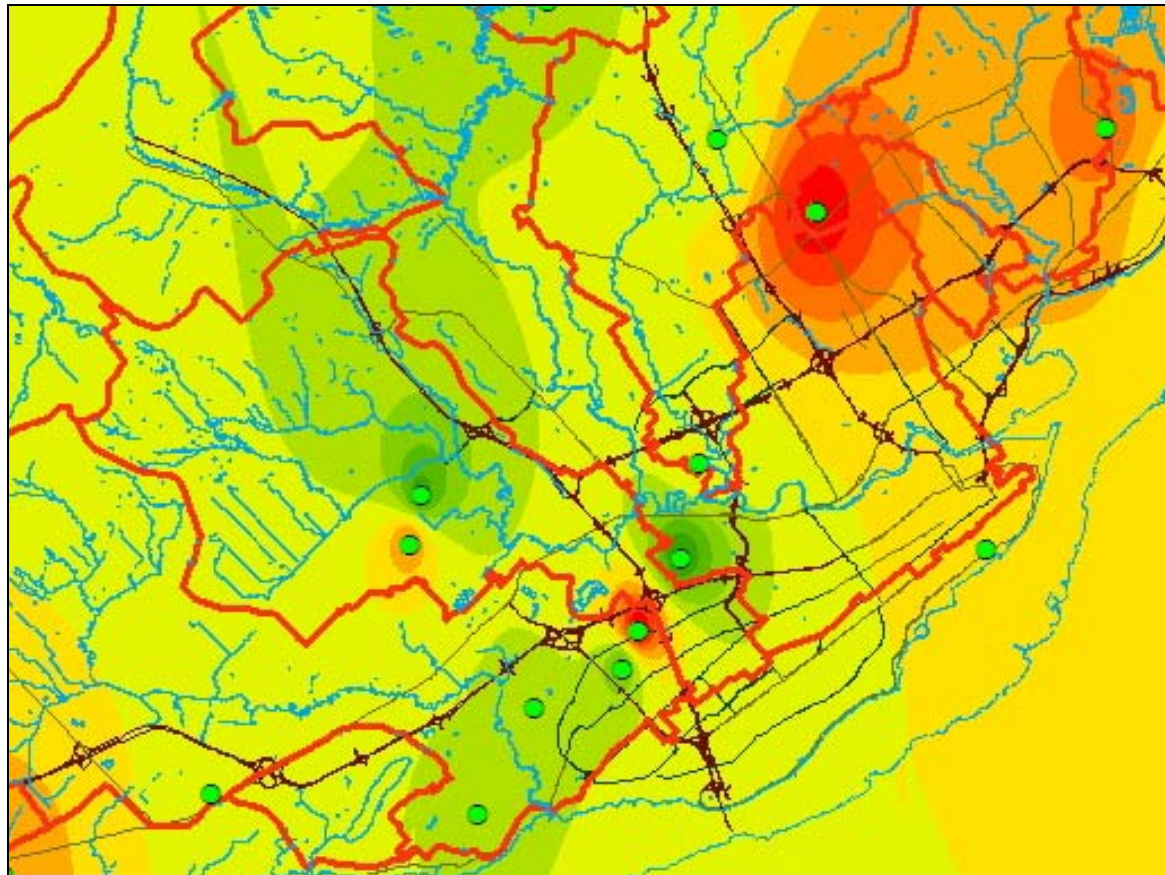


Figure 4-8 Maximum annuel moyen de pluie sur 30 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

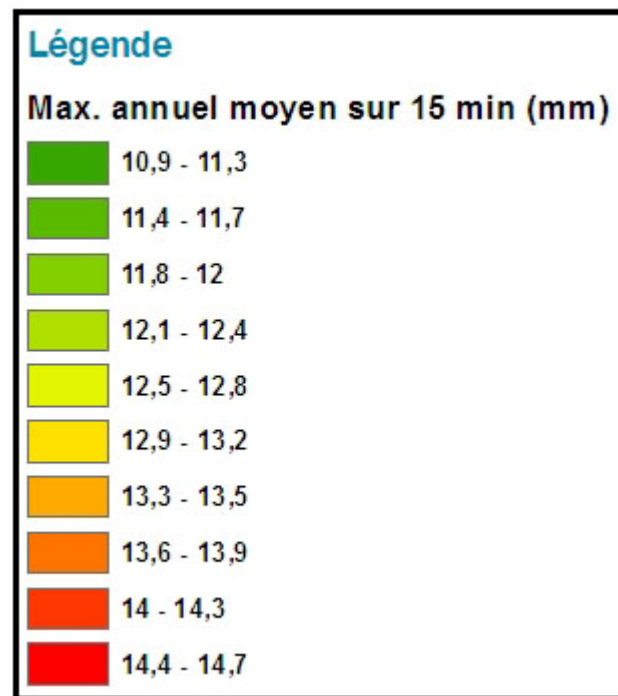
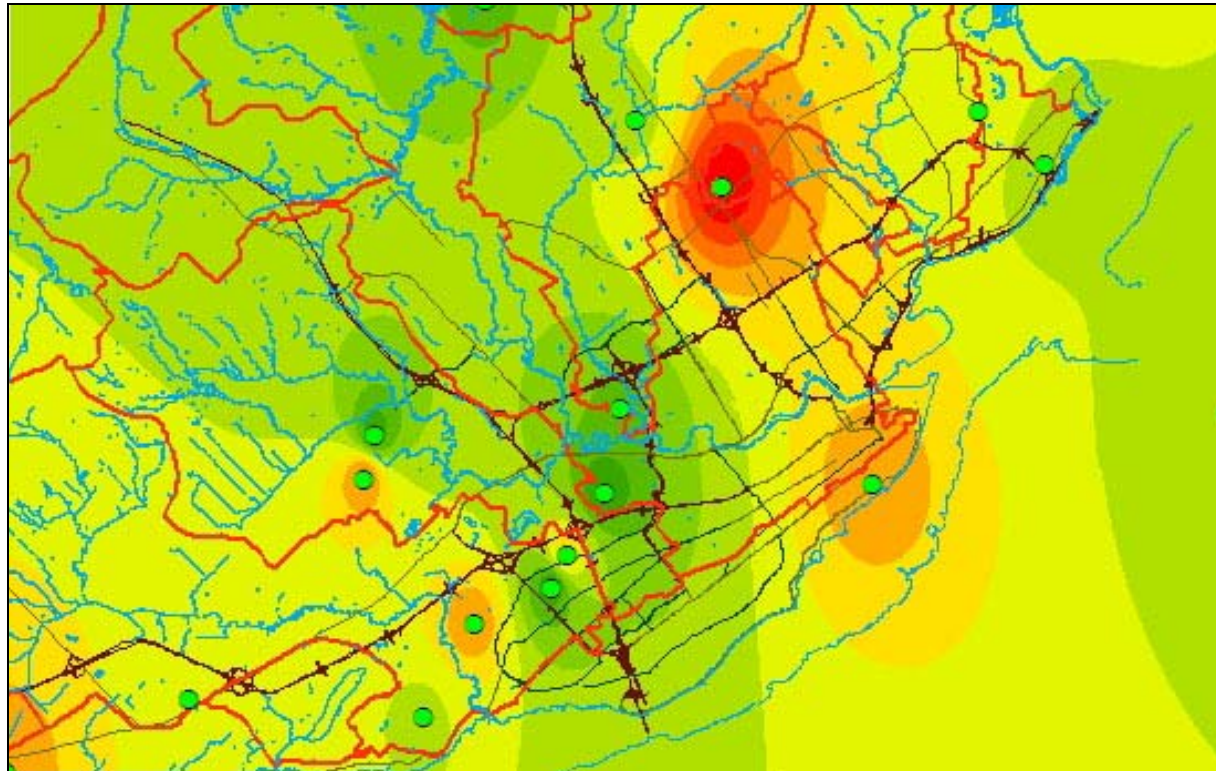


Figure 4-9 Maximum annuel moyen de pluie sur 15 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

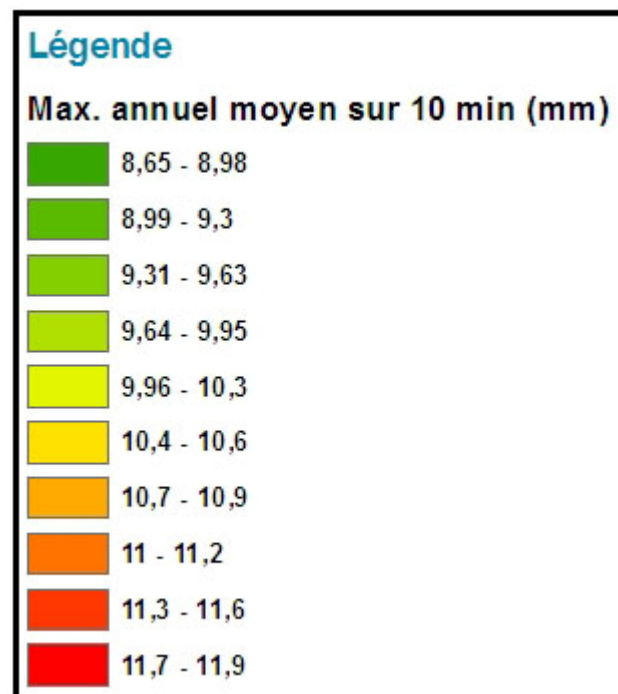
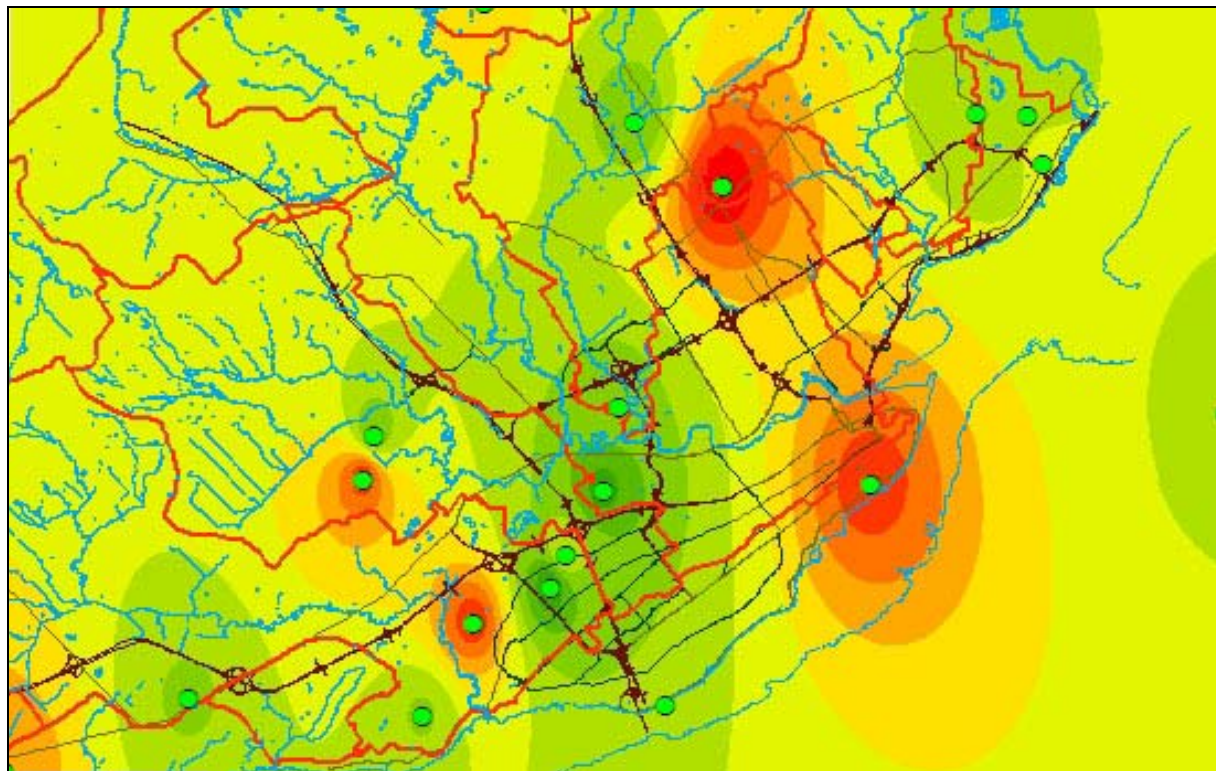


Figure 4-10 Maximum annuel moyen de pluie sur 10 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

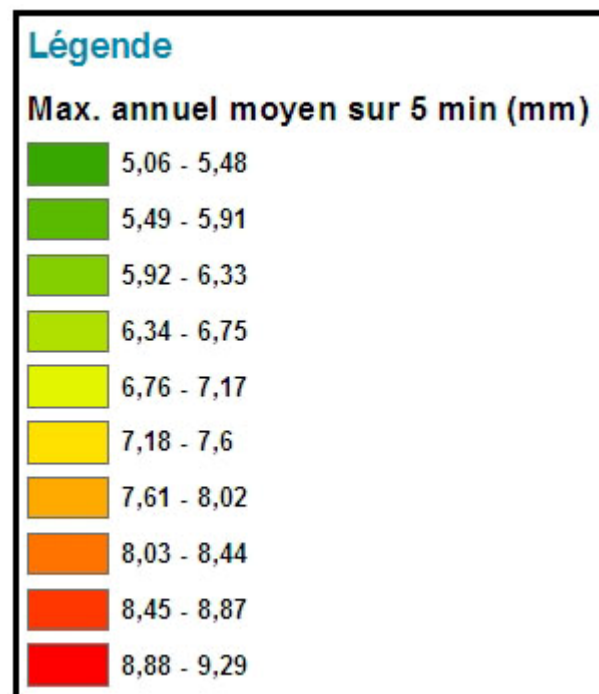
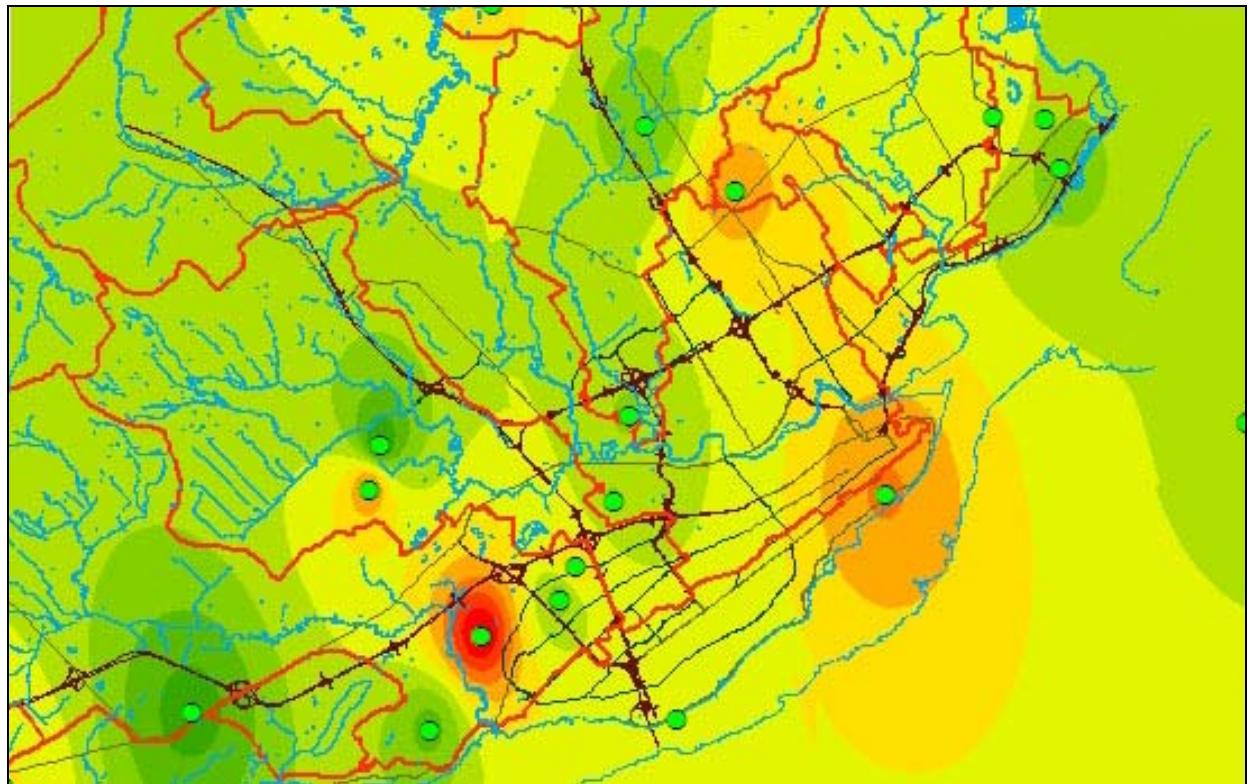


Figure 4-11 Maximum annuel moyen de pluie sur 5 min (mm) dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

Pour illustrer comment la localisation de l'intensité maximale peut varier d'une année à l'autre sur le territoire, nous avons tracé aux Figures 4-12 à 4-14 les cartes du maximum annuel de pluie enregistré sur 24 heures, pour les années 1989, 2004 et 2005 respectivement. Aucune autre année ne permet d'avoir une aussi bonne couverture spatiale de l'intensité maximale des précipitations à partir des données disponibles. À l'examen des Figures 4-12 à 4-14, on constate que l'analyse des maxima annuels des années 1989, 2004 et 2005 ne permet de tirer aucune conclusion sur la répartition spatiale de l'intensité des maxima annuels de pluie sur une durée de 24 h sur le territoire de la ville de Québec. Le même genre d'observation peut être tirée pour des durées d'événements de 5 min à 12 h.

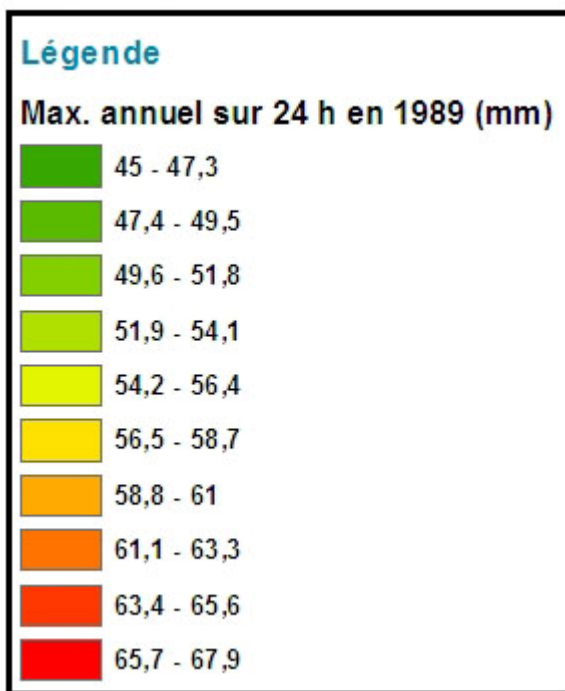
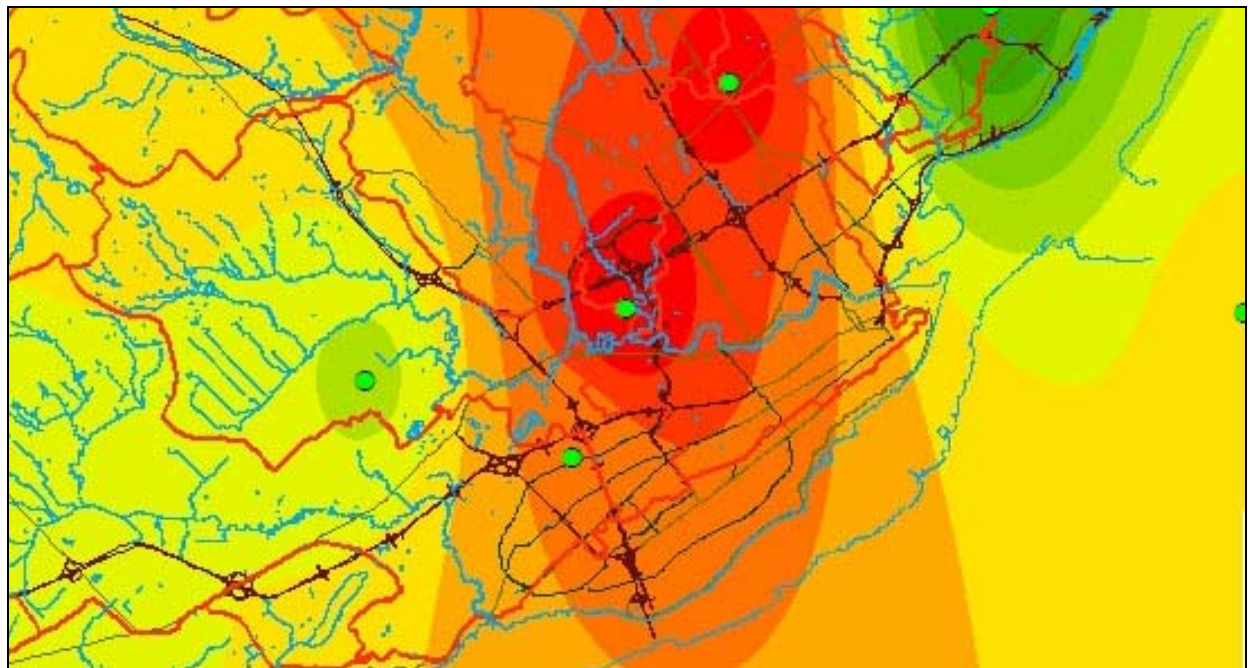


Figure 4-12 Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 1989 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

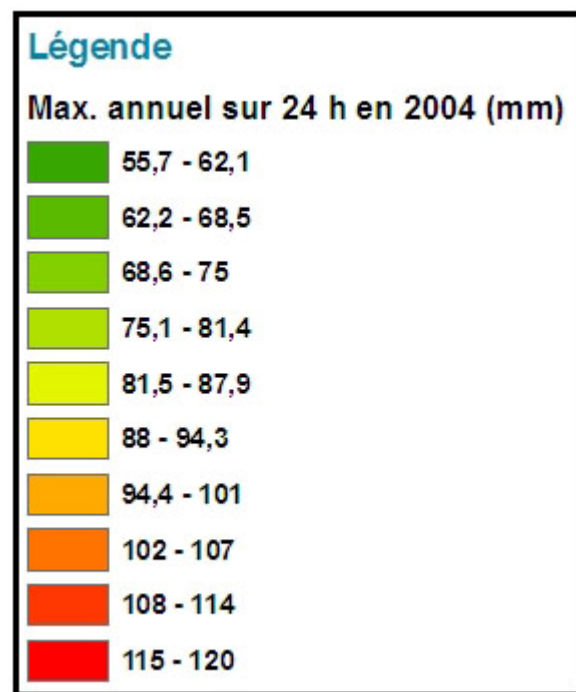
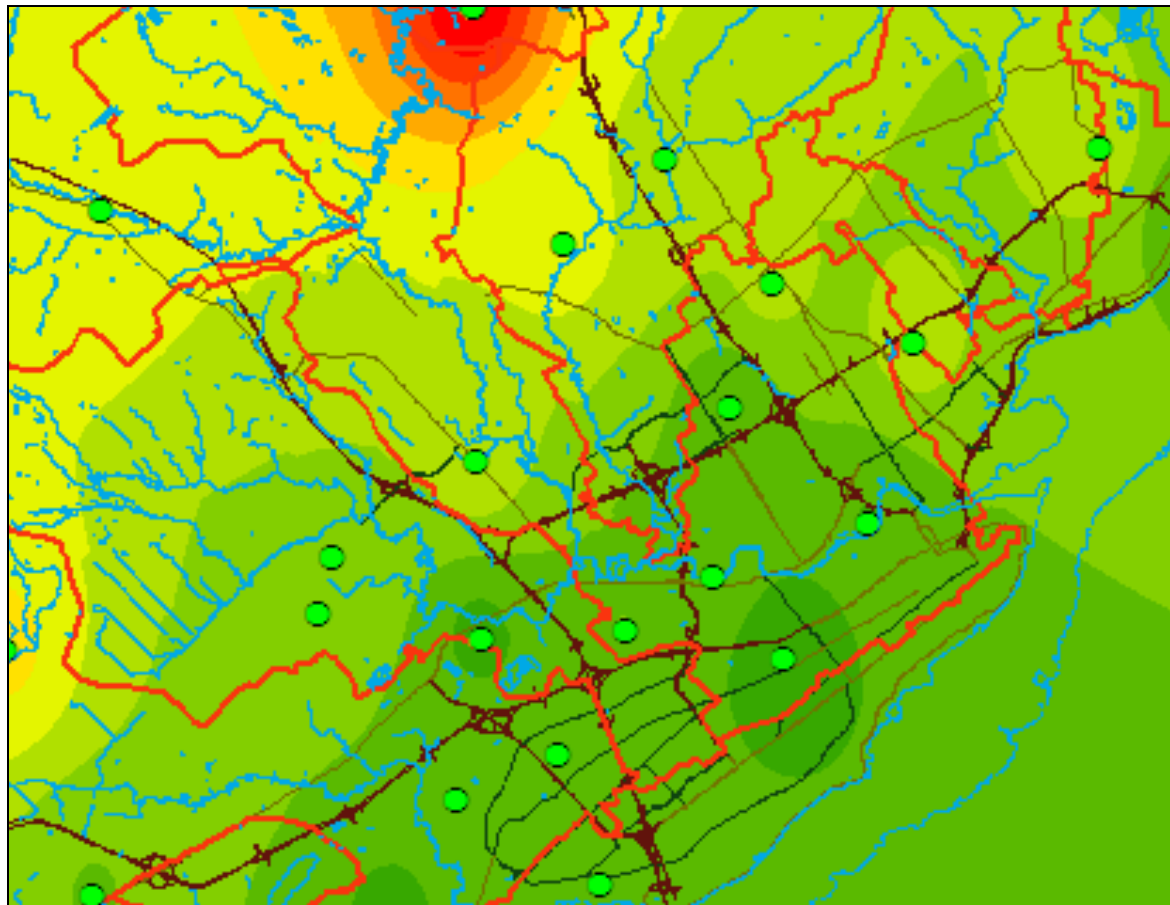


Figure 4-13 Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 2004 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

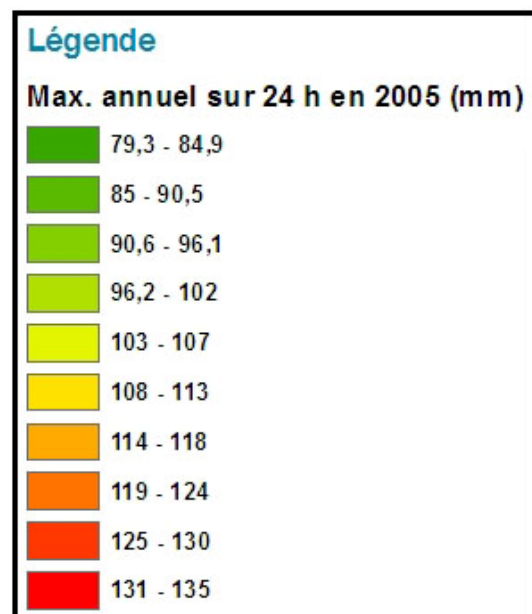
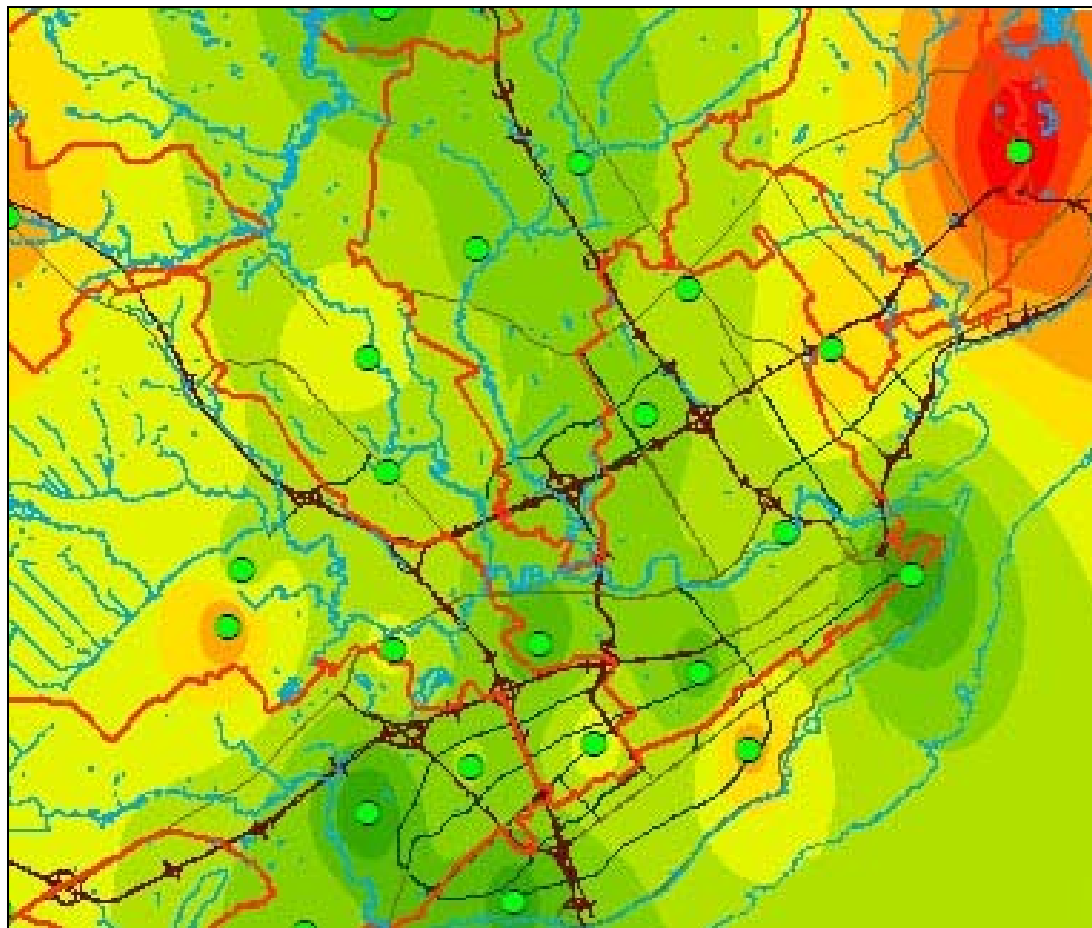


Figure 4-14 Maximum de pluie enregistré sur 24 h (mm) en 2005 dans la région de Québec (pluviomètres d'Environnement Canada et de la Ville de Québec)

5. Analyses de tendances

Des analyses de tendances ont été réalisées en vue de caractériser l'évolution temporelle du profil des précipitations sur le territoire de la ville de Québec, tant en ce qui concerne la pluie totale annuelle et hivernale que l'intensité des événements extrêmes (maxima annuels). Dans tous les cas, seules les stations possédant un historique de données d'au moins 15 années ont été prises en compte, puisque les tendances, à moins d'être fortement prononcées, peuvent difficilement être détectées sur des séries plus courtes.

Deux tests statistiques distincts ont été appliqués dans le cadre des analyses de tendance. En premier lieu, la présence ou l'absence de tendances dans les différentes données a été déterminée par le test non paramétrique de Mann-Kendall, en retenant un seuil d'acceptation de 5 %⁴. En second lieu, la pente de la tendance détectée, le cas échéant, a été estimée en se basant sur la corrélation des rangs de Kendall, tel que suggéré par Sen (1968) et décrit dans Wang et Swail (2001).

5.1 Pluie annuelle totale

Les tendances sur la pluie annuelle totale ont été évaluées à partir des données quotidiennes de pluie mesurée aux stations d'Environnement Canada. À chaque station, seules les années contenant au moins 335 jours de données (336 pour les années bissextiles) ont été conservées pour les calculs de tendance, ce qui correspond aux années avec moins de 9 % de données manquantes. Le Tableau 5-1 résume les données et résultats de cette analyse de tendance. Notons que, au seuil d'acceptation retenu, on peut conclure qu'une tendance existe effectivement dans les séries pour lesquelles le degré de signification (*p-value*) est inférieur ou égal à 0,05.

⁴ Un seuil d'acceptation de 5 % signifie qu'on accepte l'hypothèse d'une tendance lorsqu'il y a moins de 5 % de chance qu'il n'y ait effectivement pas de tendance.

Tableau 5-1 Données et résultats de l'analyse de tendance pour la pluie annuelle totale (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

<i>Station</i>	<i>Nb années</i>	<i>Début</i>	<i>Fin</i>	<i>Degré de signification (p-value) test de Mann-Kendall</i>	<i>Pente (mm/an)</i>
7011170	27	1912	1939	0,59	
7011309	24	1972	1996	0,98	
7012232	20	1972	1992	0,50	
7016280	83	1873	1958	0,00	2,2
7016294	51	1944	1994	0,00	5,8
7016900	22	1965	1988	0,55	
7018577	17	1956	1974	0,04	13,5
7020567	25	1977	2002	0,44	
7024254	23	1979	2002	0,29	
7027391	16	1969	1984	0,39	
7041330	20	1981	2002	0,92	
7017BFN	21	1973	1995	0,49	

À l'examen du tableau précédent, on constate des tendances significatives dans la pluie annuelle totale pour les stations 7016294 (1944-1994, Aéroport de Québec), 7016280 (1873-1958, Québec Ville) et 7018577 (1956-1974, Valcartier Fes). Aucune tendance ne peut être détectée dans les autres séries de mesures. Ceci pourrait provenir du fait que les séries observées aux autres stations ne sont pas suffisamment longues pour détecter une tendance significative à ces stations. En effet, plus une série est courte, plus la tendance doit être marquée afin d'être détectée par les analyses statistiques. À cet égard, bien que la série de mesures soit relativement courte à la station 7018577 (17 ans), une tendance significative à la hausse y est tout de même détectée. Ceci provient du fait que l'augmentation de la pluviométrie annuelle fut tellement importante au cours de la période 1956-1974 à Valcartier (13,5 mm par année en moyenne) que même une courte série peut mener à l'identification d'une tendance significative sur cette période. Notons par ailleurs que les données observées à l'aéroport Jean-Lesage révèlent également une hausse importante de la pluie annuelle totale de 1956 à 1974.

La Figure 5-1 donne un aperçu de l'évolution de la pluie annuelle totale sur le territoire de la ville de Québec, telle que mesurée aux stations pour lesquelles des tendances significatives ont été détectées (stations Québec Aéroport, Québec Ville et Valcartier Fes). En résumé, si on considère que la pluie mesurée à l'aéroport Jean-Lesage et à la station Québec Ville est

représentative de la pluviométrie sur l'ensemble du territoire de la ville⁵, on peut conclure que la pluie annuelle totale s'est accrue en moyenne de 2,2 mm par année (intervalle de confiance à 95 % = 1,0 à 3,3 mm/an) de 1873 à 1958 et de 5,8 mm par année (intervalle de confiance à 95 % = 3,1 à 8,3 mm/an) de 1944 à 1994 à Québec. Malheureusement, les données disponibles ne permettent pas de statuer sur l'évolution récente (1995-2005) de la pluie annuelle totale à Québec.

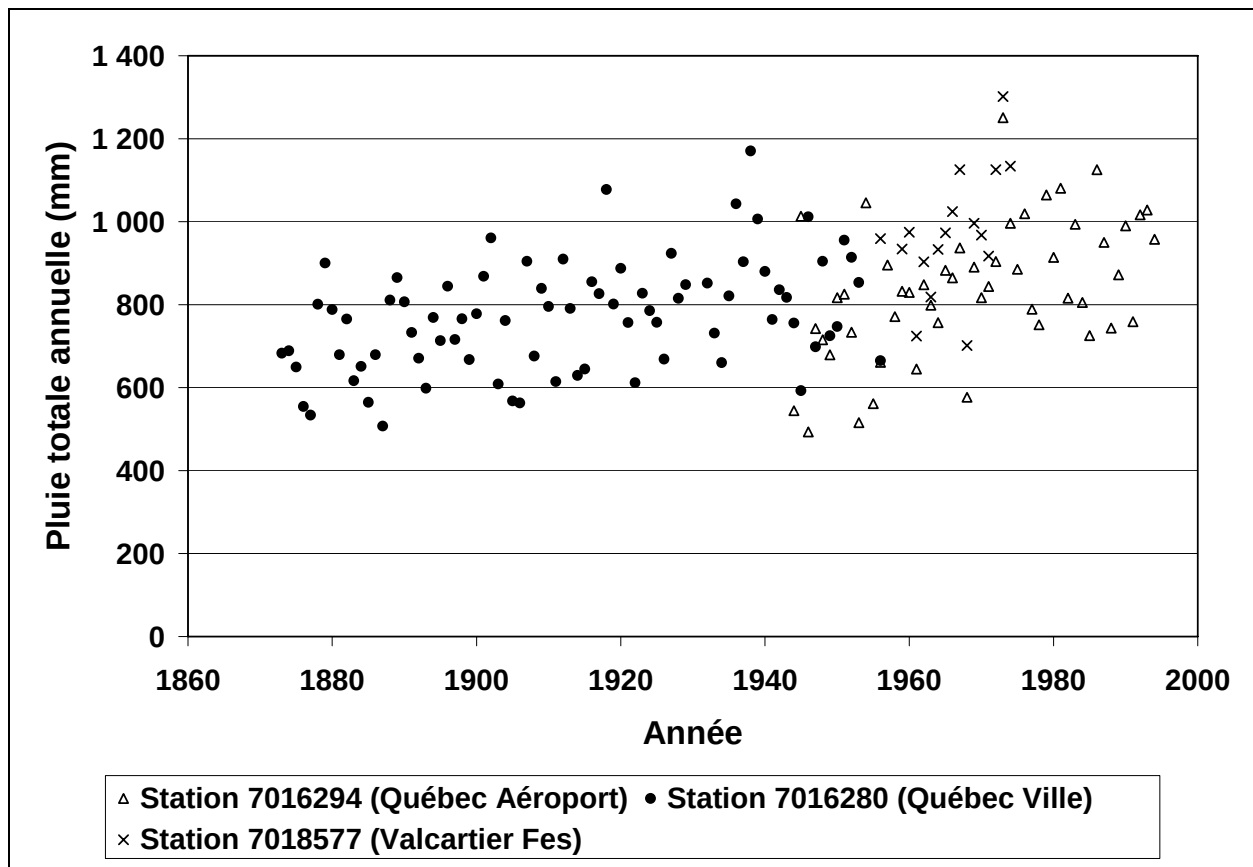


Figure 5-1 Évolution de la pluie annuelle totale aux stations pour lesquelles une tendance significative a été détectée (stations Québec Aéroport, Québec Ville et Valcartier Fes)

⁵ Le coefficient de corrélation entre la pluie annuelle totale à la station 7016294 et aux autres stations varie de 0,80 à 0,93, tandis qu'il est de 0,90 entre la pluie annuelle totale à la station 7016280 et aux deux autres stations possédant des données concomitantes (7011170 et 7016294).

Afin d'illustrer plus clairement la tendance à la hausse observée dans la pluie annuelle à Québec aux stations Québec Ville (de 1873 à 1958) et Québec Aéroport (de 1944 à 1994), la Figure 5-2 montre la pluie annuelle mesurée à chacune de ces stations (points) en compagnie de la tendance calculée à chacune (lignes pleines). Sur cette même figure, les lignes pointillées correspondent à la valeur de la tendance additionnée (ligne la plus élevée) ou soustraite (ligne la moins élevée) d'une valeur équivalente à 2 fois l'écart-type de la pluie annuelle mesurée à chacune des stations; les lignes pointillées peuvent donc être assimilées aux bornes supérieures et inférieures de l'intervalle de confiance à 95 % de la pluie annuelle.

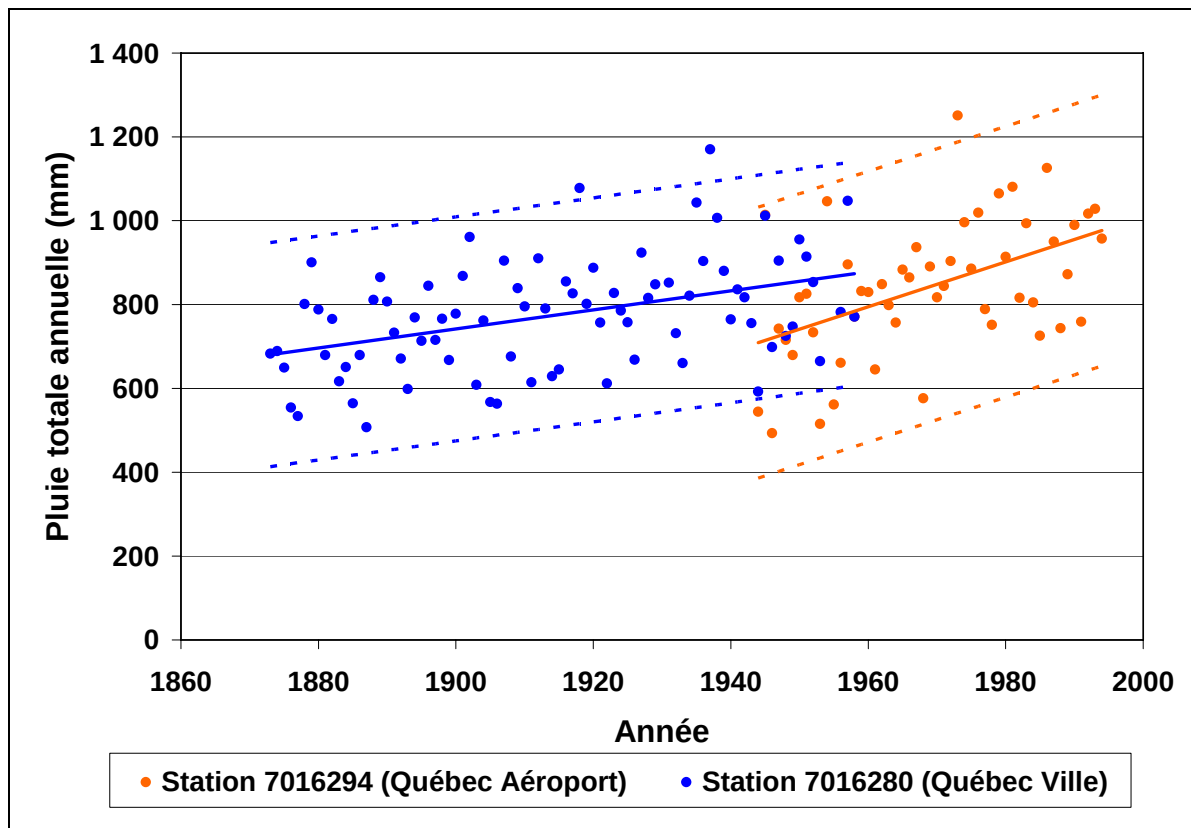


Figure 5-2 Pluie annuelle à Québec - valeurs annuelles (points) et tendances (lignes pleines); les lignes pointillées représentent l'intervalle de confiance à 95 % de la pluie annuelle à chacune des deux stations (stations Québec Ville et Québec Aéroport)

5.2 Pluie hivernale totale

Les tendances sur la pluie hivernale totale ont été évaluées à partir des données quotidiennes de pluie mesurée aux stations d'Environnement Canada. Pour chaque année, les hauteurs de pluie mesurées en janvier, février et mars ont été additionnées à celle mesurée en décembre de

l'année précédente. À chaque station, seules les années contenant au moins 115 jours de données (116 pour les années bissextiles) au cours des quatre mois d'hiver (décembre, janvier, février et mars) ont été conservées pour les calculs de tendance, ce qui correspond aux années avec moins de 5 % de données manquantes. Le Tableau 5-2 résume les données et résultats de cette analyse de tendance. Tel qu'il a été mentionné précédemment, on peut conclure qu'une tendance existe effectivement, au seuil d'acceptation retenu, pour les séries pour lesquelles le degré de signification (*p-value*) est inférieur ou égal à 0,05.

Tableau 5-2 Données et résultats de l'analyse de tendance pour la pluie hivernale totale (décembre, janvier, février et mars) (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

Station	Nb années	Début	Fin	Degré de signification (<i>p-value</i>) test de Mann-Kendall	Pente (mm/an)
7011170	28	1912	1940	0,95	0,9
7011309	25	1972	1997	0,22	
7012232	22	1972	1993	0,40	
7016280	84	1873	1958	0,94	
7016294	52	1944	1995	0,05	
7016900	23	1965	1989	0,92	6,1
7018577	18	1956	1977	0,02	
7020567	26	1977	2003	0,35	
7024254	23	1980	2003	0,79	
7027391	16	1969	1984	0,44	
7041330	22	1981	2003	0,52	
7017BFN	22	1973	1996	0,18	

À l'examen du tableau précédent, on constate des tendances significatives dans la pluie hivernale totale pour les stations 7016294 (1944-1994, Aéroport de Québec) et 7018577 (1956-1974, Valcartier Fes). Aucune tendance ne peut être détectée dans les autres séries de mesures. Ainsi, si on considère que la pluie mesurée à l'aéroport Jean-Lesage est représentative de la pluviométrie sur l'ensemble du territoire de la ville, on peut conclure que la pluie hivernale totale s'est accrue en moyenne de 0,9 mm par année (intervalle de confiance à 95 % = 0,0 à 1,9 mm/an) de 1944 à 1994 à Québec (station Québec Aéroport). Également, en tenant compte des considérations discutées précédemment au sujet de la longueur des séries de données (voir section 5.1) et des résultats obtenus pour la station 7016280, on peut conclure

que la pluie hivernale totale n'a pas subi d'augmentation significative de 1873 à 1958 à Québec (station Québec Ville).

Une forte augmentation de la pluie hivernale est d'ailleurs observée sur la période 1956-1977 (station Valcartier Fes). L'identification d'une forte tendance à la hausse par le test de Mann-Kendall sur cette période est due, en partie, aux années 1973 et 1974 au cours desquelles respectivement 264 mm et 213 mm de pluie ont été enregistrés pendant les mois de décembre, janvier, février et mars à la station Valcartier Fes; pour ces mêmes années, des totaux de 183 mm et 213 mm de pluie ont été enregistrés à l'aéroport Jean-Lesage pendant les 4 mois d'hiver. La Figure 5-3 offre une représentation visuelle de l'évolution dans le temps de la pluie hivernale totale, telle qu'observée à ces deux stations.

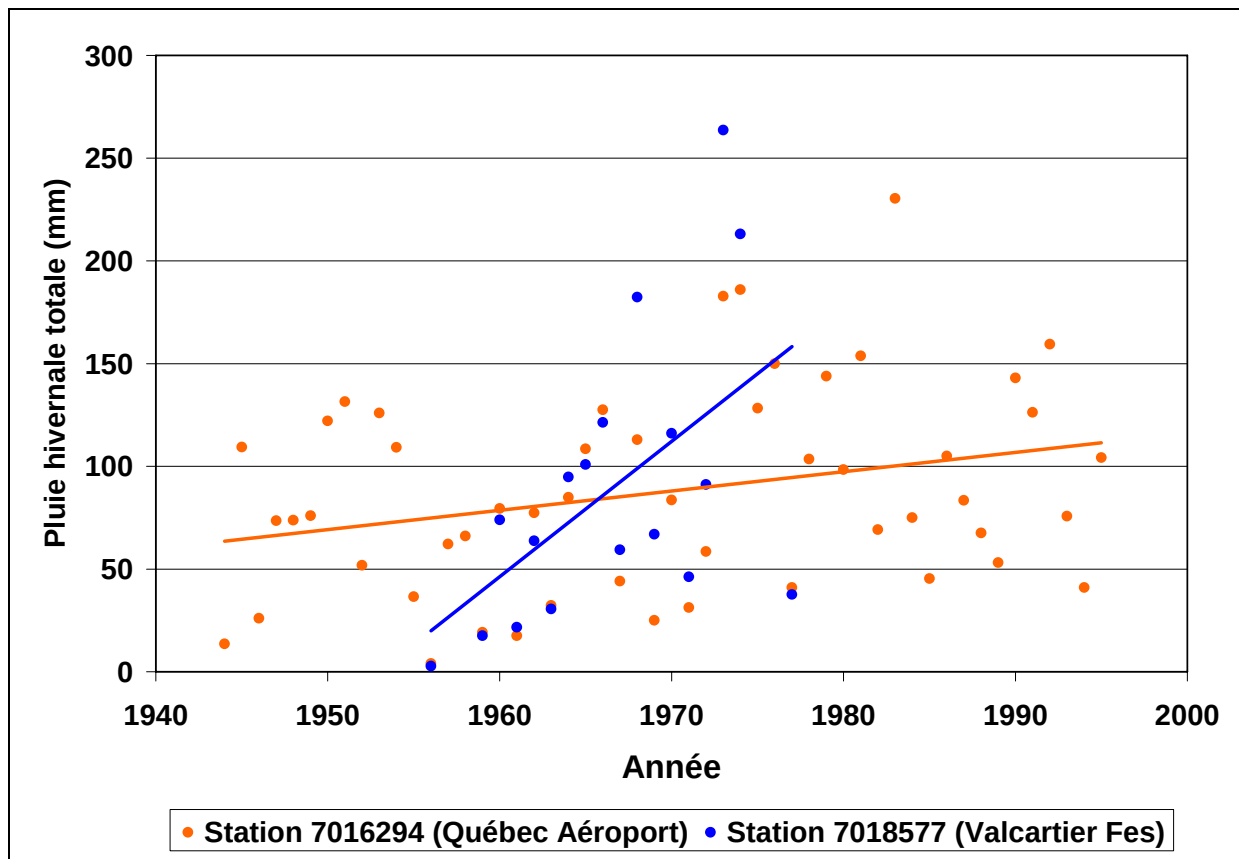


Figure 5-3 Évolution de la pluie hivernale totale (décembre, janvier, février et mars) aux stations pour lesquelles une tendance significative a été détectée (stations Québec Aéroport et Valcartier Fes) (les points représentent les observations et les droites, les tendances)

5.3 Précipitations annuelles et neige annuelle

Les analyses présentées à la section 5.1 ont révélé que la pluie annuelle totale s'est accrue de façon significative à la station Québec Ville de 1873 à 1958 ainsi qu'à l'aéroport Jean-Lesage de 1944 à 1994. Afin de vérifier si ces modifications sont principalement dues au réchauffement des températures (pouvant réduire le rapport neige sur pluie à chaque année et par conséquent augmenter la hauteur annuelle de pluie) ou encore à une augmentation des précipitations annuelles totales, nous avons réalisé des analyses de tendance sur la somme annuelle des hauteurs de pluie et de neige. Les résultats de ces analyses, présentés au Tableau 5-3, sont quelque peu différents de ceux obtenus pour la pluie seule. En effet, contrairement à ce qu'on avait observé pour la pluie, il n'est pas possible de détecter, au seuil d'acceptation de 5 %, une tendance dans les précipitations annuelles totales de 1873 à 1958 à la station 7016280 (Québec Ville). Or, une telle tendance est détectée pour les stations 7016294 (1944-1994, Aéroport de Québec) et 7018577 (1956-1974, Valcartier Fes). Ceci signifie qu'il y a donc eu une réelle augmentation des précipitations pendant la période 1944-1994, mais que la tendance observée dans la pluie annuelle totale de 1873 à 1958 serait principalement due à une réduction des précipitations tombées sous forme de neige plutôt qu'à une augmentation des précipitations totales. Pour vérifier cette hypothèse, on a également réalisé des analyses de tendance sur la neige annuelle totale. Les résultats de ces analyses apparaissent au Tableau 5-4. Il est intéressant de constater qu'il existe effectivement une tendance à la baisse significative de la neige annuelle totale de 1873 à 1958 à la station 7016280 (Québec Ville). Une analyse subséquente a par ailleurs démontré qu'il existe une tendance significative à la hausse (niveau de signification de 0,00) dans les températures hivernales moyennes (décembre à mars) enregistrées à la station de 7016280 pendant la période 1876-1953; l'augmentation moyenne des températures hivernales pendant cette période s'élève à 0,033 °C par année (augmentation totale de 2,5 °C en 77 ans).

Tableau 5-3 Données et résultats de l'analyse de tendance pour les précipitations annuelles totales (pluie et neige) (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

<i>Station</i>	<i>Nb années</i>	<i>Début</i>	<i>Fin</i>	<i>Degré de signification (p-value) test de Mann-Kendall)</i>	<i>Pente (mm/an)</i>
7011170	27	1912	1939	0,56	5,4
7011309	24	1972	1996	0,90	
7012232	19	1972	1992	0,89	
7016280	83	1873	1958	0,10	
7016294	51	1944	1994	0,00	
7016900	22	1965	1988	0,46	
7018577	17	1956	1974	0,01	
7020567	25	1977	2002	0,11	
7024254	23	1979	2002	0,75	
7027391	16	1969	1984	0,08	
7041330	20	1981	2002	0,77	24,7
7017BFN	21	1973	1995	0,38	

Tableau 5-4 Données et résultats de l'analyse de tendance pour la neige annuelle totale (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

<i>Station</i>	<i>Nb années</i>	<i>Début</i>	<i>Fin</i>	<i>Degré de signification (p-value) test de Mann-Kendall</i>	<i>Pente (mm/an)</i>
7011170	27	1912	1939	0,59	-1,1
7011309	24	1972	1996	0,64	
7012232	19	1972	1992	0,44	
7016280	83	1873	1958	0,01	
7016294	51	1944	1994	0,27	
7016900	22	1965	1988	0,35	
7018577	17	1956	1974	0,02	
7020567	25	1977	2002	0,83	
7024254	23	1979	2002	0,79	
7027391	16	1969	1984	0,96	
7041330	20	1981	2002	0,18	6,9
7017BFN	21	1973	1995	0,74	

5.4 Maximum annuel de pluie tombée en une journée

Nous avons également analysé l'évolution du maximum annuel de pluie enregistré au cours d'une même journée. Ces tendances ont été évaluées à partir des données quotidiennes de pluie mesurée aux stations d'Environnement Canada. Ainsi, il est important de noter que les maxima annuels analysés dans cette section ne correspondent pas à des maxima de pluie enregistrés sur 24 h, mais bien à des maxima enregistrés au cours d'une même journée, soit *par exemple* de 8 h 00 à 7 h 59 le lendemain matin. À chaque station, seules les années contenant au moins 335 jours de données (336 pour les années bissextiles) ont été conservées pour les calculs. Le Tableau 5-5 résume les données et résultats de cette analyse de tendance.

Tableau 5-5 Données et résultats de l'analyse de tendance pour le maximum annuel de pluie enregistré au cours d'une même journée (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

Station	Nb années	Début	Fin	Degré de signification (p-value) test de Mann-Kendall	Pente (mm/an)
7011170	27	1912	1939	0,50	0,2
7011309	24	1972	1996	0,31	
7012232	20	1972	1992	0,95	
7016280	83	1873	1958	0,01	
7016294	51	1944	1994	0,29	
7016900	22	1965	1988	0,15	
7018577	17	1956	1974	0,62	-1,0
7020567	25	1977	2002	0,89	
7024254	23	1979	2002	0,01	
7027391	16	1969	1984	0,18	
7041330	20	1981	2002	0,11	
7017BFN	21	1973	1995	0,74	

Il est intéressant de constater que le maximum annuel de pluie journalière a augmenté de façon significative de 1873 à 1958 à la station Québec Ville (7016280), mais qu'il a également diminué de façon significative à Lauzon (station 7024254) de 1979 à 2002. Par ailleurs, aucune tendance ne peut être observée à l'aéroport (station 7016294) sur la période 1944-1994 en ce qui concerne le maximum annuel de pluie journalière. Toutefois, les données disponibles ne permettent pas d'analyser la tendance des plus récentes années à cette station.

La Figure 5-4 illustre l'évolution du maximum annuel de pluie mesuré en une journée aux stations Québec Ville et Lauzon, c'est-à-dire aux stations pour lesquelles des tendances significatives ont été détectées. Outre l'illustration des tendances, cette figure révèle des informations intéressantes sur la pluviométrie des années '30 à Québec (station Québec Ville). En effet, on constate sur cette figure que plus de 100 mm de pluie ont été enregistrés à quatre reprises au cours d'une même journée de 1930 à 1942, les événements de 1935 et 1937 ayant même atteint, respectivement, 126 et 131 mm de pluie. Puisque ces hauteurs de pluie sont plus élevées que tous les maxima annuels enregistrés sur 24 h à la station de l'aéroport (le maximum pour cette station atteignant 118 mm en 2005), il sera important d'en tenir compte lors de l'élaboration de courbes IDF représentatives du régime des pluies extrêmes dans la région de Québec.

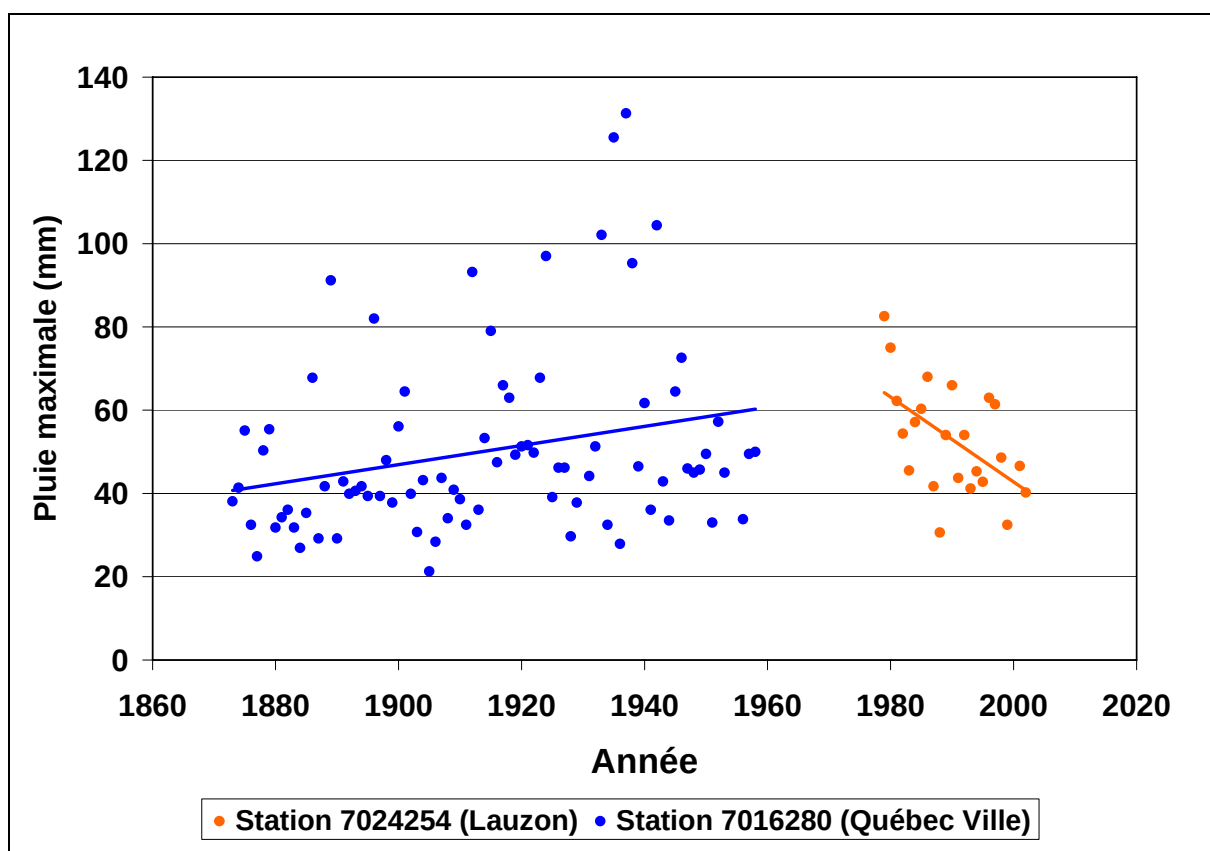


Figure 5-4 Évolution du maximum annuel de pluie enregistré au cours d'une même journée, aux stations pour lesquelles une tendance significative a été détectée (stations Lauzon et Québec Ville) (les points représentent les observations et les droites, les tendances)

5.5 Maximum hivernal (décembre à mars) de pluie tombée en une journée

Les analyses réalisées précédemment (section 5.4) ont été reprises pour le maximum annuel de pluie enregistré au cours des mois de janvier, février et mars d'une même année et du mois de décembre de l'année précédente. Pour chaque station, seules les années contenant au moins 115 jours de données (116 pour les années bissextiles) au cours des quatre mois d'hiver (décembre, janvier, février et mars) ont été conservées puis des analyses de tendance ont été complétées. Il ressort de cette analyse, dont les résultats sont résumés au Tableau 5-6, qu'aucune tendance significative ne peut être relevée, à partir des données disponibles, en ce qui concerne le maximum hivernal de pluie mesuré au cours d'une même journée dans la région de Québec.

Tableau 5-6 Données et résultats de l'analyse de tendance pour le maximum hivernal de pluie enregistré au cours d'une même journée (un degré de signification inférieur ou égal à 0,05 indique la présence d'une tendance)

Station	Nb années	Début	Fin	Degré de signification (p-value) test de Mann-Kendall
7011170	28	1912	1940	0,34
7011309	25	1972	1997	0,21
7012232	22	1972	1993	0,08
7016280	84	1873	1958	0,86
7016294	52	1944	1995	0,37
7016900	23	1965	1989	0,71
7018577	18	1956	1977	0,09
7020567	26	1977	2003	0,93
7024254	23	1980	2003	0,58
7027391	16	1969	1984	0,44
7041330	22	1981	2003	0,50
7017BFN	22	1973	1996	0,28

5.6 Maximum de pluie tombée sur différentes durées en saison estivale

Les données quotidiennes de pluie analysées aux sections précédentes ne permettent pas une caractérisation complète des événements pluvieux extrêmes. Pour le design des ouvrages de drainage urbain, on s'intéresse généralement au maximum de pluie tombé sur diverses périodes variant de 5 minutes à 24 heures. Ces valeurs sont obtenues de pluviomètres à auget, localisés aux stations météorologiques d'Environnement Canada (les séries de mesures aux pluviomètres de la ville sont encore trop courtes pour alimenter les calculs d'analyse de tendances). En général, pour une même station, les séries de pluviomètres à auget sont plus courtes que celles des mesures de pluie quotidienne. On doit également se rappeler que, tel qu'il a été discuté à la section 3.2, la plupart des pluviomètres à auget ne sont en opération que pendant la période estivale. Ainsi, les maxima analysés sont en fait des maxima sur la période de mai à octobre plutôt que de véritables maxima annuels.

Des analyses de tendance ont été réalisées pour les maxima « estivaux » de pluie tombée sur des durées de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h. Pour chacune des ces durées, à chaque station, on ne retient que les années pour lesquelles au moins 150 jours de données sont disponibles sur la période de mai à octobre. De plus, les analyses de tendance ne sont réalisées que pour les stations pour lesquelles au moins 15 années de données ont été conservées. Le Tableau 5-7 résume les données utilisées pour les analyses de tendance.

Tableau 5-7 Synthèse des données des analyses de tendance pour le maximum annuel de pluie tombée sur différentes durées

Station	Analyses sur 5 min, 10 min, 15 min et 30 min			Analyses sur 1 h, 2 h, 6 h et 12 h			Analyses sur 24 h		
	Nb années	Début	Fin	Nb années	Début	Fin	Nb années	Début	Fin
7011309	24	1972	1995	24	1972	1995	19	1972	1990
7012232	-	-	-	21	1972	1992	18	1972	1990
7016294	45	1961	2005	45	1961	2005	44	1961	2005
7016900	23	1966	1989	23	1966	1989	24	1966	1989
7017999	-	-	-	23	1972	1995	19	1972	1990
7016280	30	1914	1943	30	1914	1943	30	1914	1943
7024254	15	1979	1995	15	1979	1995	-	-	-

Sur les 54 analyses de tendances réalisées (6 stations pour les durées de 5 min à 30 min, 7 stations pour les durées de 1 h à 12 h et 6 stations pour la durée de 24 h), aucune n'a révélé de tendance significative au seuil d'acceptation de 5 %. Cependant, si on retient plutôt un seuil d'acceptation de 10 %, on peut conclure à l'existence d'une tendance à la hausse dans les maxima annuels de pluie sur des durées de 15 et 30 minutes, de 1914 à 1943, à la station Québec Ville (7016280). En effet, les degrés de signification (*p-values*) sont respectivement de 0,07 et de 0,09 pour les durées de 15 minutes et 30 minutes à cette station.

5.7 Évolution de diverses caractéristiques du régime pluvieux dans la région de Québec

Les analyses de tendances présentées aux sections précédentes (5.1 à 5.6) offrent un aperçu des modifications globales du régime pluvieux dans la région de Québec, sur les périodes couvertes par les historiques d'enregistrement aux différentes stations. Afin d'illustrer de façon plus détaillée comment les diverses caractéristiques liées à ce régime ont évolué au cours des années, les Figures 5-5 à 5-12 présentent, pour les stations Québec Ville (7016280) et aéroport Jean-Lesage (7016294), les moyennes mobiles sur 15 ans de 1) la pluie annuelle totale, 2) la pluie hivernale totale, 3) les précipitations annuelles totales, 4) la neige annuelle totale, 5) le maximum annuel de pluie enregistré en une journée, 6) le maximum hivernal de pluie enregistré en une journée et 7) le maximum de pluie enregistré sur diverses durées variant de 5 minutes à 24 h. Ces figures permettent entre autres de visualiser les périodes lors desquelles les augmentations ont été les plus importantes. L'examen visuel des Figures 5-5 à 5-10 nous amène par ailleurs aux mêmes conclusions que les analyses de tendances précédemment présentées, soit : 1) identification d'une tendance à la hausse pour la pluie annuelle totale aux stations 7016280 et 7016294; 2) identification d'une tendance à la hausse pour la pluie hivernale à la station 7016294; 3) identification d'une tendance à la hausse pour les précipitations annuelles totales à la station 7016294; 4) identification d'une tendance à la baisse pour la neige annuelle totale à la station 7016280; 5) identification d'une tendance à la hausse pour le maximum annuel de pluie tombée en une journée à la station 7016280; et 6) aucune tendance dans le maximum hivernal de pluie tombée en une journée. Également, on voit clairement aux Figures 5-11 et 5-12 que l'intensité des événements extrêmes (maxima annuels sur diverses durées variant de 5 min à 24 h) n'est pas plus élevée à la fin du 20^e siècle qu'elle ne l'était au début de ce siècle.

Aux Figures 5-5 à 5-7, le saut entre les deux courbes peut s'expliquer en partie par la différence dans la précision des mesures aux deux stations. En effet, ces courbes ont été construites en supposant nul toute hauteur identifiée comme « trace » dans les bases de données. Or, la précision des mesures est de 0,3 mm à la station 7016280 alors qu'elle est de 0,2 mm à la station 7016294. Si les hauteurs journalières de précipitations à chaque station sont estimées par l'addition de mesures prises aux 6 heures (ce qui n'a pu être vérifié, mais constituait une pratique courante pour certaines stations selon Mekis et Hogg, 1999), alors les « traces » peuvent correspondre à des hauteurs journalières allant de 0 à 1,2 mm à la station 7016280 ou de 0 à 0,8 mm à la station 7016294, pour un écart de 0,4 mm par jour entre les deux stations. Cependant, le nombre de traces dans les hauteurs quotidiennes de pluie aux stations 70156280 et 7016294 varie de 0 à 57 par année (en 1961 à la station 7016294), ce qui ne peut donc expliquer entièrement l'écart entre les deux courbes de la Figure 5-5. Par ailleurs, des vérifications supplémentaires concernant l'évolution du nombre de traces par année ont permis de s'assurer que ces traces ne sont pas à l'origine de la tendance à la hausse identifiée dans la pluie annuelle totale, la pluie hivernale totale et les précipitations annuelles totales de 1944 à 1994.

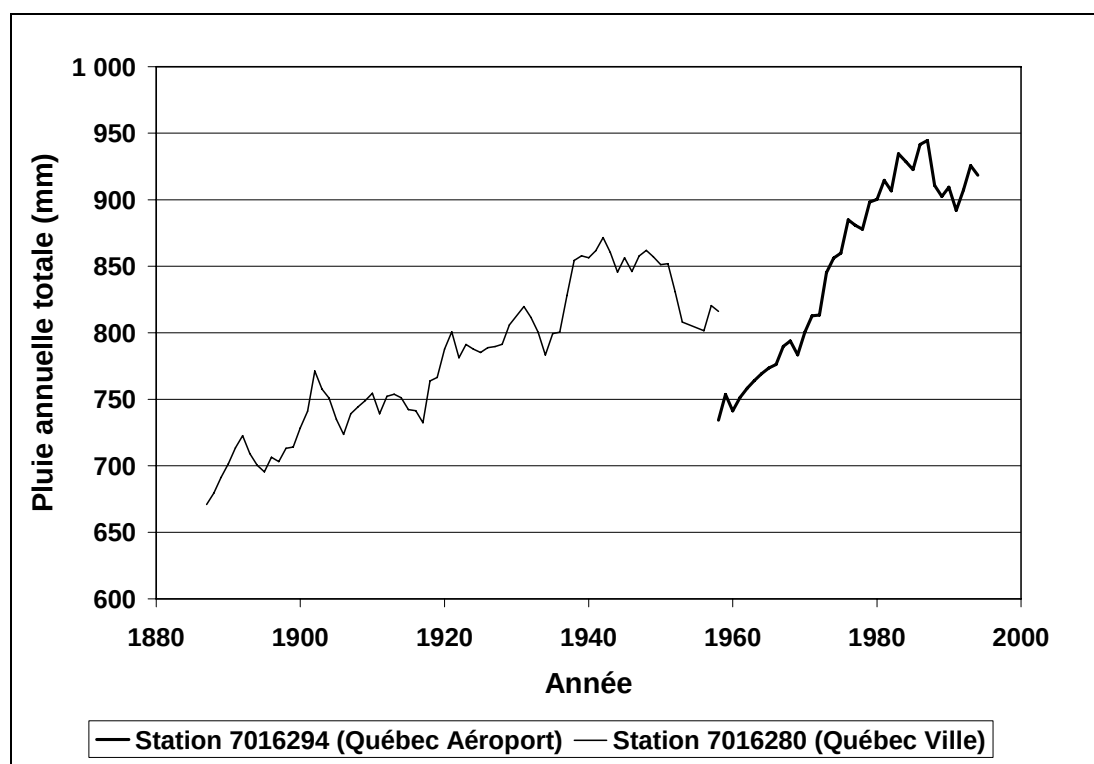


Figure 5-5 Moyenne mobile sur 15 ans de la pluie annuelle totale (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

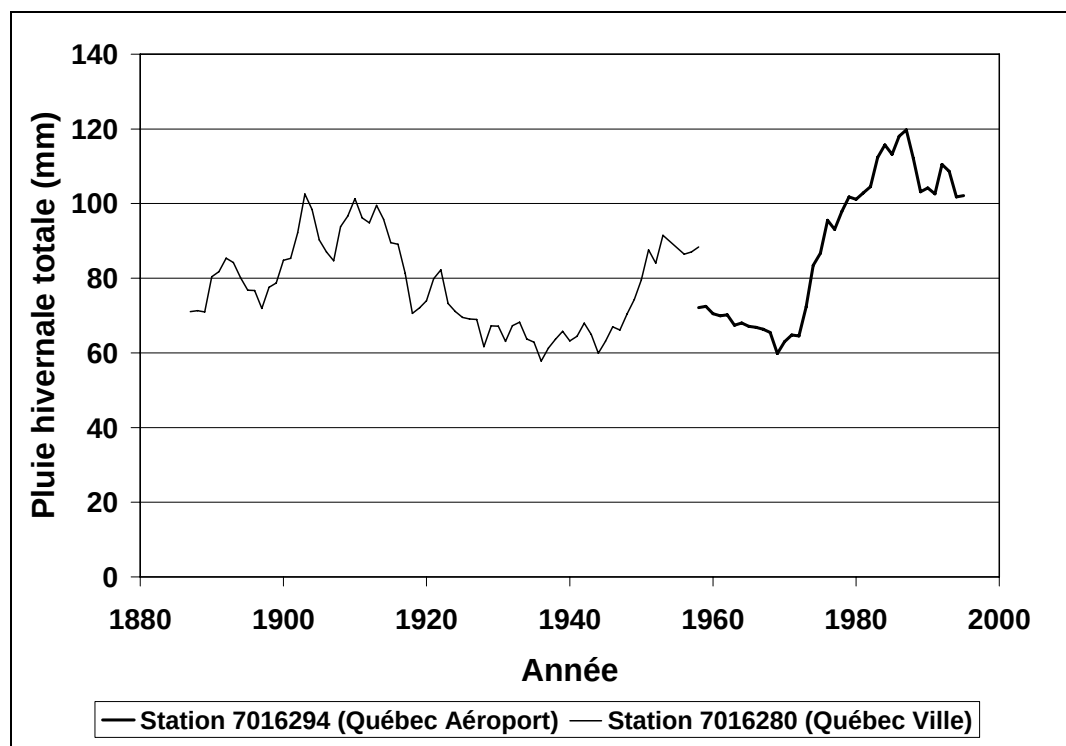


Figure 5-6 Moyenne mobile sur 15 ans de la pluie hivernale totale (décembre à mars) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

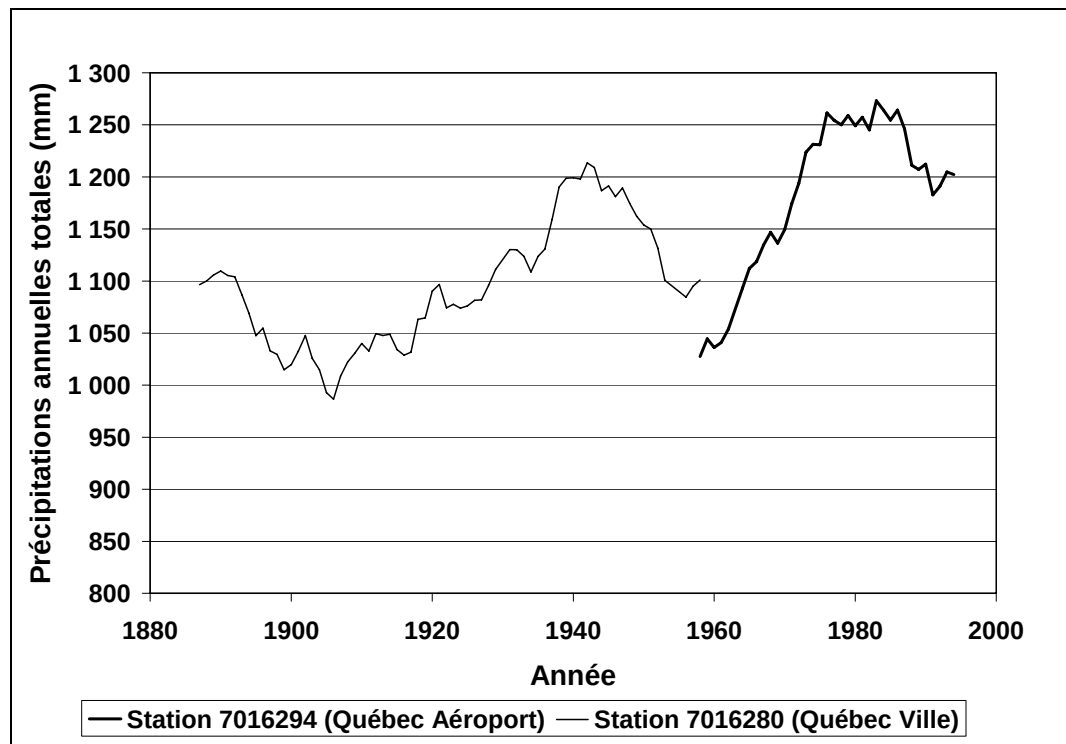


Figure 5-7 Moyenne mobile sur 15 ans des précipitations annuelles totales (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

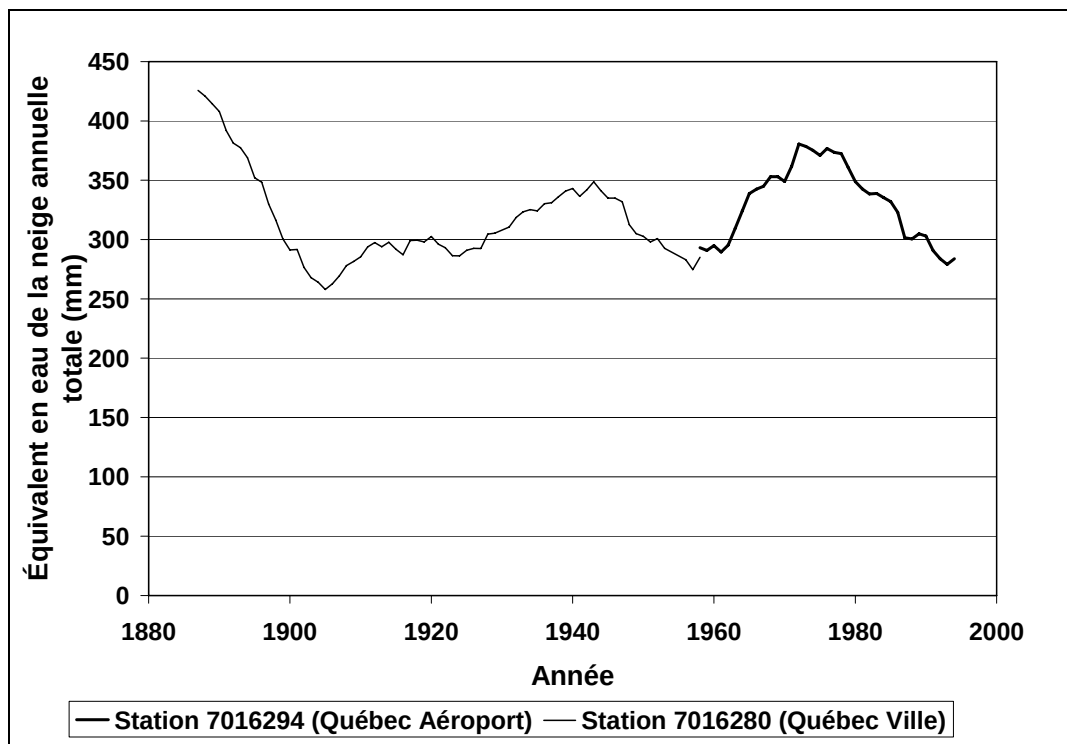


Figure 5-8 Moyenne mobile sur 15 ans de la neige annuelle totale (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

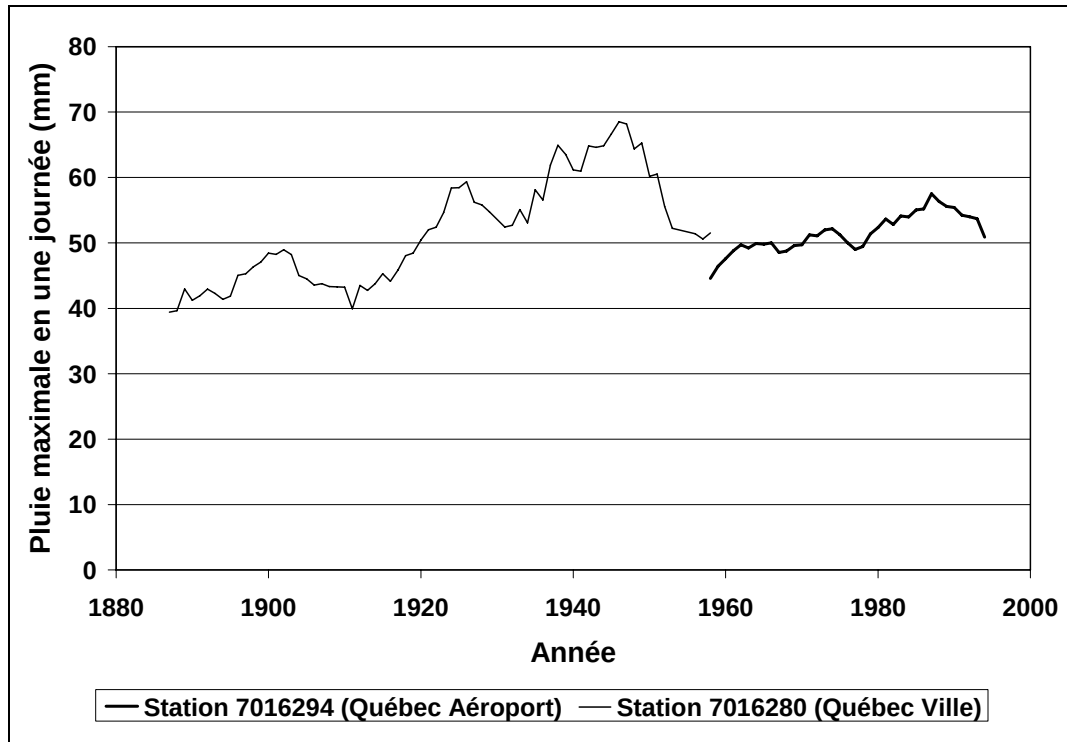


Figure 5-9 Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en une journée (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

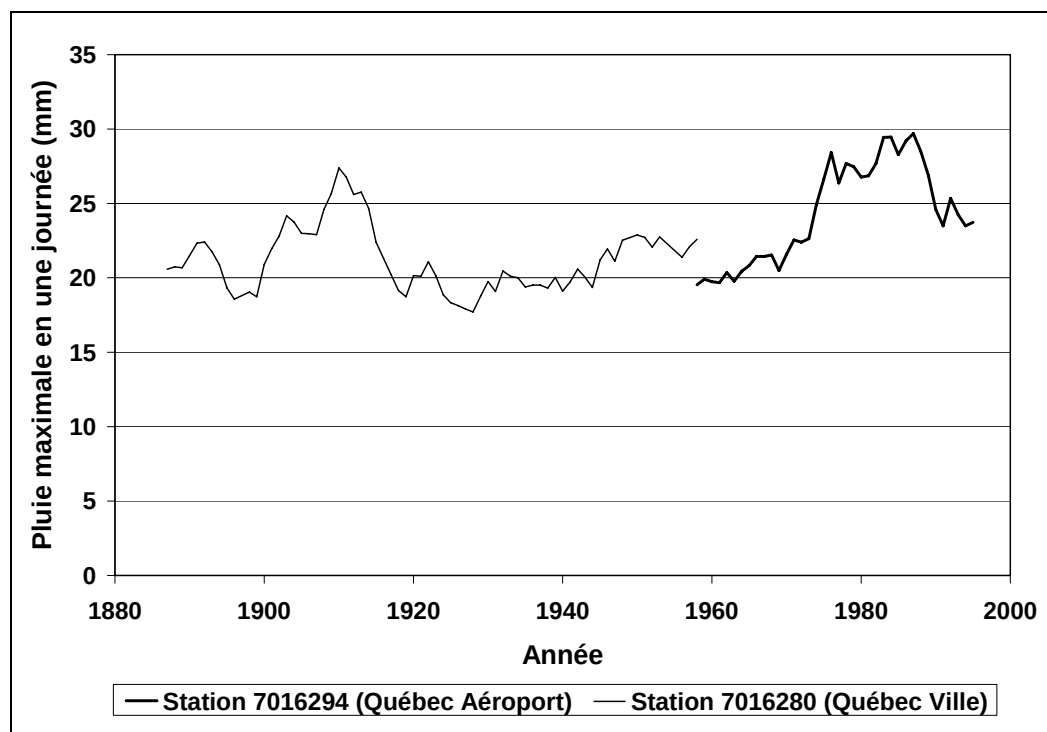


Figure 5-10 Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en une journée en période hivernale (décembre à mars) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

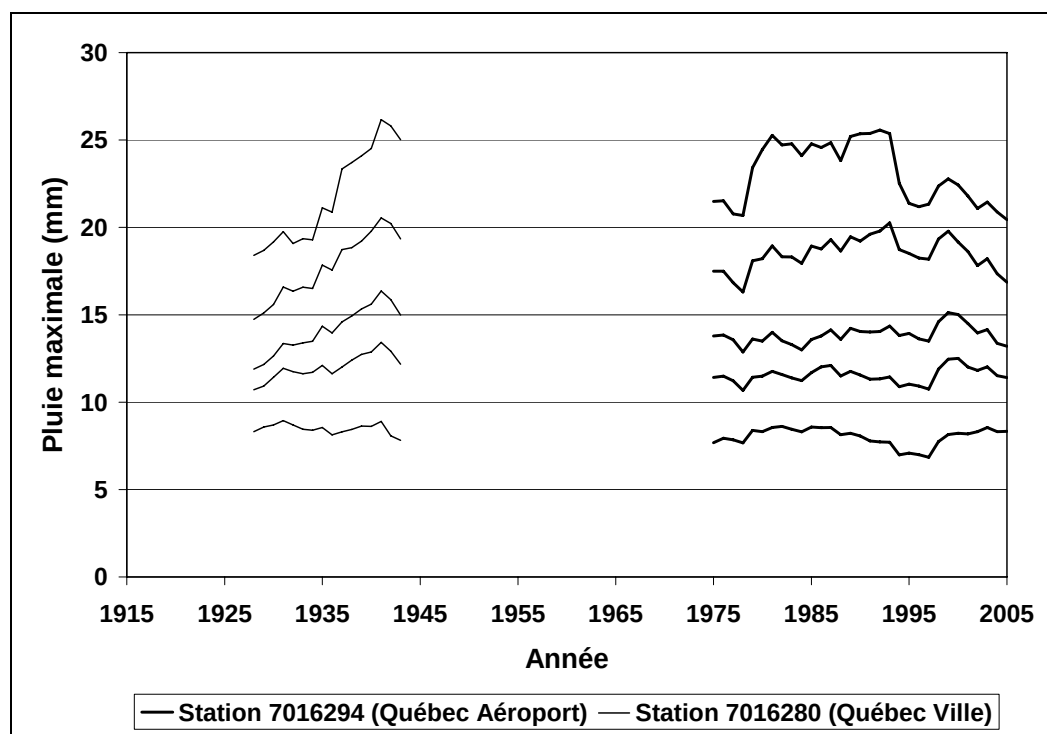


Figure 5-11 Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en période estivale (mai à octobre approximativement) sur des durées de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min et 1 h (courbes respectives de bas en haut) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

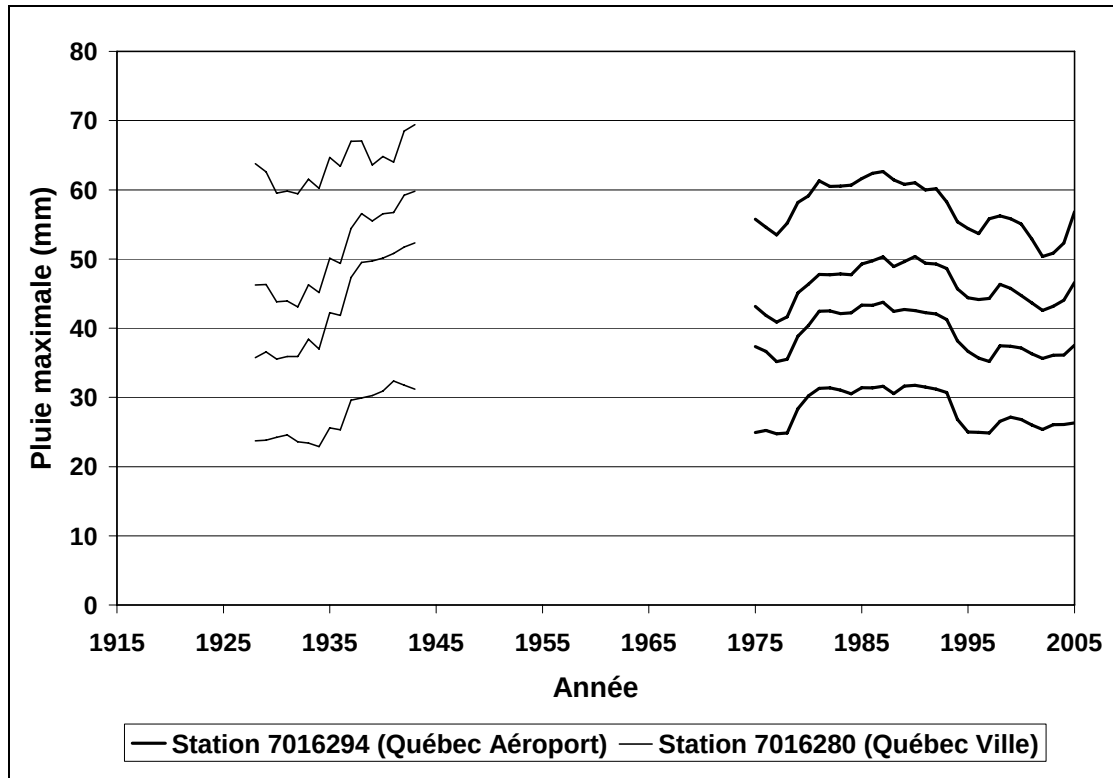


Figure 5-12 Moyenne mobile sur 15 ans du maximum de pluie enregistré en période estivale (mai à octobre approximativement) sur des durées de 2h, 6 h, 12 h et 24 h (courbes respectives de bas en haut) (stations Québec Aéroport et Québec Ville)

6. Méthodologie pour la production des courbes IDF

Tel qu'il a été mentionné précédemment, les courbes IDF représentent la relation entre l'intensité des événements pluvieux extrêmes, leur durée et leur période de retour, en un point spécifique de l'espace. Cette relation est établie sur la base d'une analyse statistique des intensités maximales annuelles enregistrées sur diverses durées, variant généralement de 5 min à 24 h, en supposant que ces maxima annuels sont stationnaires sur toute la longueur de la période d'analyse. Ce chapitre présente les méthodes que nous avons appliquées pour la production de courbes IDF dans la région de Québec. Nous présenterons d'abord la méthode que nous appelons « standard », soit celle utilisée par Environnement Canada. Nous introduirons par la suite d'autres méthodes qui ont été appliquées pour produire les courbes IDF dans le cadre de ce mandat, afin de tirer profit au maximum de toute l'information disponible ainsi que pour surmonter les difficultés associées aux très courtes séries de mesures à certaines stations; ces méthodes sont l'analyse fréquentielle régionale et la prolongation des courtes séries de données par interpolation spatiale (krigeage). Les résultats de chacune de ces méthodes pour le cas particulier de la ville de Québec sont présentés au chapitre 7.

6.1 Méthode standard

Les courbes IDF distribuées par Environnement Canada sont construites par l'ajustement d'une distribution de Gumbel, à l'aide de la méthode des moments, aux maxima annuels de pluie enregistrés en une seule station. Le choix de cette distribution statistique et de cette méthode d'ajustement (méthode des moments) repose sur leur facilité de mise en œuvre plutôt que sur leur aptitude à bien reproduire les données observées. Dans le cadre de ce mandat, nous avons plutôt opté pour la distribution généralisée des valeurs extrêmes (*Generalized Extreme Value*, GEV), dont la loi de Gumbel est un cas particulier. La distribution GEV est la distribution limite d'une série de maxima indépendants et identiquement distribués. La fonction de distribution de la GEV est donnée par (Hosking et Wallis, 1997) :

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

avec :

$$x < \xi + \frac{\alpha}{k} \quad \text{si } k > 0 \quad \text{ou} \quad x > \xi + \frac{\alpha}{k} \quad \text{si } k < 0$$

Les trois paramètres de cette distribution sont le paramètre de position ξ ($\xi > 0$), le paramètre de dispersion α ($\alpha > 0$) et le paramètre de forme k , qui en pratique se situe dans l'intervalle $[-1/2, 1/2]$ (Hosking *et al.*, 1985). La distribution GEV se ramène à la distribution Gumbel lorsque $k = 0$. Pour toutes les courbes IDF présentées dans ce rapport, la méthode des L-moments (Hosking et Wallis, 1997; Hosking *et al.*, 1985; voir Annexe 1) a été appliquée pour déterminer la valeur des paramètres $\{\xi, \alpha, k\}$. La méthode des L-moments a été choisie puisque, selon Hosking *et al.* (1985), cette méthode est plus performante que les autres méthodes d'ajustement lorsque les séries de données sont courtes. Elle offre l'avantage de fournir des estimateurs non biaisés des valeurs de paramètres, et ce même si l'échantillon disponible est petit. La stationnarité des différentes séries de mesure a été vérifiée précédemment lors des analyses de tendances (cf. section 5.6).

Une fois les différentes distributions GEV ajustées, la hauteur de pluie pour une période de retour T donnée est estimée ainsi :

$$\begin{aligned} x(T) &= \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left(-\ln(1-1/T) \right)^k \right\} & k \neq 0 \\ x(T) &= \xi - \alpha \ln \left(-\ln(1-1/T) \right) & k = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Lors de la production de courbes IDF à partir des données d'une seule station, la méthode du χ^2 a été utilisée afin de vérifier que la distribution GEV, ajustée par la méthode des L-Moments, représentait bien les données disponibles aux stations. Les intervalles de confiance à 95 % sur les hauteurs de pluie calculées ont été estimés à l'aide de la méthode du *bootstrap* paramétrique (Kharin et Zwiers, 2000) avec $n = 10\,000$ répétitions.

6.2 Analyse fréquentielle régionale

Afin de tirer le maximum d'information possible des données de pluviométrie disponibles sur le territoire de la ville, des courbes IDF ont été construites à l'aide de la méthode d'analyse fréquentielle régionale proposée par Hosking et Wallis (1997). Puisque les séries de données aux divers pluviomètres de la ville sont très courtes (de l'ordre de 5 ans), il est de toute façon hasardeux d'utiliser directement ces séries de façon individuelle pour déterminer l'intensité d'événements pluvieux extrêmes (par ex., se produisant une fois tous les 25 ou 50 ans). Cependant, l'information provenant de ces pluviomètres peut être combinée à celle provenant des pluviomètres d'Environnement Canada à l'aide de l'analyse fréquentielle régionale. Cette façon de faire permet aussi d'intégrer l'information concernant la pluviométrie observée à Québec avant que la station de l'aéroport Jean-Lesage ne soit en opération.

L'application de l'analyse fréquentielle régionale repose sur l'hypothèse que les données de chaque station sont indépendantes et identiquement distribuées selon la même loi statistique. Après vérification de l'homogénéité statistique de la région (voir test ici-bas), les données de chaque station sont combinées pour calculer la distribution statistique régionale adimensionnelle. Par la suite, la distribution statistique des événements pluvieux extrêmes à chaque station est obtenue en multipliant cette distribution régionale adimensionnelle par la moyenne des valeurs observées à cette même station. On obtient donc des courbes IDF distinctes pour chaque station, mais construites en tenant compte de l'information disponible à toutes les autres stations.

L'analyse fréquentielle régionale est réalisée en trois étapes principales (Onibon *et al.*, 2004) :

- 1) constitution de régions homogènes et vérification de l'homogénéité des régions construites;
- 2) détermination de la fonction de distribution régionale et estimation de ses paramètres; et
- 3) estimation des quantiles (hauteurs de pluie) correspondant à des périodes de retour spécifiées. Ces étapes sont résumées aux sections suivantes.

6.2.1 Homogénéité statistique

Pour chaque cas d'application de l'analyse fréquentielle régionale, l'homogénéité statistique des données provenant de plusieurs stations a été vérifiée par l'application du test d'homogénéité statistique proposé par Hosking et Wallis (1993). Une description détaillée de ce test est présentée à l'Annexe 2. De façon succincte, mentionnons que ce test consiste à calculer trois

indices H_k ($k = 1, 2, 3$) caractérisant l'homogénéité statistique d'une région. Selon Hosking et Wallis (1993), une région peut être considérée comme étant homogène si les indices des trois ratios satisfont la condition $H_k < 1$, « possiblement hétérogène » si l'un ou l'autre des ratios satisfait $1 \leq H_k < 2$, et « très certainement hétérogène » si l'un des indices satisfait l'inégalité $H_k \geq 2$.

6.2.2 Détermination de la distribution régionale et de ses paramètres

Dans tous les cas d'application présentés dans ce rapport, la distribution GEV a été retenue pour représenter la distribution des maxima annuels de pluie. Afin de s'assurer que la GEV permet de bien représenter le comportement des séries assemblées pour l'analyse fréquentielle régionale, nous avons appliqué le test proposé par Hosking et Wallis (1997), dont les détails sont donnés à l'Annexe 2. En résumé, ce test consiste à calculer un indice Z qui caractérise l'adéquation des séries avec la distribution statistique choisie. Plus la valeur de Z est près de zéro, meilleure est l'adéquation entre la distribution régionale et les données observées. Selon Hosking et Wallis (1997), on peut conclure qu'une distribution représente bien les séries de mesures lorsque la valeur absolue de Z pour cette distribution est inférieure ou égale à 1,64.

6.2.3 Estimation des hauteurs de pluie pour différentes périodes de retour

Une fois la valeur des paramètres de la distribution GEV déterminée, les hauteurs (ou intensités) de pluie pour différentes périodes de retour sont calculés à l'aide de l'équation 2. Dans un contexte d'analyse fréquentielle régionale, la hauteur donnée par cette équation est établi pour un maximum annuel moyen de 1 mm; elle doit donc être multipliée, pour chaque station, par la moyenne des maxima à cette station. Ainsi, lorsque n stations sont prises en compte pour l'analyse régionale, on obtient donc n ensembles de courbes IDF pour la région considérée. Dans un contexte opérationnel, on souhaite évidemment n'avoir qu'une ou quelques courbes IDF auxquelles se référer pour le design des ouvrages de drainage. Le choix de ces courbes reposera sur les résultats obtenus et est exposé plus en détail à la section 7.1.5.

6.2.4 Intervalles de confiance des intensités données par l'analyse fréquentielle régionale

Les intervalles de confiance des intensités de pluie données par l'analyse fréquentielle régionale ont été déterminés par simulations Monte Carlo, d'après la méthode proposée par Hosking et Wallis (1997), avec $n = 10\,000$ répétitions. La corrélation entre les données observées aux différentes stations a été prise en compte en supposant un coefficient de corrélation moyen.

6.3 Prolongation des courtes séries de données

Aux pluviomètres pour lesquels les séries de données sont très courtes (~ 5 ans), l'estimation des hauteurs de pluie des événements rares s'accompagne nécessairement d'une forte incertitude, et ce même lorsque la méthode d'analyse fréquentielle régionale est appliquée. Afin de réduire l'incertitude associée aux hauteurs de pluie évaluées en certains points où seules de courtes séries sont disponibles, nous avons examiné la possibilité d'allonger ces séries en utilisant l'information disponible aux autres stations. Pour ce faire, nous avons reconstruit les données de pluie antérieures au début de la période d'opération d'une station ne possédant qu'une courte série de données, à partir de la pluie observée à toutes les autres stations qui étaient en opération pendant la période dite de « reconstruction ».

Le logiciel Geostat (Favre *et al.*, 2003) a facilité la mise en œuvre de quatre méthodes de reconstitution distinctes : la méthode des trois stations les plus proches, la méthode des quatre quadrants, la méthode du rapport normalisé et la méthode du krigeage avec ajustement automatique du semi-variogramme. Le krigeage ayant toujours donné de meilleurs résultats, tant en matière de biais que d'erreur quadratique moyenne, nous avons choisi de ne conserver que les résultats de cette méthode. Rappelons que le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui choisit les poids associés à chaque station à partir de la covariance entre les points et en fonction de la distance entre ces points. Ainsi, ces poids, qui constituent ce qu'on appelle le « variogramme », sont déterminés à partir des données disponibles et sont par la suite utilisés pour reconstituer les données manquantes.

6.4 Courbes IDF en climat futur

La production des courbes IDF en climat futur repose sur la méthodologie et les résultats de Mailhot *et al.* (2006 et 2007). Par l'analyse des résultats du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) et de la pluviométrie enregistrée à une cinquantaine de stations du Sud du Québec, ces auteurs ont estimé l'accroissement de la hauteur des précipitations estivales extrêmes entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2041-2070), pour des événements de 2 à 24 h et des périodes de retour de 2 à 50 ans. Ces accroissements apparaissent au Tableau 6-1. En raison des caractéristiques inhérentes au MRCC (pas de temps et d'espace) et de la longueur des séries sur lesquelles reposent les analyses, Mailhot *et al.* (2006 et 2007) ne fournissent pas l'accroissement prévu des hauteurs de précipitations pour des événements de durée inférieure à 2 h ni de récurrence supérieure à 50 ans. Pour répondre aux besoins énoncés par la Ville de Québec, nous avons repris la méthodologie de Mailhot *et al.* (2006 et 2007) afin de calculer les accroissements prévus en climat futur pour les événements de durée 1 h de même que pour la période de retour de 100 ans (durées 1 à 24 h). Les accroissements ainsi calculés sont aussi donnés au Tableau 6-1. Dans l'état d'avancement actuel des connaissances et des outils de simulation disponibles, les accroissements pour les événements de durée inférieure à 1 h ne peuvent être estimés pour la région du Sud du Québec.

Tableau 6-1 Accroissement moyen de la hauteur des précipitations estivales entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2041-2070) pour la région du Sud du Québec à l'échelle des stations, selon la méthodologie de Mailhot *et al.* (2006 et 2007)

	Accroissement actuel-futur (%) pour une période de retour de					
	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
Durée 1 h	20,9	19,1	18,8	19,1	19,7	20,4
Durée 2 h	20,5	18,1	16,3	13,0	11,2	9,5
Durée 6 h	13,8	14,5	13,1	10,1	7,3	4,3
Durée 12 h	10,9	10,0	8,2	5,1	2,5	-0,2
Durée 24 h	10,5	8,8	6,9	3,9	1,5	-0,8

Afin de construire les courbes IDF représentatives du régime pluvieux de la période 2041-2070 dans la région de Québec, nous avons appliqué les taux d'accroissement résumés au Tableau 6-1 aux courbes obtenues pour le climat actuel, sauf pour les durées 12 et 24 h pour lesquelles les accroissements ont été considérés nuls pour la période de retour de 100 ans. En

raison des considérations mentionnées plus haut, les courbes IDF en climat futur n'ont été calculées que pour des événements de 1 à 24 h. On doit noter que le calcul des accroissements du Tableau 6-1 repose sur plusieurs hypothèses, concernant notamment la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère en climat futur. Le scénario retenu pour ces estimations est le SRES A2 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), lequel scénario est très souvent considéré dans les simulations climatiques. Ce scénario considère que les concentrations effectives de CO₂ augmenteront de 714 à 950 ppmv (partie par million par volume) au cours de la période 2041-2070. Il est entendu que, en fonction de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre qui surviendra réellement dans l'atmosphère au cours du XXI^e siècle, les accroissements calculés par Mailhot *et al.* (2006 et 2007) pourront survenir avant 2041 ou après 2070. De plus, les estimations de Mailhot *et al.* (2006 et 2007) supposent que les pluies estivales extrêmes auront la même extension spatiale en climat futur qu'en climat actuel. Or, cette hypothèse ne peut être vérifiée à l'heure actuelle puisque le MRCC travaille à une échelle de 45 km x 45 km, soit à une échelle parfois beaucoup plus grande que la dimension des systèmes météorologiques en jeu, ce qui est d'autant plus vrai pour les événements de précipitations intenses de courtes durées.

7. Résultats des analyses IDF

L'ensemble des courbes IDF produites à partir des données de pluviométrie disponibles dans la région de Québec est présenté dans ce chapitre. On y expose les courbes représentant la pluviométrie de la région pour la saison de mai à octobre, d'abord en climat actuel puis ensuite en climat futur, et finalement les hauteurs des pluies extrêmes sont calculées pour la saison de décembre à mars, en climat actuel. Notons que plusieurs méthodes ont été utilisées pour la production des courbes IDF estivales en climat actuel. Les résultats de chacune de ces méthodes sont détaillés dans ce chapitre, où on discutera également du choix d'un ensemble de courbes IDF représentatif de la pluviométrie sur le territoire de la ville de Québec, en regard des résultats obtenus.

7.1 Courbes IDF pour la saison de mai à octobre en climat actuel

Les courbes IDF pour la saison de mai à octobre en climat actuel ont d'abord été calculées par la méthode standard, c'est-à-dire à partir des données provenant d'une seule station, pour la station de l'aéroport Jean-Lesage (7016294) et la station Québec Ville (7016280). Le résultat de ces calculs servira principalement de base de comparaison pour les courbes IDF produites par d'autres méthodes, mais permettra également d'illustrer l'impact que peut avoir la période d'opération d'une station sur l'estimation de l'intensité des événements extrêmes. Afin de tenir compte de toute l'information disponible concernant la pluviométrie sur le territoire de la ville de Québec, les courbes IDF ont aussi été estimées par analyse fréquentielle régionale. Or, l'incertitude associée aux courbes ainsi produites demeure élevée aux stations pour lesquelles on ne dispose que de courtes séries de données. Afin de surmonter cette difficulté, nous avons exploré la possibilité de prolonger les courtes séries de données à partir des enregistrements disponibles aux autres stations. Les résultats issus de ces diverses méthodes nous ont finalement conduit au choix d'un ensemble de courbes représentant au mieux les précipitations estivales extrêmes sur le territoire de la ville de Québec.

7.1.1 Courbes locales calculées par la méthode standard

7.1.1.1 Station de l'aéroport Jean-Lesage (1961-2005)

Les courbes IDF et leurs intervalles de confiance respectifs ont été calculés pour la station de l'aéroport Jean-Lesage, à partir des données enregistrées pendant la période 1961-2005. Une distribution GEV a été ajustée aux maxima annuels par la méthode des L-moments. La qualité de cet ajustement a été vérifiée par la méthode du χ^2 . Ce test montre que le choix de la distribution GEV est acceptable (niveau de confiance de 1 %) pour toutes les durées. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 7-1 et illustrés à la Figure 7-1. Il est important de noter l'étendue des intervalles de confiance pour les événements de périodes de retour élevées (par ex. 100 ans). Ces valeurs ayant été calculées à partir d'une série de 45 maxima annuels (de 1961 à 2005), on peut s'attendre à des intervalles de confiance encore plus étendus pour d'autres stations possédant des historiques de données plus courts.

Il est essentiel de retenir que les courbes IDF construites par la méthode standard à partir de mesures locales ne peuvent représenter que la pluviométrie enregistrée sur la période au cours de laquelle le pluviomètre considéré était en opération. Ainsi, les courbes IDF de la station de l'aéroport Jean-Lesage, construites par la méthode standard, ne peuvent tenir compte que des événements pluvieux de la période 1961-2005. Or, nous avons vu précédemment (section 5.4) que plusieurs événements pluvieux d'importance sont survenus à Québec pendant les années 1930; il est entendu que cette information ne peut pas être intégrée aux courbes IDF de l'aéroport construites par la méthode standard. Afin d'illustrer comment le fait de prendre en compte la période 1914-1943 plutôt que la période 1961-2005 peut entraîner des modifications importantes dans les hauteurs de pluie estimées par la méthode IDF standard, la section suivante présente les courbes IDF de la station Québec Ville.

Tableau 7-1 Hauteur des précipitations estivales extrêmes (mm) et intervalles de confiance à 95 % calculés à partir des maxima annuels à l'aéroport Jean-Lesage sur la période 1961-2005 (analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode de L-moments)

	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	6,9	7,5	8,1	8,9	9,7	10,7	10,1	11,3	12,6
10 min	9,8	10,5	11,4	12,4	13,6	14,9	14,1	15,9	17,8
15 min	11,8	12,8	13,8	15,0	16,5	18,0	17,0	18,9	21,0
30 min	15,2	16,6	18,1	19,8	22,0	24,2	22,6	25,7	28,8
1 h	18,7	20,4	22,3	24,4	27,3	30,3	28,2	32,4	37,0
2 h	23,2	25,1	27,4	29,9	33,3	37,0	34,4	39,6	45,5
6 h	34,1	36,8	39,9	43,1	47,0	51,2	48,4	53,7	59,2
12 h	41,0	44,2	47,8	51,8	56,3	61,2	58,0	64,1	70,4
24 h	51,9	55,6	59,7	64,0	69,3	74,8	71,1	78,0	85,4
	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	11,4	13,3	15,6	12,2	14,9	18,3	13,0	16,6	21,5
10 min	16,0	19,0	22,5	17,3	21,5	26,9	18,5	24,2	32,4
15 min	19,0	22,1	25,5	20,4	24,5	29,5	21,5	26,9	34,0
30 min	25,8	30,5	35,8	27,7	34,1	41,9	29,4	37,8	49,0
1 h	32,6	39,6	47,7	35,5	45,5	58,4	38,1	51,9	71,2
2 h	39,7	49,0	60,2	43,4	57,0	74,9	46,9	66,0	94,3
6 h	54,0	61,9	70,8	57,4	67,9	80,9	60,3	73,8	91,8
12 h	64,5	73,5	83,5	68,4	80,4	94,7	71,6	87,0	106,9
24 h	78,5	88,9	100,5	83,0	96,7	113,2	86,6	104,3	127,5

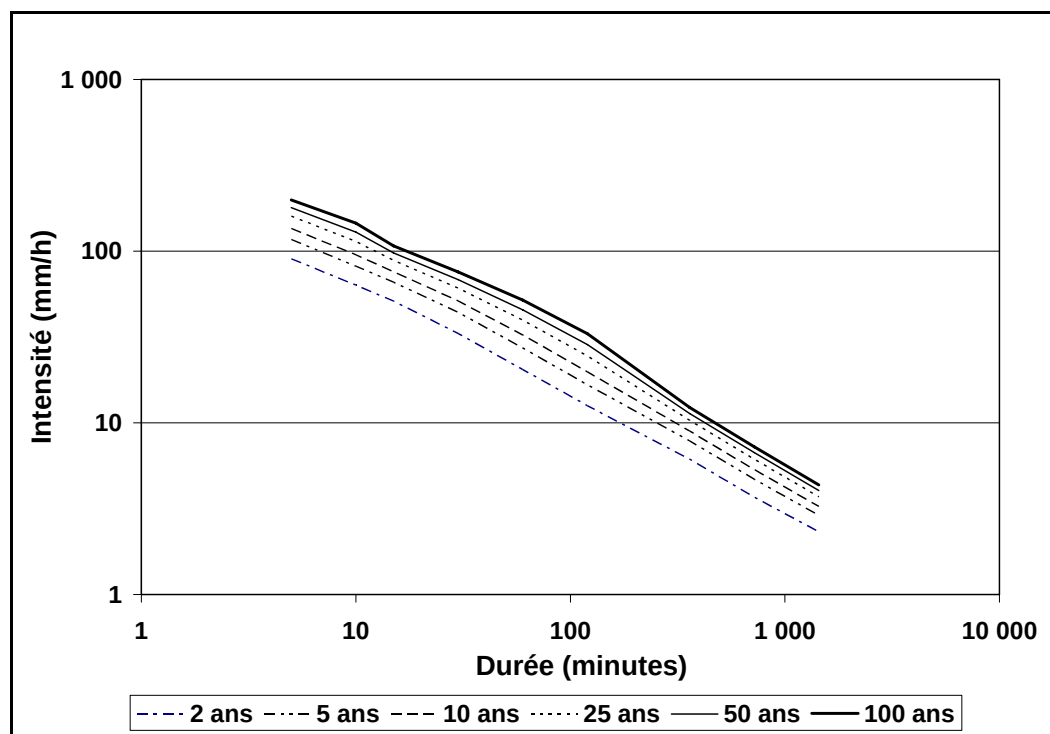


Figure 7-1 Courbes IDF de l'aéroport Jean-Lesage (période 1961-2005), telles que calculées par ajustement de distributions GEV à l'aide de la méthode des L-moments (analyse fréquentielle locale)

7.1.1.2 Station Québec Ville (1914-1943)

Les courbes IDF et leurs intervalles de confiance respectifs ont également été calculés pour la station Québec Ville, à partir des données enregistrées pendant la période 1914-1943. Une distribution GEV a été ajustée aux maxima annuels par la méthode des L-moments. La qualité de cet ajustement a été vérifiée par la méthode du χ^2 . Ce test montre que le choix de la distribution GEV est acceptable (niveau de confiance de 5 %) pour toutes les durées. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 7-2 et illustrés à la Figure 7-2. À l'examen de ces résultats, on remarque un écart important entre les courbes IDF calculées pour la station de l'aéroport Jean-Lesage (1961-2005) et pour la station Québec Ville (1914-1943). À titre d'exemple, l'événement d'une durée 24 h se produisant en moyenne une fois tous les 100 ans serait de 104 mm selon la courbe de l'aéroport comparativement à 171 mm selon la courbe de la station Québec Ville. Cette comparaison rapide permet de saisir l'importance de la prise en compte de l'ensemble de l'information disponible lors de la définition de pluies et/ou de débits de conception des réseaux de drainage urbain. Ces considérations sont un argument

supplémentaire en faveur de l'application de l'analyse fréquentielle régionale pour l'élaboration de courbes IDF représentatives du régime pluvieux de la ville de Québec.

Tableau 7-2 Hauteur des précipitations estivales extrêmes (mm) et intervalles de confiance à 95 % calculés à partir des maxima annuels à la station Québec Ville sur la période 1914-1943 (analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode de L-moments)

	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	6,7	7,4	8,2	8,6	9,8	11,0	9,8 ;]	11,5	13,4
10 min	9,9	11,0	12,3	12,9	14,4	15,9	14,6	16,4	18,3
15 min	11,4	12,8	14,3	15,0	17,0	18,8	17,0	19,5	22,0
30 min	14,4	16,2	18,2	19,1	21,6	24,1	21,7	25,0	28,3
1 h	16,9	19,1	21,8	23,1	27,0	31,6	27,2	33,4	40,5
2 h	20,4	23,1	26,6	28,0	33,7	40,2	33,6	43,1	53,4
6 h	31,9	35,9	41,4	43,4	52,4	63,3	52,1	68,2	86,5
12 h	39,6	45,2	52,1	55,5	66,4	78,9	66,5	84,3	103,9
24 h	52,7	60,3	68,9	73,4	85,7	98,9	86,2	104,2	123,4
	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	11,1	14,0	17,4	12,0	16,0	21,3	12,7	18,1	26,2
10 min	16,1	18,8	21,6	16,9	20,4	24,4	17,6	21,8	27,3
15 min	19,0	22,6	26,5	20,1	24,8	30,4	21,0	26,9	34,7
30 min	24,3	29,1	34,2	25,7	32,0	39,5	26,8	34,8	45,4
1 h	32,1	43,0	56,7	35,3	51,5	73,9	38,4	61,3	97,4
2 h	40,3	58,4	79,8	45,1	73,1	110,8	49,9	91,2	154,3
6 h	63,7	96,1	135,6	72,5	124,8	196,7	81,2	162,2	290,3
12 h	80,2	112,6	152,1	89,5	138,5	204,1	98,6	169,5	278,0
24 h	100,5	129,5	164,3	109,0	149,8	203,7	116,6	171,3	253,5

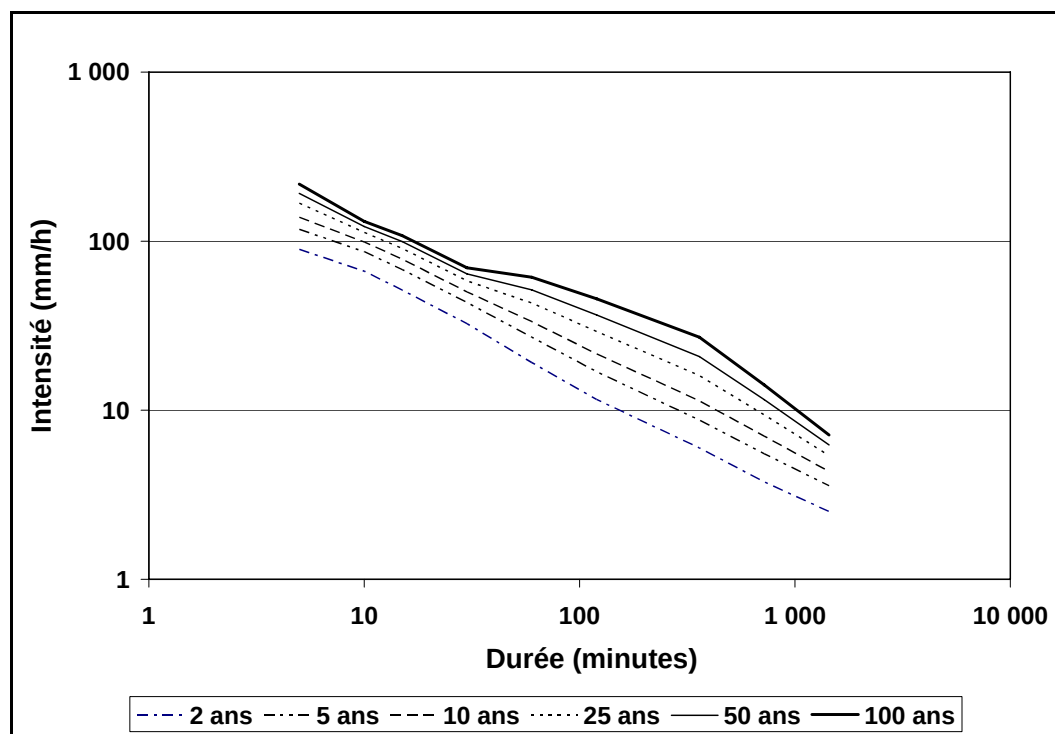


Figure 7-2 Courbes IDF de la station Québec Ville (période 1914-1943), telles que calculées par ajustement de distributions GEV à l'aide de la méthode des L-moments (analyse fréquentielle locale)

7.1.2 Courbes obtenues par analyse régionale

7.1.2.1 Données prises en compte

Toutes les données provenant des stations listées aux Tableaux 3-1 et 3-2 (voir aussi Figure 3-1) ont dans un premier temps été considérées pour l'analyse régionale. Cependant, suite à l'application du processus de validation des données présenté en détail à la section 3.2, certaines stations ont dû être retirées de l'analyse, de même que certaines années pour les stations conservées, en raison du nombre trop élevé de données manquantes. De plus, les données provenant des pluviomètres de la ville (stations S14B, S018, S027, S905, S910, S921, S80A, S902, S903, S904) n'ont pas été prises en compte pour le calcul des statistiques concernant les maxima de pluie sur des durées de 5 et 10 minutes. En effet, pour ces stations, les hauteurs de pluie sont enregistrées toutes les 5 minutes, alors qu'elles le sont à toutes les minutes pour les stations d'Environnement Canada. Or, un enregistrement aux 5 minutes ne

permet pas d'extraire de façon suffisamment précise des maxima de pluie tombés sur des périodes de 5 ou 10 minutes. En effet, supposons à titre d'exemple, la pluviométrie suivante :

• minute 1 : 0 mm	}	2 mm
• minute 2 : 0 mm		
• minute 3 : 0 mm		
• minute 4 : 1 mm		
• minute 5 : 1 mm		
• minute 6 : 1 mm	}	3 mm
• minute 7 : 1 mm		
• minute 8 : 1 mm		
• minute 9 : 0 mm		
• minute 10 : 0 mm		

Un enregistrement de la pluie à toutes les minutes donnerait dans ce cas un maximum de pluie tombée en 5 minutes de 5 mm (de la minute 4 à la minute 8) alors qu'un enregistrement toutes les 5 minutes donnerait un maximum de 3 mm. On constate donc par cet exemple simple que les deux types d'enregistrement peuvent donner des résultats très différents dans certaines situations et ne peuvent donc être combinés pour les analyses statistiques sur de courtes durées. Par ailleurs, les écarts entre les deux types d'enregistrement deviennent proportionnellement moins importants pour des durées plus longues.

Ces considérations ainsi que les résultats du processus de validation présenté à la section 3.2 ont conduit à la sélection de 9 pluviomètres d'Environnement Canada et de 10 stations de la ville de Québec pour l'analyse fréquentielle régionale. Le Tableau 7-3 résume les stations retenues ainsi que, pour chacune, le nombre d'années de données pris en compte dans les analyses en fonction de la durée des événements pluvieux.

Tableau 7-3 Stations initialement retenues pour l'analyse fréquentielle régionale et nombre d'années prises en compte pour les différentes durées

Station	Longueur de la série de données (ans)			
	24 h	1 h à 12 h	15 et 30 min	5 et 10 min
7011309	19	24	24	24
7012232	18	21	6	6
7016280	30	30	30	30
7016294	44	45	45	45
7016900	24	23	23	23
7017B65	13	12	-	-
7017BFN	19	23	9	9
7019990	11	7	-	-
7024254	11	15	15	15
S14B	5	5	5	-
S018	5	5	5	-
S027	5	5	5	-
S905	5	5	5	-
S910	5	5	5	-
S921	5	5	-	-
S80A	5	5	5	-
S902	5	5	5	-
S903	5	5	5	-
S904	5	5	5	-

Les trois grandes étapes de l'analyse fréquentielle régionale ont été décrites au Chapitre 6. Les résultats de ces trois étapes, pour le cas particulier de la ville de Québec, sont détaillés aux sections suivantes.

7.1.2.2 Homogénéité statistique

Dans un premier temps, nous avons supposé que toutes les stations du Tableau 7-3 constituaient une région homogène en matière d'intensités d'événements pluvieux extrêmes, pour toutes les durées de 5 min à 24 h. Pour valider l'homogénéité statistique de cette région, nous avons appliqué le test proposé par Hosking et Wallis (1993), décrit à l'Annexe 2 et à la section 6.2.1. Les valeurs de H_1 , H_2 et H_3 calculées pour la région regroupant toutes les stations du Tableau 7-3 apparaissent au Tableau 7-4. Notons que, puisque la construction des courbes

IDF requiert l'ajustement d'une distribution statistique pour 9 durées d'événements pluvieux (5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h), chaque étape de l'analyse fréquentielle régionale doit être réalisée pour chacune de ces durées. C'est pourquoi le Tableau 7-4 contient 9 valeurs de H_1 , H_2 et H_3 , chaque groupe de H_k caractérisant l'homogénéité statistique de la région en matière de maximum pluvieux sur une durée spécifique.

Tableau 7-4 Valeurs de H_k calculées en considérant toutes les stations listées au Tableau 7-3

Durée	H_1	H_2	H_3
5 min	-0,8	0,1	0,3
10 min	-0,8	-0,7	-0,5
15 min	-1,2	-0,5	0,5
30 min	-0,6	-0,9	-1,0
1 h	-1,5	-0,7	-0,3
2 h	0,9	0,0	0,6
6 h	-0,1	-0,5	-1,0
12 h	2,2	-0,5	-1,7
24 h	6,7	3,2	1,6

Les résultats du Tableau 7-4 révèlent que le groupe de stations du Tableau 7-3 est statistiquement homogène pour les durées de 5 min à 6 h (H_k toujours inférieur ou égal à 1) et quelque peu hétérogène pour la durée 2 h (H_k supérieur à 2). Cependant, il apparaît clairement que les séries de maxima annuels sur 24 h ne sont pas homogènes, et donc qu'il est impossible d'appliquer la méthode d'analyse fréquentielle régionale en considérant à la fois toutes les stations du Tableau 7-4. Ce comportement statistique distinct provient probablement du fait que les maxima annuels sur 24 h sont causés par des phénomènes météorologiques différents que les événements courts et intenses (extrêmes sur courtes durées). Ces derniers sont en effet causés par des phénomènes convectifs locaux dont les probabilités d'occurrence sont similaires d'une année à l'autre, tandis que les événements sur 24 h résultent de systèmes frontaux de plus grande envergure spatiale. Ainsi, lorsqu'un événement extrême sur 24 h est enregistré à un des pluviomètres sur le territoire de la ville, il est également enregistré aux autres pluviomètres. À l'opposé, un événement de courte durée (ex. 15 min) peut être très localisé et n'être perçu qu'à un ou quelques pluviomètres à la fois. C'est pourquoi, bien que les divers pluviomètres aient des séries de mesures s'étalant sur des périodes différentes, leur comportement statistique puisse être homogène pour des événements de courtes durées. Pour

les événements de plus longues durées, cependant, les séries ne contenant que 5 ans de données ne présenteront pas le même profil que les séries plus longues. À titre d'exemple, on a enregistré en septembre 2005 plus de 90 mm de pluie en 24 h à la plupart des pluviomètres situés sur le territoire de la ville. Or, cet événement compte pour un cinquième des séries de maxima annuels des pluviomètres de la ville, mais pour un 45^e seulement de la série des maxima à l'aéroport Jean-Lesage. On comprend donc aisément que les distributions statistiques des maxima sur 24 h soient très différentes et que ces séries ne puissent être combinées pour former un groupe homogène.

Pour la durée 24 h, il a donc fallu retirer certaines stations du groupe décrit au Tableau 7-3, de façon à constituer un ensemble de stations statistiquement homogène. Pour ce faire, nous avons appliqué le test de discordance proposé par Hosking et Wallis (1997) afin d'identifier les stations à conserver. De cette façon, nous avons finalement retenu, pour l'analyse fréquentielle régionale des hauteurs de précipitations sur 24 h, le groupe de stations du Tableau 7-5. Pour la région constituée de ces stations, les valeurs de H_k sont respectivement de $H_1 = 4,9$, $H_2 = 2,0$ et $H_3 = 1,1$. Bien que le critère d'homogénéité statistique ne soit pas formellement respecté (c.-à-d. tous les H_k ne sont pas inférieurs à 1), il s'agit d'une amélioration face à la valeur de $H_1 = 6,7$ précédemment obtenue en regroupant toutes les séries disponibles. Il s'avère par ailleurs impossible d'obtenir un groupe de stations parfaitement statistiquement homogène pour les événements de durées 24 h sans venir limiter la couverture spatiale des stations prises en compte dans l'analyse fréquentielle régionale.

L'ensemble de ces considérations nous amène à retenir, pour l'analyse fréquentielle régionale, les séries de maxima annuels présentées en détail à l'Annexe 3.

Tableau 7-5 Stations retenues pour l'analyse fréquentielle régionale des événements de durée 24 h et nombre d'années prises en compte

<i>Station</i>	<i>Longueur de la série de données (ans)</i>
7011309	19
7012232	18
7016280	30
7016294	44
7016900	24
7017B65	13
7019990	11
S14B	5
S018	5
S905	5
S921	5
S80A	5

7.1.2.3 Détermination de la distribution régionale et de ses paramètres

Tel qu'il a été mentionné précédemment, la distribution GEV a été retenue pour représenter la distribution des maxima annuels de pluie. Avant de procéder à l'ajustement des paramètres de cette distribution pour les neuf durées d'événements, on doit s'assurer que la GEV permet de bien représenter le comportement moyen des séries assemblées pour l'analyse. À cette fin, nous avons appliqué le test proposé par Hosking et Wallis (1993), décrit à l'Annexe 2 et à la section 6.2.2. Rappelons que Hosking et Wallis (1997) mentionnent que l'on peut conclure qu'une distribution représente bien les séries de mesures lorsque la valeur absolue de Z pour cette station est inférieure à 1,64. On constate au Tableau 7-6 que ce critère est respecté pour toutes les durées d'événements pluvieux, pour les groupes de stations décrits à la section précédente (7.1.2.2). Il est donc justifié d'appliquer une distribution GEV dans tous les cas.

Tableau 7-6 Valeurs de Z calculées en considérant toutes les stations listées au Tableau 7-3 (sauf pour les durées de 5 min et 10 min pour lesquelles seules les stations d'Environnement Canada ont été retenues et pour la durée 24 h pour laquelle les stations listées au Tableau 7-5 ont été retenues)

Durée	Z GEV
5 min	-0,78
10 min	0,82
15 min	-0,28
30 min	0,75
1 h	-0,76
2 h	-0,02
6 h	-0,83
12 h	0,13
24 h	0,93

Cette vérification complétée, les paramètres de la distribution GEV, pour un maximum annuel moyen de 1 mm, sont déterminés à l'aide de la méthode des L-moments (voir Annexe 1). Les paramètres calculés apparaissent au Tableau 7-7.

Tableau 7-7 Paramètres de la distribution GEV régionale pour un maximum annuel moyen de 1 mm de pluie (analyse fréquentielle régionale; méthode des L-moments)

Durée	k	α	ξ
5 min	0,045	0,260	0,861
10 min	-0,003	0,261	0,849
15 min	-0,029	0,263	0,841
30 min	0,022	0,292	0,838
1 h	-0,045	0,274	0,829
2 h	-0,082	0,256	0,830
6 h	-0,128	0,243	0,825
12 h	-0,039	0,266	0,836
24 h	0,095	0,267	0,869

7.1.2.4 Estimation des hauteurs de pluie pour différentes périodes de retour

Une fois la valeur des paramètres de la distribution GEV déterminée, il est possible de calculer les hauteurs (ou intensités) de pluie pour différentes périodes de retour à l'aide de l'équation 2. Dans un contexte d'analyse fréquentielle régionale, cette équation donne une hauteur « adimensionnelle » qui, pour chaque station, doit être multipliée par la moyenne des maxima à

cette station. Ainsi, lorsque n stations sont prises en compte pour l'analyse régionale, on obtient n ensembles de courbes IDF pour la région considérée. Toutes les courbes IDF calculées dans le cadre de notre analyse sont exposées à l'Annexe 4. Chaque valeur calculée est accompagnée des bornes inférieure et supérieure de son intervalle de confiance à 95 %.

D'un point de vue opérationnel, il s'avère peu pratique de disposer de plusieurs ensembles de courbes IDF pour le seul territoire de la ville de Québec. Il faut donc s'accorder sur la procédure à suivre pour sélectionner un seul ensemble de courbes IDF à appliquer dans tous les secteurs de la ville. Une méthode simple et sécuritaire serait de sélectionner, pour chaque durée et chaque période de retour, la hauteur de pluie la plus élevée parmi les hauteurs calculées à chaque station. Or, on s'aperçoit que pour les durées de 1 h à 24 h, les hauteurs les plus élevées sont calculées à la station S921 (Beauport), pour laquelle on ne dispose que d'une série de données de 5 ans, et donc pour laquelle les intervalles de confiance des hauteurs calculées sont très étendus. À titre d'exemple, on calcule une hauteur de 140 mm sur 24 h pour l'événement de récurrence 100 ans à cette station, cette valeur se situant à 95 % dans l'intervalle [86 mm; 267 mm]. On conçoit aisément qu'il s'avère impensable de travailler avec de telles incertitudes pour la planification et le dimensionnement des ouvrages de drainage.

Une façon qui permettrait de réduire de façon considérable l'incertitude associée aux hauteurs de pluie calculées tout en procurant un seul ensemble de courbes IDF pour tout le territoire de la ville serait de calculer les moyennes pondérées des valeurs obtenues à chaque station pour construire des courbes IDF que l'on peut qualifier de « moyennes ». Les hauteurs de pluie ainsi calculées, pour la saison de mai à octobre en climat actuel, sont résumées au Tableau 7-8 avec leurs intervalles de confiance respectifs. Ces courbes IDF moyennes ne peuvent cependant être représentatives du régime des pluies extrêmes sur le territoire de la ville de Québec qu'en l'absence de disparité spatiale significative dans l'intensité des maxima annuels de pluie sur des durées de 5 min à 24 h entre les divers secteurs de la ville. La section suivante présente les résultats d'analyses complétées en vue de vérifier si une telle disparité existe ou non à Québec.

Tableau 7-8 Hauteur des pluies estivales extrêmes (mm) issue de la moyenne pondérée des hauteurs calculées par l'analyse fréquentielle régionale, pour la saison de mai à octobre en climat actuel (distribution GEV; méthode des L-moments)

	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	6,8	7,0	7,8	8,9	9,1	10,2	10,0	10,5	11,8
10 min	9,8	10,0	11,3	12,8	13,2	14,9	14,6	15,4	17,4
15 min	11,7	12,3	13,3	15,2	16,3	17,8	17,4	19,0	20,8
30 min	15,3	16,4	17,8	20,4	22,0	24,0	23,3	25,6	28,1
1 h	18,3	19,6	21,2	24,5	26,4	28,8	28,3	31,1	34,2
2 h	23,3	24,9	27,0	30,8	33,4	36,6	35,6	39,4	43,8
6 h	33,6	36,5	41,0	43,9	48,9	56,2	50,6	58,1	67,8
12 h	41,2	45,1	50,5	54,2	60,2	68,0	62,3	70,6	80,6
24 h	53,7	58,3	64,3	68,5	75,0	83,2	76,6	85,1	95,3
	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	11,3	12,3	13,9	12,1	13,6	15,5	12,7	15,0	17,3
10 min	16,7	18,4	20,9	18,0	20,8	23,7	19,2	23,3	26,8
15 min	19,8	22,6	24,8	21,4	25,3	28,1	22,7	28,0	31,5
30 min	26,6	30,1	33,5	28,7	33,4	37,7	30,4	36,7	42,1
1 h	32,9	37,3	41,7	36,0	42,0	47,9	38,8	46,9	54,7
2 h	41,6	47,6	54,3	45,7	54,1	63,3	49,6	60,9	73,3
6 h	59,0	71,1	84,9	65,1	81,9	99,8	70,8	93,5	116,8
12 h	71,7	84,1	97,7	78,1	94,5	111,8	83,9	105,1	127,3
24 h	85,2	96,9	110,1	90,3	105,0	120,7	94,5	112,5	131,8

7.1.3 Comparaison des mesures concomitantes à la station S921 et à la station de l'aéroport Jean-Lesage

Tel qu'il a été discuté précédemment, les résultats détaillés de l'analyse fréquentielle régionale, présentés à l'Annexe 4, révèlent que les hauteurs de pluie calculées à la station S921 (Beauport) pour les événements extrêmes de durée 1 h à 24 h sont plus élevées que les hauteurs calculées à toute autre station. À première vue, ces résultats peuvent laisser présumer que les événements de 1 h à 24 h sont en général plus intenses dans le secteur de Beauport qu'ailleurs sur le territoire de la ville. Cependant, seuls cinq maxima annuels ont pu être utilisés à la station S921 pour obtenir ces résultats, ce qui conduit à une incertitude élevée sur les valeurs calculées. Ainsi, les hauteurs de pluie sur des durées de 1 h à 24 h, pour des événements de récurrences de 2 à 100 ans, sont certes plus élevées *en moyenne* à Beauport, mais l'incertitude sur la valeur de cette moyenne est telle qu'on ne peut conclure sur la répartition spatiale de l'intensité des événements pluvieux extrêmes à partir de ces seuls résultats. En effet, il est possible que les cinq années pour lesquelles des maxima annuels sont disponibles à la station S921 (1989, 1998, 1999, 2004 et 2005) soient des années lors desquelles les événements de 1 h à 24 h ont été particulièrement intenses et/ou que les maxima annuels pour une ou plusieurs de ces années aient été effectivement plus élevés à Beauport qu'ailleurs, sans pour autant que l'on puisse observer cette disparité de façon générale. L'un ou l'autre de ces facteurs, ou encore la combinaison des deux, peuvent conduire au calcul de maxima moyens élevés pour la station S921, et par conséquent à des hauteurs de pluie calculées par analyse régionale plus élevées qu'aux autres stations.

Plutôt que d'émettre des conclusions hâtives, il est essentiel de vérifier si les valeurs plus élevées à la station S921, calculées à partir de courtes séries et donc entachées d'une incertitude importante, résultent des considérations mentionnées précédemment ou si, à l'opposé, elles proviennent d'une réelle disparité spatiale dans l'intensité des événements extrêmes. Cette vérification est d'autant plus importante qu'il n'existe aucune série de maxima annuels plus longue que cinq ans dans le secteur de Beauport (voir Figure 3-1). Pour ce secteur, la seule information disponible provient de courtes séries de mesures. On doit donc relier cette information à celle fournie par des séries plus longues, provenant de stations localisées dans d'autres secteurs de la ville, afin de déterminer s'il existe réellement une disparité spatiale dans l'intensité des événements extrêmes.

À cette fin, nous avons comparé la hauteur maximale de pluie enregistrée sur 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h à la station de l'aéroport Jean-Lesage (7016294) et à la station de Beauport (S921), pour chaque journée lors lesquelles des données étaient disponibles à ces deux stations; les 1 101 journées recensées s'étalent sur les années 1989, 1996 à 1999, 2004 et 2005. Au cours de ces 7 années, on compte 446 journées lors desquelles au moins 1 mm de pluie ont été enregistrés aux deux stations. Il est à noter qu'aucune station autre que celle de l'aéroport Jean-Lesage ne possède autant de mesures concomitantes aux mesures de la station S921. La comparaison s'est donc limitée aux données de ces deux stations.

La comparaison a été effectuée selon deux méthodes distinctes pour chaque durée allant de 1 h à 24 h. Selon la première méthode, nous avons calculé le rapport entre le maximum de pluie enregistré à la station S921, sur la durée spécifiée, et le maximum enregistré le même jour à la station de l'aéroport pour toutes les journées lors desquelles les maxima de pluie enregistrés aux deux stations, sur la durée spécifiée, étaient supérieurs à un certain seuil prédéfini. Le seuil retenu pour cette analyse est le moins élevé des maxima annuels enregistrés à la station de l'aéroport sur toute sa période d'opération, soit de 1961 à 2005. La moyenne des rapports de chaque journée a finalement été calculée.

Selon la deuxième méthode de comparaison, les hauteurs maximales enregistrées à chaque station, sur la durée spécifiée et pour toutes les journées où des données étaient disponibles aux deux stations, ont été triées en ordre croissant, de façon indépendante aux deux stations. La moyenne des 10 hauteurs les plus élevées a été calculée pour chaque station, puis le rapport de la moyenne à la station S921 sur la moyenne à la station de l'aéroport a été évalué. Les résultats des deux méthodes de comparaison apparaissent au Tableau 7-9.

Tableau 7-9 Résultats de la comparaison entre les mesures de la station de l'aéroport Jean-Lesage et celles de station S921 (Beauport)

Durée	Méthode des journées avec hauteur > seuil aux deux stations			Rapport entre la moyenne des 10 hauteurs les plus élevées
	Seuil (mm)	Nombre de jours	Moyenne des rapports	
1 h	11,9	13	1,05	1,04
2 h	13,9	15	1,03	0,98
6 h	19,9	27	0,98	1,02
12 h	19,9	33	1,02	1,07
24 h	29,2	29	1,09	1,01

On constate au Tableau 7-9 qu'il est difficile de statuer sur la présence ou non d'une disparité spatiale des intensités de pluie lors d'événements importants à partir des résultats des deux méthodes de comparaison appliquées avec les données disponibles et, le cas échéant, sur l'ampleur de cette disparité. Selon les méthodes et les durées, les intensités seraient en moyenne de 2 % moins élevées (durée 2 h, 2^e méthode et durée 6 h, 1^{re} méthode) à 9 % plus élevées (durée 24 h, 1^{re} méthode) à Beauport qu'à l'aéroport Jean-Lesage. Pour tenir compte de ces résultats d'une façon qu'on pourrait qualifier de « sécuritaire », les courbes IDF représentatives de la pluviométrie à Beauport pourraient être obtenues en majorant les courbes de l'aéroport Jean-Lesage de 5 % pour les durées de 1 h à 6 h, et de 10 % pour les durées de 12 h et 24 h. Ces considérations seront prises en compte lors du choix de courbes IDF à utiliser sur l'ensemble du territoire de la ville de Québec, choix qui sera discuté en détail à la section 7.1.5.

7.1.4 Interpolation spatiale à la station S921

Afin de réduire l'incertitude associée aux intensités de pluie calculées à la station S921 pour les événements extrêmes, nous avons examiné la possibilité d'allonger les séries de mesures à cette station en utilisant les données disponibles aux autres stations sur le territoire de la ville. Tel qu'il est explicité à la section 6.3, nous avons utilisé le logiciel Geostat (Favre *et al.*, 2003) pour reconstituer les données manquantes par krigeage. Les tests ont été effectués pour les maxima de pluie enregistrés sur 12 h, afin d'évaluer la nature et la qualité de l'information

supplémentaire que cette méthode pourrait nous apporter par rapport aux autres méthodes considérées dans le cadre de cette étude. Le krigeage a été appliqué sur la période 1972 à 2005, à partir des données provenant des stations listées au Tableau 7-10. De cette façon, nous avons pu reconstituer les maxima de pluie sur une durée de 12 h à la station S921 pour chaque journée de la période 1972-2005. L'analyse fréquentielle régionale des précipitations de 12 h sur le territoire de Québec, dont les résultats apparaissent à la section 7.1.2.4 et à l'Annexe 4, a par la suite été recommencée en utilisant les mêmes données que précédemment, sauf à la station S921 pour laquelle les maxima annuels des données reconstituées par krigeage, sur la période 1972-2005, ont plutôt été considérés.

Tableau 7-10 Stations utilisées pour la reconstitution des données manquantes par krigeage

Numéro	Nom	Début	Fin
7011309	Charlesbourg Parc Orléans	1972	1995
7012232	Duburger	1972	1992
7016294	Québec Aéroport	1961	1995
7016900	St Augustin	1966	1989
7017B65	Ste Foy Matapédia	1972	1984
7017BFN	Ste Foy (Pie XII)	1973	1995
701A9E0	Courville de Poissy	1975	1981
7024254	Lauzon	1979	1995
S921	Beauport	1989 *	2005 *

* Des données sont disponibles pour les années 1989, 1996 à 1999, 2004 et 2005 à la station S921.

Les résultats de cette seconde analyse régionale, réalisée sur la base des données reconstituées, ne seront pas présentés en détail dans ce rapport. Mentionnons seulement que les modifications par rapport aux hauteurs calculées lors de l'analyse régionale précédemment réalisée pour la durée 12 h sont mineures aux stations autres que la station S921 (variations de 0 à 2 %, selon les stations et les récurrences), mais que la nouvelle analyse régionale conduit à une réduction de 34 à 35 % (selon les récurrences) des hauteurs calculées à la station S921. Ce résultat provient du fait que la moyenne des maxima annuels sur 12 h à cette station passe de 65,8 mm, pour les 5 années où des données sont disponibles, à 42,8 mm pour la série reconstituée par krigeage. Or, on sait que le krigeage consiste en une interpolation spatiale des données disponibles afin d'estimer la valeur des données manquantes. S'il existe réellement une différence entre l'intensité de pluie à Beauport et ailleurs sur le territoire de la ville, le

krigeage ne pourrait en tenir compte que si on disposait d'une ou de plusieurs séries comportant plusieurs années de données dans les environs de Beauport, ce qui, nous l'avons déjà souligné, n'est pas le cas en date d'aujourd'hui. Cette situation explique pourquoi les intensités calculées à Beauport suite au krigeage sont plus faibles que celles calculées à partir des données réelles. On peut donc conclure à la lumière de ces résultats que le krigeage, ou toute forme de reconstitution de données à base spatiale, ne peut pas fournir d'information supplémentaire qui puisse être utile à la sélection d'un ensemble de courbes IDF à utiliser sur tout le territoire de la ville de Québec.

7.1.5 Choix d'un ensemble de courbes représentatif pour le territoire de la ville de Québec

Parmi les résultats présentés aux sections 7.1.1 à 7.1.4, on doit choisir un ensemble de courbes IDF à utiliser pour la conception des ouvrages de drainage sur l'ensemble du territoire de la ville de Québec. À cette fin, nous pouvons choisir parmi les quatre options suivantes : 1) les résultats de l'analyse régionale pour chaque station, desquels on pourrait retenir la hauteur maximale pour chaque durée et chaque récurrence; 2) la moyenne pondérée de l'analyse régionale (valeurs du Tableau 7-8); 3) les résultats de l'analyse régionale à la station 7016294 (aéroport Jean-Lesage) majorés de 5 % pour les durées de 1 h à 6 h et de 10 % pour les durées de 12 h et 24 h, afin de tenir compte des résultats obtenus par comparaison de la pluviométrie de la station S921 (Beauport) avec celle de la station de l'aéroport (réf. section 7.1.3); et 4) les résultats de l'analyse locale à la station de l'aéroport Jean-Lesage. Lors de ce choix, nous devons tenir compte du fait que les incertitudes associées aux valeurs calculées à partir de courtes séries sont très importantes. C'est pourquoi nous proposons de retenir, comme hauteurs de pluie représentatives des événements pluvieux exceptionnels sur tout le territoire de la ville, *le maximum des valeurs suivantes*, pour chaque durée d'événement : 1) la hauteur maximale issue de l'analyse régionale parmi les hauteurs calculées aux stations pour lesquelles on dispose d'au moins 20 ans de données (et donc pour lesquelles les incertitudes demeurent acceptables); 2) la moyenne pondérée de l'analyse régionale; 3) les résultats de l'analyse régionale à la station 7016294 majorés de 5 % pour les durées de 1 h à 6 h, et de 10 % pour les durées de 12 h et 24 h; et 4) les résultats de l'analyse locale à la station de l'aéroport Jean-Lesage. De cette façon, on obtient les hauteurs de pluie données au Tableau 7-11. Ces hauteurs constituent les courbes IDF que nous proposons de retenir pour

représenter la pluviométrie en climat actuel sur le territoire de la ville de Québec. Ces courbes sont illustrées à la Figure 7-3. À titre informatif, le Tableau 7-12 mentionne l'origine de la hauteur de pluie sélectionnée pour chaque durée. La Figure 7-4 offre une comparaison visuelle entre les courbes proposées et celles provenant de l'analyse locale (méthode standard) des données de l'aéroport Jean-Lesage. On constate sur cette figure que les écarts les plus importants entre les deux jeux de courbes surviennent pour les durées de 6 à 24 h (événements longs, à fort volume).

Tableau 7-11 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat actuel pour la saison de mai à octobre à Québec

	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
5 min	7,7	10,0	11,4	13,3	14,9	16,6
10 min	11,2	14,8	17,1	20,1	22,3	24,5
15 min	13,7	18,2	21,3	25,2	28,2	31,3
30 min	18,5	24,9	29,0	34,1	37,8	41,5
1 h	22,1	29,8	35,1	42,1	47,5	53,0
2 h	26,9	36,0	42,4	51,2	58,3	66,0
6 h	40,3	54,0	64,2	78,6	90,4	103,3
12 h	49,5	66,1	77,5	92,3	103,7	115,3
24 h	64,3	82,7	93,9	106,9	115,8	124,1

Tableau 7-12 Origine des hauteurs sélectionnées pour les courbes IDF proposées

Durée	Hauteur choisie pour les courbes IDF proposées
5 min	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7016280 (Québec Ville) pour les récurrences 2 à 10 ans Hauteur calculée par analyse locale à la station 7016294 (Québec Aéroport) pour les récurrences 25 à 100 ans
10 min	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7011309 (Charlesbourg Parc-Orléans) (récurrences 2 à 100 ans)
15 min	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7011309 (Charlesbourg Parc-Orléans) (récurrences 2 à 100 ans)
30 min	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7011309 (Charlesbourg Parc-Orléans) (récurrences 2 à 100 ans)
1 h	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7011309 (Charlesbourg Parc-Orléans) (récurrences 2 à 100 ans)
2 h	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7016294 (Québec Aéroport) majoré de 5 % pour tenir compte des écarts possibles avec Beauport pour les récurrences 2 à 50 ans Hauteur calculée par analyse locale à la station 7016294 (Québec Aéroport) pour la récurrence 100 ans
6 h	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7016280 (Québec Ville) (récurrences 2 à 100 ans)
12 h	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7016280 (Québec Ville) (récurrences 2 à 100 ans)
24 h	Hauteur calculée par analyse régionale à la station 7016280 (Québec Ville) (récurrences 2 à 100 ans)

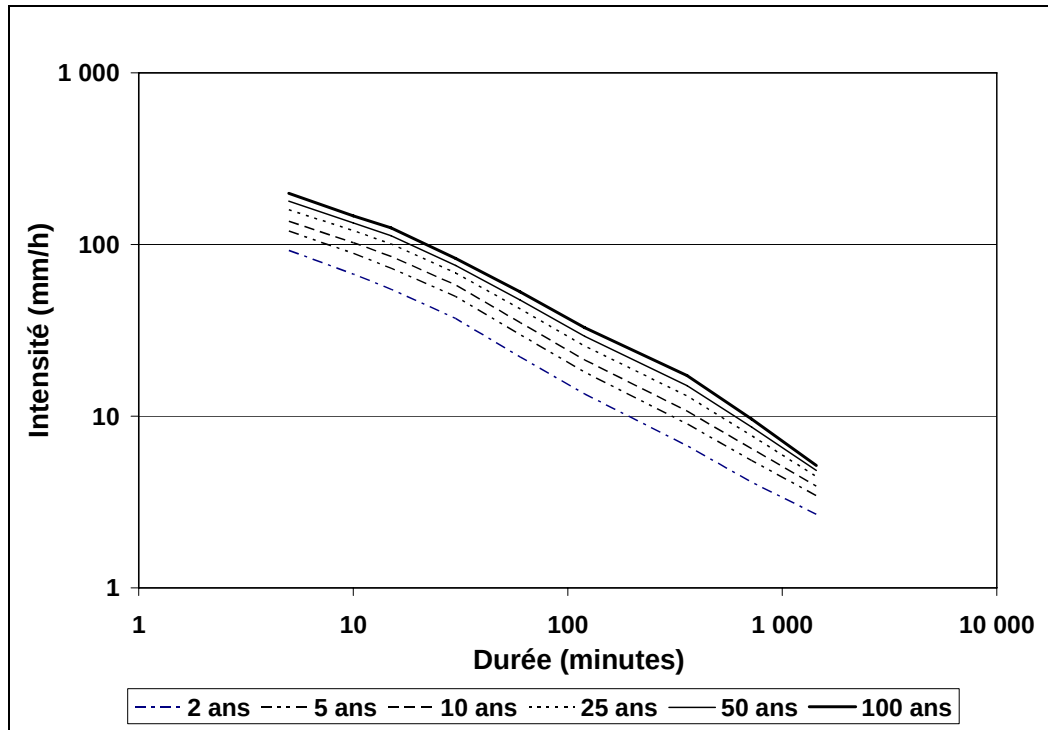


Figure 7-3 Courbes IDF proposées en climat actuel pour la ville de Québec

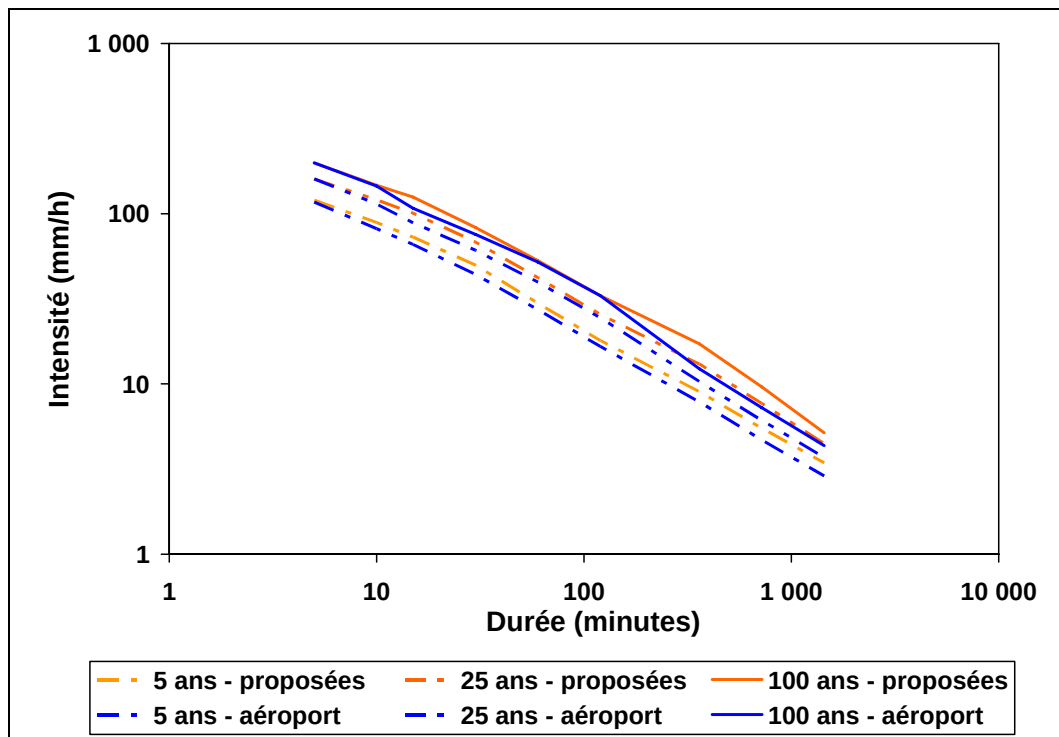


Figure 7-4 Comparaison entre les courbes IDF proposées et celles obtenues par analyse locale des données de l'aéroport Jean-Lesage (distribution GEV; méthode des L-moments)

À titre informatif également, le Tableau 7-13 reprend les hauteurs de pluie des courbes IDF proposées (présentées précédemment au Tableau 7-11) en compagnie des intervalles de confiance associés à chaque valeur sélectionnée pour composer ces courbes IDF.

Tableau 7-13 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat actuel pour la saison de mai à octobre à Québec et intervalles de confiance à 95 % de chaque valeur sélectionnée pour composer ces courbes

	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	6,8	7,7	8,8	8,8	10,0	11,4	10,0	11,4	13,2
10 min	9,6	11,2	13,1	12,6	14,8	17,1	14,5	17,1	19,9
15 min	12,0	13,7	15,9	15,8	18,2	20,8	18,2	21,3	24,0
30 min	16,4	18,5	21,0	21,9	24,9	28,0	25,3	29,0	32,6
1 h	19,7	22,1	24,9	26,5	29,8	33,4	31,0	35,1	39,3
2 h	24,3	26,9	30,2	32,2	36,0	40,7	37,4	42,4	48,3
6 h	33,3	40,3	53,3	43,5	54,0	73,0	50,4	64,2	87,7
12 h	41,5	49,5	61,4	54,3	66,1	82,9	62,5	77,5	97,8
24 h	55,1	64,3	75,8	70,0	82,7	97,8	78,4	93,9	111,2
	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
5 min	11,4	13,3	15,6	12,2	14,9	18,3	13,0	16,6	21,5
10 min	16,7	20,1	23,6	18,2	22,3	26,6	19,5	24,5	29,8
15 min	21,0	25,2	28,3	22,9	28,2	31,8	24,6	31,3	35,4
30 min	29,1	34,1	38,5	31,5	37,8	43,0	33,5	41,5	47,9
1 h	36,2	42,1	47,5	39,9	47,5	54,2	43,3	53,0	61,6
2 h	43,7	51,2	59,7	48,1	58,3	69,3	46,9	66,0	94,3
6 h	58,9	78,6	109,6	65,1	90,4	128,7	71,2	103,3	149,1
12 h	72,1	92,3	118,3	78,9	103,7	134,2	85,0	115,3	151,6
24 h	87,5	106,9	127,7	93,1	115,8	139,4	97,8	124,1	151,2

7.2 Courbes IDF pour la saison de mai à octobre en climat futur

Les courbes IDF en climat futur sont obtenues en majorant les courbes IDF en climat actuel, dont les valeurs apparaissent au Tableau 7-11, par les accroissements présentés au Tableau 6-1. Les courbes IDF ainsi estimées pour la période 2041-2070 sont données au Tableau 7-14. Rappelons que les accroissements entre les climats actuel et futur ont été estimés par Mailhot *et al.* (2007) sur la base de l'analyse des sorties du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) et de la pluviométrie enregistrée à une cinquantaine de stations du Sud du Québec. Ces estimations reposent sur les hypothèses discutées précédemment à la section 6.4. Tel qu'il a déjà été mentionné, Mailhot *et al.* (2007) n'ont calculé que les accroissements pour des durées de 2 h à 24 h et des périodes de retour de 2 à 50 ans, en raison des limitations associées aux données disponibles. Les accroissements pour la durée 1 h et pour la récurrence 100 ans (durées 1 h à 24 h) ont été calculés sur la base des résultats du MRCC, en utilisant la méthodologie développée par Mailhot *et al.* (2007).

Tableau 7-14 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat futur (période 2041-2070) pour la saison de mai à octobre à Québec

	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
1 h	26,7	35,5	41,7	50,1	56,8	63,8
2 h	32,4	42,5	49,3	57,9	64,8	72,3
6 h	45,9	61,8	72,6	86,5	97,0	107,8
12 h	54,9	72,7	83,9	97,0	106,3	115,3
24 h	71,0	90,0	100,4	111,1	117,6	124,1

La Figure 7-5 offre une comparaison visuelle des courbes IDF proposées en climats actuel et futur. On remarque notamment sur cette figure que les intensités calculées en climat futur (période 2041-2070) pour les événements de récurrence 5 ans sont presque les mêmes que les intensités calculées pour les événements de récurrence 10 ans en climat actuel. Également, les intensités des événements de récurrence 10 ans en climat futur s'approchent des intensités des événements de récurrence 25 ans en climat actuel pour les courtes durées (1 h et 2 h). Ces changements entraîneront certainement des conséquences notables en matière de conception des ouvrages de drainage urbain.

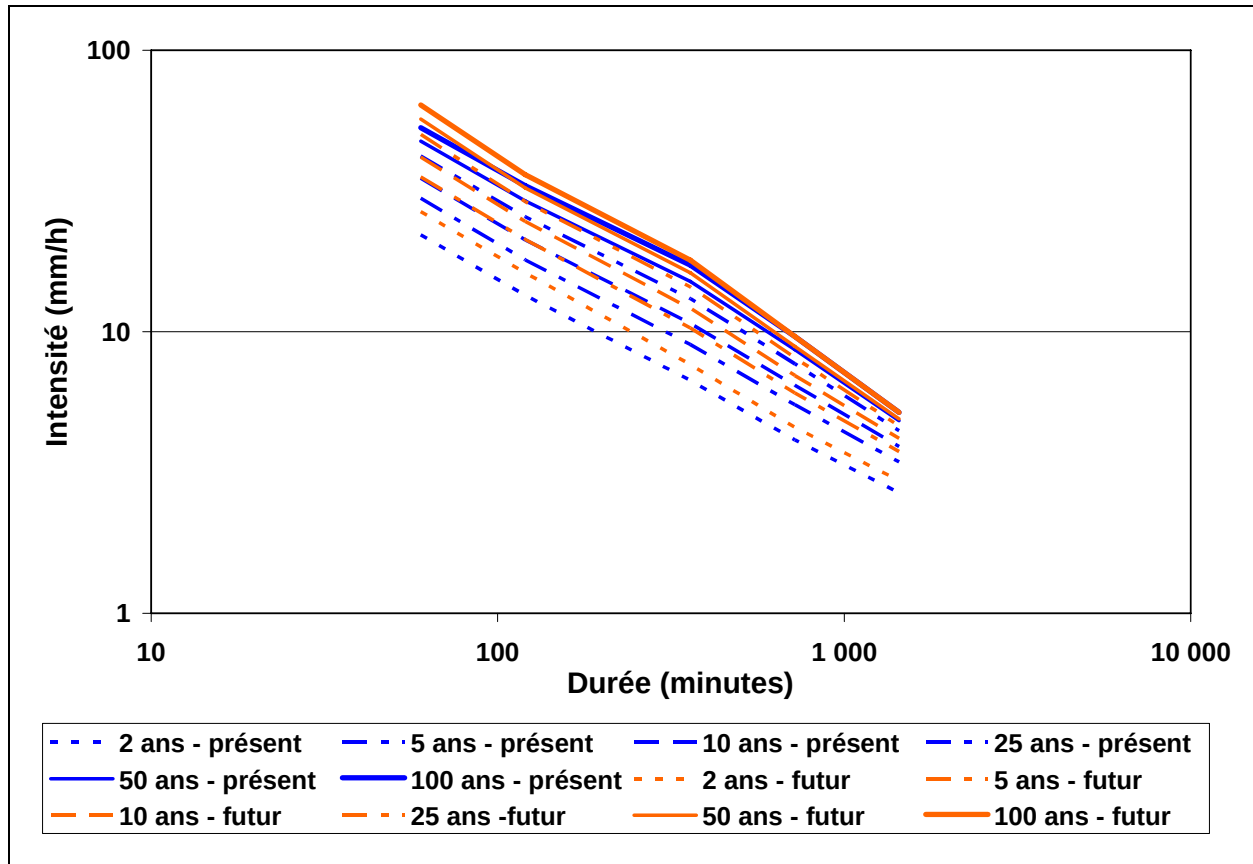


Figure 7-5 Comparaison des courbes IDF proposées en climats actuel et futur pour la ville de Québec

Afin de donner un aperçu des incertitudes associées aux valeurs des courbes IDF en climat futur, nous avons multiplié les intervalles de confiance des courbes proposées en climat actuel (Tableau 7-13) par les accroissements prévus entre les hauteurs de pluie des climats futur et actuel (Tableau 6-1). Les résultats de ce calcul sont donnés au Tableau 7-15. Les incertitudes présentées dans ce tableau ne sont que celles provenant des estimations statistiques; elles ne tiennent pas compte des incertitudes associées aux prédictions du modèle climatologique en climat futur non plus que de celles provenant de la méthode appliquée pour transposer les résultats de ce modèle (échelle 45 km x 45 km) à l'échelle des stations météorologiques. Les intervalles de confiance à 95 % des hauteurs de pluie en climat futur seraient donc en réalité beaucoup plus étendus que les intervalles présentés au Tableau 7-15 si l'on tenait compte de l'ensemble de ces facteurs. Cependant, les données disponibles ne nous permettent pas d'évaluer l'amplitude exacte de ces intervalles de confiance.

Tableau 7-15 Hauteurs (mm) des courbes IDF proposées en climat futur pour la saison de mai à octobre à Québec et incertitudes (intervalles de confiance à 95 %) provenant des hauteurs de pluie calculées en climat actuel

	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
1 h	23,8	26,7	30,1	31,6	35,5	39,8	36,8	41,7	46,7
2 h	29,3	32,4	36,4	38,0	42,5	48,0	43,5	49,3	56,2
6 h	37,9	45,9	60,7	49,8	61,8	83,5	57,0	72,6	99,2
12 h	46,0	54,9	68,1	59,8	72,7	91,2	67,7	83,9	105,9
24 h	60,9	71,0	83,8	76,2	90,0	106,5	83,8	100,4	118,8
	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
1 h	43,1	50,1	56,6	47,7	56,8	64,9	52,1	63,8	74,2
2 h	49,4	57,9	67,4	53,5	64,8	77,0	51,4	72,3	103,2
6 h	64,9	86,5	120,6	69,9	97,0	138,1	74,3	107,8	155,6
12 h	75,8	97,0	124,4	80,9	106,3	137,6	85,0	115,3	151,6
24 h	90,9	111,1	132,6	94,5	117,6	141,6	97,8	124,1	151,2

Notons que, dans l'état actuel des connaissances et des outils disponibles, il nous est impossible de statuer sur l'augmentation des hauteurs de pluie en climat futur pour des événements de durée inférieure à 1 h. Pour ces événements, on ne peut qu'extrapoler les accroissements résumés au Tableau 6-1. Une façon de faire serait de retenir, pour les événements de durée inférieure à 1 h, les accroissements calculés pour la durée 1 h. Ainsi, pour obtenir les hauteurs de pluie de récurrence de 2 à 100 ans en climat futur pour les événements de durée inférieure à 1 h, il serait possible d'accroître les valeurs du climat présent (Tableau 7-11) de 20 % environ. Cette façon de faire ne peut cependant donner qu'un aperçu des hauteurs de pluie attendues; les hauteurs de pluie ainsi calculées ne devraient donc être utilisées qu'à titre indicatif. On s'attend par ailleurs à ce que les modifications du climat des prochaines décennies entraînent une augmentation plus marquée de l'intensité des événements pluvieux de courte durée que de celle des événements de longue durée, sans

toutefois que cela puisse être vérifié à l'aide des versions actuelles des modèles climatiques. Dans l'état actuel des connaissances, il nous est impossible de statuer sur l'augmentation de l'intensité des événements de durée inférieure à 1 h. On retiendra donc à titre indicatif une augmentation de l'ordre de 20 % pour ces événements, en considérant cette approximation comme étant la limite inférieure de l'accroissement pouvant être effectivement observé d'ici la période 2041-2070.

7.3 Courbes IDF pour la saison de décembre à mars en climat actuel

En période hivernale, les données disponibles ne permettent pas de construire des courbes IDF aussi complètes que celles de la période estivale. En effet, la seule information dont on dispose en hiver est la pluviométrie totale tombée à chaque jour, puisque les pluviomètres à auget sont généralement fermés pendant cette période. Ainsi, nous avons calculé, à l'aide de l'analyse fréquentielle régionale, les hauteurs de pluie journalières pouvant être dépassées une fois tous les 2 à 100 ans, en moyenne, pendant les mois de décembre, janvier, février et mars à Québec. Les données retenues pour ce calcul sont celles des stations d'Environnement Canada situées dans un rayon de 25 km de la ville de Québec et pour lesquelles on dispose d'au moins 15 années avec moins de 7 jours de données manquantes pendant les mois de décembre, janvier, février et mars. Ces stations sont listées au Tableau 7-16.

Tableau 7-16 Stations retenues pour l'analyse fréquentielle régionale de la pluie hivernale journalière et nombre d'années prises en compte

Station	<i>Longueur de la série de données (ans)</i>
7011170	28
7011309	25
7012232	22
7016280	84
7016294	52
7016900	23
7018577	18
7020567	25
7024254	23
7027391	16
7041330	22
7017999	22

Rappelons que la première étape de l'analyse régionale consiste à vérifier l'homogénéité statistique de la région composée des stations retenues. Pour la région formée des stations énumérées au Tableau 7-16, les valeurs de H_1 , H_2 , et H_3 , selon le test de Hosking et Wallis (1993; voir aussi Annexe 2), sont respectivement de 0,9, -1,3 et -1,8. Puisque toutes ces valeurs sont inférieures à 1, on peut conclure à l'homogénéité statistique de la région et poursuivre les calculs d'analyse fréquentielle régionale. La deuxième étape de cette analyse consiste à vérifier que la distribution statistique retenue, soit la distribution GEV, représente bien les données observées. La valeur de Z calculée selon le test de Hosking et Wallis (1997; voir aussi Annexe 2) pour la pluie hivernale journalière enregistrée aux stations du Tableau 7-16 est de -0,33; on peut donc conclure que la distribution GEV est appropriée, puisque la valeur absolue de Z est inférieure à 1,64. La troisième et dernière étape de l'analyse fréquentielle régionale consiste à estimer les hauteurs de pluie, pour chaque station et pour diverses périodes de retour. Pour ce faire, les paramètres de la distribution GEV régionale adimensionnelle ont d'abord été déterminés à l'aide de la méthode des L-moments (voir Annexe 1). Les paramètres calculés apparaissent au Tableau 7-17 et les hauteurs de pluie hivernale journalière calculées à partir de ces paramètres sont données au Tableau 7-18 pour chaque station.

Tableau 7-17 Paramètres de la distribution GEV régionale pour la pluie hivernale journalière, pour un maximum annuel moyen de 1 mm de pluie (analyse fréquentielle régionale; méthode des L-moments)

k	α	ξ
0,105	0,403	0,806

Tableau 7-18 Hauteur de pluie sur une même journée en période hivernale, selon les résultats de l'analyse fréquentielle régionale (mm) (distribution GEV; méthode des L-moments)

Station	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
7011170	19,7	28,3	33,4	39,3	43,4	47,1
7011309	27,7	39,8	47,0	55,4	61,1	66,3
7012232	26,2	37,7	44,5	52,4	57,8	62,8
7016280	20,1	28,9	34,1	40,2	44,3	48,2
7016294	22,2	31,9	37,7	44,4	49,0	53,2
7016900	21,9	31,5	37,2	43,8	48,3	52,4
7018577	22,7	32,5	38,5	45,3	50,0	54,2
7020567	22,7	32,6	38,6	45,4	50,1	54,4
7024254	20,5	29,4	34,7	40,9	45,1	49,0
7027391	23,5	33,7	39,8	46,9	51,7	56,2
7041330	24,0	34,5	40,8	48,0	53,0	57,5
7017999	24,3	34,9	41,3	48,6	53,6	58,2
MOYENNE	23,0	33,0	39,0	45,9	50,6	55,0
ÉC.-TYPE	2,4	3,4	4,1	4,8	5,3	5,7

Les hauteurs du Tableau 7-18 représentent des hauteurs de pluie qui sont susceptibles de tomber au cours d'une même journée, soit, à *titre d'exemple*, de 8 h 01 le matin à 8 h 00 le lendemain. Or, pour convertir cette hauteur en une hauteur maximale annuelle pouvant se produire sur 24 h, et pas nécessairement au cours d'une même journée du calendrier, il est possible de multiplier ces valeurs par 1,13, ce facteur multiplicatif étant souvent mentionné dans la littérature scientifique pour le calcul du maximum annuel de pluie sur 24 h, toutes saisons confondues (ex. Angel et Huff, 1997). Le Tableau 7-19 donne les hauteurs ainsi calculées, accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, pour la station 7011309 (Charlesbourg Parc-Orléans), soit la station pour laquelle les hauteurs de pluie hivernale calculées à l'aide de l'analyse fréquentielle régionale sont les plus élevées.

Tableau 7-19 Hauteur de pluie maximale sur 24 h en période hivernale (mm) pour la station 7011309 et intervalles de confiance à 95 % (analyse fréquentielle régionale; distribution GEV; méthode des L-moments)

Réurrence	Borne inférieure 95 %	Moyenne	Borne supérieure 95 %
2 ans	26,9	31,3	36,2
5 ans	38,9	45,0	51,5
10 ans	45,7	53,1	61,0
25 ans	53,5	62,6	72,4
50 ans	58,3	69,0	80,9
100 ans	62,4	75,0	89,4

8. Analyse des événements majeurs de 2004, 2005 et 2006

En 2004, 2005 et 2006, quelques événements pluvieux ont causé des dysfonctionnements importants (i.e. refoulements et inondations) du réseau de drainage en certains points de la ville. Afin de répondre aux diverses questions soulevées concernant, notamment, le caractère extrême ou non de ces événements, nous avons étudié de façon plus détaillée les événements suivants :

- 9 septembre 2004;
- 30-31 août 2005;
- 25-26 septembre 2005;
- 17 juillet 2006.

Pour ces quatre événements, nous avons calculé le maximum de pluie enregistré à chaque pluviomètre de la ville sur diverses durées variant de 5 min à 24 h, puis avons comparé ces différents maxima aux courbes IDF proposées pour le design des ouvrages de drainage sur le territoire de la ville de Québec, en climat actuel (voir Tableau 7-11). Ces graphiques comparatifs apparaissent aux Figures 8-1, 8-3, 8-5 et 8-7. Afin de donner un aperçu des divergences entre les courbes IDF proposées et les courbes construites à partir des seules mesures de l'aéroport Jean-Lesage, la pluviométrie des trois événements précités a également été tracée en compagnie des courbes IDF de l'aéroport, aux Figures 8-2, 8-4, 8-6 et 8-8. Sur chacune de ces figures, les points représentent la pluviométrie maximale enregistrée sur diverses durées en chacun des pluviomètres en opération lors des journées considérées. On note tout d'abord à l'examen de ces figures que la récurrence des événements est moindre lorsqu'elle est estimée sur la base des courbes IDF proposées dans ce rapport plutôt que sur la base des courbes de l'aéroport. On constate également que les périodes de retour atteintes varient considérablement selon les pluviomètres (grande dispersion verticale des points sur les Figures 8-1 à 8-8), ce qui illustre la grande disparité spatiale de la pluie sur le territoire de la ville de Québec lors de ces quatre événements. Il est à noter que, pour chaque événement, l'intensité maximale sur

diverses durées n'a pas été atteinte au même pluviomètre. Ce fait est illustré aux Figures 8-9 à 8-12, qui représentent respectivement la distribution spatiale de la hauteur maximale de pluie enregistrée sur 24 h lors des événements du 9 septembre 2004, du 31 août 2005 et du 26 septembre 2005, ainsi que celle de la hauteur maximale de pluie enregistrée sur 30 min le 17 juillet 2006.

Les Figures 8-1 à 8-6 révèlent que les trois premiers événements analysés sont surtout critiques pour les longues durées. En effet, pour les événements du 9 septembre 2004 et du 31 août 2005, l'intensité maximale mesurée à tous les pluviomètres sur des durées inférieures à 1 h est plus faible que l'événement de récurrence 1 fois dans 2 ans, tandis qu'il en va de même pour les durées inférieures à 2 h lors de l'événement du 26 septembre 2005. Or, pour les trois événements, les intensités maximales sur 24 h atteignent presque ou parfois même dépassent l'intensité de l'événement centennal en certaines stations.

Bien qu'il puisse sembler exceptionnel que trois événements d'une si grande importance se soient produits en deux ans, on voit clairement aux Figures 8-9 à 8-11 que les hauteurs de pluie maximales n'ont pas été atteintes aux mêmes endroits lors de chaque événement. Ainsi, les hauteurs sur 24 h les plus importantes ont été enregistrées dans le nord de la ville le 9 septembre 2004, dans l'est le 31 août 2005 et principalement dans l'ouest et le sud le 26 septembre 2005. Cependant, tel qu'il a été discuté précédemment, on doit se rappeler que les courbes IDF donnent la probabilité d'observer *localement* une certaine hauteur de pluie. Sur un territoire étendu tel celui de la ville de Québec, on s'attend donc à ce que le dépassement d'une certaine hauteur de pluie soit *au total* plus fréquent que la récurrence donnée par les courbes IDF. C'est pourquoi lorsqu'on analyse les événements pluvieux récents, on doit tenir compte du fait qu'on dispose maintenant de 28 pluviomètres sur le territoire de la ville et qu'on a ainsi plus de chance de « capter » des intensités élevées.

Il ne faudrait pas indûment attribuer l'occurrence des trois événements de 2004 et 2005 aux seuls changements climatiques. Pour s'en convaincre, rappelons que des hauteurs de pluie supérieures à 100 mm ont été enregistrées en 24 h à quatre reprises à Québec au cours de la période 1935-1942, et ce avec un seul pluviomètre en fonction (station 7016280, voir Tableau 8-1). À titre de comparaison, le Tableau 8-2 donne pour les trois événements de 2004 et 2005 précédemment analysés la hauteur maximale enregistrée sur 24 h parmi les 28 stations, de même que la hauteur sur 24 h enregistrée à la station S924, située à 1,2 km de la station 7016280 (station qui était en opération à Québec au début du siècle). On voit bien en examinant ces données que si seul le pluviomètre S924 avait été en fonction le 9 septembre

2004 et le 31 août 2005, on aurait attribué à ces événements, pour la durée 24 h, des récurrences respectives de 2 ans et 5 ans, plutôt qu'une récurrence de 100 ans lorsque l'intensité maximale enregistrée sur tout le territoire (parmi les 28 pluviomètres) est considérée.

Tableau 8-1 Maximum annuel de pluie enregistré sur 24 h à la station 7016280 (Québec Ville)

Année	Hauteur maximale sur 24 h (mm)
1933	102
1935	126
1937	134
1942	118

Tableau 8-2 Pluviométrie des événements de 2004 et 2005 analysés

	Pluviomètre auquel la hauteur maximale sur 24 h a été enregistrée		Hauteur sur 24 h enregistrée au pluviomètre S924 (mm)
	No du pluviomètre	Hauteur sur 24 h (mm)	
9 septembre 2004	S027	120	64
31 août 2005	S921	135	81
26 septembre 2005	S907	115	hors d'usage

L'événement du 17 juillet 2006 est de tout autre nature que les trois événements précédemment analysés. En effet, on constate aux Figures 8-7 et 8-8 que cet événement a atteint des périodes de récurrence élevées pour des durées allant de 5 min à 2 h. La récurrence la plus importante a été atteinte pour une durée de 30 minutes, aux stations de Charlesbourg et Beauport (≈ 50 ans selon les courbes IDF de l'aéroport et ≈ 25 ans selon les courbes IDF proposées dans ce rapport). Il s'agit d'un événement court et intense, qui a provoqué des dysfonctionnements surtout au niveau des égouts locaux (environ 500 refoulements dans les secteurs de Charlesbourg, Beauport et Limoilou). La Figure 8-12 illustre la distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 30 min sur le territoire de Québec lors de cet événement. On y constate que les intensités maximales sont concentrées dans le secteur est de la ville.

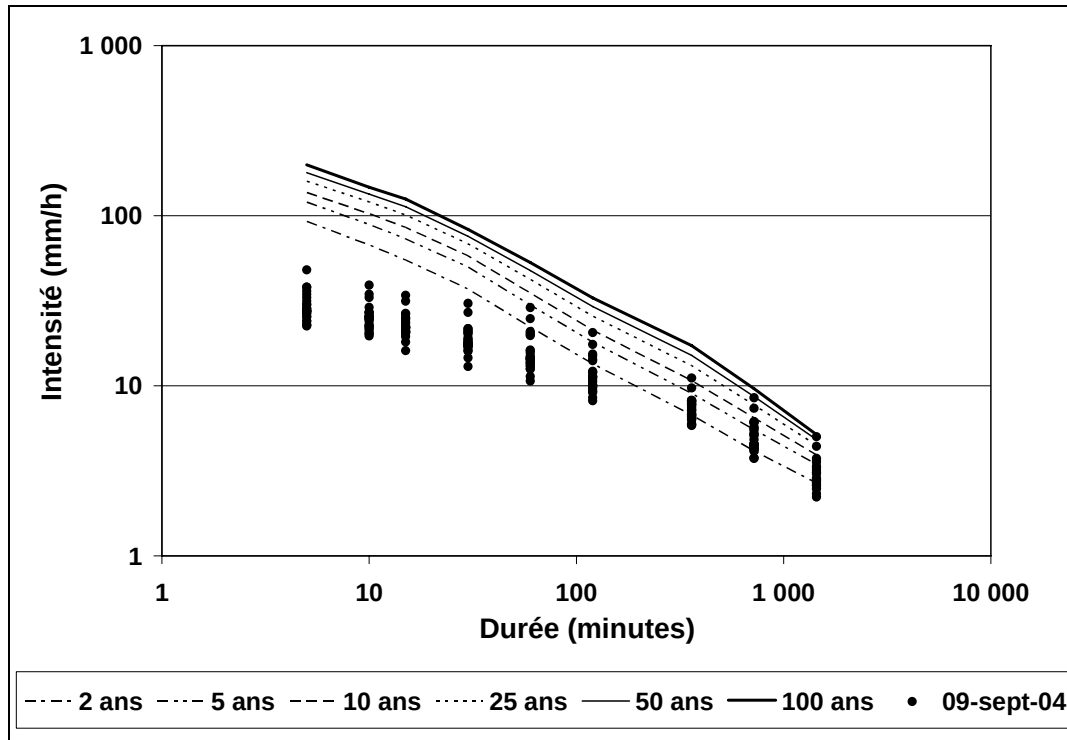


Figure 8-1 Pluviométrie enregistrée le 9 septembre 2004 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec

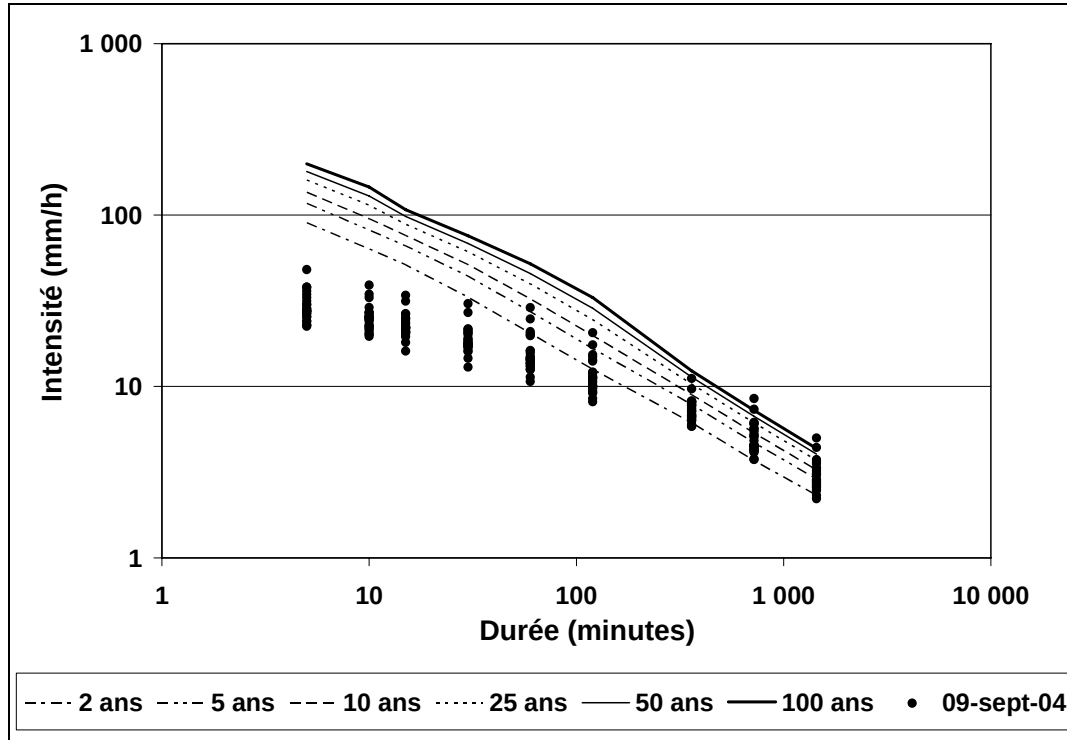


Figure 8-2 Pluviométrie enregistrée le 9 septembre 2004 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)

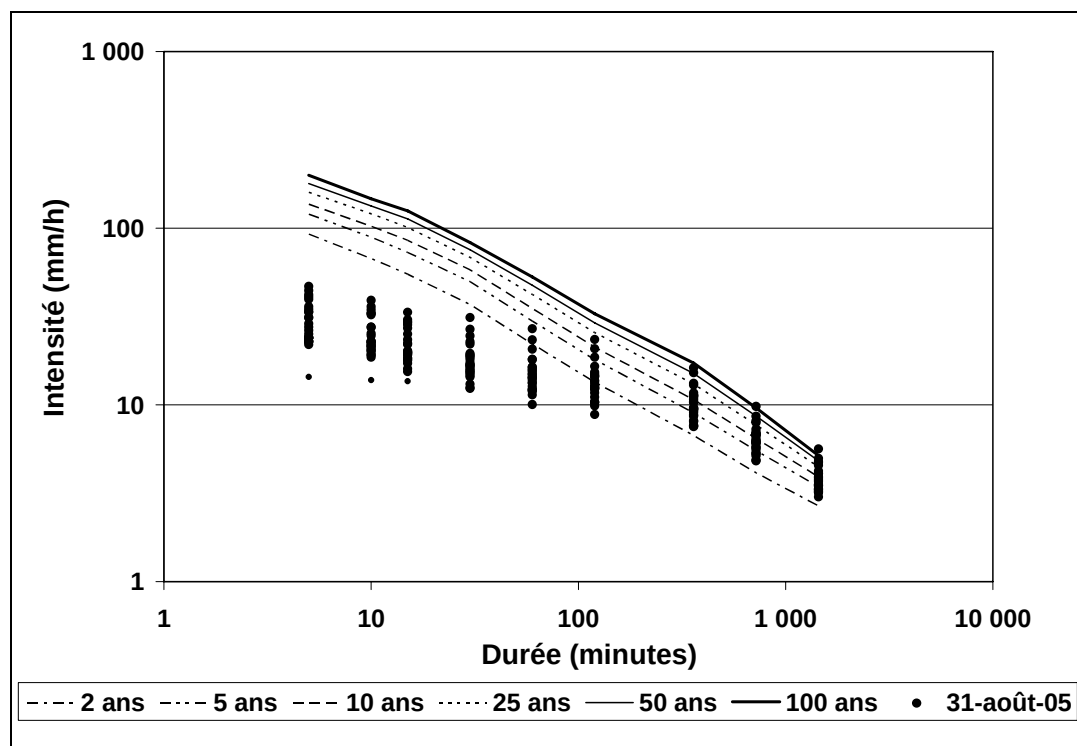


Figure 8-3 Pluviométrie enregistrée le 31 août 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec

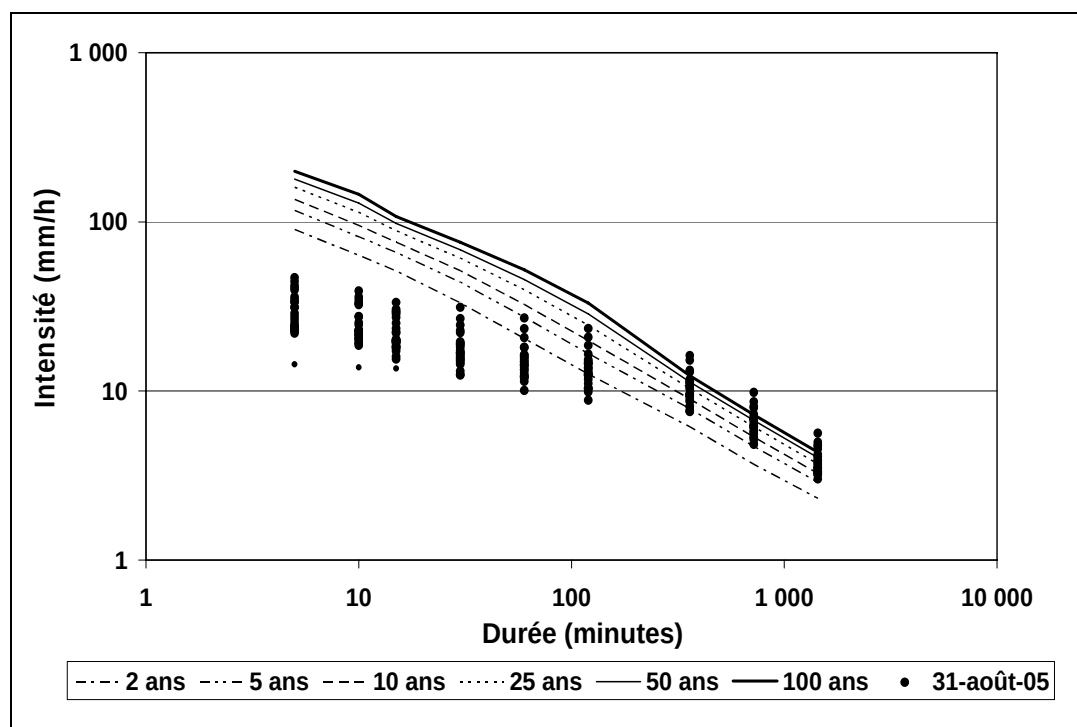


Figure 8-4 Pluviométrie enregistrée le 31 août 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)

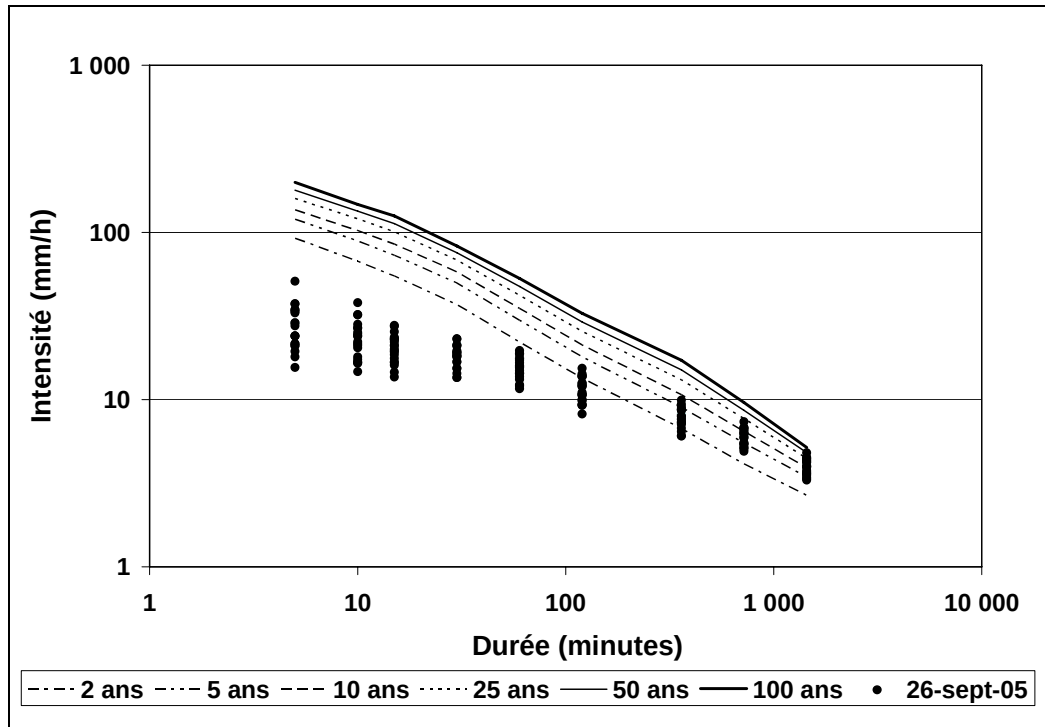


Figure 8-5 Pluviométrie enregistrée le 26 septembre 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec

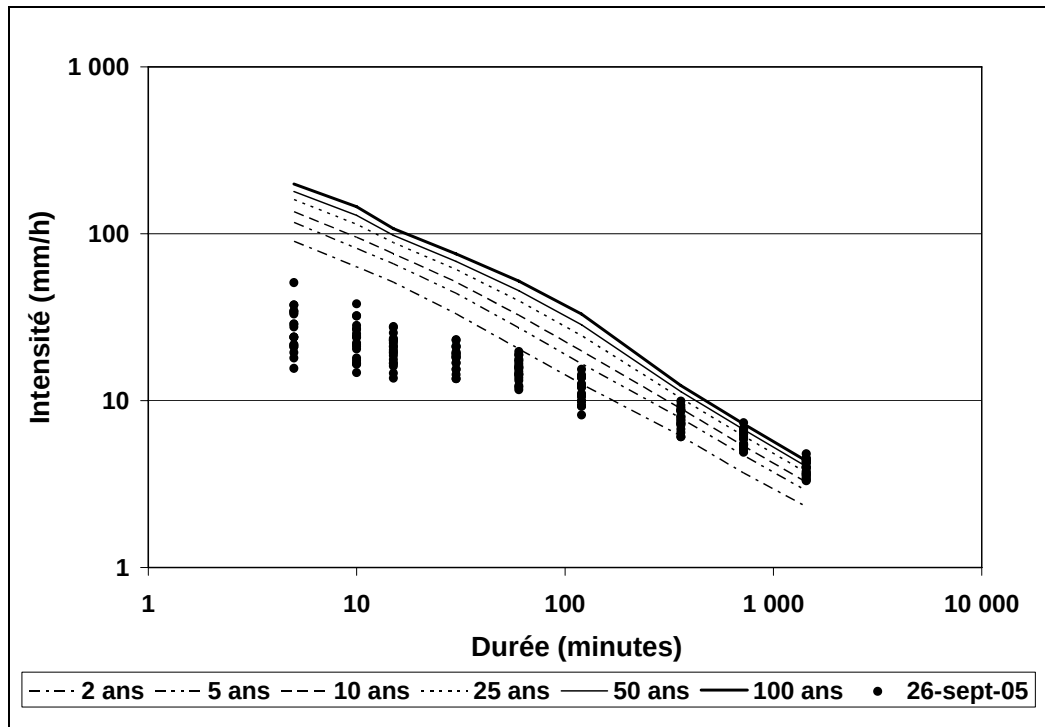


Figure 8-6 Pluviométrie enregistrée le 26 septembre 2005 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)

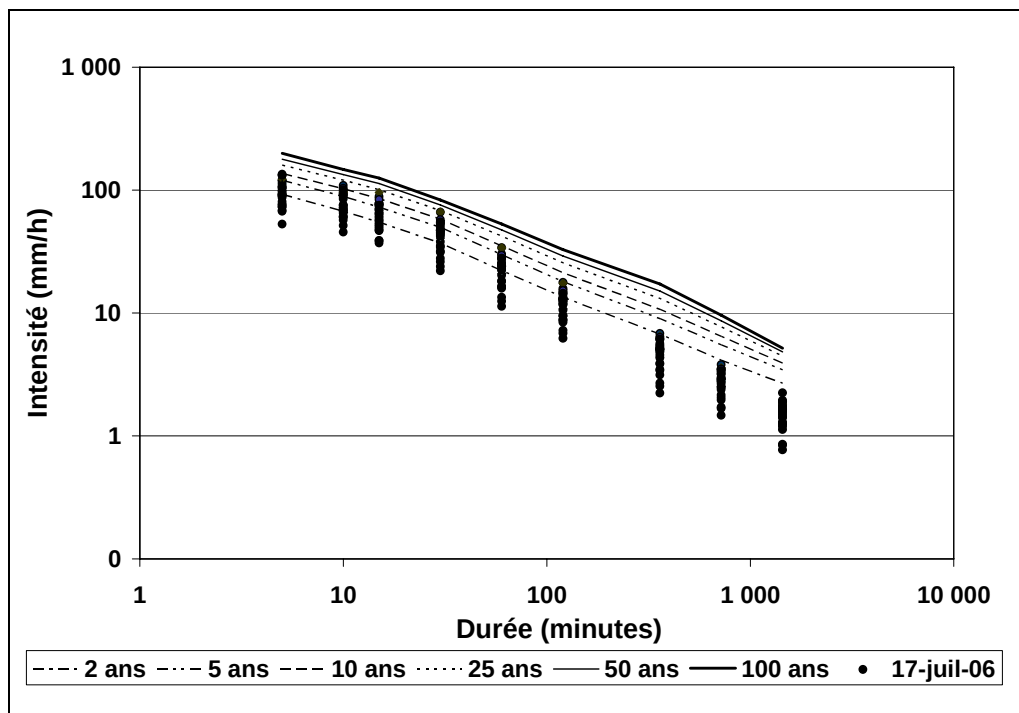


Figure 8-7 Pluviométrie enregistrée le 17 juillet 2006 en diverses stations (•) et courbes IDF proposées en climat actuel pour le territoire de la ville de Québec

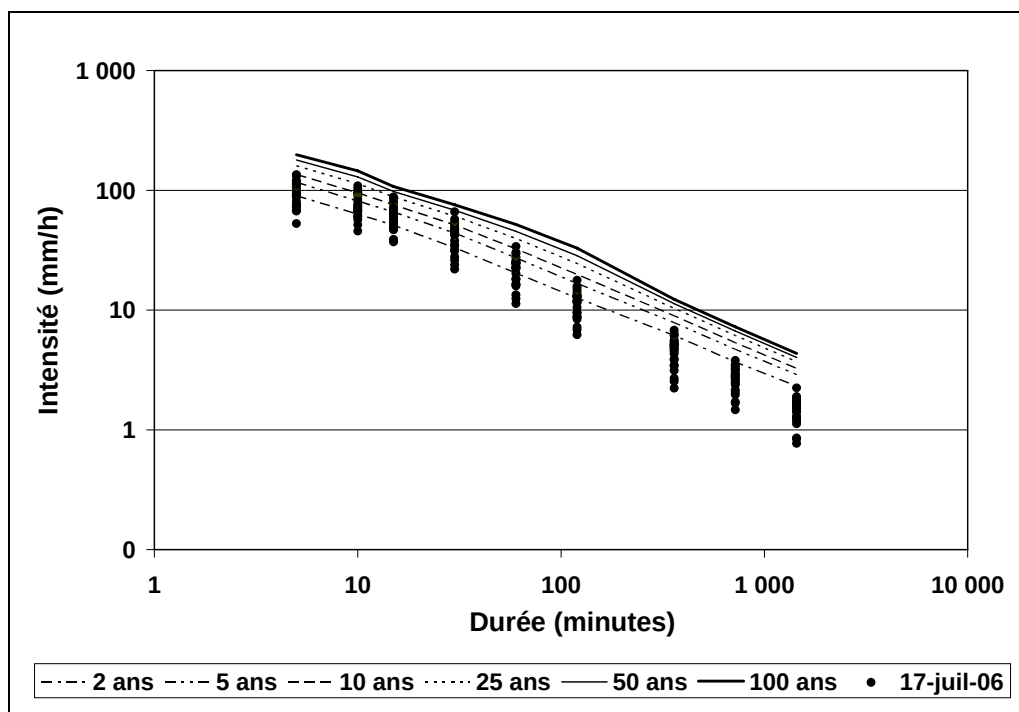


Figure 8-8 Pluviométrie enregistrée le 17 juillet 2006 en diverses stations (•) et courbes IDF de la station 7016294 (Aéroport Jean-Lesage, 1961-2005; analyse fréquentielle locale; distribution GEV; méthode des L-moments)

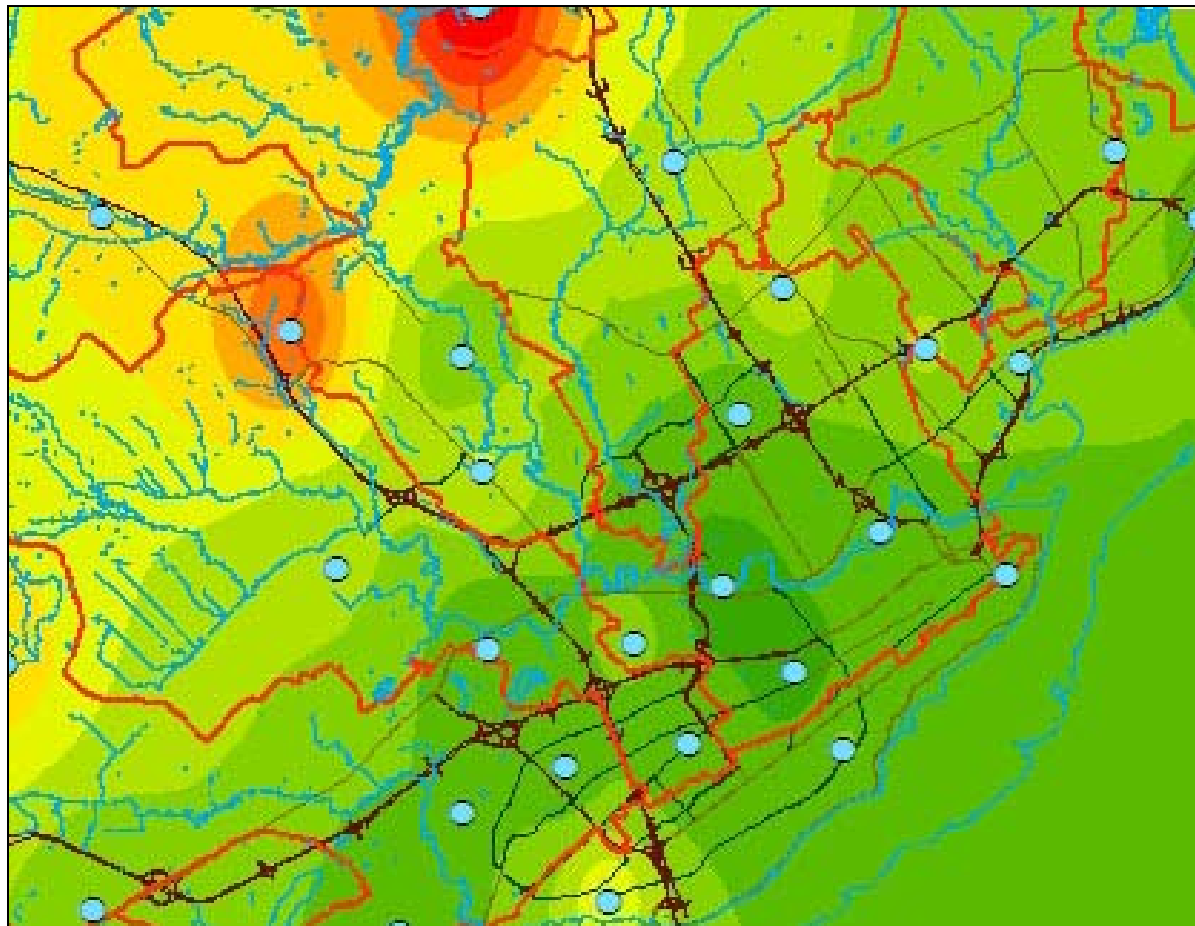


Figure 8-9 Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 9 septembre 2004 (pluviomètres de la Ville de Québec)

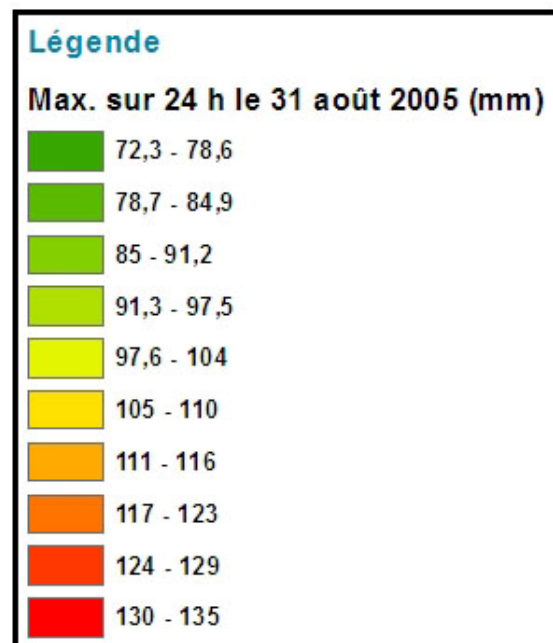
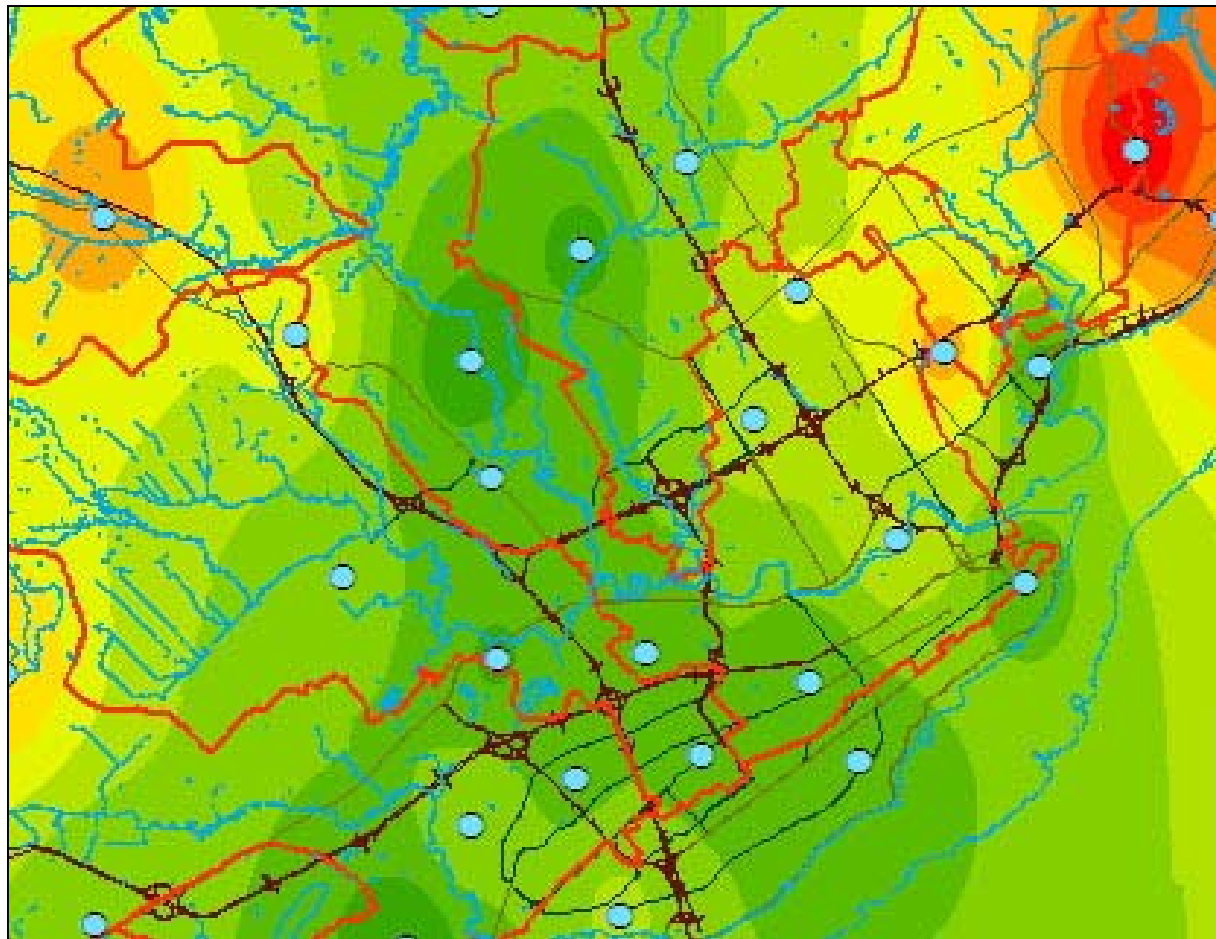


Figure 8-10 Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 31 août 2005 (pluviomètres de la Ville de Québec)

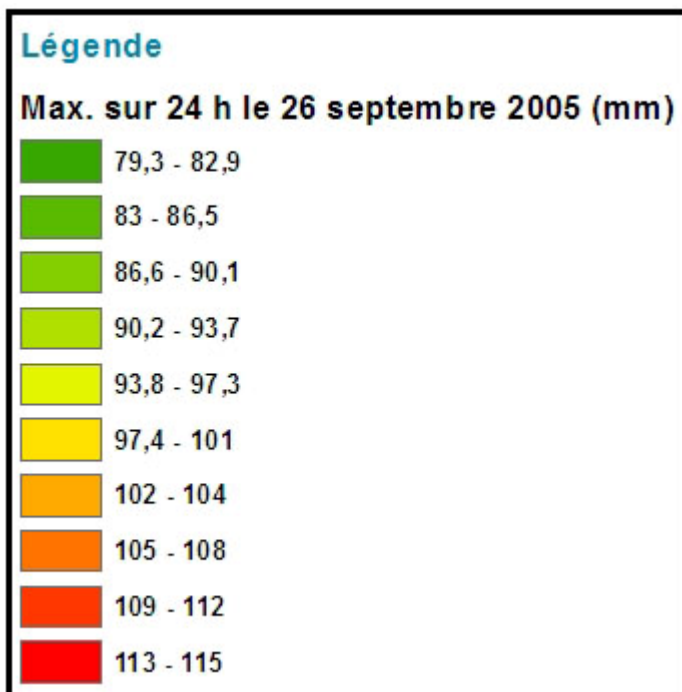
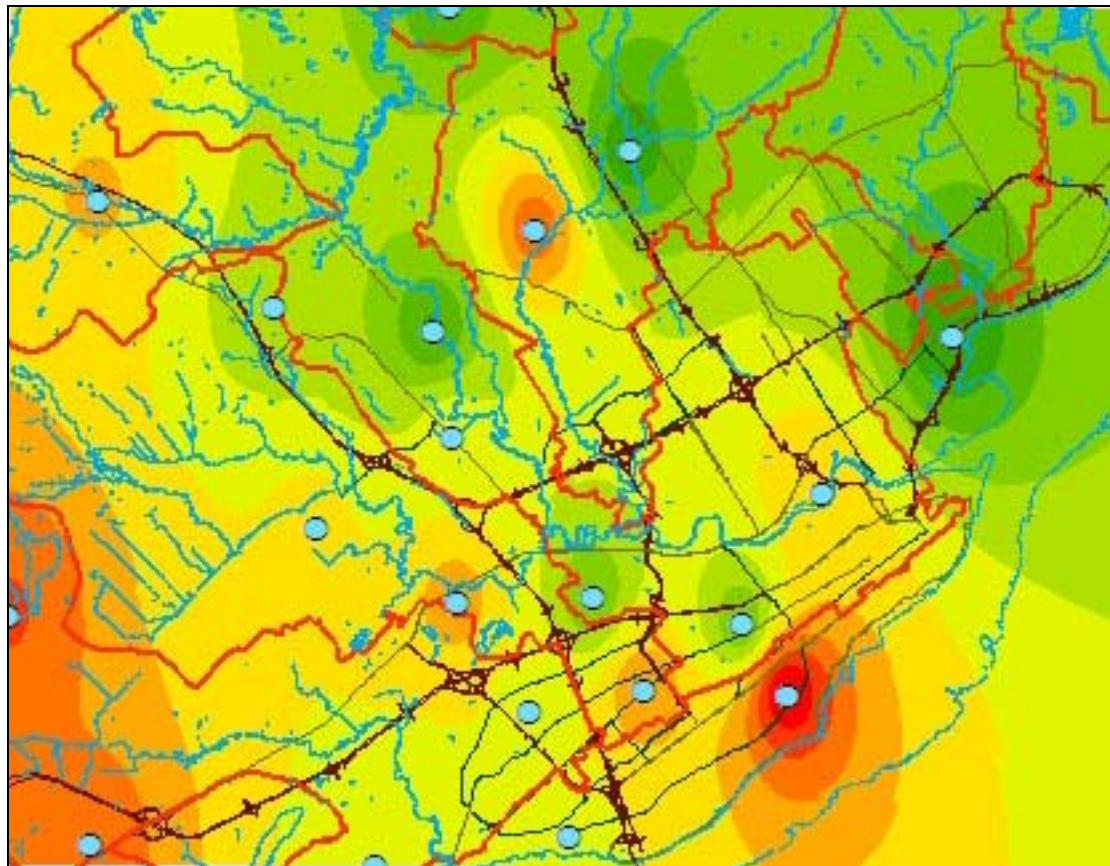


Figure 8-11 Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 24 h (mm) le 26 septembre 2005 (pluviomètres de la Ville de Québec)

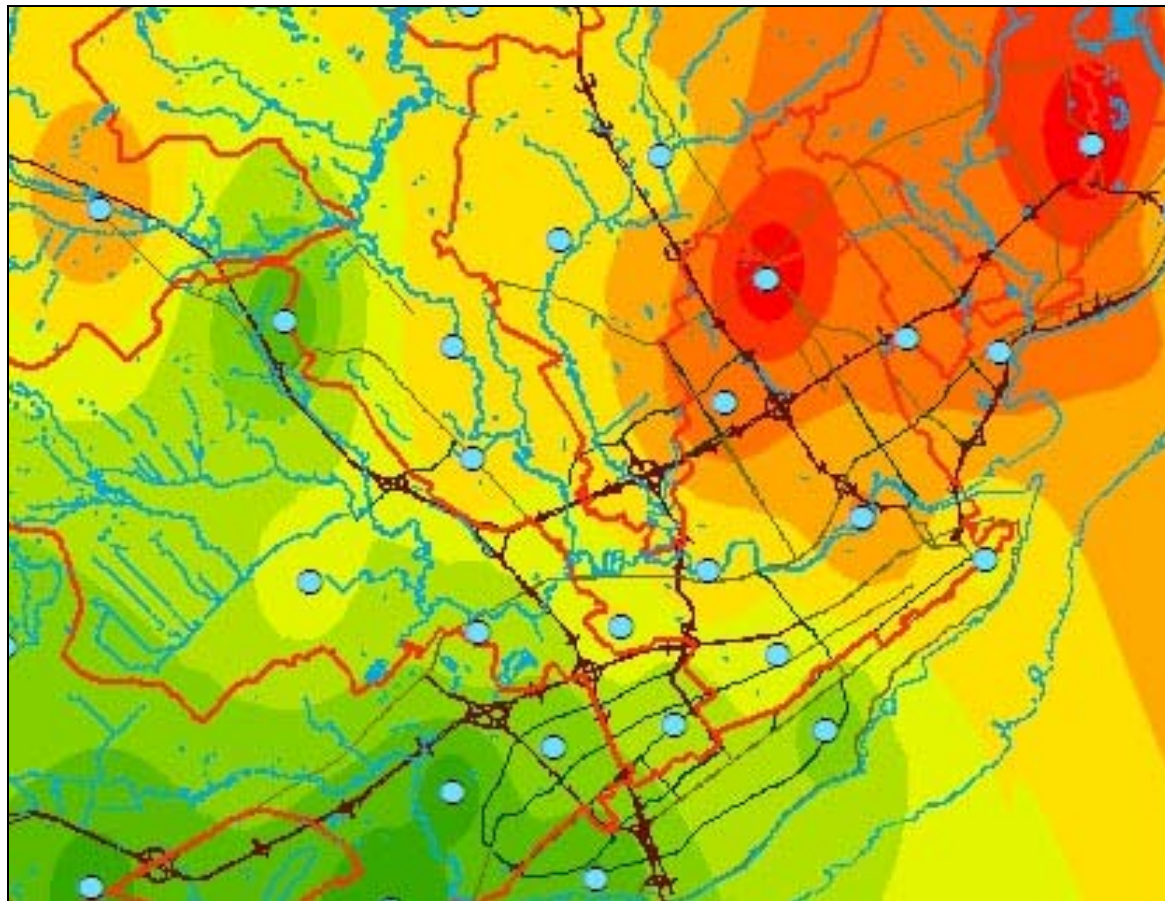


Figure 8-12 Distribution spatiale du maximum de pluie enregistré en 30 min (mm) le 17 juillet 2006 (pluviomètres de la Ville de Québec)

9. Conclusion

Nous avons complété dans ce rapport une analyse des données de pluies disponibles dans la région de Québec, en vue de caractériser les événements pluvieux pouvant potentiellement y engendrer des problèmes d'inondation et de refoulement. Cette caractérisation a d'abord été complétée en climat actuel, puis ensuite en tenant compte des changements climatiques susceptibles de survenir au cours des 60 prochaines années. Les premières analyses réalisées ont permis de constater qu'il existe une augmentation significative de la pluie annuelle à Québec au cours du XX^e siècle, mais que les maxima annuels de pluie sur diverses durées, variant de 5 min à 24 h, ne sont pas plus élevés au cours de la période récente (période 1961-2005) qu'ils ne l'étaient au début du XX^e siècle (période 1914-1943). Cependant, cette observation concernant l'absence de tendance historique ne peut être directement transposée au climat futur puisque les modèles climatologiques prévoient un accroissement significatif de l'intensité des événements pluvieux extrêmes au Québec au cours du XXI^e siècle, en conséquence de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Nous avons proposé dans ce rapport de nouvelles courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) représentatives des climats actuel et futur (période 2041-2070) pour la ville de Québec en intégrant toutes les informations disponibles concernant la pluviométrie à Québec. Toutes les données disponibles provenant de pluviomètres à auget sur le territoire de la ville ont été prises en compte pour la construction de ces courbes, tant les données provenant de pluviomètres ayant cessé leurs opérations que de pluviomètres encore en fonction. L'objectif était de produire un seul ensemble de courbes IDF à utiliser sur tout le territoire de la ville, ces courbes IDF devant refléter les intensités maximales auxquelles on peut s'attendre à Québec, en regard des données disponibles. Notons toutefois que les valeurs d'intensités de pluie composant les courbes IDF sont toujours empreintes d'une certaine incertitude, dont l'amplitude s'accroît lorsque la longueur des séries d'observations sur lesquelles se basent les calculs diminue. À cet égard, on n'insistera jamais assez sur l'importance du maintien en opération du réseau de pluviomètres existant, mais également d'une validation et d'un archivage consciencieux des données récoltées et de la mise à jour régulière des courbes IDF en fonction des nouvelles données disponibles.

En plus d'affiner les prédictions d'intensités de pluie pour diverses périodes de retour, de plus longues séries de données permettraient d'identifier les disparités spatiales éventuelles dans l'intensité des maxima annuels de pluie sur le territoire de la ville et, s'il s'avère que de telles disparités existent, de les quantifier. Les données actuellement disponibles semblent indiquer que les intensités maximales annuelles de pluie sur des durées de 1 h à 24 h seraient plus élevées à Beauport que dans les autres secteurs de la ville. Or, ces observations se basent sur une série contenant seulement cinq maxima annuels. La faible longueur de cette série de mesures combinée à la grande variabilité interannuelle des intensités maximales de pluie nous empêchent de conclure à une quelconque disparité spatiale sur la base de ces seules données. À moyen terme, l'ajout d'une dizaine de maxima annuels valides aux séries des pluviomètres composant le réseau actuellement en opération viendra réduire de façon considérable l'incertitude sur les intensités de pluie calculées à chacune des stations de mesures et, par le fait même, permettra de comparer l'intensité des événements pluvieux extrêmes attendue dans divers secteurs de la ville. On pourra alors proposer de retenir, pour la construction de courbes IDF à utiliser sur tout le territoire de la ville, l'intensité de pluie la plus élevée parmi celles calculées dans chaque secteur.

Cependant, même si des données supplémentaires viendront nécessairement réduire l'incertitude associée aux intensités estimées pour les événements pluvieux rares, les seules mesures de pluie récoltées aux pluviomètres ne permettent pas de prédire comment ces intensités pourront être modifiées dans le futur, dans un contexte de changements climatiques. De telles prédictions doivent être basées sur les résultats de modèles climatologiques. Afin de caractériser l'intensité des événements pluvieux extrêmes à Québec en climat futur (période 2041-2070), nous avons proposé dans ce rapport des courbes IDF obtenues en majorant les courbes IDF du climat actuel par les accroissements estimés par Mailhot *et al.* (2007), sur la base des résultats du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). Ces accroissements varient, selon les durées et périodes de retour considérées, de 0 à 21 %. Ces accroissements dans l'intensité des événements pluvieux extrêmes entraîneront des impacts variés sur le coût de construction, de réhabilitation et/ou de mise à niveau des réseaux de drainage urbain, en fonction notamment du type d'ouvrage considéré ainsi que de la nature et de l'étendue des surfaces drainées. Il est impossible de dresser un tableau général des augmentations de coûts attendues sans une étude détaillée des travaux à réaliser dans chaque secteur. Notons toutefois que Mailhot *et al.* (2006) ont estimé que ces accroissements conduiraient, pour un stationnement de 0,5 ha à 100 % imperméable et pour un secteur résidentiel de 0,5 ha à 35 % imperméable, à une augmentation des débits de pointe variant respectivement de 16 à 25 % et

de 24 à 38 %, selon la période de retour (de 2 à 100 ans), de même qu'à une augmentation des hauteurs de ruissellement de 14 à 19 % pour le stationnement et de 21 à 49 % pour le secteur résidentiel. Tel qu'il a été mentionné par Mailhot *et al.* (2006), ces accroissements substantiels des débits de pointe et des hauteurs de ruissellement montrent l'importance de mettre en place diverses mesures d'adaptation afin de maintenir à un niveau acceptable le risque associé aux événements pluvieux extrêmes en climat futur. On conçoit aisément qu'il est également essentiel de tenir compte de ces accroissements lors du dimensionnement de nouvelles composantes du réseau de drainage de la ville de Québec, sachant que la plupart de ces composantes resteront en place pendant plusieurs décennies.

En terminant, mentionnons que même si les hauteurs de pluie composant les courbes IDF proposées dans ce rapport sont plus élevées que celles traditionnellement utilisées pour le design des ouvrages de drainage à la Ville de Québec, nous ne discréditons aucunement les travaux réalisés par le passé à partir des courbes IDF standards. Les courbes IDF standards synthétisent l'information disponible au moment de leur élaboration et répondent aux normes communément reconnues dans la pratique du génie municipal au Québec. Il est à espérer que l'information fournie par le nouveau réseau de 28 pluviomètres dorénavant en place sur le territoire de la ville de Québec (de même que l'analyse périodique des mesures de ces pluviomètres) permettra dans le futur de mieux comprendre la distribution spatiale et temporelle des événements pluvieux extrêmes à Québec, afin d'affiner l'estimation des courbes IDF utilisées pour le design des ouvrages de drainage.

10. Références

- Angel, J.R et F.A. Huff (1997). Changes in heavy rainfall in midwestern United States. *Water Resources Planning and Management*, 123(4): 246-249.
- Bureau d'assurance du Canada (2005). *Domages causés par l'eau dans la région de Québec : 92 % des assurés indemnisés par leur compagnie d'assurance et plus de 16 millions de dollars en indemnités*. Communiqué de presse, 24 octobre 2005.
- Favre, A.-C., V. Fortin, N. Thiémonge, C. Pion, Y. Hamdi, P. Coulibaly et B. Bobée (2003). *Modélisation de l'incertitude des paramètres de modèles conceptuels*. Rapport final du projet T2.2 de la Phase 2 de la Chaire en Hydrologie statistique. INRS-ETE, Rapport de recherche N° R-693; "confidentiel".
- Hengeveld, H.G., 2000. Climate Change Digest - Projections for Canada's Climate Future. CCD 00-01 Special Edition, Meteorological Service of Canada, Environment Canada, Ottawa, ON, 27 p.
- Hosking, J.R.M. et J.R. Wallis (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hosking, J.R.M. et J.R. Wallis (1993). Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 29(2): 271-281.
- Hosking, J.R.M., J.R. Wallis et J.R. Wood (1985). Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments. *Technometrics*, 27: 251-261.
- Hulme, M.A. et N. Sheard (1999). *Climate Change Scenarios for Canada*. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK.
- IPCC, International Panel on Climate Change (2001). *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press, 881 pp.

- Kharin, V.V. et F.W. Zwiers (2000). Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate*, 13: 3760-3788.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot (2007). Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). À soumettre au *Journal of Hydrology*.
- Mailhot, A., G. Rivard, S. Duchesne et J.-P. Villeneuve (2006). Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain. INRS-Eau, Terre et Environnement, Rapport de recherche N° R-874, Québec, QC, Canada.
- Mekis, E. et W.D Hogg (1999). Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series. *Atmosphere-Ocean*, 37(1): 53-85.
- Onibon, H., T.B.M.J. Ouarda, M. Barbet, A. St-Hilaire, B. Bobée et P. Bruneau (2004). Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec, Canada. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 49(4): 717-735.
- Ouranos (2004). S'adapter aux changements climatiques. Consortium Ouranos, Montréal, QC, Canada. Disponible sur http://www.ouranos.ca/cc/table_f.html
- 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, QC, Canada.
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistics Association*, 63: 1379-1389.
- Wang, X.L. et V.R. Swail (2001). Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *Journal of Climate*, 14: 2204-2221.

ANNEXE 1 – 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) :

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_j \quad (\text{A1.1})$$

avec $r = 0, 1, 2, 3$. Les L-moments jusqu'à l'ordre 4 sont estimés à partir des expressions suivantes :

$$\begin{aligned} l_1 &= b_0 \\ l_2 &= 2b_1 - b_0 \\ l_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0 \\ l_4 &= 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0 \end{aligned} \quad (\text{A1.2})$$

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 :

$$\begin{aligned} t &= l_2 / l_1 \\ t_3 &= l_3 / l_2 \\ t_4 &= l_4 / l_2 \end{aligned} \quad (\text{A1.3})$$

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 :

$$\begin{aligned} k &\approx 7.8590 \left(\frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3} \right) + 2.9554 \left(\frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3} \right)^2 \\ \alpha &= k \left[\frac{2b_1 - b_0}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})} \right] \\ \xi &= b_0 + \frac{\alpha}{k} [\Gamma(1+k) - 1] \end{aligned} \quad (\text{A1.4})$$

ANNEXE 2 – Analyse fréquentielle régionale

A2.1 Détermination de la distribution régionale

Les distributions à trois paramètres les plus couramment utilisées pour décrire le comportement statistique régional des valeurs extrêmes 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 régionale s'effectue selon les étapes suivantes :

- 1) 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 aux équations suivantes :

$$\begin{aligned} t^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t^{(j)} \\ t_3^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t_3^{(j)} \\ t_4^R &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n n_j t_4^{(j)} \end{aligned} \quad (A2.1)$$

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 représente le nombre de sites et N , le nombre total de données disponibles :

$$N = \sum_{j=1}^n n_j \quad (A2.2)$$

- 2) Le ratio des L-moments t_4^{DIST} pour chaque distribution candidate *DIST* (GEV ou autre) est estimé à partir des valeurs régionales des L-moments $1, t_3^R, t_4^R$.
- 3) Les paramètres de la distribution Kappa sont estimés à partir des ratios des L-moments $1, t^R, t_3^R, t_4^R$ (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)).
- 4) 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 j , 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.

5) La valeur Z^{DIST} est calculée pour chaque distribution candidate :

$$Z^{DIST} = \frac{1}{\sigma_4} (t_4^{DIST} - t_4^R + B_4) \quad (A2.3)$$

où :

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

$$\sigma_4 = \left\{ \frac{1}{(N_{sim} - 1)} \left[\sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{(m)} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (A2.4)$$

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

A2.2 Homogénéité statistique

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

- 1) Les valeurs moyennes pondérées des L-moments sont estimées (équation A2.1).
- 2) L'écart-type entre la valeur moyenne régionale des ratios des L-moments et l'ensemble des valeurs aux sites est estimé :

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} n_i (t_k^{(i)} - t_k^R)^2}{\sum_{i=1}^{N_s} n_i}} \quad (A2.5)$$

L'indice k réfère aux trois L-moments.

- 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 μ_{V_k} et l'écart-type σ_{V_k} des valeurs de V_k pour l'ensemble des simulations sont estimés.
- 7) L'indice d'hétérogénéité est ensuite calculé :

$$H_k = \frac{(V_k - \mu_{V_k})}{\sigma_{V_k}} \quad (\text{A2.6})$$

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

ANNEXE 3 – Maxima annuels utilisés pour l'analyse régionale

Tableau A3-1 Station 7011309 (mm)

<i>Année</i>	<i>5 min</i>	<i>10 min</i>	<i>15 min</i>	<i>30 min</i>	<i>1 h</i>	<i>2 h</i>	<i>6 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>
1972	5,1	9,9	13,0	16,5	18,0	30,0	32,3	38,9	72,9
1973	11,7	19,3	21,3	22,6	24,4	24,9	27,7	51,3	72,4
1974	7,4	14,2	18,0	24,1	32,0	34,8	38,6	39,4	59,9
1975	7,9	12,4	14,2	15,2	15,5	28,7	34,0	39,9	42,7
1976	8,1	12,7	16,0	22,1	23,9	27,7	37,8	63,2	74,2
1977	12,2	19,3	20,1	31,8	41,9	45,5	46,7	55,4	61,5
1978	8,0	11,8	14,2	14,6	15,0	23,2	34,0	38,2	59,8
1979	10,2	13,2	17,6	22,4	27,2	27,6	62,4	75,8	75,8
1980	4,6	7,0	9,4	13,6	19,2	30,4	37,4	37,6	42,2
1981	5,0	7,2	9,6	17,2	21,6	31,0	77,2	81,2	81,8
1982	4,2	5,2	5,6	7,8	12,2	16,2	22,6	33,8	50,8
1983	7,8	7,8	7,8	12,8	18,8	25,6	27,8	35,8	42,7
1984	4,4	7,4	10,4	20,0	27,2	27,6	39,4	44,2	71,8
1985	6,2	8,6	13,6	18,4	19,0	25,0	36,0	47,2	54,5
1986	6,0	7,5	9,2	13,8	21,5	27,8	47,0	54,4	71,1
1987	6,2	10,3	11,1	14,1	16,4	22,6	24,8	30,8	50,4
1988	10,7	18,4	20,4	25,5	29,4	29,5	33,4	33,3	36,4
1989	7,8	10,9	15,7	21,4	29,1	31,1	33,0	40,4	66,7
1990	10,0	18,6	21,8	29,8	30,6	33,7	46,3	52,6	54,6
1991	10,4	12,4	18,4	20,8	25,5	25,9	30,0	30,0	-
1992	8,6	12,0	15,8	21,8	26,7	26,9	33,0	39,6	-
1993	10,4	19,6	23,9	27,5	28,1	28,2	42,8	53,6	-
1994	7,3	9,1	12,5	19,7	23,8	24,6	28,6	29,3	-
1995	9,0	10,6	12,2	16,8	23,6	30,8	38,9	38,8	-
Moyen.	7,9	11,9	14,7	19,6	23,8	28,3	38,0	45,2	60,1

Tableau A3-2 Station 7012232 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1972	-	-	-	-	19,6	26,7	27,9	37,1	64,3
1973	-	-	-	-	12,7	15,7	29,7	53,3	72,1
1974	-	-	-	-	13,2	24,9	31,5	31,5	52,3
1975	-	-	-	-	21,1	21,1	41,7	41,7	51,1
1976	-	-	-	-	22,6	25,1	25,9	25,9	29,0
1977	-	-	-	-	15,2	20,6	38,6	53,1	54,4
1978	-	-	-	-	15,5	17,5	25,4	35,6	-
1979	-	-	-	-	17,4	26,4	62,4	77,8	77,7
1980	-	-	-	-	20,6	37,4	53,2	54,0	54,7
1981	-	-	-	-	15,8	29,2	58,4	60,4	68,4
1982	-	-	-	-	14,4	21,8	37,6	44,8	47,2
1983	-	-	-	-	10,8	14,0	26,2	37,2	54,3
1984	-	-	-	-	11,2	16,4	31,0	37,8	53,4
1985	-	-	-	-	22,2	25,4	35,4	50,6	57,7
1986	-	-	-	-	19,0	23,8	57,9	59,7	75,6
1987	8,7	10,8	11,9	21,8	23,5	29,9	38,1	41,8	84,7
1988	4,8	7,7	7,7	8,1	9,5	14,5	25,3	31,1	37,7
1989	10,2	15,8	21,8	34,4	45,2	47,8	47,8	48,2	67,9
1990	3,1	5,8	8,6	10,5	11,4	17,9	41,2	61,4	63,0
1991	5,2	8,4	9,8	10,8	11,7	13,9	24,2	25,0	-
1992	5,7	8,2	9,8	14,9	20,3	20,6	28,9	35,5	-
Moyen.	6,3	9,5	11,6	16,8	17,8	23,4	37,5	44,9	59,2

Tableau A3-3 Station 7016280 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1914	5,1	8,6	10,4	11,4	13,5	17,5	23,1	36,8	55,9
1915	6,6	7,1	7,9	13,2	15,2	17	41,9	64,3	81,3
1916	5,6	6,6	7,4	8,4	14,7	18,8	25,1	42,4	55,4
1917	8,6	10,4	10,4	14	21,8	34,8	46	64,3	65,5
1918	10,7	14,2	15	17,8	29,2	39,9	50,5	53,1	70,4
1919	9,9	12,2	14,5	21,3	23,9	33,8	49	49,3	71,4
1920	6,6	10,2	10,7	12,7	17,8	23,1	42,7	51,3	58,9
1921	11,9	15,5	15,5	15,5	15,5	16,5	28,7	34	51,6
1922	6,1	7,4	8,6	12,2	14,2	19,3	29,7	48,3	80,3
1923	5,1	6,3	9,4	17,8	20,6	25,9	49	63,2	94,2
1924	5,6	8,4	9,9	13	13	14,7	31,2	56,4	98,3
1925	6,3	8,1	9,4	10,4	18,3	24,1	33,8	38,1	42,4
1926	8,1	8,4	8,4	10,2	11,4	14	26,2	33	51,3
1927	18	19	19	19,6	20,1	29,7	32,5	32,5	50,8
1928	10,4	18,3	21,8	23,6	26,7	26,7	26,7	26,7	29
1929	9,1	11,7	14,5	16,8	17,8	18,8	35,8	37,8	37,8
1930	8,4	14,7	15,2	20,6	22,6	23,4	26,4	26,9	35,6
1931	9,4	14,2	18	23,4	23,4	24,1	30,7	44,2	59,7
1932	4,8	7,6	9,1	10,2	11,7	19,8	46	51,3	59,7
1933	7,1	12,4	16,8	21,3	33,3	37,3	87,6	101,3	101,9
1934	9,1	13,5	16	20,3	22,9	26,2	27,9	32,5	51,8
1935	8,9	16	23,6	32,8	45,2	63,5	121,7	125,5	125,5
1936	5,6	8,4	9,7	11,2	11,9	12,2	22,6	22,6	33
1937	8,6	13,2	18	29,7	51,1	83,8	111,8	124,2	134,1
1938	7,1	12,2	14,5	19,6	26,2	30,5	81,5	95,2	95,2
1939	8,6	13,2	16	18,5	18,8	19,8	34,5	40,9	46
1940	6,1	10,2	13,5	18,8	24,6	33,8	40,1	53,3	60,7
1941	12,2	16,8	19,6	21,8	36,1	36,1	36,1	36,1	39,4
1942	5,8	11,2	11,7	14,7	14,7	20,8	46,5	69,6	118,1
1943	6,6	7,4	8,6	10,4	15	17,8	35,6	35,6	42,7
Moyen.	8,1	11,4	13,4	17,0	21,7	27,5	44,0	53,0	66,6

Tableau A3-4 Station 7016294 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1961	6,1	10,4	10,9	12,2	19,1	19,1	34,5	53,1	61,9
1962	7,6	11,7	13,2	19,8	25,4	29,7	62,5	63,5	71,6
1963	10,4	16,8	19,1	20,8	24,4	27,9	37,6	38,9	53,4
1964	5,8	6,6	9,4	13,5	19,1	25,4	28,2	29,5	35,8
1965	8,9	10,2	15,7	17,8	20,3	22,1	36,1	40,4	44,6
1966	7,4	8,6	9,1	9,7	12,7	15,5	24,4	39,4	46,8
1967	7,6	13,0	17,8	20,8	21,3	22,9	40,6	42,2	56,3
1968	6,4	10,4	11,4	11,4	11,9	18,5	30,5	31,8	49,7
1969	7,6	10,2	14,7	17,8	23,4	26,7	39,9	52,3	59,7
1970	4,8	7,6	8,6	10,7	18,3	21,1	24,6	34,3	48,5
1971	8,6	10,2	14,0	22,6	26,7	27,9	39,1	47,0	60,8
1972	6,4	11,2	12,4	16,3	20,6	29,5	33,0	37,6	69,5
1973	10,4	17,3	19,8	26,7	34,3	36,6	49,0	56,6	63,5
1974	8,1	11,7	12,7	18,0	20,3	24,9	38,1	38,1	63,2
1975	9,1	15,5	17,8	24,4	24,6	25,9	42,2	42,4	51,0
1976	9,9	11,4	11,7	12,2	19,6	24,1	24,1	34,0	44,5
1977	6,2	7,8	9,2	10,0	14,0	22,4	40,2	49,0	54,7
1978	7,8	8,4	8,6	12,8	23,2	29,6	43,0	50,2	78,9
1979	16,6	18,0	20,6	40,2	60,0	77,8	78,0	81,4	81,2
1980	7,8	11,0	14,0	19,6	36,0	50,2	59,2	59,2	58,8
1981	11,0	12,9	16,6	20,6	24,7	31,8	55,3	60,3	79,0
1982	8,5	10,2	10,4	11,6	13,2	23,6	41,6	42,0	44,7
1983	3,8	7,6	8,2	11,2	12,9	13,9	24,2	33,2	50,0
1984	5,4	7,8	10,2	12,2	13,2	18,4	41,6	50,8	61,9
1985	9,0	14,4	17,6	25,6	28,4	34,4	41,4	57,2	62,6
1986	8,1	15,1	17,0	20,1	23,5	27,5	38,8	54,1	72,2
1987	6,6	12,5	17,7	24,3	24,8	32,8	39,5	46,2	73,3
1988	4,1	8,2	11,6	16,9	18,8	20,7	29,2	35,6	45,6
1989	9,4	15,7	22,2	30,2	41,0	41,5	42,6	48,6	53,4
1990	6,8	12,2	15,0	20,7	27,1	27,7	39,2	53,5	54,4
1991	5,6	8,0	11,4	18,1	19,9	19,9	19,9	19,8	29,2
1992	5,4	8,0	9,5	12,7	16,8	18,1	37,5	47,0	57,0
1993	7,5	10,0	13,4	19,9	20,2	22,7	30,9	40,5	50,2
1994	5,8	9,7	12,4	17,2	17,2	19,4	31,6	37,1	38,6
1995	9,4	13,2	15,8	16,4	18,9	22,7	36,4	40,2	44,2
1996	9,5	11,2	11,9	16,6	21,8	30,8	40,9	56,2	67,9

Tableau A3-4 Station 7016294 (mm) (suite)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1997	6,2	7,6	8,6	10,6	15,4	22,6	34,2	44,5	76,8
1998	17,4	24,8	24,8	28,4	28,4	39,3	58,3	63,9	-
1999	11,5	16,2	18,0	18,9	19,4	27,2	40,7	41,9	55,9
2000	10,0	15,2	16,0	16,4	23,1	29,1	37,5	41,4	51,9
2001	7,6	7,6	9,1	11,9	14,2	15,7	26,2	38,5	41,8
2002	8,5	9,7	9,7	12,2	14,1	23,3	29,5	29,8	38,2
2003	7,8	11,2	14,5	22,9	24,1	31,1	35,9	44,6	52,2
2004	5,7	8,2	10,4	17,3	32,6	41,7	43,2	61,7	73,9
2005	7,1	10,5	12,5	13,5	20,5	31,3	60,4	92,4	118,1
Moyen.	8,0	11,5	13,7	17,9	22,4	27,7	39,1	46,7	57,9

Tableau A3-5 Station 7016900 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1966	6,1	10,2	10,2	10,2	12,4	14,7	20,1	33,3	39,1
1967	12,4	17,0	18,0	27,4	28,7	29,0	44,5	55,9	71,6
1968	6,9	7,1	7,1	8,4	8,9	13,7	28,7	38,4	45,5
1969	6,9	9,9	12,7	14,7	15,5	17,8	30,0	40,9	57,7
1970	9,4	17,5	26,4	31,5	35,6	49,8	50,3	56,4	58,9
1971	6,4	9,7	11,7	17,3	19,6	20,6	38,6	39,4	51,3
1972	8,9	15,7	18,8	20,6	21,6	21,8	35,8	46,0	77,7
1973	6,4	10,2	11,7	15,7	17,0	19,1	33,5	51,6	67,8
1974	5,6	10,2	14,5	24,4	29,7	32,8	37,3	38,6	58,4
1975	7,1	13,5	14,5	14,5	21,6	28,7	49,0	51,3	59,2
1976	6,9	7,4	9,1	11,9	19,3	22,9	32,0	38,1	38,4
1977	7,6	12,2	14,2	16,3	19,3	23,6	35,3	43,2	44,7
1978	9,9	13,5	15,2	17,0	17,5	27,4	37,1	42,7	68,6
1979	9,8	13,2	18,6	28,2	34,4	46,2	47,2	47,2	73,4
1980	6,6	9,2	11,0	18,8	32,4	52,8	69,8	75,0	75,1
1981	6,4	9,0	11,2	16,2	20,4	26,2	41,4	47,2	61,2
1982	4,0	6,4	7,4	9,8	13,6	21,4	42,4	45,6	45,6
1983	7,0	9,2	11,2	15,0	16,2	19,6	22,6	28,4	44,9
1984	7,2	11,0	13,4	17,4	24,2	29,6	51,8	61,6	71,8
1985	-	-	-	-	-	-	-	-	33,4
1986	5,5	8,8	11,7	15,0	19,3	29,5	54,2	60,6	78,4
1987	6,8	12,0	16,0	27,4	33,4	36,2	47,2	47,0	65,2
1988	4,1	8,1	11,9	14,8	15,7	24,2	27,5	29,9	49,7
1989	7,8	9,1	10,4	14,1	18,4	20,9	38,0	46,4	54,2
Moyen.	7,2	10,9	13,3	17,7	21,5	27,3	39,8	46,3	58,0

Tableau A3-6 Station 7017B65 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1969	-	-	-	-	-	-	-	-	50,5
1972	-	-	-	-	10,7	10,9	17,3	20,8	57,1
1973	-	-	-	-	20,1	26,9	35,3	62,0	79,5
1975	-	-	-	-	24,1	32,5	42,2	42,4	44,7
1976	-	-	-	-	13,2	14,5	23,6	32,5	39,1
1977	-	-	-	-	24,6	36,3	36,3	38,6	71,6
1978	-	-	-	-	21,4	28,4	36,2	43,6	66,9
1979	-	-	-	-	40,6	59,2	59,2	70,8	78,8
1980	-	-	-	-	20,0	35,2	42,6	46,0	49,6
1981	-	-	-	-	21,0	32,6	62,0	62,6	65,0
1982	-	-	-	-	13,6	20,6	36,4	41,0	42,7
1983	-	-	-	-	18,0	18,6	26,8	35,8	53,8
1984	-	-	-	-	10,0	17,0	20,0	31,0	37,0
Moyen.	-	-	-	-	19,8	27,7	36,5	43,9	56,6

Tableau A3-7 Station 7017BFN (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1972	-	-	-	-	18,3	21,8	39,6	54,1	-
1973	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1974	-	-	-	-	20,3	24,6	29,5	30,0	-
1975	-	-	-	-	19,1	23,6	42,4	43,7	-
1976	-	-	-	-	11,2	15,2	23,4	32,8	-
1977	-	-	-	-	21,3	27,9	40,9	49,5	-
1978	-	-	-	-	18,2	28,8	36,2	45,4	-
1979	-	-	-	-	47,8	68,0	70,8	70,8	-
1980	-	-	-	-	23,6	35,0	48,0	51,8	-
1981	-	-	-	-	17,8	34,6	67,8	68,6	-
1982	-	-	-	-	18,6	23,6	38,4	44,4	-
1983	-	-	-	-	14,2	17,6	27,0	40,2	-
1984	-	-	-	-	16,8	23,0	36,0	50,0	-
1985	-	-	-	-	16,8	24,6	40,6	59,6	-
1986	-	-	-	-	12,9	23,0	45,4	76,8	-
1987	9,7	10,1	12,7	22,0	25,5	29,3	37,0	37,2	-
1988	10,2	11,3	14,9	23,6	26,1	35,5	41,8	41,7	-
1989	9,0	12,0	18,0	20,6	26,7	27,1	40,4	50,9	-
1990	8,1	8,1	9,3	16,0	19,8	25,1	47,7	55,6	-
1991	4,0	7,3	10,0	12,0	13,0	14,3	23,6	23,4	-
1992	6,1	10,1	12,3	18,2	21,6	25,1	42,4	56,6	-
1993	9,3	16,2	22,8	34,9	45,5	57,6	59,0	60,2	-
1994	7,1	9,1	11,3	17,4	25,9	29,3	35,6	36,1	-
1995	5,1	5,7	6,9	12,5	20,8	29,0	37,7	37,6	-
Moyen.	7,6	10,0	13,1	19,7	21,8	28,9	41,4	48,6	-

Tableau A3-8 Station 7019990 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1971	-	-	-	-	-	-	-	-	58,2
1972	-	-	-	-	-	-	-	-	81,5
1973	-	-	-	-	-	-	-	-	78,0
1974	-	-	-	-	-	-	-	-	75,2
1975	-	-	-	-	13,2	20,3	26,2	29,7	38,9
1976	-	-	-	-	21,3	28,4	33,5	54,9	63,5
1977	-	-	-	-	23,4	35,3	47,0	58,9	64,3
1978	-	-	-	-	19,8	30,8	34,4	50,8	51,0
1979	-	-	-	-	25,8	26,2	30,8	39,2	51,7
1980	-	-	-	-	14,2	26,2	46,0	46,0	46,4
1981	-	-	-	-	21,8	34,0	73,2	75,2	75,0
Moyen.	-	-	-	-	19,9	28,7	41,6	50,7	62,2

Tableau A3-9 Station 7024254 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1979	9,0	14,2	17,6	19,6	21,0	29,2	57,2	69,4	-
1980	5,4	8,8	12,8	21,2	33,8	59,8	74,8	75,0	-
1981	5,4	8,0	9,4	16,8	22,8	29,4	33,6	39,4	-
1982	3,6	4,8	5,8	7,8	15,4	23,8	37,2	42,6	-
1983	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1984	7,8	12,0	13,8	17,6	18,4	23,6	33,4	49,8	-
1985	3,4	4,2	4,6	6,8	10,4	19,6	33,6	50,8	-
1986	6,6	7,7	8,8	11,0	16,6	27,6	48,4	68,0	-
1987	7,4	12,2	12,5	16,6	20,6	31,4	38,6	41,3	-
1988	8,1	10,7	12,1	16,0	21,8	22,7	26,5	30,6	-
1989	9,5	13,7	16,5	21,2	26,9	28,8	37,5	47,9	-
1990	5,2	7,8	9,2	13,9	21,2	31,3	51,1	62,1	-
1992	6,0	11,7	12,6	16,4	18,0	22,6	28,0	36,7	-
1993	10,2	16,0	24,0	31,2	36,0	40,0	41,2	41,2	-
1994	5,7	8,0	10,1	13,4	14,3	23,1	42,9	44,5	-
1995	5,8	7,8	11,1	17,3	23,1	24,1	33,0	39,3	-
Moyen.	6,6	9,8	12,1	16,5	21,4	29,1	41,1	49,2	-

Tableau A3-10 Station S14B (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	6,9	7,0	7,0	10,6	20,0	28,2	29,6
2002	-	-	8,8	11,5	13,6	16,6	28,3	28,8	37,7
2003	-	-	16,2	22,0	23,0	27,9	29,5	40,4	43,8
2004	-	-	12,9	15,2	25,0	34,2	45,1	57,9	68,6
2005	-	-	9,9	13,0	14,9	24,8	57,4	74,1	86,4
Moyen.	-	-	10,9	13,7	16,7	22,8	36,1	45,9	53,2

Tableau A3-11 Station S018 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1997	-	-	12,5	19,0	24,3	26,0	34,5	59,3	63,8
1998	-	-	7,3	8,8	11,0	18,5	34,3	39,3	42,8
1999	-	-	9,3	11,8	14,8	16,8	24,3	34,8	43,8
2004	-	-	22,1	31,1	38,8	39,7	43,0	54,2	64,6
2005	-	-	10,0	13,4	20,7	37,2	77,7	97,4	119,6
Moyen.	-	-	12,2	16,8	21,9	27,6	42,8	57,0	66,9

Tableau A3-12 Station S027 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	15,3	18,1	18,3	18,3	22,9	28,1	-
2002	-	-	9,9	12,7	17,9	22,7	24,5	31,4	-
2003	-	-	11,4	17,2	31,0	53,5	58,6	60,8	-
2004	-	-	13,5	20,7	28,8	41,1	66,7	101,9	-
2005	-	-	7,7	9,8	15,4	25,6	62,0	76,7	-
Moyen.	-	-	11,6	15,7	22,3	32,2	46,9	59,8	-

Tableau A3-13 Station S905 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	8,5	9,3	9,4	13,3	27,0	36,6	39,1
2002	-	-	9,7	12,2	12,5	15,1	29,1	29,7	32,8
2003	-	-	11,1	18,4	19,4	24,8	29,8	40,6	44,1
2004	-	-	13,4	16,3	18,8	19,7	39,2	51,2	62,7
2005	-	-	12,3	17,8	19,7	28,5	55,8	75,0	96,7
Moyen.	-	-	11,0	14,8	16,0	20,3	36,2	46,6	55,1

Tableau A3-14 Station S910 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	16,5	18,5	18,6	31,4	31,5	31,9	-
2002	-	-	12,1	16,1	19,4	25,4	27,7	28,7	-
2003	-	-	14,7	22,7	34,0	34,6	37,0	51,7	-
2004	-	-	7,0	10,5	20,5	29,8	46,6	67,7	-
2005	-	-	11,0	12,5	16,3	29,0	67,3	83,9	-
Moyen.	-	-	12,3	16,1	21,8	30,0	42,0	52,8	-

Tableau A3-15 Station S921 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1989	-	-	-	-	24,9	26,4	28,2	34,3	45,0
1998	-	-	-	-	16,0	23,0	41,3	48,0	52,0
1999	-	-	-	-	15,8	18,8	36,6	50,8	66,0
2004	-	-	-	-	36,8	50,4	69,9	78,4	78,4
2005	-	-	-	-	27,0	46,9	97,2	117,6	135,2
Moyen.	-	-	-	-	24,1	33,1	54,6	65,8	75,3

Tableau A3-16 Station S80A (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
1997	-	-	10,3	10,3	11,5	15,5	31,0	53,0	64,0
1998	-	-	23,8	23,8	23,8	23,8	25,5	26,8	37,3
2003	-	-	9,6	13,1	16,8	23,9	30,1	40,3	44,9
2004	-	-	11,6	13,5	15,8	19,6	39,6	54,4	67,0
2005	-	-	12,5	18,7	19,5	22,1	45,8	62,1	79,3
Moyen.	-	-	13,6	15,9	17,5	21,0	34,4	47,3	58,5

Tableau A3-17 Station S902 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	10,0	10,3	10,5	13,5	24,3	33,0	-
2002	-	-	7,8	10,2	16,2	16,9	20,4	24,7	-
2003	-	-	11,0	16,0	20,7	31,7	37,2	37,2	-
2004	-	-	9,6	15,6	22,8	30,0	40,4	61,9	-
2005	-	-	16,7	18,2	18,2	24,7	57,8	73,2	-
Moyen.	-	-	11,0	14,1	17,7	23,4	36,0	46,0	-

Tableau A3-18 Station S903 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	8,8	11,9	14,8	15,0	21,2	28,1	-
2002	-	-	10,9	12,2	12,4	12,6	22,0	25,8	-
2003	-	-	12,1	19,7	22,3	22,4	30,7	43,7	-
2004	-	-	11,4	12,7	13,5	19,5	37,8	54,4	-
2005	-	-	20,3	26,6	26,6	27,5	52,1	81,1	-
Moyen.	-	-	12,7	16,6	17,9	19,4	32,8	46,6	-

Tableau A3-19 Station S904 (mm)

Année	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
2001	-	-	9,8	11,5	12,3	12,5	25,0	37,6	-
2002	-	-	9,9	10,6	11,0	12,9	24,6	25,1	-
2003	-	-	16,3	23,1	23,1	24,4	27,9	36,4	-
2004	-	-	9,6	11,6	13,4	16,3	35,0	49,5	-
2005	-	-	16,1	23,0	24,7	24,7	47,5	72,5	-
Moyen.	-	-	12,3	16,0	16,9	18,2	32,0	44,2	-

ANNEXE 4 – Relations Hauteur-Durée-Fréquence données par l'analyse fréquentielle régionale

Tableau A4-1 Hauteur sur 5 minutes (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	6,6	7,5	8,5	8,5	9,8	11,0	9,7	11,2	12,6
7012232	4,1	6,0	8,7	5,3	7,8	11,2	6,0	8,9	12,8
7016294	7,0	7,7	8,4	9,0	9,9	11,0	10,2	11,4	12,7
7016900	6,2	6,9	7,7	8,0	8,9	10,0	9,1	10,2	11,5
7024254	5,3	6,3	7,4	6,9	8,2	9,5	7,8	9,4	10,9
7017999	5,7	7,3	8,7	7,4	9,4	11,1	8,5	10,8	12,7
7016280	6,8	7,7	8,8	8,8	10,0	11,4	10,0	11,4	13,2
MOYENNE		6,4			8,4			9,7	
ÉC.-TYPE		0,7			0,9			1,0	
Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	11,1	12,9	14,7	12,0	14,1	16,3	12,8	15,3	18,1
7012232	6,9	10,3	14,9	7,4	11,3	16,4	8,0	12,2	18,0
7016294	11,5	13,1	15,0	12,4	14,4	16,7	13,1	15,6	18,5
7016900	10,3	11,8	13,4	11,0	12,9	15,0	11,7	14,0	16,6
7024254	9,0	10,8	12,7	9,7	11,8	14,1	10,3	12,8	15,6
7017999	9,8	12,5	14,8	10,7	13,7	16,4	11,4	14,8	18,0
7016280	11,3	13,2	15,6	12,1	14,5	17,4	12,9	15,7	19,2
MOYENNE		11,4			12,6			13,8	
ÉC.-TYPE		1,2			1,3			1,4	

Tableau A4-2 Hauteur sur 10 minutes (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	9,7	11,2	13,1	12,6	14,8	17,2	14,5	17,1	20,0
7012232	6,6	8,9	13,6	8,7	11,7	17,9	10,0	13,6	20,8
7016294	9,9	10,8	11,9	12,9	14,2	15,8	14,7	16,5	18,5
7016900	9,1	10,3	11,6	11,9	13,5	15,3	13,7	15,6	17,8
7024254	7,7	9,3	11,1	10,1	12,2	14,5	11,6	14,2	16,8
7017999	7,6	9,4	11,6	9,9	12,4	15,2	11,4	14,4	17,7
7016280	9,6	10,8	12,2	12,6	14,2	15,9	14,4	16,5	18,5
MOYENNE		9,4			12,4			14,5	
ÉC.-TYPE		0,9			1,2			1,4	
Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	16,7	20,1	23,7	18,2	22,3	26,7	19,6	24,5	29,9
7012232	11,5	15,9	24,7	12,6	17,7	27,5	13,5	19,4	30,7
7016294	16,8	19,3	22,2	18,2	21,5	25,1	19,5	23,6	28,3
7016900	15,7	18,3	21,2	17,0	20,4	24,0	18,2	22,4	27,0
7024254	13,4	16,6	19,8	14,7	18,4	22,2	15,8	20,2	24,8
7017999	13,2	16,9	20,8	14,4	18,7	23,3	15,5	20,6	26,2
7016280	16,6	19,3	21,9	18,1	21,4	24,8	19,4	23,6	27,9
MOYENNE		17,3			19,6			21,9	
ÉC.-TYPE		1,6			1,8			2,0	

Tableau A4-3 Hauteur sur 15 minutes (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	12,0	13,7	15,9	15,8	18,2	20,8	18,2	21,3	24,0
7012232	8,1	10,9	20,0	10,5	14,4	26,5	12,1	16,8	30,9
7016294	11,9	12,8	14,2	15,5	17,0	18,7	17,8	19,8	21,7
7016900	11,1	12,5	14,5	14,5	16,6	19,1	16,6	19,4	22,2
7024254	9,2	11,3	14,0	12,1	15,0	18,3	13,9	17,5	21,2
7017999	9,6	12,3	16,4	12,5	16,3	21,6	14,4	19,1	25,0
7016280	11,2	12,6	14,4	14,7	16,7	18,9	16,9	19,5	21,9
S14B	7,4	10,2	14,5	9,7	13,6	19,0	11,1	15,9	22,1
S018	7,7	11,5	21,2	10,0	15,2	28,0	11,5	17,7	32,5
S027	8,3	10,8	13,7	10,8	14,4	18,0	12,4	16,8	20,8
S905	8,5	10,3	12,2	11,2	13,7	16,0	12,9	15,9	18,5
S910	8,0	11,5	14,7	10,5	15,2	19,3	12,2	17,8	22,3
S80A	9,5	12,7	24,5	12,3	16,8	32,6	14,1	19,6	37,9
S902	8,1	10,3	15,5	10,6	13,7	20,5	12,2	16,0	23,8
S903	9,2	11,9	19,9	12,0	15,8	26,4	13,7	18,4	30,7
S904	9,1	11,6	16,2	12,0	15,3	21,3	13,7	17,9	24,7
MOYENNE		11,7			15,5			18,1	
ÉC.-TYPE		1,0			1,4			1,6	

Tableau A4-3 Hauteur sur 15 minutes (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	21,0	25,2	28,3	22,9	28,2	31,8	24,6	31,3	35,4
7012232	13,9	20,0	36,6	15,1	22,3	40,8	16,2	24,7	45,2
7016294	20,4	23,5	25,8	22,0	26,3	29,0	23,5	29,2	32,5
7016900	19,1	23,0	26,2	20,7	25,7	29,4	22,2	28,5	32,8
7024254	16,1	20,8	24,9	17,5	23,2	27,9	18,9	25,7	31,0
7017999	16,6	22,6	29,5	18,1	25,3	32,8	19,5	28,0	36,4
7016280	19,4	23,1	25,9	21,1	25,9	29,1	22,6	28,7	32,5
S14B	12,8	18,8	25,9	14,0	21,0	28,8	15,0	23,3	31,8
S018	13,2	21,0	38,2	14,5	23,5	42,5	15,6	26,1	46,7
S027	14,4	19,9	24,5	15,7	22,3	27,3	17,0	24,7	30,2
S905	14,9	18,9	21,8	16,3	21,2	24,4	17,6	23,4	27,1
S910	14,1	21,1	26,1	15,5	23,6	29,2	16,9	26,2	32,3
S80A	16,2	23,3	44,9	17,6	26,1	50,0	18,9	28,9	54,9
S902	14,0	19,0	28,1	15,2	21,2	31,3	16,3	23,5	34,5
S903	15,8	21,8	36,4	17,1	24,4	40,7	18,4	27,1	44,8
S904	15,8	21,2	29,0	17,3	23,7	32,1	18,5	26,3	35,5
MOYENNE		21,5			24,0			26,6	
ÉC.-TYPE		1,9			2,1			2,3	

Tableau A4-4 Hauteur sur 30 minutes (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	16,4	18,5	21,0	21,9	24,9	28,0	25,3	29,0	32,6
7012232	9,3	15,8	30,4	12,4	21,2	40,9	14,3	24,8	47,8
7016294	15,3	16,9	18,9	20,3	22,6	25,2	23,4	26,4	29,4
7016900	14,5	16,7	19,6	19,3	22,4	26,2	22,2	26,1	30,6
7024254	13,0	15,5	18,5	17,3	20,9	24,7	20,0	24,3	28,6
7017999	14,7	18,6	24,3	19,7	25,0	32,4	22,7	29,1	37,7
7016280	14,2	16,1	18,4	18,9	21,6	24,5	21,8	25,2	28,5
S14B	8,6	13,0	18,7	11,5	17,4	25,0	13,2	20,3	29,0
S018	9,5	15,9	29,5	12,7	21,3	39,8	14,6	24,8	46,3
S027	10,4	14,8	18,7	14,0	19,9	24,9	16,2	23,2	28,8
S905	9,5	14,0	17,2	12,8	18,8	22,9	14,9	21,9	26,5
S910	11,0	15,2	20,4	14,8	20,4	27,3	17,0	23,8	31,6
S80A	10,9	15,0	21,9	14,5	20,1	29,3	16,8	23,4	34,0
S902	10,1	13,3	16,6	13,6	17,8	22,1	15,7	20,8	25,6
S903	11,4	15,7	27,1	15,2	21,1	36,6	17,5	24,6	42,5
S904	10,4	15,1	22,4	13,8	20,2	30,0	16,0	23,6	34,8
MOYENNE		15,6			21,0			24,5	
ÉC.-TYPE		1,6			2,1			2,5	

Tableau A4-4 Hauteur sur 30 minutes (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	29,1	34,1	38,5	31,5	37,8	43,0	33,5	41,5	47,9
7012232	16,5	29,1	56,3	18,1	32,3	62,4	19,5	35,4	68,6
7016294	26,8	31,1	35,0	28,9	34,5	39,2	30,8	37,8	43,7
7016900	25,4	30,7	36,1	27,6	34,1	40,4	29,5	37,4	44,8
7024254	23,1	28,6	33,6	25,1	31,7	37,4	26,9	34,8	41,5
7017999	26,1	34,2	44,2	28,4	38,0	49,2	30,4	41,6	54,4
7016280	25,1	29,6	33,6	27,2	32,9	37,6	29,0	36,0	41,8
S14B	15,3	23,9	34,0	16,7	26,5	37,6	18,0	29,1	41,1
S018	16,9	29,2	54,5	18,5	32,4	60,5	19,9	35,5	66,5
S027	18,8	27,3	33,8	20,5	30,3	37,6	22,2	33,2	41,6
S905	17,3	25,7	31,3	19,1	28,5	35,0	20,6	31,3	38,7
S910	19,7	27,9	36,9	21,5	31,0	41,0	23,2	34,0	45,0
S80A	19,4	27,6	40,0	21,1	30,6	44,5	22,7	33,5	48,8
S902	18,3	24,5	30,0	20,0	27,1	33,2	21,5	29,7	36,7
S903	20,2	28,9	50,1	22,0	32,0	55,7	23,5	35,1	61,1
S904	18,5	27,7	40,7	20,2	30,8	45,1	21,8	33,7	49,3
MOYENNE		28,8			31,9			35,0	
ÉC.-TYPE		2,9			3,2			3,5	

Tableau A4-5 Hauteur sur 1 heure (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	19,7	22,1	24,9	26,5	29,8	33,4	31,0	35,1	39,3
7012232	14,0	16,5	19,9	18,6	22,3	27,1	21,7	26,2	32,1
7016294	18,9	20,9	23,5	25,2	28,1	31,8	29,3	33,2	37,6
7016900	17,3	20,0	23,3	23,2	27,0	31,4	27,0	31,8	37,0
7017965	14,5	18,4	23,4	19,5	24,8	31,6	22,7	29,2	37,1
7017999	17,4	20,3	24,5	23,2	27,4	33,3	27,0	32,2	39,4
7019990	14,9	18,5	22,0	20,1	25,0	29,5	23,6	29,5	34,6
7016280	17,2	20,2	24,2	23,0	27,2	32,9	26,7	32,1	39,0
7024254	16,9	19,9	23,6	22,7	26,8	31,8	26,4	31,6	37,4
S14B	8,8	15,5	22,0	11,9	21,0	29,4	14,0	24,7	34,5
S018	12,2	20,4	33,6	16,4	27,5	45,3	19,1	32,4	53,6
S027	15,3	20,7	28,6	20,5	27,9	38,5	24,0	32,9	45,3
S905	9,0	14,8	18,4	12,4	20,0	24,6	14,6	23,6	28,8
S910	16,1	20,2	33,8	21,6	27,3	45,6	25,2	32,2	53,6
S921	15,6	22,4	32,7	20,9	30,2	44,2	24,4	35,6	51,8
S80A	12,4	16,2	20,7	16,8	21,9	27,7	19,6	25,8	32,5
S902	11,5	16,4	20,4	15,5	22,2	27,3	18,2	26,1	32,1
S903	12,0	16,7	25,2	16,1	22,5	33,9	18,9	26,5	39,9
S904	10,8	15,7	23,0	14,5	21,2	31,1	16,9	25,0	36,5
MOYENNE		18,7			25,3			29,8	
ÉC.-TYPE		2,4			3,2			3,8	

Tableau A4-5 Hauteur sur 1 heure (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	36,2	42,1	47,5	39,9	47,5	54,2	43,3	53,0	61,6
7012232	25,4	31,5	38,7	28,0	35,5	44,0	30,4	39,6	49,7
7016294	34,2	39,7	45,8	37,5	44,8	52,4	40,5	50,0	59,5
7016900	31,6	38,1	44,6	34,8	43,0	50,8	37,8	47,9	57,5
7017965	26,7	35,0	44,6	29,5	39,5	50,6	32,3	44,1	56,9
7017999	31,6	38,7	47,7	34,7	43,6	54,5	37,7	48,6	61,7
7019990	27,9	35,3	41,5	30,9	39,8	47,1	33,6	44,4	53,4
7016280	31,2	38,5	47,2	34,4	43,4	53,8	37,3	48,4	60,9
7024254	30,9	37,8	45,1	34,1	42,7	51,2	37,1	47,6	58,0
S14B	16,7	29,6	41,0	18,5	33,4	46,3	20,4	37,2	52,0
S018	22,7	38,8	64,0	25,2	43,7	72,0	27,6	48,8	80,4
S027	28,1	39,5	54,4	31,2	44,5	61,4	34,1	49,6	68,8
S905	17,3	28,2	34,6	19,3	31,8	39,3	21,4	35,5	44,4
S910	29,4	38,5	64,2	32,3	43,4	72,5	35,0	48,5	80,6
S921	28,8	42,7	61,7	32,0	48,1	69,6	34,9	53,7	77,8
S80A	23,2	30,9	38,9	25,7	34,9	44,0	28,1	38,9	49,5
S902	21,6	31,3	38,5	24,1	35,3	43,7	26,5	39,4	49,1
S903	22,2	31,7	47,5	24,6	35,8	53,7	26,9	39,9	60,2
S904	20,0	29,9	43,6	22,2	33,8	49,2	24,4	37,7	55,1
MOYENNE		35,7			40,2			44,9	
ÉC.-TYPE		4,5			5,1			5,7	

Tableau A4-6 Hauteur sur 2 heures (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	24,4	26,2	28,4	32,6	35,0	37,8	37,9	41,4	44,9
7012232	18,6	21,6	25,4	24,8	28,9	34,0	28,9	34,2	40,4
7016294	23,2	25,6	28,8	30,7	34,3	38,7	35,6	40,4	46,0
7016900	21,7	25,3	30,2	28,7	33,8	40,6	33,5	39,9	48,1
7017965	19,2	25,7	33,4	25,6	34,3	44,7	30,0	40,5	52,7
7017999	22,9	26,7	32,6	30,3	35,7	44,1	35,3	42,2	52,4
7019990	22,8	26,6	30,6	30,4	35,6	40,6	35,6	42,0	47,9
7016280	21,2	25,4	31,8	27,9	34,0	43,1	32,4	40,1	51,5
7024254	23,2	27,0	34,2	30,8	36,1	46,1	35,8	42,6	54,8
S14B	12,3	21,1	29,3	16,5	28,3	38,8	19,4	33,4	45,7
S018	16,9	25,5	35,8	22,5	34,2	47,6	26,4	40,4	55,8
S027	18,7	29,8	49,0	25,0	39,9	65,8	29,3	47,1	77,7
S905	13,4	18,7	25,2	18,0	25,1	33,6	21,1	29,6	39,5
S910	24,8	27,8	31,1	33,3	37,2	41,4	38,9	43,9	48,9
S921	19,2	30,6	45,7	25,6	41,0	61,1	30,0	48,4	72,1
S80A	14,9	19,4	22,3	20,0	26,0	29,5	23,6	30,6	34,9
S902	13,9	21,6	28,4	18,7	28,9	37,8	22,0	34,1	44,3
S903	13,0	17,9	23,9	17,4	24,0	31,8	20,5	28,3	37,4
S904	11,9	16,8	22,8	16,0	22,5	30,3	18,8	26,5	35,7
MOYENNE		24,2			32,4			38,2	
ÉC.-TYPE		4,0			5,3			6,3	

Tableau A4-6 Hauteur sur 2 heures (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	44,4	50,0	55,3	48,8	56,8	64,4	52,9	63,9	74,6
7012232	34,0	41,2	49,4	37,7	46,9	57,0	41,1	52,8	65,2
7016294	41,6	48,8	56,8	45,8	55,5	66,0	50,0	62,5	76,1
7016900	39,4	48,2	58,7	43,6	54,8	67,7	47,7	61,7	77,7
7017965	35,5	48,9	63,8	39,7	55,6	73,2	43,8	62,6	83,4
7017999	41,4	50,9	63,9	45,8	57,9	73,9	50,0	65,2	84,9
7019990	42,3	50,8	58,4	47,0	57,7	67,4	51,5	65,0	77,7
7016280	38,1	48,5	63,5	42,2	55,1	73,2	46,1	62,0	83,7
7024254	42,0	51,4	67,3	46,4	58,4	77,8	50,5	65,8	88,9
S14B	23,4	40,3	55,1	26,2	45,8	63,0	29,0	51,5	71,7
S018	31,3	48,7	67,3	35,1	55,4	77,0	38,8	62,4	87,4
S027	34,7	56,9	93,8	38,9	64,6	106,6	43,0	72,8	120,9
S905	25,1	35,8	47,7	28,1	40,7	54,5	30,9	45,8	62,0
S910	45,9	53,0	59,9	50,5	60,2	69,2	55,0	67,8	80,0
S921	35,8	58,4	86,9	40,0	66,4	98,9	44,2	74,8	112,6
S80A	28,1	37,0	42,6	31,5	42,1	49,4	34,9	47,4	57,0
S902	26,4	41,2	53,6	29,5	46,9	61,1	32,6	52,8	69,9
S903	24,3	34,2	45,2	27,2	38,9	51,7	29,9	43,8	59,1
S904	22,3	32,0	43,3	25,0	36,4	49,4	27,5	41,0	56,2
MOYENNE		46,1			52,4			59,0	
ÉC.-TYPE		7,6			8,7			9,8	

Tableau A4-7 Hauteur sur 6 heures (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	31,3	34,8	40,3	41,2	46,6	54,5	47,7	55,4	65,3
7012232	30,1	34,4	40,5	39,7	46,1	54,4	46,1	54,8	65,0
7016294	33,2	35,9	39,6	44,0	48,0	52,9	51,0	57,1	63,3
7016900	32,6	36,4	41,4	43,1	48,8	55,2	50,1	58,0	65,8
7017965	26,7	33,4	41,7	35,4	44,8	55,9	41,2	53,2	66,3
7017999	34,1	37,9	43,1	45,0	50,7	57,8	52,1	60,3	69,1
7019990	28,7	38,1	55,8	38,0	51,0	75,3	44,3	60,7	89,9
7016280	33,3	40,3	53,3	43,5	54,0	73,0	50,4	64,2	87,7
7024254	32,7	37,7	45,6	42,9	50,5	61,6	49,8	60,0	73,6
S14B	21,6	33,0	49,9	28,5	44,2	67,2	33,3	52,6	79,9
S018	26,1	39,2	74,4	34,5	52,4	100,7	40,2	62,4	120,5
S027	22,8	43,0	60,3	30,7	57,6	79,9	36,5	68,4	94,1
S905	25,9	33,1	55,3	34,2	44,4	74,8	39,8	52,8	89,3
S910	27,6	38,5	63,3	36,4	51,5	85,1	42,6	61,3	101,0
S921	29,5	50,0	89,5	38,9	67,0	120,2	45,4	79,7	142,5
S80A	25,4	31,5	40,9	33,6	42,2	54,9	39,2	50,2	65,6
S902	21,6	33,0	49,4	28,5	44,2	66,5	33,4	52,5	78,8
S903	20,8	30,0	47,1	27,4	40,2	63,5	32,0	47,8	75,6
S904	23,2	29,3	45,7	30,7	39,3	62,0	35,7	46,7	74,0
MOYENNE		36,3			48,6			57,8	
ÉC.-TYPE		4,9			6,5			7,8	

Tableau A4-7 Hauteur sur 6 heures (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	55,8	67,8	80,9	61,5	78,0	94,7	67,2	89,1	110,7
7012232	53,9	67,0	80,5	59,6	77,1	94,0	65,0	88,1	109,9
7016294	59,5	69,9	78,9	65,5	80,4	92,8	71,3	91,8	108,9
7016900	58,8	71,0	81,7	64,9	81,7	95,8	71,1	93,3	111,9
7017965	48,7	65,1	81,6	54,1	75,0	94,8	59,5	85,6	109,7
7017999	61,1	73,8	85,6	67,4	85,0	100,5	73,8	97,0	117,6
7019990	52,3	74,2	110,1	58,2	85,4	127,3	63,9	97,6	147,6
7016280	58,9	78,6	109,6	65,1	90,4	128,7	71,2	103,3	149,1
7024254	58,3	73,4	91,1	64,5	84,5	106,4	70,4	96,5	123,9
S14B	39,6	64,3	97,7	44,4	74,0	112,7	49,2	84,6	129,2
S018	47,6	76,3	147,4	53,0	87,8	170,1	58,2	100,3	194,4
S027	44,1	83,8	114,7	49,5	96,4	132,4	54,8	110,1	152,5
S905	46,6	64,6	109,8	51,5	74,3	125,7	56,3	84,9	144,6
S910	50,2	75,0	124,5	55,8	86,3	143,4	61,5	98,6	164,6
S921	53,9	97,5	174,7	60,2	112,2	201,5	66,9	128,2	230,3
S80A	46,3	61,4	80,2	51,4	70,7	92,8	56,4	80,7	107,2
S902	39,5	64,3	96,3	44,2	74,0	110,7	48,9	84,5	127,2
S903	37,7	58,5	91,9	42,1	67,3	106,3	46,3	76,9	122,0
S904	42,0	57,2	90,8	46,5	65,8	105,0	50,9	75,1	120,6
MOYENNE		70,7			81,4			93,0	
ÉC.-TYPE		9,5			10,9			12,5	

Tableau A4-8 Hauteur sur 12 heures (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	37,6	42,2	48,9	49,6	56,3	65,7	57,0	66,0	77,4
7012232	36,8	42,0	48,3	48,8	56,0	64,1	56,3	65,6	75,2
7016294	40,3	43,6	47,9	53,3	58,2	63,8	61,4	68,2	75,2
7016900	39,4	43,2	48,1	52,2	57,7	64,0	60,2	67,6	75,2
7017965	33,7	41,0	50,0	44,5	54,7	66,6	51,5	64,2	78,2
7017999	40,3	45,4	51,1	53,5	60,5	68,1	61,9	70,9	80,0
7019990	37,2	47,3	58,9	49,3	63,2	78,4	57,1	74,0	91,8
7016280	41,5	49,5	61,4	54,3	66,1	82,9	62,5	77,5	97,8
7024254	40,2	46,0	54,3	53,1	61,4	72,5	61,2	71,9	85,2
S14B	27,8	42,9	68,5	36,6	57,2	91,3	42,3	67,0	107,0
S018	35,9	53,2	89,3	47,5	71,0	119,7	55,1	83,2	140,7
S027	30,4	55,8	88,8	40,4	74,5	118,4	46,9	87,3	138,2
S905	30,9	43,6	69,4	40,8	58,1	93,2	47,2	68,1	110,0
S910	30,1	49,3	73,4	39,8	65,8	98,1	46,2	77,1	115,0
S921	37,8	61,5	110,1	50,0	82,0	148,5	57,9	96,1	174,4
S80A	29,3	44,2	55,8	39,4	59,0	73,8	46,1	69,1	86,2
S902	26,9	43,0	65,3	35,5	57,3	87,1	40,9	67,2	102,1
S903	26,6	43,6	74,0	35,4	58,1	98,7	41,1	68,1	115,2
S904	27,9	41,3	64,2	36,9	55,1	86,0	42,9	64,6	101,1
MOYENNE		46,2			61,7			72,3	
ÉC.-TYPE		5,5			7,3			8,5	

Tableau A4-8 Hauteur sur 12 heures (mm) (suite)

Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	65,7	78,7	93,4	71,7	88,4	106,5	77,2	98,3	120,7
7012232	65,4	78,2	90,6	71,5	87,9	103,5	77,1	97,7	117,2
7016294	70,6	81,3	91,3	77,0	91,3	104,6	82,7	101,6	118,8
7016900	69,5	80,6	90,9	75,8	90,5	104,0	81,4	100,7	118,5
7017965	60,0	76,5	93,9	66,0	85,9	106,6	71,6	95,5	120,2
7017999	71,8	84,6	96,6	78,3	95,0	110,2	84,5	105,6	125,1
7019990	66,7	88,2	109,8	73,5	99,1	124,6	79,5	110,2	140,0
7016280	72,1	92,3	118,3	78,9	103,7	134,2	85,0	115,3	151,6
7024254	70,9	85,7	102,5	77,4	96,3	116,8	83,4	107,1	132,2
S14B	49,5	79,9	128,0	54,6	89,7	144,6	59,4	99,8	162,4
S018	64,2	99,2	167,6	70,6	111,4	187,5	76,7	123,9	208,3
S027	55,3	104,1	164,3	61,3	116,9	184,7	67,2	130,0	205,9
S905	55,0	81,2	131,9	60,3	91,2	148,9	65,6	101,4	166,7
S910	53,9	91,9	137,2	59,8	103,2	154,6	65,4	114,7	173,2
S921	67,8	114,6	208,7	74,8	128,7	235,1	81,4	143,1	262,6
S80A	54,2	82,4	102,7	60,2	92,5	116,2	65,8	102,9	131,1
S902	47,8	80,1	121,9	52,9	90,0	137,8	57,8	100,0	153,5
S903	47,9	81,2	137,5	52,8	91,2	155,2	57,4	101,4	173,2
S904	50,3	77,0	120,7	55,4	86,5	136,5	60,2	96,2	152,3
MOYENNE		86,2			96,8			107,7	
ÉC.-TYPE		10,2			11,4			12,7	

Tableau A4-9 Hauteur sur 24 heures (mm)

Station	2 ans			5 ans			10 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	51,8	58,0	64,7	66,7	74,7	82,2	75,1	84,7	93,3
7012232	50,8	57,1	64,0	65,1	73,5	81,5	73,3	83,4	92,6
7016280	55,1	64,3	75,8	70,0	82,7	97,8	78,4	93,9	111,2
7016294	51,9	55,9	60,9	66,0	71,9	78,2	74,0	81,6	89,1
7016900	50,6	56,0	62,1	64,9	72,0	79,1	73,0	81,7	89,8
7017B65	47,0	54,7	63,5	60,1	70,4	81,0	67,7	79,8	92,0
7019990	51,3	60,0	69,4	65,9	77,2	88,4	74,3	87,6	99,9
S14B	32,6	51,4	81,1	41,6	66,1	104,4	46,8	75,0	118,9
S018	43,4	64,6	118,3	55,3	83,1	153,4	62,2	94,3	174,3
S905	34,8	53,2	96,9	44,2	68,4	124,5	49,7	77,6	142,0
S921	47,5	72,7	136,3	60,3	93,6	177,6	67,7	106,2	201,7
S80A	40,0	56,5	72,2	51,3	72,7	92,3	58,0	82,5	104,5
MOYENNE		58,7			75,5			85,7	
ÉC.-TYPE		5,9			7,6			8,7	
Station	25 ans			50 ans			100 ans		
	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %	Inf. 95 %	Moy.	Sup. 95 %
7011309	84,1	96,5	106,9	89,4	104,5	117,3	93,8	112,0	127,9
7012232	81,9	95,0	106,1	87,1	102,9	116,3	91,5	110,3	126,5
7016280	87,5	106,9	127,7	93,1	115,8	139,4	97,8	124,1	151,2
7016294	82,1	92,9	102,7	87,2	100,7	112,9	91,2	107,9	123,2
7016900	81,6	93,1	103,1	86,8	100,8	112,9	91,0	108,0	123,1
7017B65	76,0	90,9	105,3	80,9	98,5	115,2	85,0	105,5	125,0
7019990	83,2	99,7	114,0	88,9	108,1	124,6	93,6	115,8	135,2
S14B	52,8	85,4	135,4	56,6	92,5	146,6	59,7	99,1	156,9
S018	69,8	107,4	198,1	74,4	116,3	216,1	78,5	124,6	232,6
S905	55,7	88,4	161,8	59,6	95,8	176,0	63,0	102,6	188,4
S921	76,1	120,9	229,4	81,3	130,9	249,6	86,0	140,3	267,4
S80A	65,3	93,9	119,2	70,1	101,7	130,0	74,4	109,0	139,9
MOYENNE		97,6			105,7			113,3	
ÉC.-TYPE		9,9			10,7			11,4	

ANNEXE 5 – Réponses aux questions et commentaires émis dans la lettre du 31 juillet 2007

Cette annexe contient les réponses aux questions et commentaires émis par Denis Brisson, dans sa lettre transmise à Sophie Duchesne le 31 juillet 2007, concernant le rapport préliminaire de février 2007.

Commentaire 1 : Page 5, Tableau S-2 et Page 90, Tableau 7.14 :

Nous comprenons qu'il n'est pas possible d'évaluer les précipitations pour des durées de 5, 10, 15 et 30 minutes et qu'il est proposé une majoration des données du tableau S-1 de 21 %.

Réponse : En effet, dans l'état actuel des connaissances et des outils disponibles, il nous est impossible d'évaluer l'accroissement des précipitations extrêmes en climat futur pour des durées de 5, 10, 15 et 30 minutes. Nous proposons donc de considérer un accroissement minimal d'environ 20 % par rapport aux intensités de précipitations en climat actuel pour ces durées. Il faut bien comprendre que ce 20 % est un accroissement considéré comme minimal, car on s'attend à ce que l'intensité des précipitations extrêmes sur de courtes durées s'accroisse proportionnellement de façon plus importante que sur les durées plus longues. Une évaluation grossière de cet accroissement pour les durées de 5 à 30 minutes peut être réalisée par extrapolation des accroissements obtenus pour des durées de 1 h à 24 h. Les résultats de cette extrapolation sont présentés à l'Annexe 6.

Commentaire 2 : Pages 11 et 13 :

Corriger l'en-tête pour «Notions de base».

Réponse : La correction a été apportée.

Commentaire 3 : Page 44, Figure 5.2 :

Nous comprenons que les données entre 1995 et 2005 ne sont pas disponibles.

Réponse : Ces données existent, mais elles ne sont pas encore diffusées par Environnement Canada. Malgré toutes nos démarches, nous n'avons donc pas pu recueillir les données de précipitations quotidiennes pour la station de l'aéroport Jean-Lesage pour la période de 1995 à 2005.

Commentaire 4 : Page 64, Tableau 6-1 :

Accroissement moyen : nous comprenons qu'il y a eu une révision importante des données de ce tableau par rapport à la version d'octobre 2006.

Réponse : Les données qui nous avaient été fournies pour notre évaluation préliminaire d'octobre 2006 ont été révisées par les auteurs, qui nous ont fait part des corrections à apporter par rapport à nos premiers résultats. C'est pourquoi les données du tableau 6-1 ont subi une révision importante.

Commentaire 5 : Pages 92 et 93 :

Corriger 20 % par 21 % puisqu'on fait référence à 20,8 % selon nos calculs.

Réponse : Puisqu'il s'agit d'une évaluation grossière de l'accroissement attendu pour les durées de 5 à 30 minutes, et donc d'un ordre de grandeur de cet accroissement, nous avons choisi de conserver aux pages 92 et 93 une valeur de 20 %, moins précise, plutôt que celle de 21 %. Cependant, nous avons également évalué par extrapolation les accroissements auxquels on pourrait s'attendre en climat futur pour des durées de 5 à 30 minutes. Le lecteur est invité à consulter la réponse au Commentaire 1 ainsi que l'Annexe 6 à ce sujet.

Commentaire 6 : Page 99, Dernier paragraphe, Première ligne :

Corriger pour «l'événement du 17 juillet 2006 ».

Réponse : La correction a été apportée.

Commentaire 7 : Pages 110 et 111 :

Peut-on expliquer l'écart d'augmentation des débits de pointe et des hauteurs de ruissellement entre un stationnement et un secteur résidentiel?

Réponse : Dans un stationnement à 100 % imperméable, contrairement à ce qui se passe dans un secteur résidentiel à 35 % imperméable, l'infiltration ne permet pas de retarder le ruissellement ni de stocker une partie de la pluie tombant sur les surfaces. L'accroissement des précipitations extrêmes causera une augmentation plus importante, en pourcentage, des débits de pointe et des volumes de ruissellement sur des surfaces perméables (secteur résidentiel) puisqu'au-delà d'un certain seuil, la capacité d'infiltration est dépassée et ne peut plus fournir cet effet tampon, effet qui n'existe pas sur les surfaces imperméables (stationnement) même pour de faibles intensités de précipitations.

Question 1 : Dans l'éventualité où nous devrions évaluer la récurrence d'un événement, laquelle des courbes suivantes devrions-nous utiliser?

- IDF Aéroport Jean-Lesage;
- IDF Climat actuel;
- IDF Climat futur.

Réponse : L'interprétation dépend de la situation dans laquelle on se trouve. En situation défensive, pour caractériser la récurrence d'un événement après que celui-ci se soit produit, on se devrait se baser sur les données historiques d'une seule station, c'est-à-dire sur les courbes IDF de l'aéroport Jean-Lesage. Cependant, pour déterminer la récurrence à laquelle un certain événement pourrait se produire à partir d'aujourd'hui, on devrait considérer les courbes IDF du climat futur.

Question 2 : Pouvons-nous obtenir copie des données permettant la création des Figures 4-1 à 4-14 inclusivement du rapport?

Réponse : Oui, un chiffrier numérique contenant ces données sera transmis à M. Denis Brisson.

ANNEXE 6 – Extrapolation des accroissements de précipitations en climat futur pour des durées de 5 à 30 minutes

Dans l'état actuel des connaissances et des outils disponibles, il est impossible d'évaluer l'accroissement des précipitations extrêmes en climat futur pour des durées inférieures à 1 h. Nous avons cependant estimé ces accroissements de façon grossière, et ce à titre indicatif seulement, par extrapolation des accroissements donnés par Mailhot et al. (2007) pour des durées de 1 à 24 h. Les résultats de cette extrapolation sont donnés au Tableau A6-1. L'illustration graphique des données et résultats de l'extrapolation apparaît aux Figures A6-1 à A6-6.

Tableau A6-1 Accroissements de la hauteur des précipitations estivales (courbes IDF) entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2041-2070) obtenus par extrapolation des courbes de Mailhot et al. (2007) pour des durées de 5 à 30 minutes

	<i>Accroissement actuel-futur (%) pour une période de retour de</i>					
	<i>2 ans</i>	<i>5 ans</i>	<i>10 ans</i>	<i>25 ans</i>	<i>50 ans</i>	<i>100 ans</i>
<i>Durée 5 min</i>	31	29	29	30	31	33
<i>Durée 10 min</i>	28	26	26	26	27	29
<i>Durée 15 min</i>	27	25	24	24	25	26
<i>Durée 30 min</i>	24	22	22	21	21	22

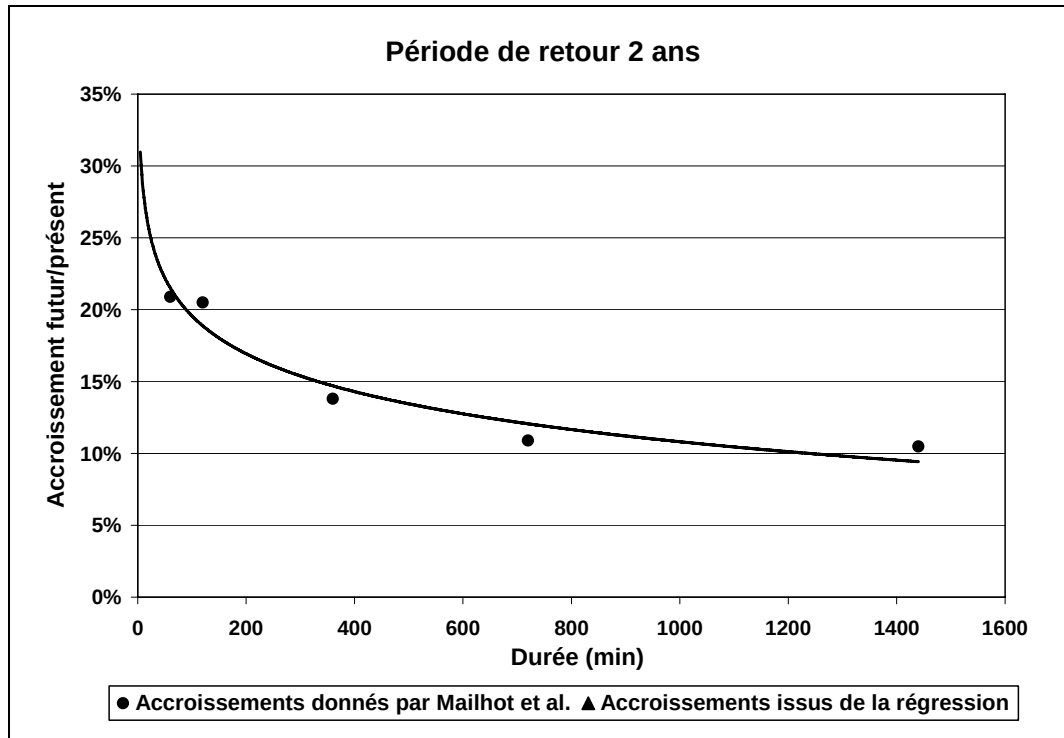


Figure A6-1 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 2 ans

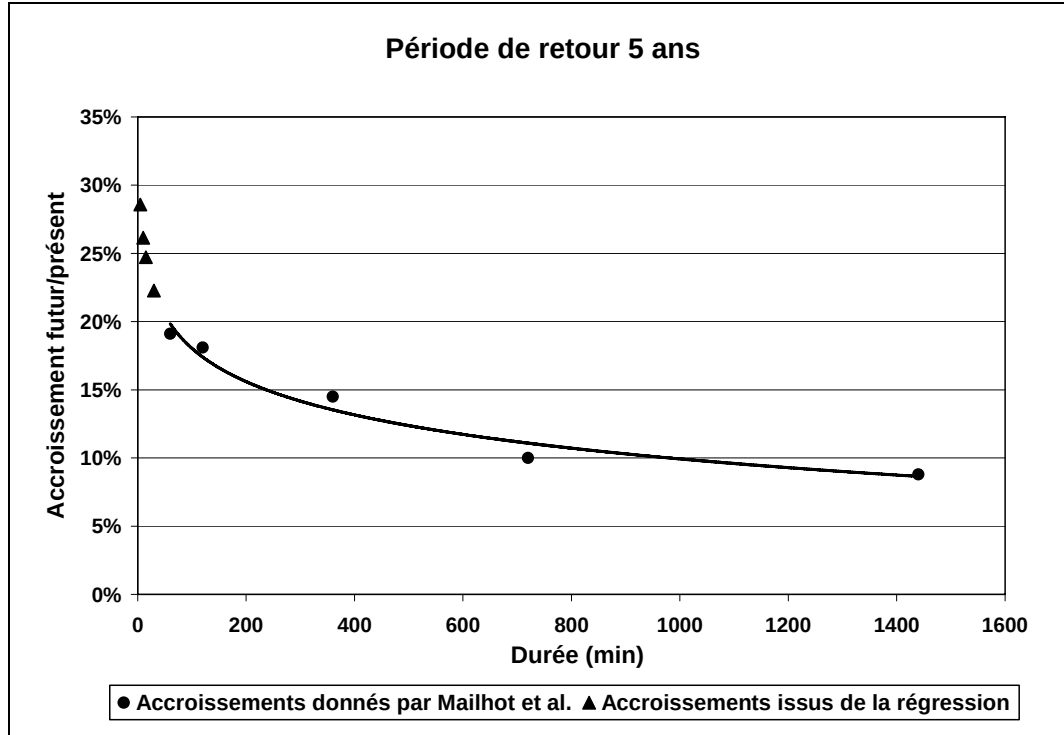


Figure A6-2 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 5 ans

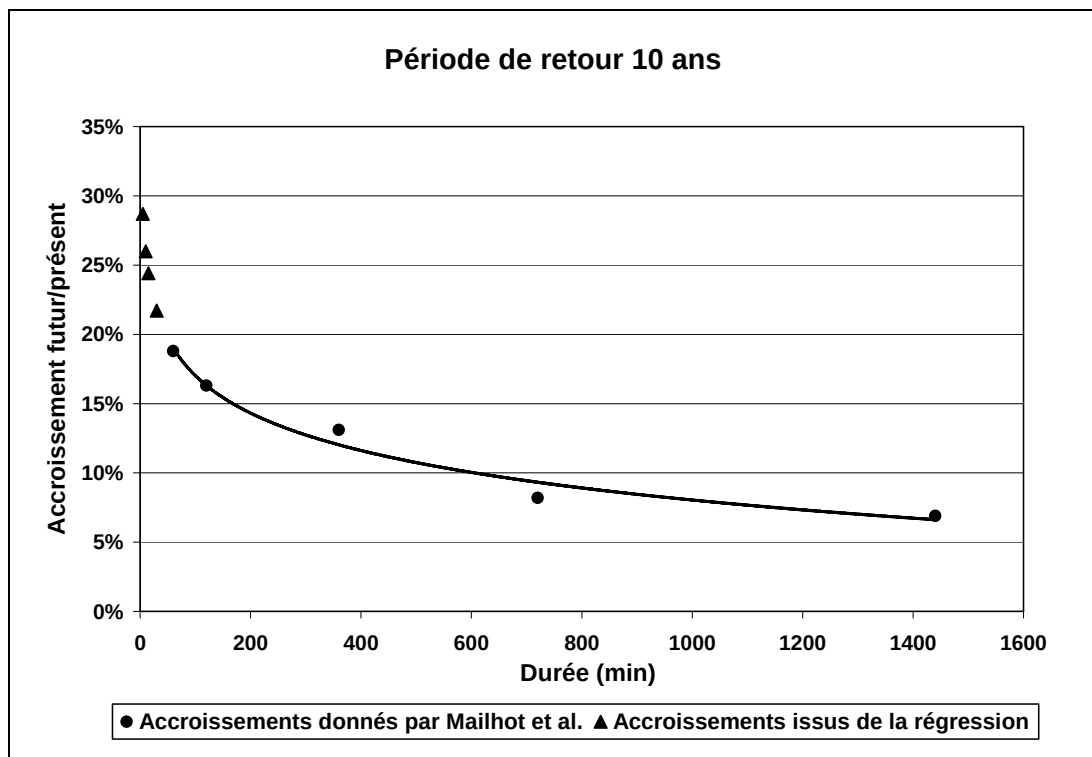


Figure A6-3 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 10 ans

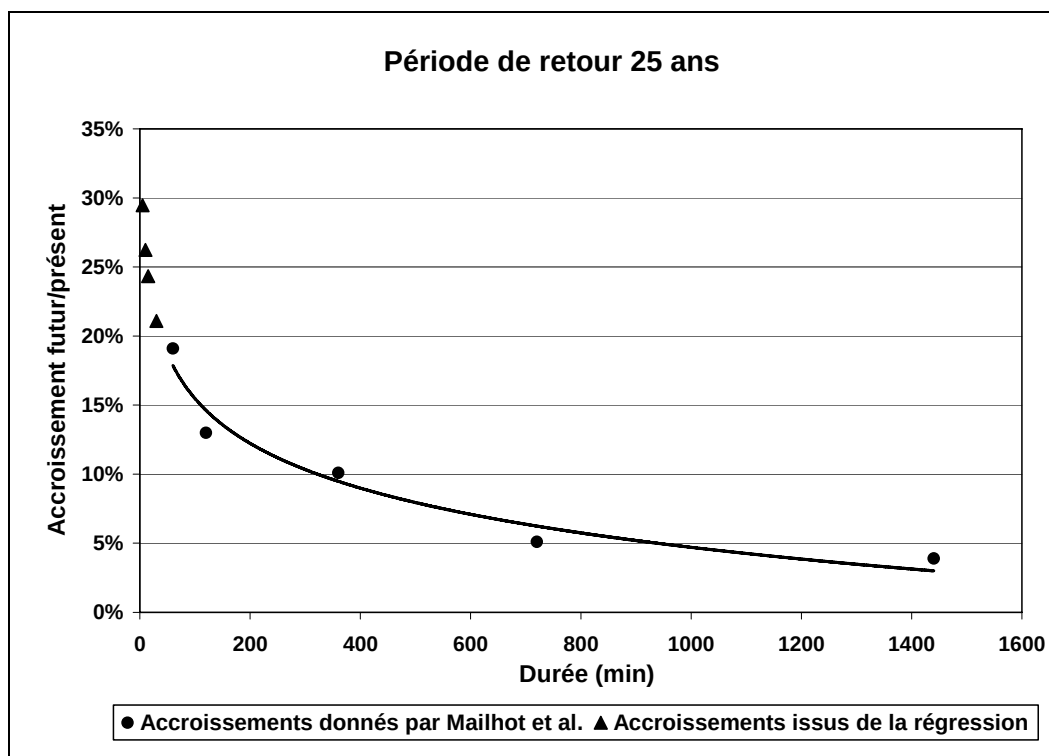


Figure A6-4 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 25 ans

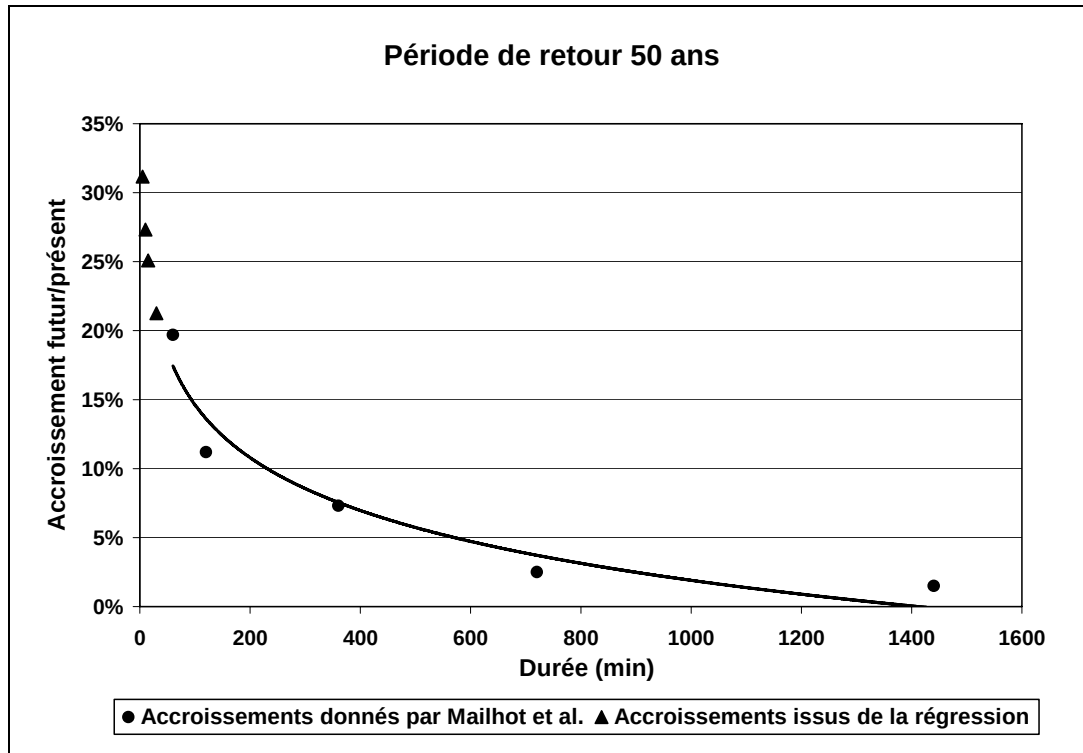


Figure A6-5 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 50 ans

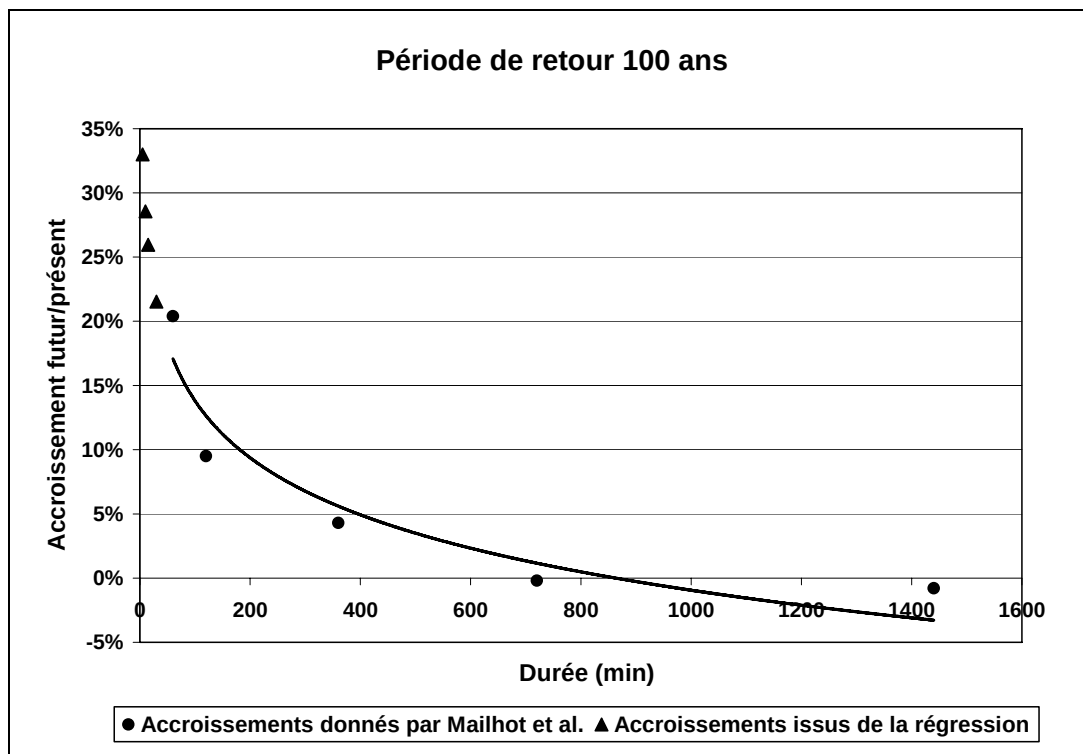


Figure A6-6 Accroissements des hauteurs de pluie entre les climats présent et futur pour une période de retour de 100 ans