

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

**IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES  
DÉBORDEMENTS DES RÉSEAUX D'ÉGOUTS UNITAIRES**

Par

**Claudine FORTIER**

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de

*Maître ès sciences, M.Sc.*

En sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe

Robert Leconte  
Université de Sherbrooke

Examineur interne

Sophie Duchesne  
INRS, Centre-Eau, Terre et Environnement

Directeur de recherche

Alain Mailhot  
INRS, Centre-Eau, Terre et Environnement



*Injuries may be forgiven, but not forgotten.*

Aesop (Greek Fabulist, 620 BC – 560 BC)



## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche Alain Mailhot pour son encadrement extrêmement formateur et sa grande disponibilité. La rigueur et l'efficacité que tu exiges de toi-même et des autres m'ont grandement fait apprécier ces deux années à travailler sous ta direction et m'ont aidée à devenir une meilleure personne.

Merci à mes collègues du local 2415 (Sophie Roberge, Michel Plourde, Simon Leclair et Amélie Thériault) de m'avoir chaleureusement accueillie dans leur environnement de travail (particulièrement toi Simon !). Je souligne également la belle amitié que j'ai développée avec Amélie.

Cette maîtrise n'aurait pu être réalisée sans le support inconditionnel de mon copain Pier-Olivier Laflamme. Ta présence, tes encouragements et ton dévouement ont été plus qu'essentiels alors que je vivais des moments difficiles en raison d'une blessure au genou. Une grande partie de cet accomplissement te revient. Idem pour ma mère Roseline Drolet qui m'a inculqué toutes les valeurs et méthodes de travail requises pour connaître du succès aux études graduées. Merci également à cette grande famille qui m'entoure, particulièrement à Daniel Nadeau, mon beau-frère, pour avoir joué un rôle de mentor indispensable dès le début de cette aventure.

Je remercie le MAMROT (Alain Roseberry et Joao Moreira), le MDDEP et le consortium Ouranos qui m'ont fourni les données essentielles à la réalisation de ce projet. Une pensée également pour Guillaume Talbot, Karine Guinard, Geneviève Pelletier et Samuel Bolduc, ces derniers ayant toujours été disponibles pour me dépanner au bon moment (soit celui juste avant de lancer l'ordinateur par la fenêtre!).

Finalement, je remercie le CRSNG, le FQRNT, l'Association des Ingénieurs municipaux du Québec (AIMQ) et le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) pour leur support financier mais surtout pour avoir cru en moi.



## RÉSUMÉ

Une partie importante des égouts des municipalités du Québec sont de type unitaire, c'est-à-dire qu'ils acheminent à la fois les eaux usées et les eaux pluviales à une station d'assainissement. En période de pluie, les capacités limitées des réseaux et des stations d'assainissement peuvent être dépassées, ce qui peut engendrer des débordements d'eaux usées non traitées vers le milieu récepteur. Cette situation est reconnue comme étant une source importante de dégradation de la qualité des cours d'eau en milieu urbain.

L'objectif principal de ce projet est d'établir des projections quant à l'évolution de la fréquence et de la durée des débordements de réseaux unitaires (DRU) dans un contexte de changement climatique. Il s'articule en deux temps. Dans un premier temps, un modèle a été développé à partir des données disponibles sur les DRU (date d'occurrence et durée pour les mois de mai à octobre inclusivement des années 2007 à 2009) à 30 ouvrages de surverses (ODS) localisés au Québec. Ce modèle permet d'évaluer, à partir de la hauteur de pluie, la probabilité d'occurrence d'un DRU et, le cas échéant, sa durée pour un ODS donné.

Dans un deuxième temps, les DRU sont évalués dans un contexte de changements climatiques. Les séries de pluie simulées par le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) ont été utilisées afin d'évaluer l'évolution future de la fréquence et de la durée des DRU pour la période 1961-2100.

Les résultats obtenus suggèrent qu'à l'échelle de la période de mai à octobre, le nombre annuel moyen de DRU pour les 30 ODS évoluera peu alors que la durée totale annuelle moyenne augmentera légèrement (+4,2%). A l'échelle mensuelle, on constate une nette diminution de la fréquence et de la durée des DRU pour les mois de juillet et août et une augmentation pour les mois de mai et octobre.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2 : NOTIONS DE BASE.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Réseaux d'égouts .....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Historique de la gestion des eaux en milieu urbain.....	3
2.1.2. Programme d'assainissement des eaux municipales du Québec.....	4
<b>2.2. Débordements des réseaux d'égouts unitaires (DRU).....</b>	<b>5</b>
2.2.1. Impacts environnementaux des DRU.....	6
<b>2.3. Contexte législatif relatif aux DRU.....</b>	<b>6</b>
2.3.1. Objectifs environnementaux de rejet (OER).....	6
2.3.2. Exigences de rejets (ER).....	7
2.3.3. Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales (SPGESM).....	7
<b>2.4. Programme de suivi des ouvrages de surverse .....</b>	<b>8</b>
<b>CHAPITRE 3 : REVUE DE LITTÉRATURE .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Changements climatiques.....</b>	<b>9</b>
3.1.1. Modèles climatiques.....	9
<b>3.2. Impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau en milieu urbain.....</b>	<b>11</b>
3.2.1. Étude des DRU par la modélisation des réseaux de drainage urbain.....	12
3.2.2. Étude des DRU par l'analyse de la pluviométrie.....	14
3.2.3. Suivi des DRU à partir de données observées .....	15
<b>CHAPITRE 4 : DONNÉES DISPONIBLES .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1. Données pluviométriques .....</b>	<b>17</b>
4.1.1. Données pluviométriques du MDDEP .....	17
<b>4.2. Données sur les DRU .....</b>	<b>18</b>
4.2.1. Description de la base de données du MAMROT .....	18
4.2.2. Sélection des stations d'assainissement étudiées.....	19
4.2.3. Choix des ODS pour chacune des stations d'assainissement sélectionnées.....	19
4.2.4. Sélection finale de 30 ouvrages de surverse .....	20
<b>CHAPITRE 5 : CARACTÉRISTIQUES DES ÉVÉNEMENTS DE PLUIE ET PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES DRU.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1. Découpage des événements de pluie.....</b>	<b>23</b>
<b>5.2. Association DRU - pluie .....</b>	<b>26</b>
5.2.1. Algorithme d'association DRU- pluie .....	26
5.2.2. DRU ignoré et DRU non associé.....	29
5.2.3. Représentation schématisée des associations.....	29

<b>5.3.</b>	<b>Détermination de la hauteur critique .....</b>	<b>32</b>
5.3.1.	Modèle conceptuel idéal de la hauteur critique.....	32
5.3.2.	Méthodologie pour déterminer la hauteur critique (Schroeder <i>et al.</i> , 2011) .....	33
<b>5.4.</b>	<b>Probabilité d'occurrence des DRU .....</b>	<b>35</b>
5.4.1.	Modèle conceptuel.....	35
5.4.2.	Choix de la fonction de probabilité .....	36
5.4.3.	Estimation des paramètres.....	37
5.4.4.	Modélisation de la probabilité d'observer un DRU.....	38
<b>5.5.</b>	<b>Estimation de la durée des DRU .....</b>	<b>41</b>
5.5.1.	Données utilisées pour les analyses de régression .....	41
5.5.2.	Régression linéaire simple .....	42
5.5.3.	Coefficient de détermination $R^2$ .....	44
5.5.4.	Résultat des tests de régression linéaire.....	44
5.5.5.	Régression multiple.....	47
5.5.6.	Résultat des analyses de régression multiple.....	49
<b>5.6.</b>	<b>Effet de la distance entre l'ODS et la station météorologique .....</b>	<b>50</b>
<b>5.7.</b>	<b>Modèle probabiliste pour estimer la fréquence et la durée totale des DRU .....</b>	<b>53</b>
5.7.1.	Description du modèle probabiliste .....	53
<b>CHAPITRE 6 :</b>	<b>COMPARAISON DES RÉSULTATS DU MODÈLE PROBABILISTE</b>	
	<b>AVEC LES DONNÉES OBSERVÉES DE DRU.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1.</b>	<b>Série d'événements de pluie de 2007 à 2009 .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2.</b>	<b>Comparaison des nombres annuels de DRU entre 2007 et 2009 .....</b>	<b>59</b>
6.2.1.	Fréquence des DRU .....	60
6.2.2.	Durée totale annuelle des DRU.....	62
<b>CHAPITRE 7 :</b>	<b>APPLICATION À UNE SÉRIE DE PLUIE HISTORIQUE.....</b>	<b>65</b>
<b>7.1.</b>	<b>Série historique de précipitation considérée.....</b>	<b>65</b>
<b>7.2.</b>	<b>Variations interannuelles des DRU simulés.....</b>	<b>66</b>
7.2.1.	Fréquence annuelle des DRU .....	66
7.2.2.	Durée totale annuelle des DRU.....	67
<b>CHAPITRE 8 :</b>	<b>APPLICATION AUX SÉRIES DE PLUIE EN CLIMAT FUTUR.....</b>	<b>71</b>
<b>8.1.</b>	<b>Séries de pluie simulées par le MRCC .....</b>	<b>71</b>
8.1.1.	Événements de pluie.....	72
8.1.2.	Comparaison des résultats obtenus des simulations <i>aet</i> et <i>aev</i> .....	73
<b>8.2.</b>	<b>Comparaison des résultats obtenus à partir des séries du MRCC simulées</b>	
	<b>en période historique et des séries historiques observées.....</b>	<b>74</b>
8.2.1.	Biais de mai à octobre.....	75
8.2.2.	Biais mensuel.....	77
<b>8.3.</b>	<b>Correction du biais .....</b>	<b>79</b>
<b>8.4.</b>	<b>Méthodologie pour estimer la variation relative (%) de la fréquence et de la</b>	
	<b>durée des DRU en climat futur.....</b>	<b>80</b>
8.4.1.	Tendance de la fréquence et de la durée des DRU entre 1961 et 2100 .....	81

8.5.	Variation relative de la fréquence et de la durée des DRU pour la période de mai à octobre entre 1961-1990 et 2070-2100.....	83
8.6.	Variation relative (%) sur une base mensuelle .....	87
8.7.	Variations relatives de la fréquence et de la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2040-2069.....	90
<b>CHAPITRE 9 : DISCUSSION .....</b>		<b>93</b>
9.1.	<b>Sources d'incertitude .....</b>	<b>93</b>
9.1.1.	Les données .....	93
9.1.2.	L'association DRU - Pluie.....	94
9.1.3.	Représentativité de la pluie mesurée .....	94
9.1.4.	Conditions initiales .....	95
9.1.5.	Développement des modèles probabilistes .....	95
9.1.6.	Modèle climatique du MRCC.....	96
9.2.	<b>Méthodologie .....</b>	<b>96</b>
9.2.1.	Choix de la caractéristique hauteur de pluie pour estimer la durée et la fréquence des DRU.....	96
9.2.2.	Choix de la fonction sigmoïde pour développer le modèle probabiliste.....	97
9.2.3.	Durée vs volume .....	98
9.2.4.	Représentativité des ODS retenus .....	98
<b>CHAPITRE 10 : CONCLUSION.....</b>		<b>99</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>		<b>103</b>
<b>Annexe A : Ajustement manuel des associations pluie – DRU.....</b>		<b>109</b>
<b>Annexe B : Informations sur les ODS étudiés.....</b>		<b>111</b>
<b>Annexe C : Coefficients de détermination et résultat des analyses de significativité des régressions linéaires entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU .....</b>		<b>113</b>
<b>Annexe D : Régression multiple : Résultats des tests de contribution des variables combinées .....</b>		<b>119</b>
<b>Annexe E : Biais mensuel pour la fréquence des DRU avec la méthode de la hauteur critique.....</b>		<b>121</b>
<b>Annexe F : Variation relative de la fréquence et de la durée des DRU .....</b>		<b>123</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Ouvrages de surverse (ODS) sélectionnés avec le nombre de DRU enregistrés de mai à octobre entre 2007 et 2009 inclusivement, le numéro et la distance de la station météorologique associée. Les types d'ODS sont expliqués à la Section 4.2.1.....	21
Tableau 4.2 : Nom, numéro, position et période couverte pour chacune des stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS étudié.....	22
Tableau 5.1 : Caractéristiques des événements de pluie considérées dans l'association DRU - pluie.....	25
Tableau 5.2 : Coefficients de détermination $R^2$ des analyses de régression entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU.....	45
Tableau 5.3 : Contribution significative d'une seconde variable à l'estimation de la durée des DRU en plus de la hauteur d'eau de l'événement de pluie.....	49
Tableau 5.4 : Résultat des tests de significativité de l'influence de la distance sur la qualité des associations durée du DRU-pluie.....	52
Tableau 7.1 : Différence entre les résultats du modèle probabiliste et de la méthode de la hauteur critique pour l'ensemble des 30 ODS. Le RMSE est calculé sur l'écart entre le nombre annuel de DRU simulés et observés entre 2007 et 2009, Section 6.2.1. Le $R^2$ est calculé à partir de la corrélation entre le total de précipitation et le nombre de DRU simulés pour une série historique entre 1977 et 2006, Figure 7.1. ....	68
Tableau 8.1 : Critères de construction des événements de pluie à partir des séries du MRCC. ....	72
Tableau 8.2 : Coefficients des régressions linéaires permettant de qualifier le biais entre les résultats du modèle probabiliste issus de quatre séries historiques observées et de la série <i>aef02</i> du MRCC en climat historique.....	77
Tableau 8.3 : Définition des périodes. ....	80
Tableau 8.4 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 minimale, maximale et moyenne pour les 30 ODS et pour les simulations <i>aef</i> et <i>aev</i> avec un seuil de 0,2 mm.....	87

Tableau 8.5 : Variation relative (%) moyenne entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour les mois de mai à octobre pour les 30 ODS et pour les simulations *aet* et *aev* avec un seuil de 0,2 mm. .... 89

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Types de réseaux d'égouts : a) Égouts unitaires; b) Égouts sanitaires. Tiré de SERAM (2012). .....	3
Figure 2.2 : Fonctionnement d'un réseau d'égout unitaire en temps sec et en temps de pluie. Adapté de MyRWA (2012). .....	5
Figure 3.1 : Vulnérabilité des infrastructures de gestion de l'eau en milieu urbain en regard des changements climatiques (tiré de Rosenzweig <i>et al.</i> , 2007). .....	12
Figure 4.1 : Localisation des stations météorologiques du MDDEP avec des données pluviométriques horaires disponibles pour le sud du Québec. ....	17
Figure 4.2 : Localisation des ODS sélectionnés au sud du Québec. La couleur des points représente le nombre d'ODS sélectionnés situés dans la même localité. ....	20
Figure 5.1 : Exemple de construction d'événements de pluie à partir des précipitations horaires en mm/h. Les données sont tirées de la station de Thetford Mines (no 7028441) entre le 2 octobre et le 14 octobre 2009. ....	25
Figure 5.2 : Schématisation d'un DRU et des quatre événements de pluie pour lesquels un pointage est calculé à partir de l'Équation 5.1. Dans ce cas précis, le DRU serait associé à l'événement $p_2$ . ....	27
Figure 5.3 : Exemple de l'application de l'algorithme pour l'association DRU – pluie sur une période de 3 mois : a) DRU et événement de pluie positionnés dans le temps avant l'association ; b) DRU associés à l'événement de pluie le plus susceptible de les avoir causés. La longueur des segments est proportionnelle à l'importance des événements. ....	31
Figure 5.4 : Modèle conceptuel de la hauteur critique. ....	32
Figure 5.5 : Événements de pluie avec et sans DRU associés survenus entre 2007 et 2009 pour l'ODS de Trois-Rivières (PRINCIPAL) et détermination de la hauteur critique à partir des courbes de répartition des données. ....	33
Figure 5.6 : Probabilité d'identifier correctement l'occurrence ( $P(\text{DRU})$ ) ou la non-occurrence ( $P(\text{Non DRU})$ ) d'un DRU selon la hauteur critique. $P(\text{DRU})$ est pour une hauteur de pluie supérieure à $h$ et $P(\text{Non DRU})$ est pour une hauteur de pluie inférieure à $h$ . ....	34
Figure 5.7 : Histogramme des hauteurs critiques des 30 ODS. ....	35

Figure 5.8 : Modèle conceptuel proposé de la probabilité d'occurrence d'un DRU. ....	36
Figure 5.9 : Probabilité d'occurrence d'un DRU en fonction de la hauteur des événements de pluie pour l'ODS de Trois – Rivières (PRINCIPAL) et événements de pluie associés ou non à un DRU. ....	39
Figure 5.10 : Modèle de probabilité de DRU à partir des fonctions sigmoïdes ajustées pour les 30 ODS.....	40
Figure 5.11 : Histogramme des hauteurs de pluie correspondant aux médianes des fonctions de probabilités des 30 ODS.....	40
Figure 5.12 : Nombre d'ODS présentant des régressions linéaires significatives entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU. ....	45
Figure 5.13 : Régression linéaire entre la durée des DRU et les six caractéristiques des événements de pluie : a) la hauteur de pluie totale, b) la durée de l'événement de pluie, c) la durée où l'intensité > 2mm/h, d) le temps sec antérieur e) l'intensité moyenne, et f) l'intensité maximale pour les données de l'ODS de Trois-Rivières, entre 2007 et 2009. Les points rouges représentent un événement de pluie associé à un DRU. ....	46
Figure 5.14 : Nombre de fois (et pourcentage correspondant) où l'ajout d'une variable (durée où l'intensité > 2 mm/h, durée de l'événement de pluie, intensité maximale) apporte une contribution significative à l'estimation de la durée des DRU par la régression multiple pour les 30 ODS. ....	49
Figure 5.15 : Effet de la distance entre l'ODS et la station météorologique sur l'association de la durée des DRU avec la caractéristique des événements de pluie hauteur de pluie pour les 30 ODS. Les coefficients de détermination en ordonnée résultent de l'association durée du DRU – hauteur de pluie.....	51
Figure 5.16 : Modèle probabiliste proposé.....	53
Figure 5.17 : Histogramme du nombre de DRU simulé pour chacune des 5 000 réalisations Monte-Carlo pour la série de pluie de 2007 à 2009 associée à l'ODS de Trois-Rivières. La barre horizontale représente l'intervalle 95%. Le nombre de DRU effectivement observés à l'endroit de cet ODS à partir de cette série de pluie est de 34.....	54
Figure 5.18 : Histogramme de la durée totale des DRU simulé par la méthode Monte-Carlo pour la série de pluie de 2007 à 2009 associée à l'ODS de Trois-Rivières. La barre horizontale représente l'intervalle 95%.....	55

Figure 6.1 : Comparaison du nombre de DRU simulé et observé durant la période de 2007 à 2009. Les points noirs réfèrent au modèle probabiliste alors que les carrés magenta réfèrent à la méthode de la hauteur critique. Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95% des réalisations de la méthode Monte-Carlo.....	58
Figure 6.2 : Comparaison des durées totales simulée et observée des DRU à chaque ODS pour la période de 2007 à 2009. Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95% des réalisations de la méthode Monte-Carlo. ....	58
Figure 6.3 : Comparaison des valeurs annuelles (nombre et durée des DRU) simulées et observées à chaque ODS. ....	60
Figure 6.4 : Nombre de DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste pour les années 2007, 2008 et 2009 pour les 30 ODS. Chaque point représente un ODS pour une des trois années. ....	60
Figure 6.5 : Nombre de DRU observés et simulés avec la méthode de la hauteur critique pour les années 2007, 2008 et 2009 pour les 30 ODS. Chaque point représente un ODS pour une des trois années.....	61
Figure 6.6 : Durée totale annuelle des DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste à partir des séries de pluie annuelles de 2007, 2008 et 2009, pour les 30 ODS. Les points encadrés représentent des ODS de la municipalité de Jonquière en 2008. ....	62
Figure 7.1 : Nombre moyen annuel de DRU simulés pour les 30 ODS selon le modèle probabiliste et la méthode de la hauteur critique à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Les $R^2$ correspondent aux corrélations entre la hauteur de pluie totale et le nombre moyen de DRU simulé à tous les ODS pour chaque année.....	67
Figure 7.2 : Durée totale moyenne des DRU simulés pour les 30 ODS selon le modèle probabiliste à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Le $R^2$ correspond à corrélation entre la hauteur de pluie totale et la durée totale moyenne des DRU simulée à tous les ODS pour chaque année. ....	68
Figure 8.1 : Séries annuelles (période de mai à octobre inclusivement) des : a) hauteurs moyennes par événement et b) nombre d'événements annuels de pluie pour les simulations <i>aet02</i> et <i>aev02</i> pour les 12 tuiles utilisées et combinées du MRCC. Les traits continus représentent les régressions linéaires pour chacune des simulations. ....	73

Figure 8.2 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC <i>aet02</i> entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) Nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste; b) Nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique; c) Durée totale annuelle moyenne (heures) des DRU simulés par le modèle probabiliste. Chaque point correspond à un ODS pour l'une des quatre séries de précipitations.....	75
Figure 8.3 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC <i>aev02</i> entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) Nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste; b) Nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique; c) Durée totale annuelle moyenne (heures) des DRU simulés par le modèle probabiliste. Chaque point correspond à un ODS pour l'une des quatre séries de précipitations.....	76
Figure 8.4 : Comparaison des résultats issus de quatre séries de pluie historiques et de la série du MRCC <i>aet02</i> entre 1977 et 2009 pour le nombre mensuel moyen de DRU simulés avec la méthode probabiliste pour les 30 ODS. ....	78
Figure 8.5 : Comparaison des résultats issus de quatre séries de pluie historiques et de la série du MRCC <i>aet02</i> entre 1977 et 2009 pour la durée totale mensuelle moyenne des DRU simulés avec la méthode probabiliste pour les 30 ODS. ....	79
Figure 8.6 : Moyenne du nombre annuel de DRU pour les 30 ODS et les deux séries <i>aev02</i> et <i>aet02</i> obtenue à partir de : a) la méthode du modèle probabiliste; b) la méthode de la hauteur critique; et c) moyenne de la durée totale des DRU pour les 30 ODS. La régression linéaire indique la tendance générale des variations interannuelles (ligne rouge). ....	82
Figure 8.7 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les 30 ODS pour les deux seuils considérés (0,2 mm et 0,3 mm) pour la simulation : a) <i>aet</i> et b) <i>aev</i> . Le numéro des cadrans cartésiens est indiqué sur chaque graphique. Les lignes rouges indiquent la régression linéaire avec un intervalle de confiance de 95%.....	83
Figure 8.8 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les 30 ODS pour les simulations <i>aet</i> et <i>aev</i> pour un seuil de : a) 0,2 mm et b) 0,3 mm. Le numéro des cadrans cartésiens est indiqué sur chaque graphique. Les lignes rouges indiquent la régression linéaire avec un intervalle de confiance de 95%.....	84

Figure 8.9 : Fonction cumulative des variations relatives entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations <i>aef</i> et <i>aev</i> pour un seuil de 0,2 mm. ....	86
Figure 8.10 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence avec le modèle probabiliste et de la durée totale des DRU à chaque ODS pour chaque mois, pour les simulations <i>aef02</i> et <i>aev02</i> . Les zones ombragées sont ajoutées à titre indicatif pour faciliter la lecture de la localisation générale des points.....	88
Figure 8.11 : Fonction cumulative pour chaque mois de la période mai à octobre des variations relatives entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations <i>aef</i> et <i>aev</i> combinées pour un seuil de 0,2 mm. ....	89
Figure 8.12 : Fonction cumulative des variations relatives entre la période 1961-1990 et les périodes 2040-2069 et 2070-2100 pour la fréquence et la durée des DRU simulés par la méthode du modèle probabiliste, pour les simulations <i>aef02</i> et <i>aev02</i> combinées entre les mois de mai et octobre. ....	90



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES**

CCCma	Canadian Climate Center Model (CCmaC)
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CGCM	Coupled General Circulation Model (MCGC)
COPLEM	Comité permanent de liaison environnement-municipalités
DEV	Déversoir d'orage
DRU	Débordement de réseau unitaire
EPA	Environmental Protection Agency
ER	Exigence de rejet
FQM	Fédération québécoise des municipalités
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Global Positioning System
HadCM	Hadley Center Model
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement du Québec
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
MCG	Modèle de circulation générale
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MOUSE	MOdel for Urban SEwer
MRC	Modèle régional du climat
MRCC	Modèle régional du climat canadien
ODS	Ouvrage de surverse
OER	Objectifs de rejets
PADEM	Programme d'assainissement des eaux municipales
PP	Poste de pompage
REG	Régulateur de débit
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur moyenne quadratique)
SOMAE	Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux
SPGESM	Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales
SWMM	Storm Water Management Model
TP	Trop-plein
UMQ	Union des municipalités du Québec



# CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les débordements des réseaux d'égouts unitaires (DRU) constituent un enjeu environnemental de premier plan. Les réseaux d'égouts unitaires acheminent à la fois les eaux usées et les eaux pluviales vers une station d'assainissement. En période de pluie, la capacité limitée des réseaux et des stations de traitement peut être dépassée, ce qui engendre des débordements d'eaux usées non traitées vers le milieu récepteur. Cette situation est reconnue comme étant une source importante de dégradation de la qualité des cours d'eau en milieu urbain et pouvant entraîner des risques pour la santé des populations (Walsh *et al.*, 2005).

De nombreuses villes d'Europe et d'Amérique du Nord dépendent encore de réseaux d'égouts unitaires pour gérer leurs eaux usées, et par conséquent, sont aux prises avec une problématique de DRU. Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA) estime qu'il y a plus de 40 millions de personnes réparties dans 772 grandes villes dont les eaux usées sont collectées par de tels systèmes (EPA, 2008), dont les villes de New-York, Chicago, Boston et Detroit. Chaque année, l'ensemble des villes situées dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent déversent plus de 90 milliards de litres d'eaux usées brutes dans les lacs et rivières (Sierra Legal, 2006). Sachant que 98% de la population du Québec occupe le bassin versant du fleuve Saint-Laurent (Godmaire et Demers, 2009), il n'est pas étonnant de constater la volonté des gouvernements et des municipalités de s'attaquer à la problématique des DRU.

Dans cette optique, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a promulgué en 2012 un nouveau règlement stipulé dans la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales (SPGESM). Dans le cadre de ce règlement, une aide financière sera offerte aux municipalités dont les systèmes d'assainissement ne sont pas conformes aux nouvelles normes, afin qu'elles puissent effectuer des travaux de mise à niveau de leurs infrastructures. Ce programme touche près de 25% de l'ensemble des stations d'assainissement du Canada (Gazette du Canada, 2012). Au Québec, de nombreux réseaux d'égouts unitaires arrivent à la fin de leur vie utile et devront être remplacés au cours des prochaines années. Selon l'Union des Municipalités du Québec, 40% des conduites d'eaux usées doivent présentement être réparées ou carrément remplacées (Mathieu, 2012). Au total, c'est un budget de 4,3 milliards de dollars par année qui devrait être investi pendant au moins 15 ans afin de remettre les réseaux de l'ensemble de la province en bon état.

Devant l'ampleur des investissements en jeu, il y a lieu de s'interroger sur l'efficacité à long terme de ces infrastructures. Ce questionnement est d'autant plus justifié si l'on tient compte du contexte de changements climatiques dans lequel ces infrastructures seront appelées à opérer. En effet, de nombreuses études suggèrent une augmentation significative de l'intensité et du nombre d'événements extrêmes de pluie d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (Easterling *et al.*, 2000; Kharin et Zwiers, 2005; Mailhot *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2007). Considérant que les événements de pluie entraînent parfois d'importants volumes d'eau de ruissellement urbain à gérer, il est donc justifié de s'interroger sur l'impact des changements climatiques sur les DRU.

L'objectif du projet de recherche est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la fréquence et la durée des DRU. Pour ce faire, la première étape du projet de recherche consiste à analyser les données de DRU de 30 ouvrages de surverse (ODS) répartis sur le territoire de 16 municipalités du Québec. En utilisant des données observées de pluviométrie provenant de stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS, les épisodes de DRU sont associés à un événement de pluie. La relation entre les DRU (fréquence et durée) et les caractéristiques de la pluie (hauteur de pluie, durée, intensité etc.) est ensuite examinée. Cette analyse a pour but d'établir, pour chaque ODS, un modèle probabiliste qui permet d'estimer la fréquence et la durée des DRU à partir d'une série de pluie. La seconde étape du projet s'intéresse aux impacts des changements climatiques sur les DRU. Les relations établies précédemment sont utilisées pour déterminer l'évolution future de la fréquence et de la durée des DRU à partir des séries de précipitations simulées par un modèle climatique régional.

En résumé, le projet se divise en trois objectifs spécifiques (étapes) :

- a) associer des DRU à des événements de pluie;
- b) établir des relations entre les fréquence et durée des DRU et la pluie pour développer un modèle probabiliste;
- c) utiliser un modèle climatique pour évaluer les fréquence et durée des DRU en climat futur à partir des relations établies en b).

Le présent mémoire résume l'ensemble des travaux effectués dans le cadre de ce projet. Les premiers chapitres portent sur les notions de base (Chapitre 2) et présentent une revue de la littérature sur le sujet (Chapitre 3). Le Chapitre 4 présente les données utilisées et le Chapitre 5 décrit la méthodologie menant au développement du modèle probabiliste. Les Chapitres 6, 7 et 8 portent sur l'application du modèle développé à des séries de pluie en climat historique et en climat futur et décrivent les résultats obtenus. Une discussion sur les incertitudes est finalement présentée au Chapitre 9, qui est suivi de la conclusion.

## CHAPITRE 2 : NOTIONS DE BASE

### 2.1. Réseaux d'égouts

La fonction principale des réseaux d'égouts unitaires est d'acheminer les eaux usées domestiques et les eaux de ruissellement urbain via un réseau commun de conduites vers une station d'assainissement où elles sont traitées, avant d'être rejetées dans l'environnement (Figure 2.1a). À l'opposé, les réseaux d'égouts sanitaires, appelés également domestiques ou séparatifs, constituent un réseau indépendant qui collecte les eaux usées domestiques, industrielles et commerciales et les achemine vers la station de traitement, sans qu'elles ne soient diluées par les eaux de ruissellement (Figure 2.1b). Ainsi, en temps de pluie, les eaux de ruissellement urbain sont dirigées vers les réseaux d'égouts pluviaux qui eux, acheminent l'eau directement vers les milieux récepteurs puisqu'il n'est pas jugé nécessaire de les traiter préalablement. À titre indicatif, il existe également les réseaux d'égouts appelés pseudo-domestiques. Il s'agit de réseaux qui reçoivent, en plus des eaux usées d'origine domestique, une certaine partie des eaux pluviales, soit celle provenant des drains de fondation, des drains de toits plats et des entrées de garage situées sous le niveau du sol.

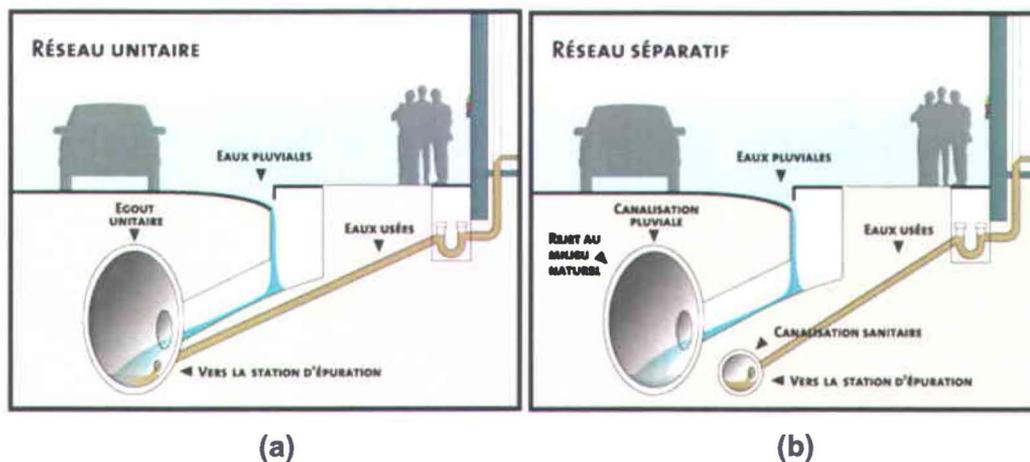


Figure 2.1 : Types de réseaux d'égouts : a) Égouts unitaires; b) Égouts sanitaires. Tiré de SERAM (2012).

#### 2.1.1. Historique de la gestion des eaux en milieu urbain

Les premiers réseaux d'égouts de l'ère moderne ont été installés au début du XX<sup>e</sup> siècle. À cette époque, les eaux usées sanitaires étaient directement rejetées vers un milieu récepteur sans

subir de traitements préalables. L'intérêt de séparer les eaux usées sanitaires des eaux de ruissellement était alors inexistant puisque le seul objectif était d'évacuer efficacement et rapidement l'eau vers un milieu récepteur (Brière, 2006).

Plusieurs villes d'Europe et d'Amérique ont donc conçu et implanté des réseaux de type unitaire jusque dans les années 1970, rejetant les eaux ainsi collectées directement dans l'environnement. Constatant les problèmes environnementaux ainsi engendrés, les gouvernements ont dû repenser ce mode de gestion des eaux usées. Les intervenants ont conclu qu'il fallait épurer les eaux d'origine domestique, mais pas nécessairement les eaux de ruissellement. À cette époque, la conception prévisionnelle en fonction des changements climatiques était peu ou pas pratiquée, car l'idée que l'homme pouvait être responsable d'un changement du climat n'était même pas évoquée. Les critères de conception étaient donc basés sur l'hypothèse que les régimes climatiques demeureraient stables dans le temps, tout comme les niveaux de risque. Ainsi, la plupart des infrastructures permettant la gestion des eaux pluviales en milieu urbain n'ont pas été conçues en considérant les nouvelles courbes IDF (Intensité, Durée et Fréquence) qui sont mieux adaptées à la réalité des climats actuel et futur (Mailhot et Duchesne, 2010).

### **2.1.2. Programme d'assainissement des eaux municipales du Québec**

Au Québec, on ne s'intéresse à la problématique des rejets des eaux usées vers le milieu récepteur que depuis les années 1970. Conscient du fait que les eaux sanitaires doivent être traitées, le Gouvernement du Québec a mis sur pied le programme d'assainissement des eaux municipales (PADEM) en 1980, dont la mission consistait à fournir des services de gestion et de financement appropriés aux municipalités, afin qu'elles puissent se doter d'équipements d'assainissement de qualité et au meilleur coût (Ministère de l'Environnement, 1989). À ce moment, 80% de la population du Québec était desservie par un réseau d'égout unitaire (Lessard et Lavallée, 1985). Ainsi, à partir de 1985, les premières stations d'assainissement ont été construites. Également, en 1989, le Ministère de l'Environnement du Québec a mis sur pied un guide d'orientation pour les concepteurs de projets se rapportant aux réseaux d'égouts. Appelé la Directive 004, ce guide précise, entre autres, qu'il est primordial d'effectuer une séparation des divers types d'eaux, soit sanitaire et pluvial, sinon on s'expose à des conséquences négatives aux points de vue économique et environnemental (Ministère de l'Environnement, 1989).

La situation semble s'être améliorée depuis ce temps puisqu'aujourd'hui, ce sont uniquement des réseaux d'égouts séparés qui sont mis en place dans les nouveaux développements urbains, une réglementation provinciale l'exigeant. Aussi, plusieurs municipalités conscientes de la situation profitent des travaux nécessitant une ouverture de rue pour remplacer les vieux réseaux unitaires par des réseaux séparés (Ministère de l'Environnement, 1989).

En date de 2012, il y a près de 800 stations d'assainissement qui sont opérées par les différentes municipalités du Québec. Le suivi de ces dernières est assuré par le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT) qui s'assure de la conformité du traitement et du respect des exigences de rejets auxquelles les stations sont assujetties.

## 2.2. Débordements des réseaux d'égouts unitaires (DRU)

Tel que mentionné, les réseaux d'égouts unitaires acheminent à la fois les eaux usées sanitaires et les eaux de ruissellement vers une station d'assainissement. Or, en temps de pluie, les volumes d'eaux à évacuer en milieu urbain peuvent devenir très importants en un relativement court laps de temps, ce qui peut mener à l'atteinte de la capacité limite de traitement de la station ou de la capacité limite de transport des conduites. Dans ce cas, l'excédent d'eau déborde via un ouvrage de surverse (ODS) vers le milieu récepteur, sans traitement préalable (Figure 2.2). Ces ODS sont situés à divers endroits du réseau d'égout raccordé à une station d'assainissement et consistent généralement en un trop-plein par lequel les eaux peuvent s'évacuer rapidement.

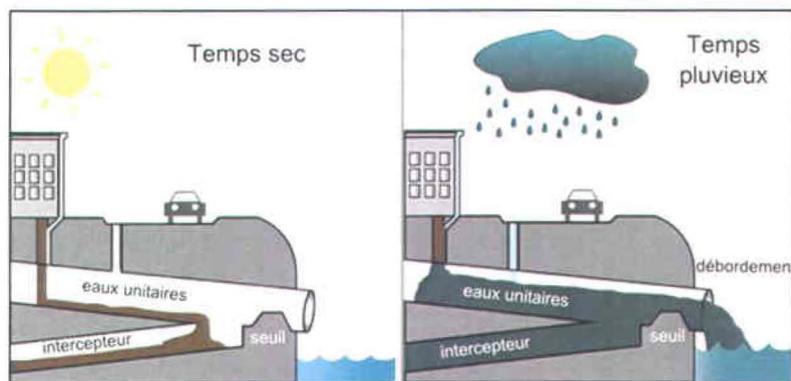


Figure 2.2 : Fonctionnement d'un réseau d'égout unitaire en temps sec et en temps de pluie. Adapté de MyRWA (2012).

### **2.2.1. Impacts environnementaux des DRU**

Les DRU sont reconnus comme étant une source importante d'apport en polluants aux milieux naturels (Walsh *et al.*, 2005). En plus de dégrader la qualité de l'eau des cours d'eau, ces polluants représentent un risque pour la santé des populations. De nombreuses études ont cherché à caractériser plus précisément les composantes des eaux des DRU et à mieux caractériser leurs impacts sur les milieux récepteurs (Gruber *et al.*, 2005; Passerat *et al.*, 2011; Sierra Legel, 2006; Walsh *et al.*, 2005). Les impacts suivants sont souvent mentionnés :

- a) diminution de la quantité d'oxygène disponible en raison de la biodégradation du surplus de matière organique apporté par les DRU ;
- b) augmentation de la turbidité, réduisant ainsi la photosynthèse de la production primaire ;
- c) augmentation de la concentration de polluants organiques ;
- d) augmentation de la concentration des métaux ;
- e) augmentation de la présence de microorganismes pathogènes (exemple : *E. Coli*) ;
- f) risque accru d'érosion des berges.

Ces conséquences physiques, biologiques ou chimiques peuvent entraîner des dommages significatifs aux écosystèmes en place, en plus de priver les citoyens d'un accès à des activités récréotouristiques associées à l'eau. À titre d'exemple, la plage de la baie de Beauport, localisée à l'est de la Ville de Québec, est souvent touchée par les débordements d'égouts, obligeant la Ville à interdire la baignade à ses citoyens. Pour contrer ce problème, la Ville de Québec prévoit aménager deux nouveaux bassins de rétention pour retenir les DRU et traiter les volumes retenus selon les normes, en fonction de la capacité de la station d'assainissement. Ce projet prendra encore plusieurs années avant d'être complété et impliquera d'importantes sommes d'argent (Parent, 2011).

## **2.3. Contexte législatif relatif aux DRU**

### **2.3.1. Objectifs environnementaux de rejet (OER)**

Les ouvrages de surverse qui libèrent l'excédent d'eau usée non traitée des réseaux sont assujettis à des exigences de rejets fixées par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) en fonction du milieu qui les reçoit. Les stations

d'assainissement sont donc tenues d'obtenir des certificats d'autorisation dans lesquels les objectifs de rejets (OER) sont définis, en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement du Québec (LQE). Les facteurs déterminants dans les calculs des OER sont les débits (capacité de dilution et débit d'étiage), la sensibilité du milieu récepteur, les usages du milieu, la technologie de traitement et le débit et la qualité des effluents (MDDEP, 2008).

### **2.3.2. Exigences de rejets (ER)**

Les exigences de rejets viennent préciser les limitations imposées à chaque ouvrage de surverse par rapport aux DRU, dans le but de respecter les OER qui leurs sont fixés. Les ER sont fixées par le MAMROT et se définissent, à toute fin pratique, en un nombre maximal de DRU permis par année, à chaque ODS. Il est donc important de mentionner qu'au final, l'atteinte ou non des exigences de rejets est évaluée en terme de fréquence des DRU, sans égard à la durée ou au volume déversé. Ainsi, que ce soit un DRU d'une heure ou de 10 heures consécutives, ce DRU est comptabilisé comme un événement ponctuel de DRU à ajouter au dossier du suivi de la performance de l'ouvrage de surverse.

### **2.3.3. Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales (SPGESM)**

En février 2009, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a adopté la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales (SPGESM) (MDDEP, 2012). Cette stratégie a pour but d'offrir une approche pour mieux gérer les rejets d'eaux usées pour l'ensemble des stations d'assainissement du Canada. Un des volets concerne spécifiquement la fréquence des DRU qui devra être plus sérieusement comptabilisée afin de répondre au nouveau règlement sur les effluents des systèmes d'assainissement des eaux usées. Une cote de risque serait assignée à chaque ODS, de même qu'à chaque DRU, afin de déterminer les endroits où un plan d'action de réduction des DRU serait requis (Environnement Canada, 2007). Au Québec, la consultation avec les municipalités se fait par l'entremise du Comité permanent de liaison environnement-municipalités (COPLEM) qui regroupe différents acteurs provenant de l'Union des municipalités du Québec (UMQ), de la Fédération Québécoise des Municipalités (FQM), du MAMROT et du MDDEP. La mission de ce comité est de procéder à l'analyse de la présente stratégie, afin que la Province de Québec puisse y adhérer graduellement.

## 2.4. Programme de suivi des ouvrages de surverse

Au Québec, le suivi des ouvrages de surverse est assuré par le MAMROT qui a développé un outil informatique, nommé SOMAE pour *Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux*. Le programme de suivi des ODS est indépendant du type de station d'assainissement, puisqu'il ne concerne que les points des réseaux d'égouts susceptibles de rejeter au milieu naturel des eaux usées non traitées. L'objectif principal du programme de suivi des ODS est de vérifier si les exigences de rejets établies pour chaque ouvrage sont respectées. Il doit également permettre de constater si les efforts minimaux d'exploitation de la station d'assainissement sont consentis en vue d'obtenir une performance satisfaisante des ODS et d'assurer leur pérennité.

En 2011, le programme de suivi comprenait 4 386 ODS, dont près de la moitié est munie d'enregistreurs de durée de DRU. Les ODS requièrent des visites quotidiennes ou hebdomadaires de la part des exploitants, afin de noter l'occurrence et la durée des DRU. Lors de sa visite, l'exploitant doit indiquer si le DRU a été causé par la pluie, la fonte de la neige, une urgence, est survenu par temps sec ou par autre circonstance. Ces observations sont transmises mensuellement au MAMROT via le logiciel en ligne SOMAE, qui permet d'évaluer si les exigences de rejets sont respectées.

En 2011, 33% des stations d'assainissement comptaient au moins un ODS qui ne respectait pas les exigences de rejets. Pour les ODS munis d'enregistreurs, 14 707 DRU causés par la pluie ont été recensés au cours de l'année, pour un total de près de 98 000 heures de DRU. Notons que le MAMROT indique qu'il y a une corrélation entre la fréquence des DRU et les conditions climatiques observées, dans les rapports annuels d'évaluations de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux. Par exemple, en 2009, seulement 12 886 DRU totalisant 72 980 heures de débordement ont été recensés. Le Centre de ressource en impact et adaptation au climat et à ses changements indiquait alors, qu'en général, les quantités de précipitation totales étaient près ou sous les normes saisonnières pour la majorité des régions du Québec en 2009, alors qu'elles étaient généralement au-dessus des normales en 2011 (Moreira, 2010).

# CHAPITRE 3 : REVUE DE LITTÉRATURE

## 3.1. Changements climatiques

Selon les recherches scientifiques, les changements climatiques seraient attribuables à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère causées par les activités humaines, notamment par l'utilisation des combustibles fossiles comme source d'énergie. Ces gaz, principalement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du méthane (CH<sub>4</sub>), agissent en emprisonnant l'énergie du rayonnement infrarouge émis par la Terre vers l'atmosphère (Raval et Ramanathan, 1989). Cela a pour conséquence de faire augmenter la température globale de la planète, influençant ainsi l'ensemble du climat terrestre (Houghton *et al.*, 2001).

Afin de mieux comprendre le phénomène des changements climatiques, l'Organisation des Nations Unies a formé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 1988. Le groupe a depuis produit de nombreux ouvrages de référence sur le sujet, dont un rapport sur les différents scénarios probables d'émissions de GES utilisés par l'ensemble des modèles climatiques (IPCC, 2000).

### 3.1.1. Modèles climatiques

#### 3.1.1.1. Modèles de circulation générale (MCG)

Les modèles de circulation générale (MCG) sont des modèles mathématiques qui sont basés, entre autres, sur des principes de thermodynamique et qui permettent de simuler les mouvements de circulation générale de l'atmosphère et des océans de la planète. Ces modèles utilisent des équations pour calculer les vents, le transfert de chaleur, la radiation, l'humidité relative et l'hydrologie au moyen d'un maillage en trois dimensions qui couvre l'ensemble de la planète. Les scientifiques utilisent donc ces modèles pour simuler l'ensemble du climat de la Terre avec une résolution spatiale de plusieurs centaines de kilomètres (Laprise, 2008).

La concentration de GES dans l'atmosphère influence le climat. En 1992, le GIEC a émis des scénarios d'émission de GES devant être utilisés par les MCG et ainsi développer des scénarios de changements climatiques (IPCC, 2000). Ces scénarios sont liés à différentes hypothèses déterminant les émissions de GES, comme la démographie, l'économie et les progrès

technologiques (Deniaux, 2009). Le scénario A1 suppose une faible croissance de la population mais un développement économique rapide reposant soit sur des énergies fossiles (A1F1), des énergies alternatives (A1T) ou un mélange des deux (A1B). Un second scénario (A2) met l'accent sur l'autosuffisance et la préservation des identités locales, se traduisant en une croissance constante de la population, une orientation régionale du développement et une utilisation modérée des technologies. Le troisième scénario (B1) représente un monde avec des changements rapides dans les structures économiques avec une importance diminuée des activités de production primaire et une utilisation accrue de technologies propres et efficaces. Finalement, le scénario B2 met l'accent sur des solutions locales pour la viabilité économique, sociale et environnementale et un progrès modéré dans les technologies dans un monde où la population mondiale augmente moins rapidement qu'avec le scénario A2 (Bloom et Hassenzahl, 2012).

### **3.1.1.2. Modèles régionaux du climat (MRC)**

Les modèles régionaux du climat sont développés pour simuler le climat à l'échelle régionale. Alors que les MCG permettent de faire des simulations à grande échelle pour l'ensemble de la planète, les MRC permettent d'atteindre des résolutions spatiales et temporelles beaucoup plus fines et peuvent ainsi servir à faire des projections climatiques régionales. Les MRC permettent ainsi de mieux simuler le cycle hydrologique dans le système climatique et d'assimiler avec davantage de précision les détails de la surface de la terre, comme les types de sol et les irrégularités topographiques (Laprise, 2008).

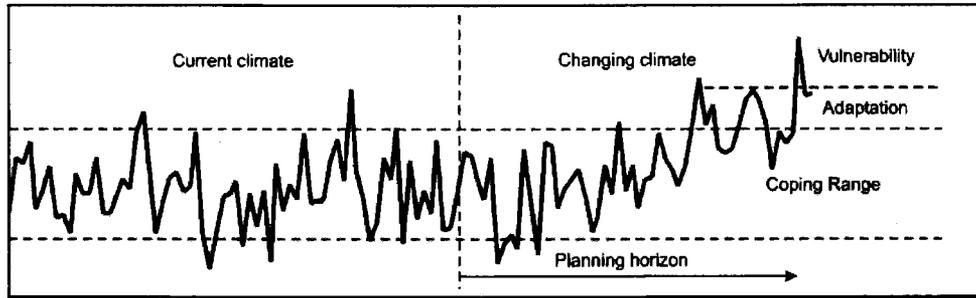
Les MCG jouent toutefois un rôle primordial dans le développement des MRC, car ils fournissent les conditions aux frontières du domaine simulé. On dit alors que le MRC est piloté par un MCG. Il existe plusieurs MCG et MRC chacun basé sur une représentation différente des processus en jeu. Par exemple, le Modèle régional canadien du climat (MRCC), piloté par le modèle couplé climatique global (CGCM), simule le climat suivant le scénario A2 avec une résolution spatiale de 45 km x 45 km sur le domaine nord-américain (CCmaC, 2010).

### **3.2. Impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau en milieu urbain**

De nombreux chercheurs ont étudié les changements climatiques selon différents scénarios d'émission de GES pour, entre autres, étudier les changements dans les régimes de précipitation. Ces chercheurs suggèrent que les précipitations extrêmes seront généralement plus intenses (Groisman *et al.*, 2005) et plus fréquentes (Easterling *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2007) d'ici la fin du siècle. À titre d'exemple, une étude sur le sujet conclut que les événements extrêmes habituellement caractérisés par une période de retour de 20 ans seront désormais associés à une période de retour de 10 ans en Amérique du Nord (Meehl *et al.*, 2000).

Les conclusions de ces recherches semblent également s'appliquer pour le Canada et le Québec. Mailhot *et al.* (2007) ont analysé les résultats des simulations MRCC pour la région du sud du Québec et les résultats de cette analyse suggèrent une augmentation significative des événements de pluie extrêmes dans le futur (2041-2070). De façon similaire, des analyses des résultats CGCM suggèrent que les périodes de retour des événements de pluie extrêmes seront diminuées par un facteur 2, d'ici la fin du siècle, pour plusieurs régions du Canada (Kharin et Zwiers, 2005; Mailhot *et al.*, 2010).

En réponse aux nombreuses études qui tendent à démontrer l'existence des changements climatiques et les conséquences qui en découlent, des questions ont été soulevées par rapport aux impacts qu'auront ces derniers sur les infrastructures urbaines. La Figure 3.1 présente un schéma exposant la marge de tolérance des infrastructures liées à la gestion de l'eau face aux fluctuations climatiques anticipées. Elle montre que, si historiquement les systèmes et infrastructures en place ont été conçus en fonction d'une certaine variabilité climatique, les changements climatiques risquent de nous entraîner dans des régimes climatiques inédits qui, à défaut de mettre diverses mesures d'adaptation en place, augmenteront sensiblement la vulnérabilité des systèmes en place. Que ce soit les routes, les ports, les bâtiments ou les réseaux d'aqueduc et d'égout, il est primordial pour les décideurs et les concepteurs de bien adapter ces infrastructures aux changements climatiques pour assurer la sécurité des populations.



**Figure 3.1 : Vulnérabilité des infrastructures de gestion de l'eau en milieu urbain en regard des changements climatiques (tiré de Rosenzweig *et al.*, 2007).**

Par exemple, les changements dans les régimes de précipitation pourraient inciter plusieurs municipalités à réviser leur plan de gestion des eaux de ruissellement en milieu urbain pour limiter les risques d'inondations et de débordements des réseaux d'égouts pluviaux ou unitaires. En effet, trois données météorologiques impliquées dans la conception de ces infrastructures, à savoir i) les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), ii) la distribution temporelle de la pluie, iii) la combinaison pluie-fonte, impliquent des données relatives à la pluie. Un changement dans les régimes hydrologiques devrait donc entraîner un changement dans les critères de conception de divers aménagements hydrauliques, dont les ouvrages de surverse qui évacuent les eaux excédentaires vers les milieux récepteurs (Watt *et al.*, 2003).

### **3.2.1. Étude des DRU par la modélisation des réseaux de drainage urbain**

Plusieurs municipalités ont rapporté que les DRU ont été plus fréquents et sévères depuis la dernière décennie (Nie *et al.*, 2009). Cette augmentation du nombre de DRU a attiré l'attention de plusieurs chercheurs qui tentent de confirmer le lien entre cette problématique et les changements climatiques. En 2003, Watt *et al.* (2003) ont publié un rapport dans lequel ils examinent la sensibilité des infrastructures de deux villes de l'Ontario face aux changements climatiques. En considérant une augmentation du volume de précipitations de 15%, ces auteurs suggèrent qu'il sera nécessaire d'améliorer ou d'adapter les infrastructures actuelles de drainage urbain avant la fin de leur vie utile puisqu'elles feront face à des événements de plus grande envergure que ce pour quoi elles ont été conçues. À titre indicatif, les résultats indiquent que le volume de ruissellement à stocker dans des bassins de rétention augmenterait de 20% avec un tel changement dans les régimes de précipitation d'ici la fin du siècle (Watt *et al.*, 2003).

D'autres études démontrent qu'il existe une forte relation non linéaire entre les précipitations et les débordements d'égouts. En Norvège, une augmentation de 20%, 30% et 50% des précipitations engendrerait une augmentation respective de 36%, 54% et 89% des DRU en terme de volumes déversés (Nie *et al.*, 2009). En Australie, une augmentation de 10% des précipitations annuelles amplifierait le ruissellement de surface de 20% à 30%, causant ainsi davantage de débordements d'égouts (Chiew *et al.*, 2011). En Italie, Andres-Domenech *et al.* (2012) suggèrent également une relation non linéaire entre les variations de la durée et de la hauteur des événements de pluie et le niveau d'utilisation des bassins de rétention en milieu urbain. Ils en viennent également à la conclusion que l'augmentation de la capacité de rétention de 50 m<sup>3</sup>/ha à 100 m<sup>3</sup>/ha ne suffirait pas pour réduire le nombre annuel de DRU, advenant une augmentation de 30% de la hauteur moyenne des événements de pluie.

En Suède, Semadeni-Davies *et al.* (2008) ont réalisé des études pour intégrer les changements technologiques, démographiques et d'occupation du sol aux scénarios du climat futur, afin d'évaluer de façon plus précise les impacts potentiels des changements climatiques et de l'urbanisation croissante sur les débits des réseaux d'égouts unitaires. Par des simulations utilisant le modèle MOdel for Urban SEwer (MOUSE), ils concluent que les deux facteurs d'aggravement des DRU, soit l'augmentation des intensités des précipitations et l'accroissement de la densité urbaine, seuls et combinés, provoquent une intensification de la fréquence des DRU. Ainsi, en augmentant la population de 48% et en considérant les précipitations d'un modèle climatique régional suédois (RCAO), les résultats suggèrent une augmentation de 318% du volume total de DRU.

Dans l'ensemble des études citées précédemment, les changements indiqués sont généralement calculés entre une période de contrôle présente et une période future s'approchant de la fin du siècle. Or, l'étude de Berggren *et al.* (2012) en Suède démontre que le nombre d'événements causant un surplus d'eau dans les réseaux de drainage urbain augmente de façon graduelle entre les périodes 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100, cette dernière période présentant des résultats toujours plus alarmants. Néanmoins, ce résultat suggère que l'impact des changements climatiques sur les DRU pourrait également se faire sentir dans un futur proche et non seulement vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

Plus localement, en Ontario, une équipe de chercheurs a évalué l'augmentation estimée du volume d'eau associé aux DRU, due aux changements climatiques, à partir du réseau d'égouts unitaires de la ville d'Ottawa qui a été modélisé avec le logiciel *Storm Water Management Model* (SWMM) de l'EPA (D'Aoust *et al.*, 2012). Pour former des événements de pluie, les auteurs ont sélectionné les 40 événements les plus extrêmes en termes de hauteur d'eau et d'intensité maximale à partir des données de précipitation des années comprises entre 1998 et 2009. Afin de tenir compte de l'effet de changements climatiques, ils ont majoré par un facteur de 15% les valeurs associées aux événements de pluie sélectionnés. Les résultats montrent que le nombre annuel moyen de DRU, selon ce scénario, passe de 1,42 à 1,75, soit une augmentation de 25%.

### **3.2.2. Étude des DRU par l'analyse de la pluviométrie**

L'étude de la fréquence des DRU ne requiert pas nécessairement l'utilisation d'un logiciel de modélisation d'un système de gestion des eaux de ruissellement tel que SWMM ou MOUSE. En effet, il est également possible d'estimer l'évolution future des DRU en analysant de façon détaillée la pluviométrie présente et future, et ce, sans l'emploi d'observations directes de DRU.

À titre d'exemple, pour les régions des Grands Lacs et de la Nouvelle-Angleterre aux États-Unis, une étude visant à connaître l'impact des changements climatiques sur les DRU a permis de conclure que la fréquence des DRU en climat futur diminuera (Furrow *et al.*, 2007). Se basant sur un critère de quatre DRU permis par année, ces auteurs ont déterminé un seuil de pluie à partir duquel il y a occurrence d'un DRU, en ordonnant les valeurs de hauteurs de pluie journalière par importance, et ce, à partir de 40 ans de données historiques. Le 160<sup>e</sup> (4 DRU permis/année x 40 ans) total de pluie journalière correspondait donc au seuil recherché, faisant l'hypothèse que les quatre plus grands totaux journaliers de pluie d'une année causaient un DRU. Ainsi, le nombre de fois où les précipitations journalières simulées en climat futur dépassaient ce seuil était comptabilisé et considéré comme provoquant un DRU. Les projections climatiques utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de deux modèles de circulation générale, soit le *Hadley Center Model* (HadCM) et le *Canadian Climate Center Model* (CCCma). Pour la région des Grands Lacs et la région de la Nouvelle-Angleterre aux États-Unis, les résultats suggèrent, dépendamment du modèle climatique utilisé et de la région, un changement moyen de la fréquence annuelle des DRU variant entre - 10,4% et + 49,9% d'ici l'horizon 2025 - 2050 par rapport à l'horizon 1954 - 1993.

À Chicago, dans la région des Grands Lacs, une autre étude basée sur deux modèles régionaux du climat, soit le *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) Model* et le *Parallel Climate Model (PCM)*, prévoit une augmentation de la fréquence des DRU allant de + 50% à + 120% d'ici la fin du siècle, en considérant comme hypothèse qu'un DRU survient lorsque la pluie totale journalière dépasse le seuil de 64 mm pour le réseau de drainage de la ville (Patz *et al.*, 2008). Cela se traduit par le passage d'une occurrence d'un DRU à tous les deux ans dans le passé récent à un DRU par année avec un scénario de faible émission de GES et 1,2 DRU par année avec un scénario d'émission élevée de GES.

La revue de littérature suggère une tendance presque unanime en faveur d'une augmentation de la fréquence d'occurrence des DRU en climat futur, mais avec des écarts importants dans les pourcentages relatifs (8,8% à 120%), tel que présenté précédemment. Les nombreuses incertitudes liées à l'utilisation des modèles climatiques, aux fluctuations internes du climat et aux développements des méthodologies pour l'estimation des DRU expliquent ces écarts.

### **3.2.3. Suivi des DRU à partir de données observées**

Alors que dans la littérature l'estimation des DRU repose généralement sur différents modèles hydrologiques et hydrauliques, ou encore simplement sur l'analyse de la pluviométrie, peu d'études sont basées sur des données observées de DRU. Dans les faits, les programmes de suivi et de collecte de données relatives aux DRU ont seulement été mis en place récemment et incidemment, les bases de données disponibles sont plutôt limitées et ne suffisent pas à bien comprendre le comportement des DRU, afin d'établir des mesures de contrôles efficaces (Sonnenberg *et al.*, 2011). De plus, puisque la plupart des ouvrages de surverse sont localisés dans des endroits hostiles et difficilement accessibles, la mise en place d'instruments de mesures des DRU en temps réel reste un défi. Des bris et des déplacements de ces instruments étant probables, un système de détection des défaillances doit être installé (Stoianov *et al.*, 2007).

Malgré la rareté à l'échelle mondiale de bases de données sur la fréquence, la durée et les volumes de DRU, une équipe de chercheurs a mis au point une méthode qui met l'accent sur les données de DRU et de pluviométrie pour évaluer l'efficacité de certaines mesures de contrôle en Allemagne (Schroeder *et al.*, 2011). À partir de données opérationnelles de DRU et de pluviométrie sur une période de deux ans, ils proposent une méthode axée sur l'identification

d'une hauteur critique de pluie à partir de laquelle un événement de DRU a une forte probabilité de se produire. La méthode permet donc de déterminer un seuil de hauteur de pluie propre à chaque ODS, à partir de données observées de DRU. Cette méthodologie sera expliquée plus en détails dans les chapitres suivants, puisqu'elle est utilisée dans le cadre du présent projet.

## CHAPITRE 4 : DONNÉES DISPONIBLES

Afin d'établir des relations entre les caractéristiques des pluies et les DRU correspondants pour différents ODS répartis au Québec, un nombre significatif de données observées de DRU doivent être traitées et analysées adéquatement. Ce projet repose ainsi sur l'analyse de deux grandes séries de données distinctes, soit des données pluviométriques issues de stations météorologiques et des données sur les DRU observés à différents ODS. Ces dernières sont analysées pour la période allant inclusivement de 2007 à 2009, pour les mois de mai à octobre inclusivement.

### 4.1. Données pluviométriques

#### 4.1.1. Données pluviométriques du MDDEP

Les données de précipitations sont issues du programme de surveillance du climat du MDDEP qui s'appuie sur un vaste réseau de stations où sont mesurées différentes variables, dont les précipitations sous forme de pluie à une fréquence horaire. Ces données sont généralement recueillies à partir de pluviomètres à pesée qui ont l'avantage de fournir des données à une petite résolution temporelle (p. ex. aux 5 minutes) (CSA, 2012). La Figure 4.1 présente une carte localisant les différentes stations météorologiques pour lesquelles des données pluviométriques horaires sont disponibles. Il y a au total plus de 261 stations qui sont ou ont déjà été en fonction depuis les années 60. Notons par contre qu'un grand nombre de ces stations ne sont plus en fonction depuis les années 90, limitant ainsi la disponibilité de séries temporelles de précipitation à long terme.

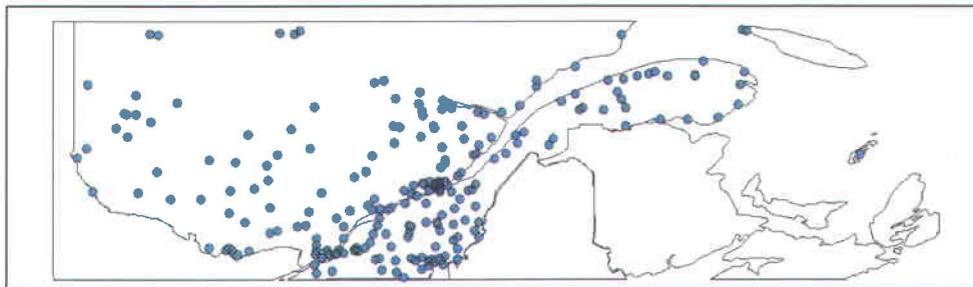


Figure 4.1 : Localisation des stations météorologiques du MDDEP avec des données pluviométriques horaires disponibles pour le sud du Québec.

Les bases de données utilisées pour ce projet comprennent, entre autres, la date, l'heure et le nombre de millimètres de pluie enregistrés à chaque station météorologique pour un nombre d'années variable entre 1960 et 2009.

## **4.2. Données sur les DRU**

### **4.2.1. Description de la base de données du MAMROT**

Les données de DRU proviennent du MAMROT qui s'occupe d'effectuer un suivi détaillé de chacune des stations d'assainissement du Québec, par l'entremise de l'outil SOMAE. Les données utilisées pour le projet regroupent le nom de l'ouvrage de surverse, la date et la durée d'un DRU, en heure. Ces données sont journalières, c'est-à-dire qu'on ne peut connaître le moment de la journée pendant lequel le DRU a eu lieu.

Il existe en effet sur le marché des appareils pouvant enregistrer la durée de chaque DRU, et ce, à faible coût. Installé au niveau d'un trop-plein, l'appareil est activé automatiquement lorsque le niveau d'eau atteint le niveau du radier de la conduite de trop-plein, comptabilisant ainsi la durée du DRU. Au Québec, des enregistreurs sont exigés pour les ouvrages principaux de chaque station ou lorsque des conditions environnementales particulières de rejets demandent un suivi plus serré (Moreira, 2010).

La base de données fournie par le MAMROT contient les informations provenant de 25 stations d'assainissement situées à différents endroits du Québec, pour un total de 173 ODS et près de 9 000 DRU signalés entre 2007 et 2009. Ces stations d'assainissement ont été préalablement sélectionnées en raison de leur proximité avec une station météorologique et de l'occurrence de DRU à l'endroit d'un ou plusieurs ODS. Notons que pour la plupart des stations d'assainissement, la compilation des données de DRU a débuté en 2007 seulement. Les types de DRU sont regroupés en cinq catégories : 1) causé par la pluie; 2) causé par la fonte des neiges; 3) survenant en situation d'urgence; 4) survenant en temps sec et 5) autre. Les DRU causés par la pluie constituent 56% du nombre total des DRU répertoriés en 2009 et sont les seuls considérés dans le cadre de ce projet.

Les ODS peuvent consister en un trop-plein associé à un poste de pompage (PP), un régulateur de débit (REG), un déversoir d'orage (DEV) ou finalement en un trop-plein situé à l'entrée de la station d'assainissement (TP) (MAMROT, 2000).

#### **4.2.2. Sélection des stations d'assainissement étudiées**

Un tri a été effectué à partir de la base de données afin de ne retenir que les stations répondant aux critères suivants :

- Distance avec une station météorologique : < 20 km
- Nombre minimal annuel de DRU pour au moins 1 ODS de la station : 20
- Population considérée lors de la conception de la station d'assainissement : > 2 000 habitants
- Années avec données : 2007 à 2009 inclusivement
- Mois avec données : mai à octobre inclusivement
- Type de DRU : causé par la pluie

Ainsi, chaque mention subséquente des DRU comprend implicitement des DRU causés par la pluie et survenus durant la période entre mai et octobre de 2007 à 2009.

#### **4.2.3. Choix des ODS pour chacune des stations d'assainissement sélectionnées**

Suite au tri des stations d'assainissement, un second tri est nécessaire pour conserver de façon individuelle les ODS qui sont utilisés pour les analyses subséquentes. D'abord, un nombre minimal de DRU doit avoir été enregistré car on ne peut pas étudier les DRU d'un ouvrage de surverse qui ne déborde jamais. Ensuite, il faut vérifier la qualité des données. Effectivement, le MAMROT ne procède pas à un contrôle de qualité des données saisies dans SOMAE, ce qui demande une certaine vigilance de la part de l'utilisateur désirant utiliser ces données.

Par exemple, pour certaines stations, les DRU survenus pendant une fin de semaine ne sont saisis que le lundi matin suivant. Dans d'autres cas, il semble que les DRU soient compilés sur une base hebdomadaire plutôt que journalière, ce qui rend difficile les associations DRU-pluie. Pour ces raisons, les formulaires de saisie du logiciel SOMAE ont été vérifiés pour chaque ODS, de manière à ne sélectionner que ceux qui répondent à certains critères précis.

Tous les ODS présentant au moins l'une des caractéristiques suivantes ont été éliminés :

- Absence d'instrument qui enregistre la durée des DRU
- Enregistrement des DRU avec durée indéfinie («NULL»)
- Saisie hebdomadaire des données
- Appareil d'enregistrement défectueux plusieurs fois par année
- Fréquence des DRU < 20 fois par année

#### 4.2.4. Sélection finale de 30 ouvrages de surverse

Le Tableau 4.1 regroupe l'ensemble des ODS qui ont été sélectionnés, au nombre total de 30, répartis dans 16 municipalités. Leur localisation géographique est illustrée à la Figure 4.2.



Figure 4.2 : Localisation des ODS sélectionnés au sud du Québec. La couleur des points représente le nombre d'ODS sélectionnés situés dans la même localité.

Les ODS sont principalement répartis dans la partie sud du Québec, avec quelques exceptions comme La Tuque, Saguenay et Rimouski qui sont au nord du 47<sup>e</sup> parallèle.

Le Tableau 4.2 présente la liste des stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS pour lesquelles les données de précipitation horaire entre 2007 et 2009 ont été utilisées dans ce projet.

Tableau 4.1 : Ouvrages de surverse (ODS) sélectionnés avec le nombre de DRU enregistrés de mai à octobre entre 2007 et 2009 inclusivement, le numéro et la distance de la station météorologique associée. Les types d'ODS sont expliqués à la Section 4.2.1.

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

**Tableau 4.2 : Nom, numéro, position et période couverte pour chacune des stations météorologiques situées à proximité de chaque ODS étudié.**

#	Nom de l'ODS	Station météorologique associée à l'ODS		Latitude	Longitude	Période couverte
		Nom	Numéro			
1	ENTRÉE DE LA STATION	THETFORD MINES	7028441	46,10	-71,35	1967-2009
2	No 04 LAVIOLETTE	LA TUQUE	7074240	47,40	-72,78	1967-2009
3	No 02 BOSTONNAIS	LA TUQUE	7074240	47,40	-72,78	1967-2009
4	No 05 LAEROPORT	LA TUQUE	7074240	47,40	-72,78	1967-2009
5	PRINCIPAL	TROIS RIVIERES AQUEDUC	701HE63	46,38	-72,62	1974-2009
6	LAURENT	GRANBY	7022800	45,38	-72,72	1968-2009
7	RUTHERFORD	GRANBY	7022800	45,38	-72,72	1968-2009
8	ST-URBAIN	GRANBY	7022800	45,38	-72,72	1968-2009
9	PRINCIPAL (O)	OKA	7015730	45,50	-74,07	1966-2009
10	OUIMET (TP POMPÉ)	OKA	7015730	45,50	-74,07	1966-2009
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	VALLEYFIELD	7028680	45,28	-74,10	1986-2009
12	STATION (amont prétraitement)	FAUSTIN	7032362	46,03	-74,48	1990-2010
13	P-17	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
14	OZANNE	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
15	P-14 (MONT-FORTIN)	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
16	MGR BÉGIN	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
17	P-12 (STE-FAMILLE)	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
18	SAINT-HUBERT	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
19	ANGERS	JONQUIERE	7063370	48,40	-71,10	1995-2011
20	No 02 (TP POMPÉ)	OKA	7015730	45,50	-74,07	1966-2009
21	No 01 (TP POMPÉ)	OKA	7015730	45,50	-74,07	1966-2009
22	1 (POMPÉ)	OKA	7015730	45,50	-74,07	1966-2009
23	MALTAIS	SAWYERVILLE NORD	7027802	45,37	-71,53	1965-2009
24	ENTRÉE MUNICIPALE	JOLIETTE VILLE	7013362	46,02	-73,43	1967-2009
25	LIPPÉE (amont)	VALLEYFIELD	7028680	45,28	-74,10	1986-2009
26	BLANCHARD (2e amont)	VALLEYFIELD	7028680	45,28	-74,10	1986-2009
27	SAUVÉ (POMPÉ)	VALLEYFIELD	7028680	45,28	-74,10	1986-2009
28	STATION DÉPURATION	TINGWICK	7028502	45,91	-71,95	1990-2010
29	ENTRÉE USINE	SAINT-SIMON	7027736	45,72	-72,84	1990-2010
30	No 8 (JULIEN REHEL)	RIMOUSKI	7056480	48,45	-68,52	1964-2009

# CHAPITRE 5 : CARACTÉRISTIQUES DES ÉVÉNEMENTS DE PLUIE ET PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES DRU

## 5.1. Découpage des événements de pluie

Travailler avec des données de pluie horaires présente un avantage par rapport à des données enregistrées sur une base journalière. Le découpage en événements de pluie à partir des séries horaires permet de faire la différence, dans une certaine mesure, entre un orage de courte durée et de forte intensité et une pluie fine s'étalant sur plusieurs heures, une information impossible à obtenir à partir de données journalières. De plus, un événement de pluie isolé débutant à 23h00 et se terminant à 2h00 serait considéré comme deux événements distincts en travaillant avec des séries journalières, ce qui n'est pas souhaitable dans le cadre de ce projet.

Un événement de pluie est défini comme étant une période pluvieuse bornée par deux périodes de temps sec d'une durée minimale prédéterminée, cette période de temps sec inter-événement s'avérant être le critère de base pour définir des événements de pluie. Une heure est considérée humide s'il tombe plus de 0,2 mm de pluie pendant cette heure; autrement, elle est assimilée à une période de temps sec. Il est à noter que, dans la littérature, nombreuses sont les études qui ne mentionnent pas le critère du temps sec utilisé dans la formation des événements de pluie. Or, une étude réalisée sur le sujet a démontré très clairement l'importance du choix de ce critère en fonction des objectifs du projet, en raison de son impact sur les caractéristiques de pluie (Dunkerley, 2008). Effectivement, choisir un temps sec plus long entraînerait la formation d'événements de pluie d'une hauteur et durée totale plus grande mais d'une intensité plus faible.

Pour réaliser leurs travaux en lien avec les DRU, une équipe de chercheurs allemands utilise un critère de séparation d'un minimum de 6 h de temps sec pour séparer les événements (Schroeder *et al.*, 2011). Ces auteurs justifient ce choix par le fait que cette durée correspond au temps moyen nécessaire aux réseaux d'égouts et des bassins d'orage pour se vider complètement après une utilisation maximale de leur capacité de stockage. Il est à noter que ce critère s'applique pour les configurations des réseaux de Berlin. À Ottawa et en Espagne, il est suggéré d'utiliser un temps sec de 12 h correspondant ainsi à la période moyenne de vidange

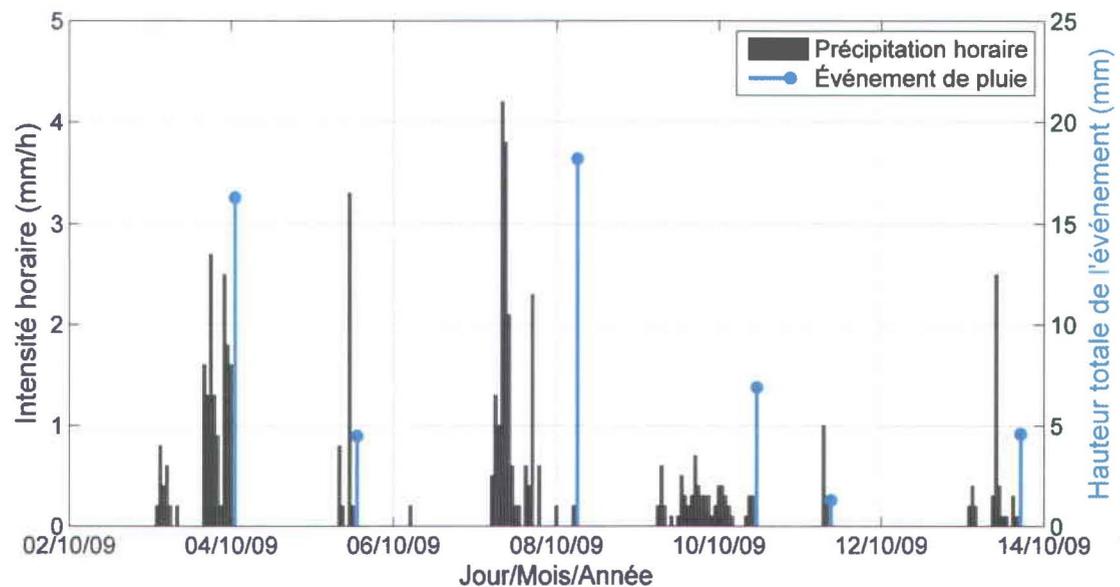
des réseaux d'égouts et des bassins d'orage (Bracken *et al.*, 2008 ; D'Aoust *et al.*, 2012). À la lumière des informations présentes dans la littérature relative au domaine de l'hydrologie, le critère du temps sec inter-événement varie généralement entre 1 h et 24 h (Dunkerley, 2008).

Au Québec, même le MDDEP évoque la difficulté de sélectionner un temps sec inter-événement universel et représentatif des configurations des réseaux d'égout du Québec (MDDEP & MAMROT, 2010). Le Ministère note toutefois qu'une durée de 6 h est généralement suffisante pour distinguer deux systèmes météorologiques, mais soutient qu'un temps sec plus long est souhaitable pour les applications en lien avec le drainage des eaux en milieux urbains.

Au terme d'une réflexion basée sur ces éléments, un temps sec de 12 h est utilisé pour séparer deux événements de pluie pour les fins de ce projet. Ce choix repose sur le fait que les données de DRU sont notées sur une base journalière, ce qui compliquerait l'association d'un DRU à un événement de pluie précis s'il y avait plusieurs petites pluies dans une même journée. À l'inverse, un temps sec plus grand aurait le désavantage d'augmenter la durée des événements de pluie sur parfois plusieurs journées, rendant également plus difficile l'association DRU-pluie. Ainsi, il a été convenu qu'un temps sec de 12 h offre le meilleur compromis pour les fins de ce projet.

Seuls les événements pluvieux ayant une hauteur totale plus grande que 0,5 mm sont retenus et ainsi susceptibles d'être associés à un DRU. Ce choix se justifie par le fait que les événements dont le cumul est de moins de 0,5 mm sont peu susceptibles de générer des DRU. Notons que lorsque certaines données sont manquantes, elles sont assimilées à une période sans pluie.

La Figure 5.1 présente un exemple de la méthodologie appliquée pour la construction des événements de pluie à partir d'un hyétogramme représentant l'intensité horaire des précipitations sur l'axe vertical de gauche. Chaque événement de pluie est identifié par une ligne bleue située à la fin de la pluie et sa hauteur est proportionnelle au total de pluie indiqué sur l'axe de droite. Les événements de pluie sont formés à partir des données pluviométriques horaires pour chaque station météorologique sélectionnée, entre les années 2007 et 2009.



**Figure 5.1 : Exemple de construction d'événements de pluie à partir des précipitations horaires en mm/h. Les données sont tirées de la station de Thetford Mines (no 7028441) entre le 2 octobre et le 14 octobre 2009.**

Chaque événement de pluie peut être décrit par un ensemble de caractéristiques. Ainsi, pour associer un DRU à un événement de pluie, six caractéristiques de pluie peuvent être considérées. Ces caractéristiques sont présentées au Tableau 5.1.

**Tableau 5.1 : Caractéristiques des événements de pluie considérées dans l'association DRU - pluie**

#	Caractéristique des événements de pluie	Unité
1	Hauteur de pluie	mm
2	Durée de l'événement de pluie	h
3	Intensité moyenne	mm/h
4	Intensité maximale	mm/h
5	Durée où l'intensité > 2 mm/h	h
6	Durée du temps sec antérieur	h

Notons que l'intensité maximale est évaluée à partir d'une durée d'une heure. Toutes les mentions subséquentes de la caractéristique intensité maximale équivalent à l'intensité horaire maximale.

## **5.2. Association DRU - pluie**

La section suivante décrit la méthodologie qui permet de lier un DRU à la pluie la plus susceptible de l'avoir causé. L'association s'appuie sur l'hypothèse de base suivant laquelle chaque DRU enregistré est provoqué par un événement de pluie survenu sur le territoire drainé par l'ODS. Les deux bases de données distinctes, soit celle regroupant les données pluviométriques et celle regroupant les DRU, ont comme point commun la date de chaque événement (pluie ou DRU). Les événements de pluie peuvent alors être associés, ou non, à un DRU. Ce travail d'association exige un traitement minutieux.

### **5.2.1. Algorithme d'association DRU- pluie**

Pour pallier le manque d'informations quant à l'heure de l'occurrence des DRU, nous supposons que, par commodité, les DRU surviennent à midi, de sorte qu'un temps d'occurrence lui soit associé. Ils sont ensuite associés à un événement de pluie par une équation pondérée qui tient compte du temps séparant le DRU et la fin de la pluie ainsi que de la hauteur de pluie. Le fait d'associer simplement le DRU à la pluie la plus rapprochée occasionne parfois des erreurs d'association évidentes qui sont évitables en ajoutant une composante de hauteur de pluie à l'algorithme, de même qu'en considérant jusqu'à deux événements de pluie précédant le DRU et jusqu'à deux événements suivant le DRU compris dans un intervalle de 48 heures autour de l'heure d'occurrence du DRU. Les DRU sont donc associés à un événement de pluie précis selon l'Équation (5.1) schématisée à la Figure 5.2. De cette façon, on favorise les événements de pluie générant les plus fortes hauteurs de pluie pour lesquels le temps écoulé entre le début de l'événement et le temps d'occurrence du DRU est le plus court.

$$S_{p,d} = J_{\max} \left[ \left( 1 - \frac{(|t_d - t_p|)}{J_{\max}} \right) P + \left( \frac{H_p}{H_{\max}} \right) (1 - P) \right] \quad (5.1)$$

où

$S_{p,d}$  = Pointage de la pluie  $p$  pour un DRU  $d$

$J_{\max}$  = Durée maximale entre un DRU  $d$  et un événement  $p$  (jour)

$t_d$  = Temps d'occurrence d'un DRU  $d$

$t_p$  = Temps à la fin de l'événement de pluie  $p$

$H_p$  = Hauteur de la pluie  $p$  (mm)

$H_{\max}$  = Hauteur maximale d'un événement  $p$  de la série (mm)

$P$  = Constante de pondération

Chacune des variables de l'Équation 5.1 est décrite plus en détails aux paragraphes suivants.

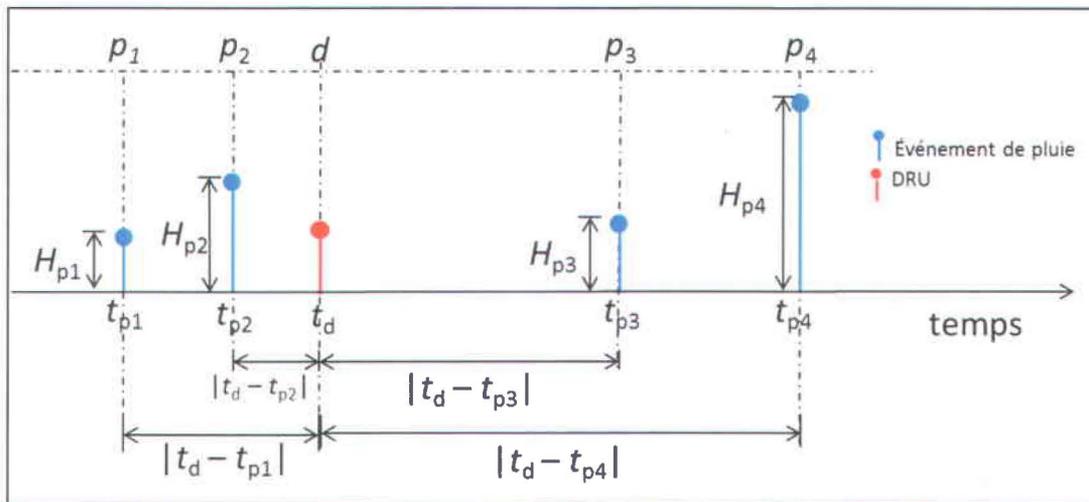


Figure 5.2 : Schématisation d'un DRU et des quatre événements de pluie pour lesquels un pointage est calculé à partir de l'Équation 5.1. Dans ce cas précis, le DRU serait associé à l'événement  $p_2$ .

$S_{p,d}$  : Pointage associé à l'événement de pluie  $p$  pour un DRU  $d$  :

Pour chaque DRU  $d$ , jusqu'à deux événements de pluie le précédant ainsi que jusqu'à deux événements de pluie le suivant sont évalués et positionnés selon leur probabilité d'avoir causé le DRU à l'aide d'un système de pointage. Le DRU est donc associé à la pluie qui génère le plus grand pointage à l'Équation (5.1).

$t_d$  : Temps d'occurrence du DRU :

L'heure du DRU est rapportée à 12h00 de la journée où le DRU est saisi.

$J_{\max}$  : Durée maximale de temps écoulé entre un DRU et la fin d'un événement de pluie susceptible de lui être associé :

Il a été fixé à 48 h, soit deux jours. Cette durée maximale est justifiable par le fait qu'il peut exister un délai entre la fin de la pluie et le DRU notamment parce que le moment précis d'occurrence du DRU est inconnu et qu'il peut y avoir un délai entre l'occurrence et la saisie du DRU dans l'outil SOMAE (p. ex. l'opérateur visite le site de l'ODS deux jours après l'occurrence du DRU et associe ce dernier au jour antérieur alors que le DRU a très bien pu survenir deux jours avant). Dans d'autres cas, les événements de pluie peuvent parfois s'étirer sur plusieurs jours s'il n'y a pas de répit de plus de 12 h, alors que des DRU surviennent bien avant la fin de la pluie. Ainsi, un DRU saisi à un moment donné et pour lequel aucun événement de pluie ne se termine dans la fenêtre des 48 h antérieure et postérieure à la date où le DRU est enregistré est alors considéré comme étant un *DRU non associé*.

$H_{\max}$  : Hauteur maximale d'un événement de pluie parmi tous les événements de pluie enregistrés entre 2007 et 2009 :

Cette variable sert à relativiser la hauteur des événements de pluie d'une station météorologique à l'autre.

$P$  : Constante de pondération pour les facteurs associés au temps (terme de gauche) et à la hauteur de pluie (terme de droite) :

Une valeur de 0,5 a été utilisée pour tous les cas présentés dans ce projet. Pour des études subséquentes, il serait possible de changer cette valeur et ainsi accorder une plus grande importance à l'un de ces facteurs si cela améliore la qualité des associations.

En résumé, cet algorithme permet d'associer un DRU à la pluie la plus susceptible de l'avoir causé en considérant les deux pluies précédentes et les deux suivantes, à l'intérieur d'une période donnée maximale  $J_{\max}$ . L'algorithme donne un «pointage» pour chaque événement de pluie en fonction du laps de temps séparant le DRU avec l'événement de pluie et de la hauteur totale de pluie tombée, l'événement générant le plus grand cumul de pluie étant favorisé.

L'événement de pluie ayant le meilleur pointage se verra associer le DRU en question. Notons que si deux DRU distincts sont causés par la même pluie, leur durée est cumulée pour ne former qu'un débordement plus long. Cette situation arrive parfois, par exemple, lorsqu'un événement de pluie couvre plus de 24 h, pouvant donc causer deux journées saisies avec un DRU.

Tel que mentionné précédemment, l'association des DRU à un événement de pluie à partir de deux bases de données s'avère un exercice compliqué qui peut difficilement s'automatiser. Les lacunes notées au niveau des bases de données et les nombreuses incertitudes influençant les relations DRU - pluie rendent nécessaire une vérification sommaire des résultats d'association pour chaque ODS. Bien que 93% des associations faites par l'algorithme semblent justes et logiques, quelques ajustements manuels sont parfois nécessaires. En Annexe A se trouve la méthodologie pour les corrections manuelles des associations DRU - pluie.

### **5.2.2. DRU ignoré et DRU non associé**

Un DRU pour lequel aucune pluie n'a été répertoriée dans un délai de  $\pm 48$  heures n'est donc pas associé à un événement en vertu des critères de l'algorithme. Ces situations s'expliquent souvent par la présence d'une interruption dans les données pluviométriques pour une période limitée, généralement causée par une défectuosité ou un entretien de l'instrument. Le cas échéant, le DRU est alors ignoré. Dans les cas où aucun signe indiquant une défectuosité n'est mentionné, le DRU est alors comptabilisé comme étant un *DRU non associé*. Cette situation représente seulement 2,5% du total des DRU pouvant être associés pour l'ensemble des 30 ODS (Annexe B). Notons que ces DRU ne sont pas considérés dans les analyses subséquentes.

### **5.2.3. Représentation schématisée des associations**

À titre d'exemple, la Figure 5.3 permet de mieux visualiser l'association des DRU à un événement de pluie. Les colonnes bleues associées à l'axe des ordonnées de gauche représentent la hauteur de pluie de chaque événement. Les colonnes rouges illustrent l'occurrence d'un DRU et leur durée est proportionnelle à la durée du DRU, sur l'axe des ordonnées situé à la droite du graphique.

La Figure 5.3a illustre la répartition dans le temps des événements de pluie et des DRU pour une période de 3 mois. Sur la Figure 5.3b chaque DRU a été associé à l'événement de pluie le plus susceptible de l'avoir causé. Notons que l'importante pluie de 55 mm en date du 28 septembre 2009 est la cause de deux DRU journaliers. La durée totale de ces DRU est donc additionnée, devenant un seul DRU associé à cet important événement pluvieux. De plus, il est possible d'observer, d'un premier coup d'œil, que la durée des DRU n'est pas automatiquement proportionnelle à la hauteur de pluie puisque, par exemple, un événement d'une hauteur donnée engendrera un DRU alors que ce ne sera pas le cas pour un autre événement de pluie d'une hauteur similaire.

Les résultats obtenus à partir de cette première étape consistent donc en un ensemble de données de DRU associé à un événement de pluie et ses six caractéristiques (Tableau 5.1). C'est à partir de cet ensemble de données qu'une relation est établie et utilisée pour les analyses subséquentes. En Annexe B se trouvent, pour chaque ODS, le nombre total d'événements de pluie, le nombre d'événements associés à un DRU de même que le nombre de *DRU non associés*.

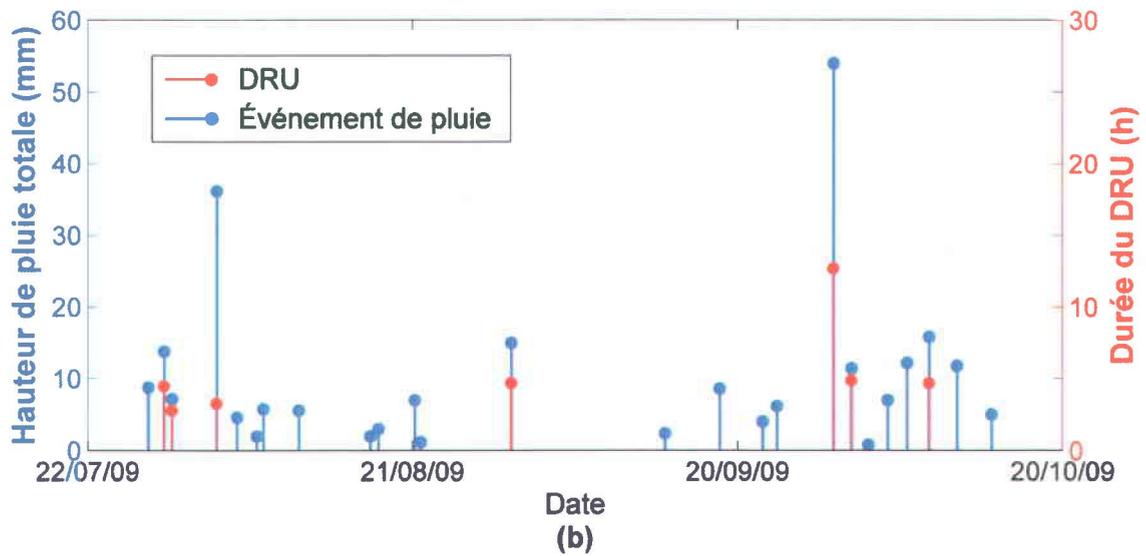
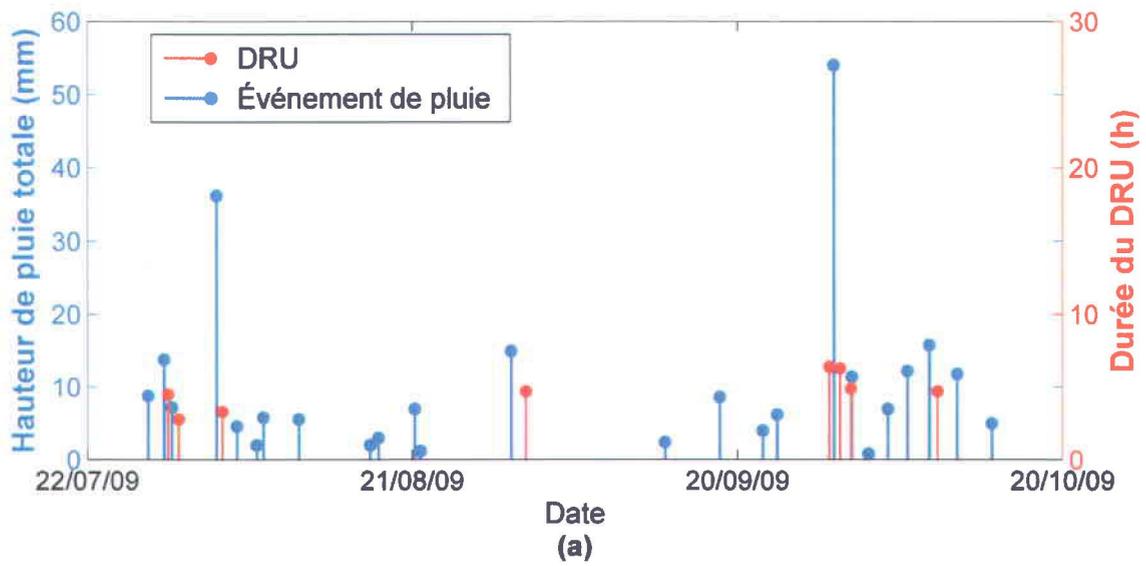


Figure 5.3 : Exemple de l'application de l'algorithme pour l'association DRU – pluie sur une période de 3 mois : a) DRU et événement de pluie positionnés dans le temps avant l'association ; b) DRU associés à l'événement de pluie le plus susceptible de les avoir causés. La longueur des segments est proportionnelle à l'importance des événements.

### 5.3. Détermination de la hauteur critique

#### 5.3.1. Modèle conceptuel idéal de la hauteur critique

Un modèle conceptuel simple de l'occurrence d'un DRU pouvant être défini consiste à postuler l'existence d'une hauteur de pluie critique à partir de laquelle la capacité limite d'un réseau d'égouts unitaires ou de la station d'assainissement est atteinte, résultant en un ou des DRU à l'endroit des ODS. Ce phénomène est schématisé à la Figure 5.4.

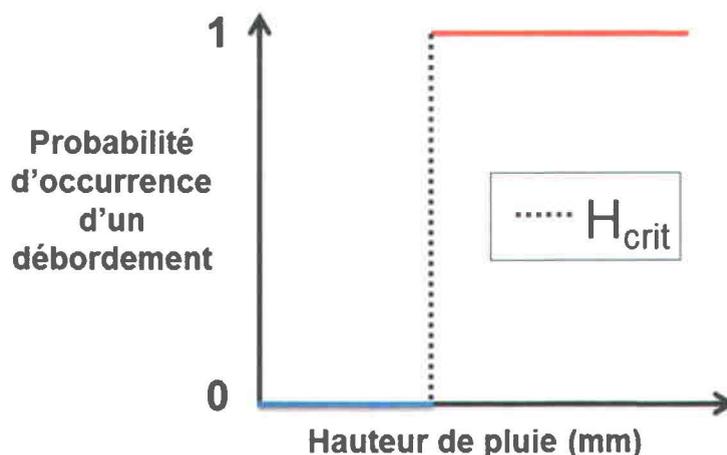


Figure 5.4 : Modèle conceptuel de la hauteur critique.

Une analyse préliminaire des événements de pluie causant les DRU permet cependant de voir qu'il n'existe pas de seuil fixe de hauteur de pluie au-delà duquel il y a nécessairement un DRU et à l'inverse, une absence de DRU en deçà de la valeur du seuil. Par exemple, pour deux pluies semblables de 10 mm, l'une causera un DRU et l'autre non. Ce comportement s'explique par de nombreux facteurs (p. ex. distributions spatiales des pluies, état initial du réseau) et incertitudes jouant un rôle dans la probabilité d'occurrence du DRU. Il est de fait simpliste de penser que la seule donnée d'une hauteur de pluie puisse permettre de déterminer s'il y a DRU ou non.

Dans la littérature, nombreuses sont les études qui utilisent la méthode de la hauteur critique pour déterminer l'occurrence ou non d'un DRU à partir d'une série d'événements de pluie observés ou simulés (Furrow *et al.*, 2007; Patz *et al.*, 2008; Riechel *et al.*, 2010). À partir de données opérationnelles de DRU observés sur le terrain, Schroeder *et al.* (2011) ont développé

une technique permettant de déterminer la hauteur de pluie qui se rapproche le plus de la hauteur critique conceptuelle propre à chaque ouvrage de surverse.

### 5.3.2. Méthodologie pour déterminer la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011)

Chaque point de la Figure 5.5 représente, à titre d'exemple, la hauteur de pluie totale associée à un événement de pluie survenu entre 2007 et 2009 pour l'ODS situé à Trois-Rivières. Les points rouges représentent les pluies ayant généré un DRU alors que les événements n'ayant pas causé de DRU sont en bleu. On remarque que les pluies ne causant pas de DRU (points bleus) sont majoritairement concentrées entre 0,5 mm et 10 mm de hauteur d'eau sur l'axe des abscisses, alors que les DRU surviennent lorsque les hauteurs de pluie sont davantage au-delà de 10 mm. Ce seuil estimé de façon visuelle est déterminé plus précisément à l'aide de courbes représentant la répartition des différents événements.

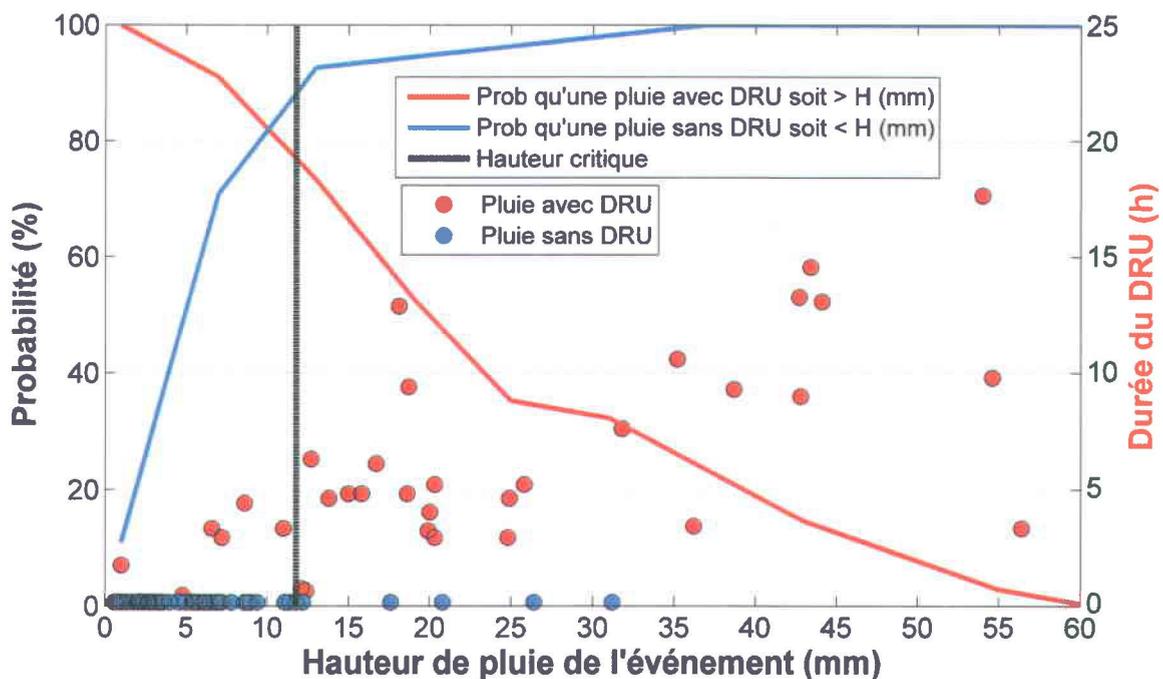
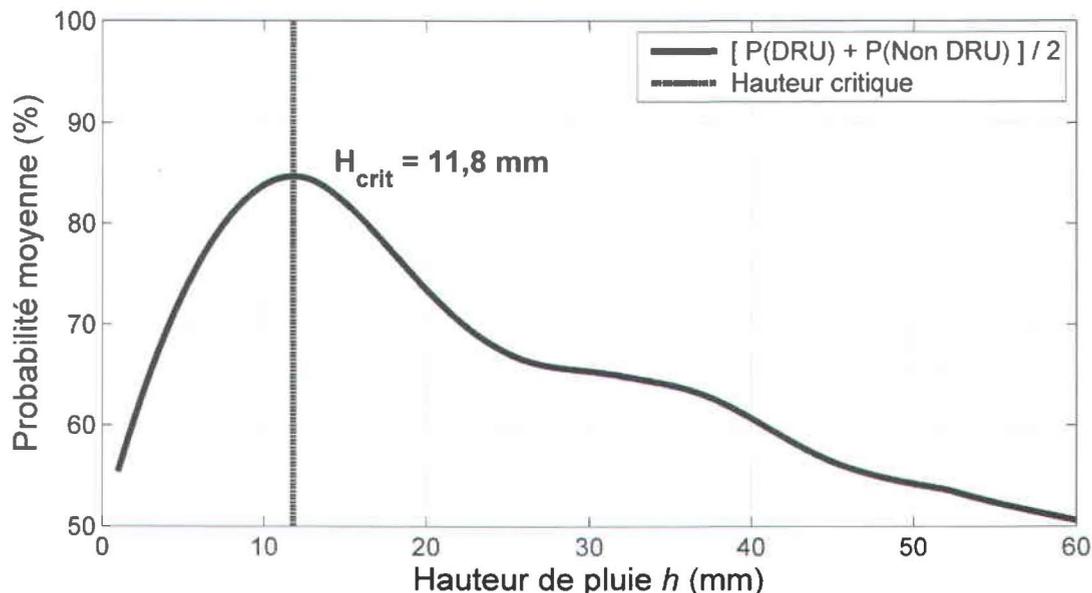


Figure 5.5 : Événements de pluie avec et sans DRU associés survenus entre 2007 et 2009 pour l'ODS de Trois-Rivières (PRINCIPAL) et détermination de la hauteur critique à partir des courbes de répartition des données.

La courbe rouge représente la répartition des événements de pluie qui causent un DRU. Cette courbe se lit comme étant la probabilité que la hauteur de pluie de l'événement causant un DRU soit plus grande que la valeur en abscisse. Dans un même ordre d'idée, la courbe en bleu

représente la répartition des événements qui ne causent pas de DRU. Il faut par contre lire cette courbe comme étant la probabilité que la hauteur de pluie de l'événement ne causant pas de DRU soit plus petite que la valeur en abscisse.

En moyennant les valeurs des deux courbes de la Figure 5.5, on obtient la courbe de la Figure 5.6. La valeur maximale de cette courbe correspond à la plus forte probabilité d'identifier correctement un événement, c'est-à-dire s'il s'agit d'une pluie causant ou non un DRU. C'est à partir de la hauteur de pluie associée à cette probabilité maximale que la hauteur critique est déterminée pour l'ODS. Pour l'exemple de la Figure 5.5, la hauteur critique est de 11,8 mm et la probabilité d'identifier correctement si un événement de pluie cause ou non un DRU en le situant d'une part ou d'autre de la hauteur critique est d'environ 85%.



**Figure 5.6 : Probabilité d'identifier correctement l'occurrence (P(DRU)) ou la non-occurrence (P(Non DRU)) d'un DRU selon la hauteur critique. P(DRU) est pour une hauteur de pluie supérieure à  $h$  et P(Non DRU) est pour une hauteur de pluie inférieure à  $h$ .**

En appliquant cette procédure, tirée de Schroeder *et al.* (2011), sur l'ensemble des données associées à chacun des 30 ODS, il est possible de déterminer leur hauteur critique respective.

Les hauteurs critiques estimées varient entre 3,1 mm et 17,7 mm. La Figure 5.7 illustre la répartition des hauteurs critiques des 30 ODS.

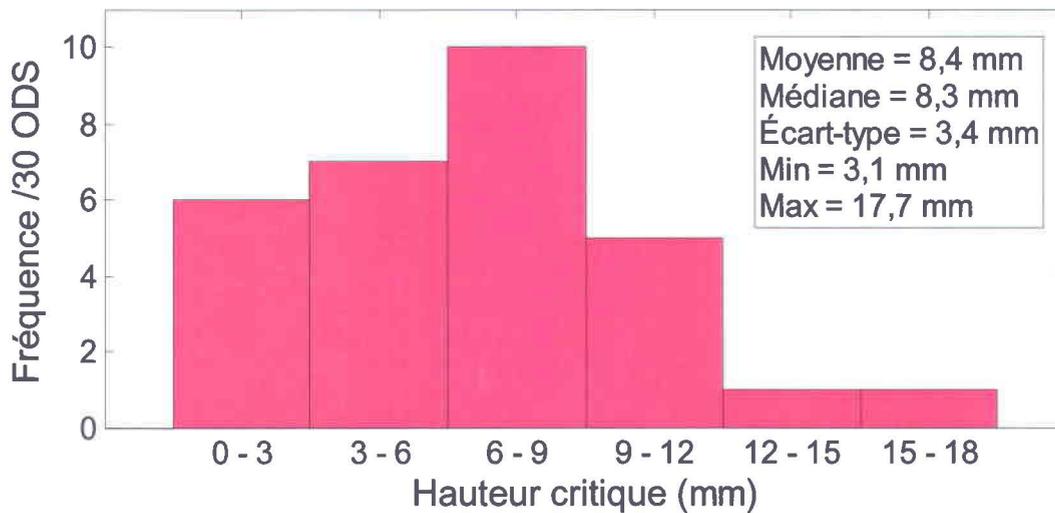


Figure 5.7 : Histogramme des hauteurs critiques des 30 ODS.

Les ouvrages de surverse des différentes municipalités montrent une sensibilité très variable aux événements de pluie. En effet, alors que certains ODS débordent plus facilement suite à un événement de pluie, d'autres entrent en fonction uniquement lorsqu'il tombe une hauteur d'eau totale plus importante. Il ressort de cette analyse que le tiers des ODS ont une hauteur critique variant entre 6 mm et 9 mm. À l'Annexe B se trouvent, par ailleurs, les hauteurs critiques associées à chaque ODS.

## 5.4. Probabilité d'occurrence des DRU

### 5.4.1. Modèle conceptuel

L'approche de la hauteur critique permet de construire un modèle simple pour lequel la probabilité d'occurrence de DRU passe de 0 à 100% selon que la hauteur de pluie est plus grande ou plus petite qu'un seuil donné (Figure 5.4). Un tel modèle n'est cependant pas réaliste en regard des données disponibles. Il est donc plus juste de vouloir modéliser la probabilité de débordement à l'aide d'une fonction monotone croissante qui fera varier la probabilité en fonction de l'importance de l'événement de pluie exprimée en termes de la hauteur de pluie, tel que schématisé à la Figure 5.8.

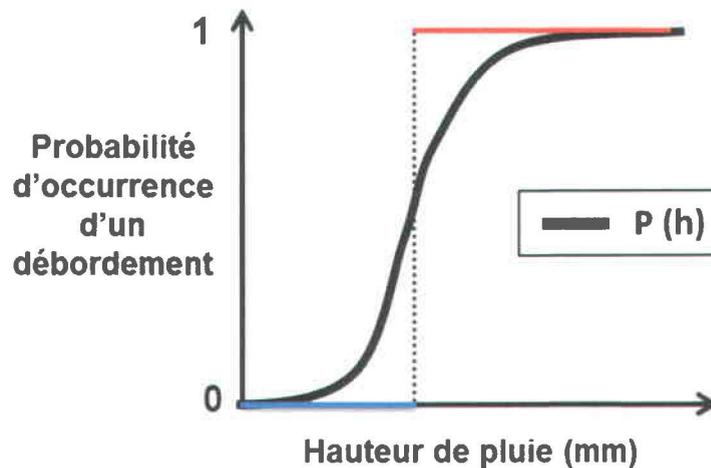


Figure 5.8 : Modèle conceptuel proposé de la probabilité d'occurrence d'un DRU.

On cherche donc à établir la probabilité d'observer un DRU pour une hauteur de pluie donnée  $h$ . Cette probabilité est représentée par la fonction  $p(h)$ . Ainsi, pour une valeur de pluie  $h$ , il y aura une probabilité  $p(h)$  d'avoir un DRU et une probabilité  $1-p(h)$  de ne pas avoir de DRU.

#### 5.4.2. Choix de la fonction de probabilité

Pour répondre à l'hypothèse de base qui veut que plus la hauteur de pluie est importante, plus grande sera la probabilité d'avoir un DRU, la fonction doit posséder les propriétés suivantes :

- Varier entre 0 et 1 pour la probabilité  $p(h)$
- Tendre vers 1 lorsque  $h \rightarrow \infty$
- Être monotone croissante
- Posséder au maximum 1 point d'inflexion

La fonction sigmoïde comporte deux paramètres, soit  $h_0$  et  $\sigma$ . Elle est utilisée dans cette étude pour modéliser la probabilité d'occurrence des DRU et s'écrit sous la forme suivante :

$$p(h | h_0, \sigma) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{h - h_0}{\sigma}\right)} \quad (5.2)$$

Cette fonction possède les propriétés souhaitées, à savoir qu'elle est comprise entre 0 et 1 et qu'elle est monotone croissante. Elle tend vers 1 lorsque  $h \rightarrow \infty$ . D'autres fonctions ont été envisagées, soit les distributions de Rayleigh, de Maxwell-Boltzmann, Gamma et Normale. Ces trois fonctions passent par (0,0), en plus d'être monotones croissantes et d'être comprises entre 0 et 1. En revanche, les essais ont permis de constater qu'il n'était pas souhaitable de faire passer la fonction par (0,0), puisqu'il en résulte un modèle qui peut sous-estimer la fréquence des DRU pour les événements de pluie de faible hauteur. Pour obtenir un modèle qui se rapproche de la réalité, il est préférable que la probabilité d'observer un DRU ne soit pas strictement nulle, se traduisant ainsi par un modèle qui ne passe pas nécessairement par (0,0).

Le modèle de probabilité sert à mettre en relation les chances d'observer un DRU à un ODS en fonction des données pluviométriques de la station météorologique la plus près. Il sera discuté dans une section suivante des incertitudes liées aux données et aux modèles, dont la distance entre l'ODS étudié et la station météorologique la plus près. Ainsi, compte tenu de ces incertitudes, il est possible d'envisager une situation où l'on enregistre un DRU sans qu'aucune pluie ne soit mesurée au pluviomètre le plus près (par exemple dans le cas d'un orage convectif centralisé sur le territoire drainé par l'ODS). Cette situation implique qu'il y a une probabilité non nulle d'avoir un DRU même si aucune pluie n'est mesurée au pluviomètre de référence.

### **5.4.3. Estimation des paramètres**

Deux paramètres doivent être estimés afin d'ajuster la fonction sigmoïde sur l'ensemble des données d'événements de pluie associés ou non à un DRU, pour chaque ODS. L'estimation des paramètres se fait à partir de la méthode du maximum de vraisemblance (Coles, 2004). Il s'agit d'une méthode statistique courante utilisée pour déterminer les paramètres de la distribution de probabilité d'un échantillon donné. La vraisemblance s'écrit dans le cas présent de la façon suivante :

$$\mathcal{L} = \prod_{i=1}^N p \left( d_i \mid h_i, \{\theta_k\} \right) = \prod_{i=1}^N \left[ (1-d_i) (1-p(h_i)) + d_i p(h_i) \right] \quad (5.3)$$

où

$\mathcal{L}$  = Vraisemblance

$d_i$  = Occurrence ou non d'un DRU  $\Rightarrow d_i = 1$  si DRU,  $d_i = 0$  si pas de DRU

$p(h_i)$  = Probabilité de DRU pour une hauteur de pluie  $i$

$\{\theta_k\}$  = Paramètres

$i$  = Événement de pluie  $i$

$N$  = Nombre total d'événements de pluie considéré

Le terme de droite correspond au produit des probabilités d'observer ou ne pas observer de DRU pour les  $N$  valeurs de la série. En prenant le logarithme de part et d'autre, on obtient :

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \ln \left[ (1-d_i)(1-p(h_i)) + d_i p(h_i) \right] = \sum_{\forall i \Rightarrow d_i=1}^{N_d} \ln [p(h_i)] + \sum_{\forall i \Rightarrow d_i=0}^{N_{nd}} \ln [1-p(h_i)] \quad (5.4)$$

La première somme du nombre de droite porte sur les  $N_d$  événements de pluie où il y a un DRU et le second sur les  $N_{nd}$  événements où il n'y a pas de DRU, considérant que  $N_d + N_{nd} = N$ .

Les estimateurs des paramètres  $\{\theta_k\}$  sont obtenus en trouvant les valeurs  $\{\hat{\theta}_k\}$  qui maximisent la log-vraisemblance ( $\ln \mathcal{L}$ ).

#### 5.4.4. Modélisation de la probabilité d'observer un DRU

Pour chacun des 30 ODS, les paramètres de la fonction de probabilité sigmoïde de l'Équation (5.2) sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. La Figure 5.9 présente un exemple de la probabilité d'observer un DRU en fonction de la hauteur de pluie des événements.

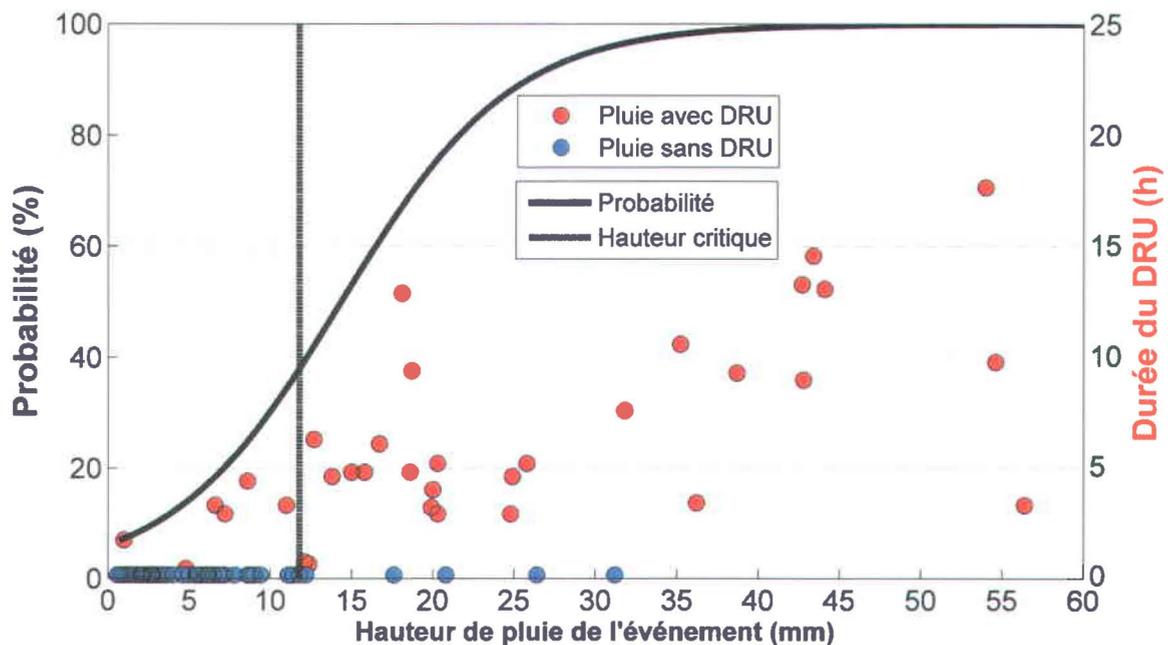


Figure 5.9 : Probabilité d'occurrence d'un DRU en fonction de la hauteur des événements de pluie pour l'ODS de Trois – Rivières (PRINCIPAL) et événements de pluie associés ou non à un DRU.

Cette méthode est avantageuse par rapport à la méthode de la hauteur critique puisqu'elle permet d'obtenir de l'information sur les probabilités d'observer un DRU suite à chaque événement de pluie. Par exemple, sur la Figure 5.9, on remarque qu'une pluie de 10 mm a environ 30% de chance d'engendrer un DRU et que ce pourcentage grimpe jusqu'à environ 75% pour une pluie de 20 mm.

La méthodologie précédente a été ainsi appliquée aux 30 ODS étudiés. Afin d'observer les variations dans l'ajustement des fonctions de probabilité, ces dernières sont tracées sur le même graphique (Figure 5.10) et l'histogramme de probabilités médianes (50%) est présenté à la Figure 5.11.

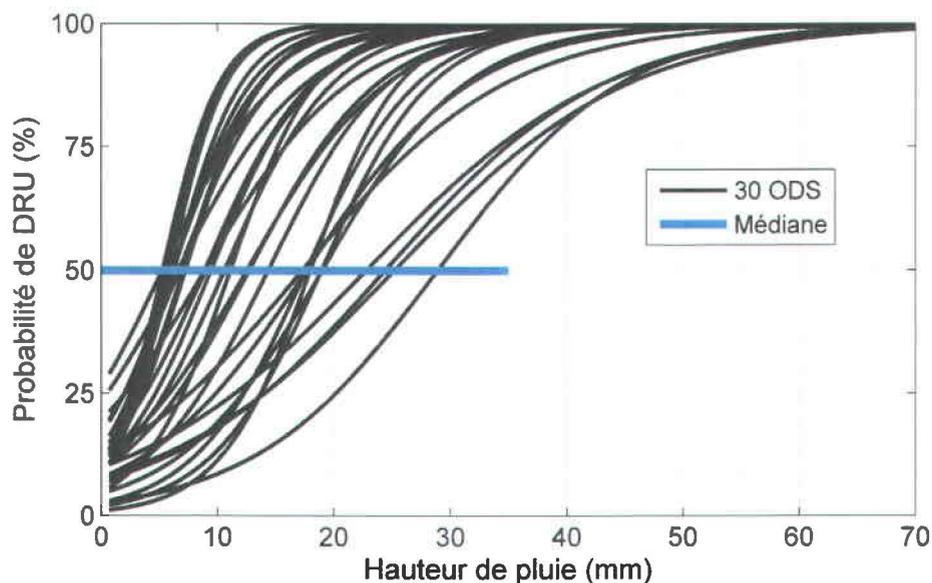


Figure 5.10 : Modèle de probabilité de DRU à partir des fonctions sigmoïdes ajustées pour les 30 ODS.

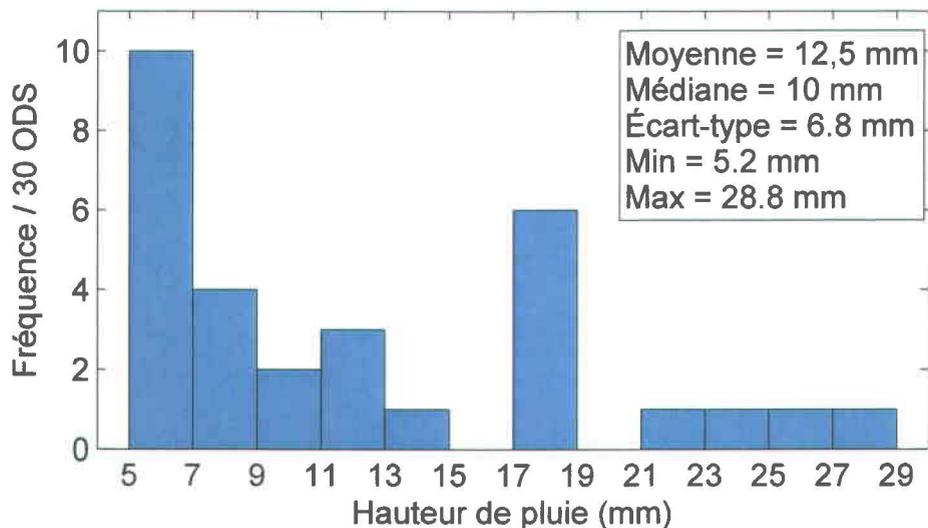


Figure 5.11 : Histogramme des hauteurs de pluie correspondant aux médianes des fonctions de probabilités des 30 ODS.

L'histogramme de la Figure 5.11 montre que le tiers des ODS ont 50% de chances de déborder pour des événements de pluie générant entre 5 mm et 7 mm. Pour les autres, l'atteinte du 50% de probabilité nécessite une pluie plus importante.

Il est intéressant de noter que l'histogramme de répartition des hauteurs critiques (Figure 5.7) et celui des probabilités médianes (Figure 5.11) sont différents. Pourtant, ce sont deux histogrammes qui, au final, servent à différencier les ODS entre eux en termes de

comportement quant aux DRU, par un indicateur relativement semblable. Cette remarque laisse sous-entendre que les résultats des estimations subséquentes en termes de fréquence des DRU pourraient différer en utilisant une méthode ou l'autre.

## **5.5. Estimation de la durée des DRU**

Cette section présente une méthodologie pour estimer la durée probable d'un DRU à partir des différentes caractéristiques des événements de pluie. Les mêmes données de DRU et de précipitation observées entre 2007 et 2009, pour les mois de mai à octobre, et pour chaque ODS, sont utilisées.

En statistique, l'analyse de régression permet d'établir une relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Les résultats de ces analyses sont souvent utilisés pour prédire ou prévoir l'événement dépendant à partir des données disponibles (variables indépendantes). Une analyse de régression s'avère donc utile aux fins de prédiction de la durée d'un DRU, la variable dépendante, à partir des caractéristiques des événements de pluie considérées, les variables indépendantes (Hines et Montgomery, 1990).

Bien qu'elle offre une bonne estimation des liens qui existent entre les variables, l'analyse de régression ne peut être utilisée pour établir une relation de cause à effet et encore moins pour prédire de façon précise de futures observations. Elle peut cependant être utile pour comparer l'influence des différentes caractéristiques des événements de pluie sur les DRU et leur durée.

### **5.5.1. Données utilisées pour les analyses de régression**

Dans les analyses suivantes, les variables indépendantes sont les caractéristiques des événements de pluie, à savoir : 1) la hauteur de pluie totale, 2) la durée de l'événement de pluie, 3) l'intensité moyenne, 4) l'intensité maximale, 5) la durée où l'intensité > 2mm/h, et 6) le temps sec antérieur.

Notons que les régressions ne sont calculées que pour les événements de pluie qui ont causé un DRU. Ainsi, tous les événements de pluie n'ayant pas généré de DRU sont exclus des analyses puisque la régression permet de trouver un lien entre des caractéristiques de la pluie

et la durée d'un DRU conditionnellement à l'occurrence d'un DRU. Sur la Figure 5.9, les pluies associées à un DRU correspondent à l'ensemble des points rouges.

### 5.5.2. Régression linéaire simple

Le modèle linéaire probabiliste veut que la valeur espérée de la variable dépendante puisse être prédite lorsqu'on connaît la valeur indépendante :

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \varepsilon \quad (5.5)$$

$\hat{y}$  = Durée du DRU estimée par la droite de régression

$\hat{\beta}_0$  = Ordonnée à l'origine

$\hat{\beta}_1$  = Pente de la régression

$x$  = Caractéristique de l'événement de pluie

$\varepsilon$  = Erreur aléatoire

Les paramètres  $\hat{\beta}_0$  et  $\hat{\beta}_1$  sont choisis de façon à minimiser la somme des écarts au carré ( $SS_E$ ), c'est-à-dire, les écarts entre les valeurs  $y$  de l'échantillon et la valeur estimée par l'Équation (5.5). Notons que ce modèle fait l'hypothèse que pour toute valeur de  $x$ ,  $y$  est décrit par une distribution normale avec une valeur moyenne donnée par l'équation  $E(y|x) = \beta_0 + \beta_1 x$  et que  $\sum \varepsilon = 0$ . Or, cette hypothèse n'est pas strictement respectée avec les données utilisées puisque la distribution des valeurs de  $y$  ne peut être normale en raison des valeurs définies positives. Une transformation de la variable  $y$  doit alors être réalisée afin de stabiliser la variance. Des tests d'hétéroscédasticité ont donc été effectués sur les données observées des DRU pour l'ensemble des ODS et ces résultats suggéraient deux essais de transformations de la variable indépendante, soit  $y' = \ln y$  et  $y' = \sqrt{y}$  (Lachapelle, 1986; Montgomery *et al.*, 1992). Ces transformations ont permis de satisfaire à l'hypothèse de normalité des erreurs mais, en contrepartie, généraient des résultats de moins bonne qualité que la régression linéaire simple sans transformation de variable. Il a donc été convenu que l'utilisation d'une régression linéaire simple était le meilleur compromis pour décrire le lien linéaire entre les six caractéristiques des événements de pluie analysées et la durée des DRU.

Un test d'hypothèses statistiques est appliqué pour vérifier si la durée des DRU est corrélée à la valeur de la caractéristique de pluie analysée, afin de mieux comprendre les comportements qui

régissent la durée des DRU. Les tests ont été effectués pour chacune des six caractéristiques prises individuellement.

Le test de Student permet de tester l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de régression significative (Montgomery *et al.*, 1992) :

$H_0 : \beta_1 = 0$  ← Pas de régression significative

$H_1 : \beta_1 \neq 0$  ← Régression significative

Le rejet de l'hypothèse  $H_0$  indique l'existence d'une corrélation statistiquement significative entre la caractéristique de pluie testée et la durée des DRU. L'Équation (5.6) décrit la statistique du test  $t_0$ , suivant une distribution de Student à  $(n - 2)$  degrés de liberté. Notons que puisque le nombre d'observations est grand, le test basé sur la distribution de Student est similaire dans ce cas au test basé sur la loi normale.

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{MS_E / S_{xx}}} \quad (5.6)$$

$\hat{\beta}_1$  = Estimateur de la pente du modèle linéaire

$MS_E$  = Erreur quadratique moyenne (Anglais : Mean Square error)

$S_{xx}$  = Somme des carrés totaux (Anglais : Sum of Squares of x)

Ainsi, pour chaque ODS, la statistique de test  $t_0$  a été calculée et comparée avec le seuil associé au niveau de confiance choisi  $\alpha$ , pour un test bilatéral. Le test bilatéral a été favorisé aux dépens du test unilatéral pour vérifier également la présence d'une régression négative. Si la condition suivante est satisfaite, l'hypothèse nulle  $H_0$  est rejetée, confirmant ainsi l'existence d'une relation linéaire.

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-2} \quad (5.7)$$

Tous les tests sont faits en considérant un niveau de confiance de 95%, i.e.  $\alpha = 0.05$ . La valeur du seuil  $t_{\alpha/2, n-2}$  est différente pour chaque ODS puisqu'elle est fonction du nombre d'événements de pluie de chaque échantillon.

La valeur P (P-value) a également été estimée de façon à confirmer le résultat des tests précédents. Une valeur de P plus faible que la valeur  $\alpha$  associée au niveau de confiance

implique le rejet de l'hypothèse nulle et donc l'acceptation de l'existence d'une relation statistique linéaire entre la durée d'un DRU et les différentes caractéristiques de pluie.

L'Annexe C regroupe les tableaux qui contiennent les résultats de l'Équation (5.7) et les statistiques du test  $|t_0|$  de l'Équation (5.6) pour chaque ODS et pour chaque caractéristique de pluie.

### 5.5.3. Coefficient de détermination $R^2$

L'adéquation entre le modèle et les données observées est mesurée par le coefficient de détermination  $R^2$  compris entre 0 et 1 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \quad (5.8)$$

$y_i$  = Durée du débordement

$\bar{y}$  = Moyenne de la durée des débordements

$\hat{y}_i$  = Durée du débordement estimée par la droite de régression

$SS_E$  = Somme des carrés des résidus (Anglais : Residual sum of squares)

$S_{yy}$  = Somme des carrés totaux (Anglais : Total sum of squares)

Cette valeur représente la part de la variance de  $y$  expliquée par le modèle linéaire. Il s'agit d'un indicateur statistique couramment utilisé pour statuer sur la qualité de la régression, un coefficient près de 1 correspondant à une régression parfaite. Notons que le coefficient de détermination est préféré au coefficient de corrélation couramment noté  $R$ , car on cherche ici à expliquer la variabilité d'une variable par une autre variable et non pas seulement la force du lien linéaire entre ces dernières (Hines et Montgomery, 1990).

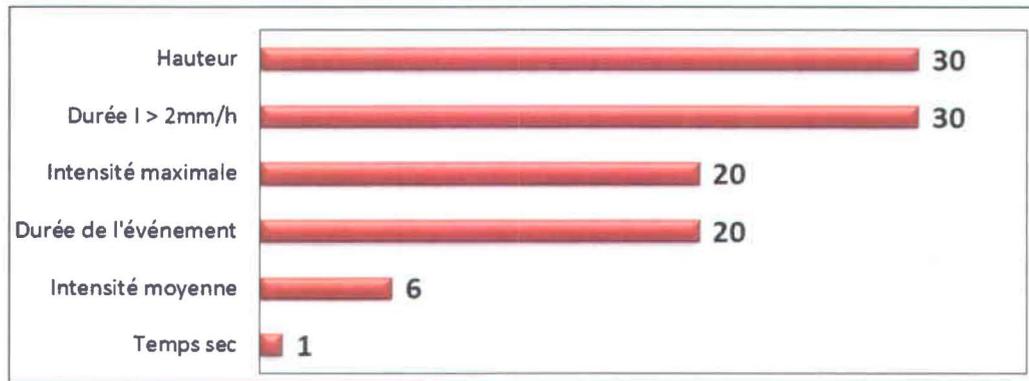
### 5.5.4. Résultat des tests de régression linéaire

Les coefficients de détermination sont calculés pour chacun des 30 ODS. Le Tableau 5.2 regroupe la moyenne des 30 coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour chaque caractéristique de pluie. Le nombre d'ODS pour lesquels on observe une régression linéaire statistiquement

significative à la suite des tests effectués avec chaque caractéristique de pluie est présenté à la Figure 5.12.

**Tableau 5.2 : Coefficients de détermination  $R^2$  des analyses de régression entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU**

Caractéristiques des événements de pluie	Hauteur de pluie	Durée où l'intensité > 2 mm/h	Durée de l'événement de pluie	Intensité maximale	Intensité moyenne	Temps sec antérieur
$R^2$ moyen	0,37	0,34	0,15	0,10	0,06	0,02
Écart-type	0,15	0,16	0,12	0,07	0,13	0,02
Min	0,10	0,11	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Max	0,63	0,68	0,43	0,32	0,54	0,12



**Figure 5.12 : Nombre d'ODS présentant des régressions linéaires significatives entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU.**

Ces résultats indiquent que le meilleur indicateur pour évaluer la durée d'un DRU est la hauteur de pluie, suivi du nombre d'heure où l'intensité > 2 mm/h. Il semble que la durée de l'événement et son intensité maximale ne sont pas, dans plusieurs cas, corrélés significativement à la durée d'un DRU, ce qui est également le cas avec l'intensité moyenne et la durée du temps sec antérieur. Ces résultats corroborent ceux d'études similaires (Schroeder *et al.*, 2011 ; D'Aoust *et al.*, 2012), où une corrélation significative entre la hauteur de pluie et la durée du DRU a également été rapportée.

La Figure 5.13 illustre un exemple de régression entre les différentes caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU, pour un ODS représentatif, soit celui de Trois-Rivières. La droite de régression linéaire est calculée selon l'Équation (5.5) avec son intervalle de confiance à 95%. Les intervalles de confiance sur les graphiques de la Figure 5.13 indiquent

que la régression linéaire est significative, ce qui est le cas, pour cet ODS, pour les régressions avec la hauteur de pluie, la durée de l'événement de pluie et la durée où l'intensité > 2 mm/h. À la lumière de ces résultats, il appert que l'intensité moyenne et maximale n'expliquent vraisemblablement pas la durée des DRU. Ce constat est d'autant plus surprenant, puisque l'intensité moyenne est une donnée basée sur la hauteur de pluie et la durée de l'événement de pluie qui, prises séparément, expliquent significativement la durée des DRU.

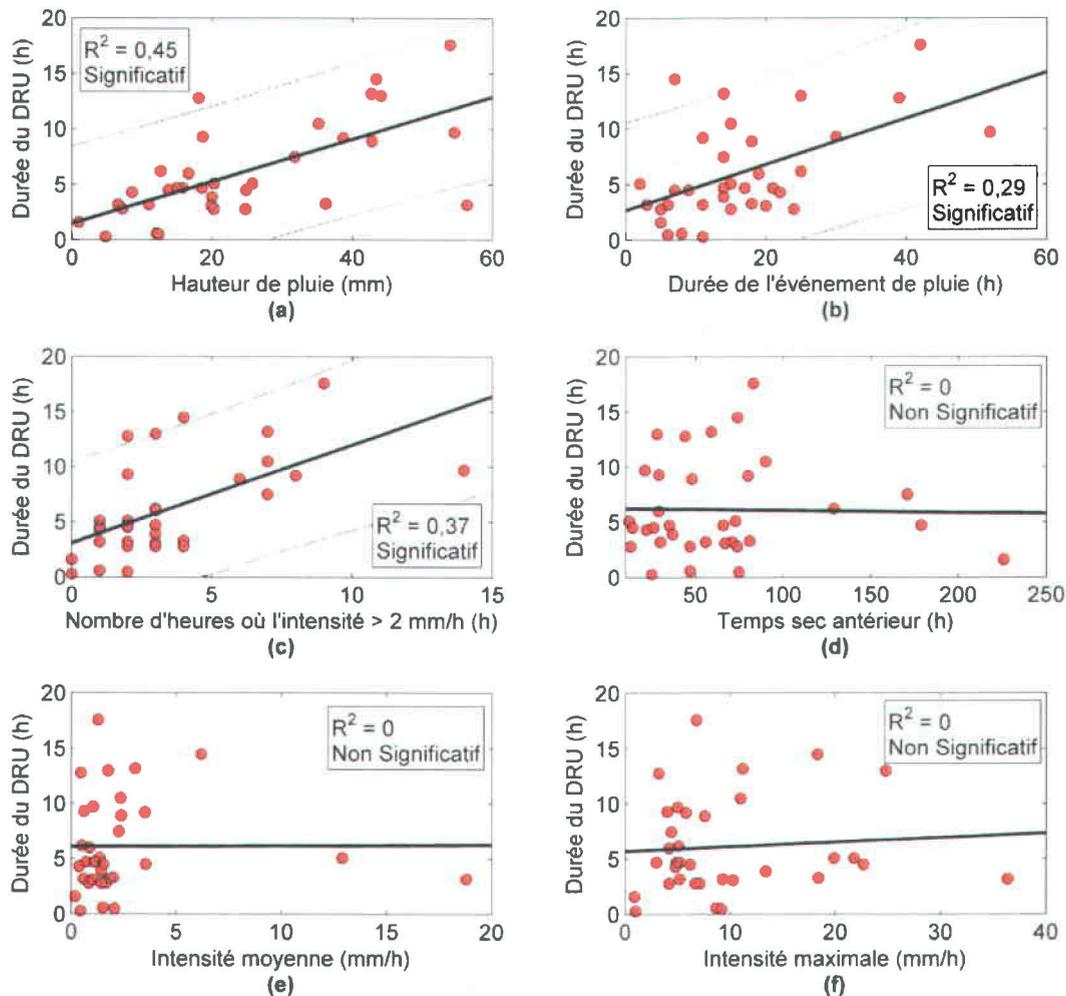


Figure 5.13 : Régression linéaire entre la durée des DRU et les six caractéristiques des événements de pluie : a) la hauteur de pluie totale, b) la durée de l'événement de pluie, c) la durée où l'intensité > 2mm/h, d) le temps sec antérieur e) l'intensité moyenne, et f) l'intensité maximale pour les données de l'ODS de Trois-Rivières, entre 2007 et 2009. Les points rouges représentent un événement de pluie associé à un DRU.

Notons encore une fois que la Figure 5.13 représente le cas d'un seul ODS. Ainsi, pour les autres cas, la durée de l'événement de pluie pourrait ne pas être une variable explicative

significative de la durée des DRU, puisque c'est seulement le cas pour 20 des 30 ODS à l'étude (Figure 5.12). Les résultats des tests de régression sont présentés en détail à l'Annexe C.

### 5.5.5. Régression multiple

En complément de l'analyse du lien entre une caractéristique de pluie unique et la durée des DRU, la régression linéaire multiple permet d'évaluer si les DRU peuvent être expliqués par plus d'une variable indépendante. Pour les fins de l'exercice, les trois variables (1 - Durée où l'intensité > 2mm/h, 2 - Durée de l'événement de pluie et 3 - Intensité maximale) ont été couplées tour à tour à la variable hauteur de pluie pour vérifier si elles contribuent à améliorer ou non le modèle de régression. Il est à noter que cette méthodologie reprend la conclusion de la Section 5.5.4, à savoir que la hauteur de pluie est une variable explicative de la durée des DRU dans tous les cas. Au terme de cette analyse, il est possible d'évaluer si la durée des DRU doit être estimée à partir d'une, de deux ou même de trois caractéristiques des événements de pluie.

Le modèle de régression linéaire multiple qui permet d'estimer la durée du DRU à partir d'un nombre  $k$  de caractéristiques ou variables (Hines et Montgomery, 1990) prend la forme suivante :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5.9)$$

où

$y$  = Durée du DRU (h)

$x_1$  = Variable indépendante 1

$x_2$  = Variable indépendante 2

$x_k$  = Variable indépendante  $k$

$\varepsilon$  = Terme d'erreur

Il est en effet possible de déterminer la contribution de chacune des variables en effectuant un test partiel-F en vérifiant si leur coefficient  $\beta_k$  est significatif ou non. Ce test joue un rôle majeur dans la construction d'un modèle, car il permet de trouver les meilleurs indicateurs à utiliser dans ce dernier (Montgomery *et al.*, 1992). L'analyse de la régression multiple a été faite à partir de différentes combinaisons allant de deux à cinq variables. De la même façon que pour la

régression linéaire, les coefficients  $\beta_k$  sont estimés par la méthode des moindres carrés, de sorte à minimiser la variance de l'erreur d'estimation en assumant que  $E(\varepsilon) = 0$  et  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ .

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$H_0 : \beta_k = 0 \quad (5.10)$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

où

$\beta_k$  = Coefficient de la variable ajoutée

La statistique du test  $F_0$  est calculée à l'aide de l'équation suivante (Hines et Montgomery, 1990) :

$$F_0 = \frac{[SS_R(\beta_2 | \beta_1)] r^{-1}}{MS_E} \quad (5.11)$$

$\beta_1$  = Coefficient de la variable hauteur de pluie (mm)

$\beta_2$  = Coefficient de la variable ajoutée

$r$  = Nombre de degré de liberté de la régression

$SS_R$  = Somme des carrés de la régression (Anglais : Regression Sum of Squares)

$MS_E$  = Erreur quadratique moyenne (Anglais : Mean Square error)

L'hypothèse nulle est rejetée si la condition suivante est satisfaite :

$$|F_0| > F_{\alpha, r, n-r-1} \quad (5.12)$$

$\alpha$  = Niveau de confiance

$r$  = Nombre de degrés de liberté de la régression

$n - r - 1$  = Nombre de degrés de liberté des résidus

$n$  = Nombre de données

En comparant la statistique du test  $F_0$  de la distribution de Fisher avec le seuil au niveau de confiance désiré, on accepte ou on rejette l'hypothèse  $H_0$  de l'Équation (5.10). Un rejet de l'hypothèse signifie que l'ajout de la deuxième variable contribue significativement à expliquer la durée du DRU. Les calculs sont faits avec un niveau de confiance de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

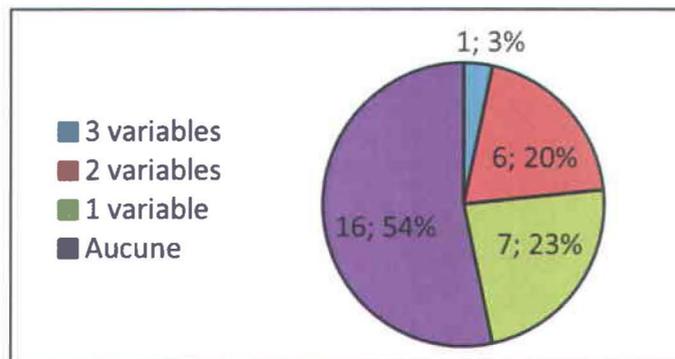
### 5.5.6. Résultat des analyses de régression multiple

Tour à tour, trois variables sont ajoutées à la hauteur de pluie et le test F-partiel est appliqué. Le Tableau 5.3 résume les résultats pour chaque caractéristique testée. La valeur représente le nombre d'ODS pour lesquels l'ajout de la variable dans la régression multiple avec la hauteur de pluie contribue significativement à améliorer l'estimation de la durée des DRU.

**Tableau 5.3 : Contribution significative d'une seconde variable à l'estimation de la durée des DRU en plus de la hauteur d'eau de l'événement de pluie.**

Variable ajoutée	Nombre d'ODS sur 30 avec contribution significative de la variable ajoutée	%
Durée où l'intensité > 2 mm/h	5	17
Durée de l'événement de pluie	7	23
Intensité maximale	10	33

La variable qui contribue le plus souvent à la régression est l'intensité maximale, pour 33% des cas, suivi de la durée de l'événement de pluie (23%) et de la durée où l'intensité > 2 mm /h (17%). Notons que plus d'une variable ajoutée peut contribuer significativement à l'estimation de la durée des DRU pour un même ODS. La Figure 5.14 illustre la répartition des ODS en fonction du nombre de variables qui, parmi les trois du Tableau 5.3, contribuent significativement au modèle. Ainsi, on note que pour plus de la moitié des ODS, aucune de ces trois variables n'ajoute réellement d'informations au modèle d'estimation de la durée des DRU.



**Figure 5.14 : Nombre de fois (et pourcentage correspondant) où l'ajout d'une variable (durée où l'intensité > 2 mm/h, durée de l'événement de pluie, intensité maximale) apporte une contribution significative à l'estimation de la durée des DRU par la régression multiple pour les 30 ODS.**

Des tableaux plus détaillés à partir desquels les statistiques du Tableau 5.3 et de la Figure 5.14 sont tirées sont insérés à l'Annexe D. Ces tableaux présentent les résultats des tests pour chaque ODS et chaque variable.

En s'appuyant sur la Figure 5.14, on conclut que dans 54% des cas, l'ajout d'une caractéristique d'un événement de pluie dans le modèle d'estimation de la durée des DRU n'améliore pas la qualité de la régression. Le Tableau 5.3 quant à lui indique que dans 33% des cas, l'ajout de l'intensité maximale améliore légèrement le modèle en vertu du test F-Partiel. Par contre, puisque les analyses suivantes visent le développement d'une méthodologie qui s'applique à l'ensemble des ODS, des résultats plus probants seraient nécessaires pour justifier la prise en compte de plus d'une variable dans le modèle de régression. En conséquence, le modèle de régression linéaire avec comme variable indépendante la hauteur de pluie a été utilisé dans la suite des travaux.

Il est à noter que des essais ont été effectués afin d'intégrer les six caractéristiques de pluie dans un modèle de régression multiple. Les résultats de ces essais se sont avérés peu concluants et sont détaillés à l'Annexe D. Cette conclusion n'est pas surprenante puisqu'en réalité, les variables ajoutées dans le modèle de régression multiple ne sont pas véritablement indépendantes. Par exemple, la durée où l'intensité horaire  $> 2$  mm/h est corrélée avec la hauteur de pluie des événements de pluie. Cela explique donc pourquoi aucune des trois variables du Tableau 5.3 n'ajoute réellement d'informations au modèle d'estimation de la durée des DRU.

## **5.6. Effet de la distance entre l'ODS et la station météorologique**

Chaque ODS sélectionné est associé à une station météorologique qui se situe dans un rayon de moins de 20 km, en vertu des critères de sélection des ODS expliqués à la Section 4.2.2. L'hypothèse de base veut que les pluies enregistrées à une station météo située près d'un ODS soient à même de représenter la pluviométrie du bassin drainé par cet ODS. Il est donc pertinent de vérifier si l'augmentation de la distance entre les ODS et les stations météo diminue significativement la qualité des associations durée du DRU – pluie.

Pour 20 ODS sur 30, les bases de données comprenaient les coordonnées GPS en degrés de l'endroit exact de la structure de DRU. Pour les 10 autres, les coordonnées ont été estimées à partir des plans de conception des réseaux d'égouts des municipalités, disponibles sur SOMAE. Les ODS ont donc été localisés à l'aide du logiciel *Google Earth*, permettant ainsi de saisir leurs coordonnées respectives.

Ayant les coordonnées des stations météorologiques utilisées pour les associations durée du DRU – pluie en main, il est possible de calculer la distance exacte séparant les deux éléments, à l'aide d'un logiciel de calcul convertissant les degrés en kilomètres. On considère que cette distance est une mesure valable de la distance euclidienne entre la station météorologique et le bassin drainé par l'ODS.

Un test statistique de Student à 95% de confiance a été appliqué pour vérifier l'existence d'une corrélation significative entre la qualité de l'association de la durée du DRU versus les caractéristiques des événements de pluie, traduite par le coefficient de détermination  $R^2$ , et la distance entre les deux éléments, pour chacune des six caractéristiques de pluie. Sur la Figure 5.15, on trouve en abscisse la distance entre la station météorologique et l'ODS associé et en ordonnée le coefficient  $R^2$  tiré de l'Équation (5.8) avec la hauteur de pluie comme caractéristique de l'événement de pluie.

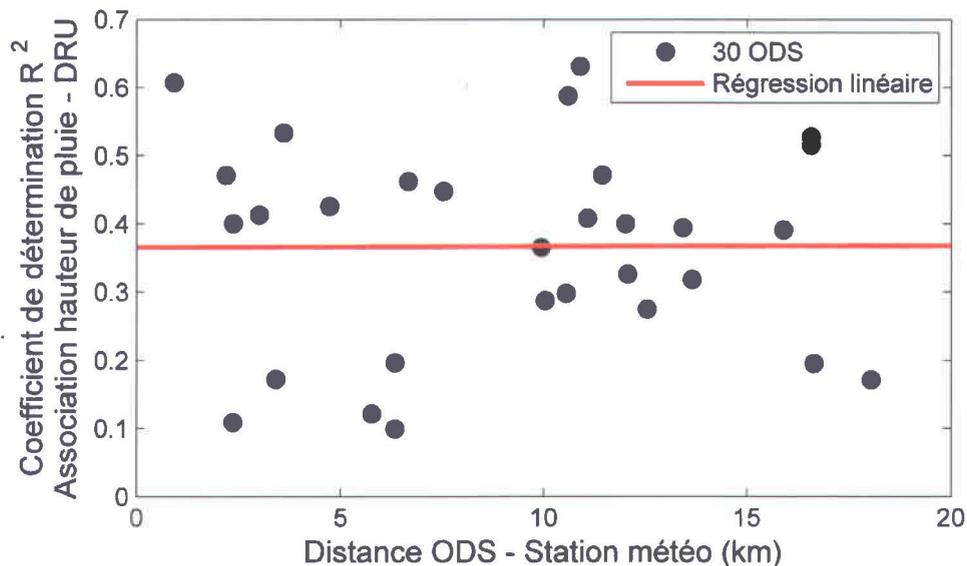


Figure 5.15 : Effet de la distance entre l'ODS et la station météorologique sur l'association de la durée des DRU avec la caractéristique des événements de pluie hauteur de pluie pour les 30 ODS. Les coefficients de détermination en ordonnée résultent de l'association durée du DRU – hauteur de pluie.

L'analyse de la Figure 5.15 indique clairement qu'il n'y a pas de lien significatif entre la qualité de l'association durée du DRU-pluie et la distance séparant l'ODS et la station météo. Cela indique donc que même si les données de pluie proviennent d'une station météorologique qui se trouve à proximité de l'ODS, la durée des DRU ne sont pas nécessairement mieux corrélées avec les caractéristiques des événements de pluie. Cette observation corrobore le fait que de nombreux autres facteurs influent sur le comportement des DRU en réponse à une pluie dont, entre autres, la configuration du réseau desservi par l'ODS, de même que les conditions d'écoulement dans le réseau et les conditions de saturation initiales des sols.

Le Tableau 5.4 résume les conclusions des tests pour les six caractéristiques de pluie. Outre l'intensité moyenne, aucun résultat n'est concluant par rapport à l'effet de la distance sur les résultats d'association durée du DRU-pluie à l'issue des tests statistiques. Pour ce qui a trait à l'intensité moyenne, la corrélation calculée est positive, indiquant ainsi que plus la distance est grande, plus le lien est bon entre l'intensité moyenne et la durée des DRU, ce qui va à l'encontre de l'hypothèse de base énoncée précédemment. Une analyse approfondie tenant compte de la répartition des coefficients  $R^2$  pour l'intensité moyenne des 30 ODS (Annexe C) permet d'expliquer ce résultat surprenant par la présence de deux données aberrantes qui influencent les résultats du test.

**Tableau 5.4 : Résultat des tests de significativité de l'influence de la distance sur la qualité des associations durée du DRU-pluie.**

Caractéristique des événements de pluie	Coefficient de détermination $R^2$ Distance (km) – Association ( $R^2$ )	Valeur P (test de Student)	Test de régression (oui = 1; non = 0)
Hauteur de pluie	0,00	0,98	0
Durée de l'événement de pluie	0,09	0,11	0
Durée où l'intensité > 2 mm/h	0,00	0,80	0
Intensité moyenne	0,24	0,01	1
Intensité maximale	0,00	0,95	0
Temps sec antérieur	0,00	0,75	0

## 5.7. Modèle probabiliste pour estimer la fréquence et la durée totale des DRU

La présente section décrit la méthodologie proposée qui permet d'estimer la fréquence et la durée totale des DRU à partir d'une série d'événements de pluie donnée. Elle intègre les fonctions de probabilité d'occurrence de DRU ajustées à chaque ODS décrites à la Section 5.4, ainsi que les modèles de régression linéaire estimant la durée des DRU élaborés à la Section 5.5. Leur combinaison permet ainsi, à l'aide d'une méthode Monte-Carlo, d'obtenir une estimation de la fréquence et de la durée des DRU à partir d'une série d'événements de pluie, dénommée le modèle probabiliste (Figure 5.16).

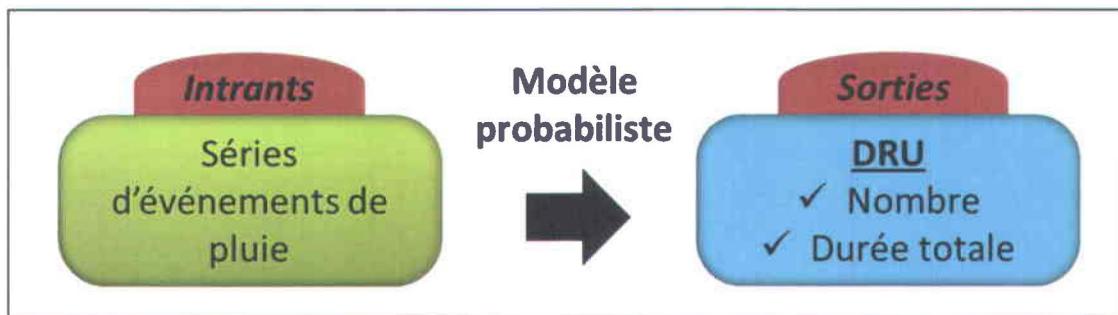


Figure 5.16 : Modèle probabiliste proposé.

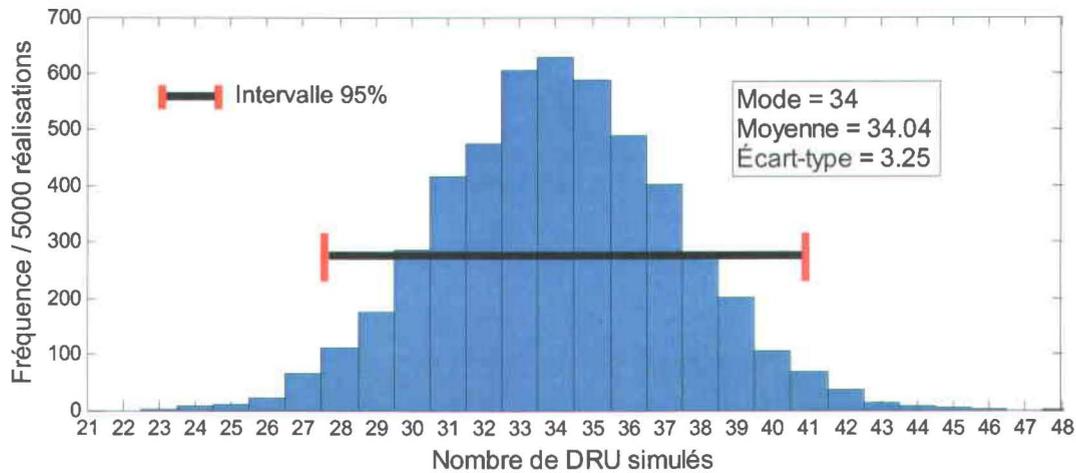
### 5.7.1. Description du modèle probabiliste

Une fois estimés les paramètres  $\hat{\theta}$  de la fonction sigmoïde décrite par l'Équation (5.2) et de la régression linéaire de l'Équation (5.5) pour chaque ODS, il est possible de calculer la probabilité d'avoir  $n$  DRU pendant une période où l'on observe une série d'événements de pluie dont les hauteurs sont  $\{h_i\}$ , en suivant les étapes suivantes :

1. Pour chaque événement de hauteur  $h_i$ , on génère un nombre aléatoire  $y$  compris entre 0 et 1;
2. On compare ce nombre à la probabilité  $p(h_i | \hat{\theta})$  d'avoir un DRU pour la hauteur de pluie  $h_i$ ;
3. Si  $y < p(h_i | \hat{\theta}) \rightarrow$  DRU
  - a) On incrémente le nombre  $n$  de un DRU;

- b) On associe une durée moyenne à ce DRU à partir de l'Équation (5.5)
- c) On incrémente la durée totale de la durée estimée en b)
- 4. On répète les étapes 1 à 3 pour tous les  $\{h_i\}$  de la série. Au terme de ce calcul, on a une réalisation possible du nombre de DRU  $n_k$ , de même que la durée totale des DRU.

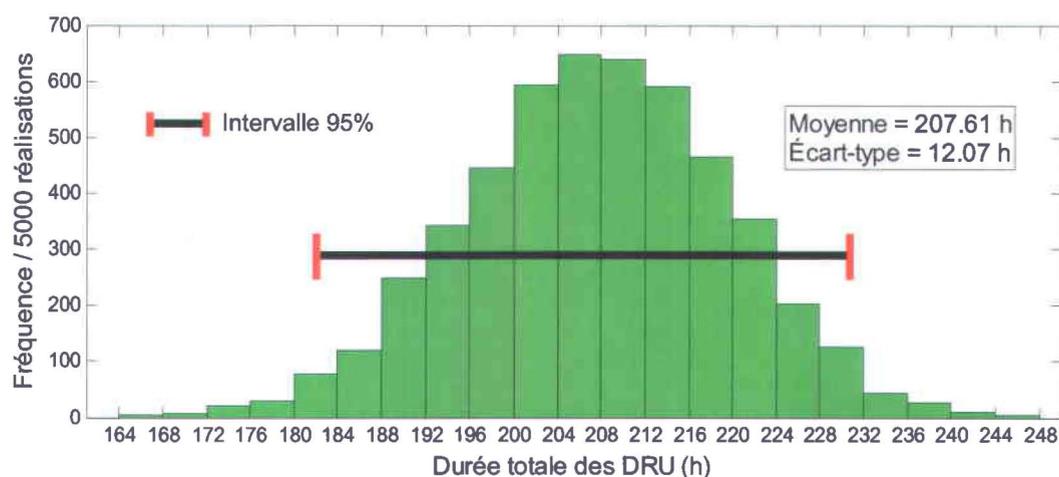
Pour évaluer la représentativité de chaque réalisation, on répète les étapes précédentes 5 000 fois, de façon à construire un histogramme de fréquence du nombre de DRU modélisé par la méthode probabiliste pour une série donnée. La Figure 5.17 illustre, à titre d'exemple, la répartition des 5 000 réalisations effectuées sur l'ODS de Trois-Rivières à partir des événements de pluie survenus entre 2007 et 2009.



**Figure 5.17 : Histogramme du nombre de DRU simulé pour chacune des 5 000 réalisations Monte-Carlo pour la série de pluie de 2007 à 2009 associée à l'ODS de Trois-Rivières. La barre horizontale représente l'intervalle 95%. Le nombre de DRU effectivement observés à l'endroit de cet ODS à partir de cette série de pluie est de 34.**

Cet histogramme permet de constater l'importance d'effectuer un nombre élevé de simulations, compte tenu de l'étendue de la distribution du nombre de DRU, qui va de 23 à 48. Par contre, la forme gaussienne de la distribution permet d'établir que la moyenne est représentative de la valeur  $n$  la plus probable (mode de la distribution) du nombre de DRU simulé à partir de la série de pluie utilisée. Ainsi, lors d'utilisations subséquentes du modèle probabiliste, le nombre de DRU retenu correspondra à la moyenne des distributions arrondie à un nombre entier. L'écart-type issu de cette méthodologie est une valeur ajoutée offrant davantage d'informations sur la probabilité d'estimation du nombre de DRU, comparativement à la méthode de la hauteur critique.

La durée totale des DRU est également estimée lors d'une étape incluse dans le modèle probabiliste. Pour chaque DRU, la durée probable est calculée avec le modèle de régression linéaire et ajoutée à la durée totale des autres DRU simulés précédemment à partir de la série de pluie. Au final, on obtient un nombre total d'heures de DRU probable pour chacune des 5 000 réalisations. La Figure 5.18 présente la répartition des durées totales simulées pour l'ODS de Trois-Rivières.



**Figure 5.18 : Histogramme de la durée totale des DRU simulé par la méthode Monte-Carlo pour la série de pluie de 2007 à 2009 associée à l'ODS de Trois-Rivières. La barre horizontale représente l'intervalle 95%.**

La durée moyenne des réalisations Monte-Carlo à chaque ODS est ainsi la valeur retenue dans les simulations du modèle probabiliste.

Les modèles ainsi développés pour chacun des 30 ODS permettent d'estimer le nombre et la durée totale des DRU à partir d'une série de pluie donnée. Les prochaines étapes du projet consistent ainsi à appliquer ces modèles sur des séries de pluie historiques et des séries de précipitations simulées en climat futur.



## **CHAPITRE 6 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DU MODÈLE PROBABILISTE AVEC LES DONNÉES OBSERVÉES DE DRU**

Avant d'appliquer le modèle probabiliste aux séries de pluie historiques observées et aux séries de pluie en climat futur, il est nécessaire de valider le comportement en comparant les sorties du modèle avec des observations réelles de DRU. Deux méthodes de validation sont utilisées. La première consiste à comparer le nombre et la durée des DRU résultant de l'application du modèle probabiliste et les DRU observés pour la même période, soit entre 2007 et 2009 pour les mois de mai à octobre inclusivement. Dans le cadre de la seconde méthode de validation, les mêmes données de DRU observés et les séries d'événements de pluie sont séparées année par année et comparées avec les sorties du modèle probabiliste.

### **6.1. Série d'événements de pluie de 2007 à 2009**

Pour chaque ODS, les séries d'événements de pluie observés entre 2007 et 2009, qui ont également été utilisées pour l'ajustement des paramètres des modèles de probabilité de DRU et de durée, sont utilisées comme intrant au modèle probabiliste. Connaissant le nombre de DRU réellement observés au cours de cette même période, les sorties du modèle sont comparées avec les données observées.

Les Figures 6.1 et 6.2 mettent en relation les résultats des simulations avec les données réellement observées entre 2007 et 2009 pour la fréquence et la durée totale des DRU respectivement, avec la méthode de la hauteur critique et du modèle probabiliste. L'intervalle 95% est une indication de la dispersion de la distribution des 5 000 réalisations, le point central représentant la moyenne de la distribution et donc le nombre de DRU prédit sur la Figure 6.1. Chaque point correspond à un ODS, pour un total de 30 points.

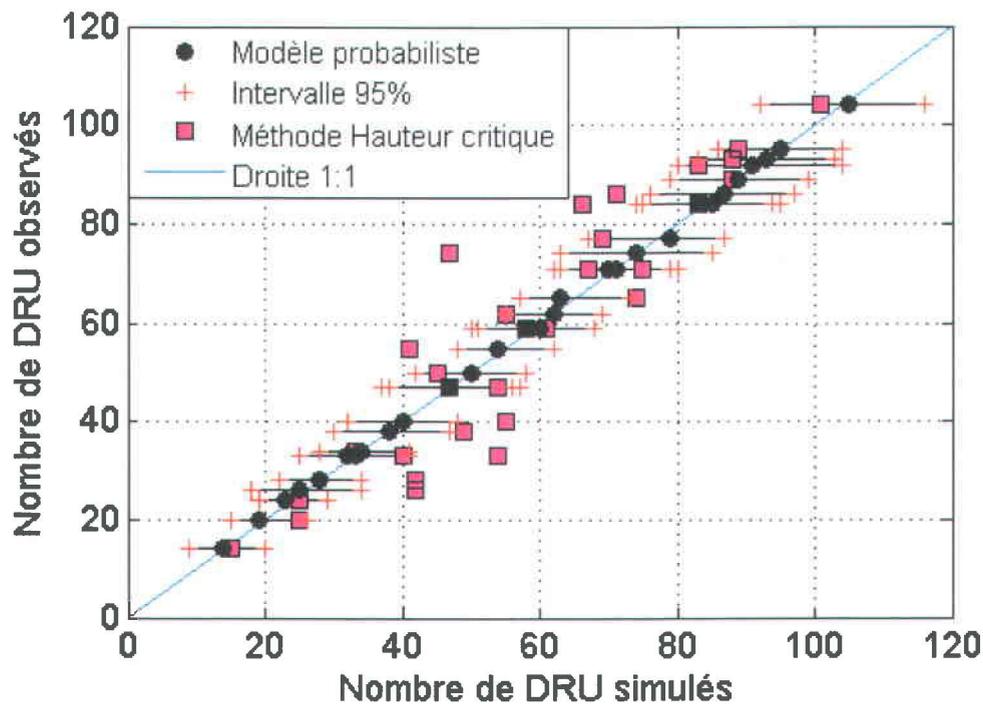


Figure 6.1 : Comparaison du nombre de DRU simulé et observé durant la période de 2007 à 2009. Les points noirs réfèrent au modèle probabiliste alors que les carrés magenta réfèrent à la méthode de la hauteur critique. Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95% des réalisations de la méthode Monte-Carlo.

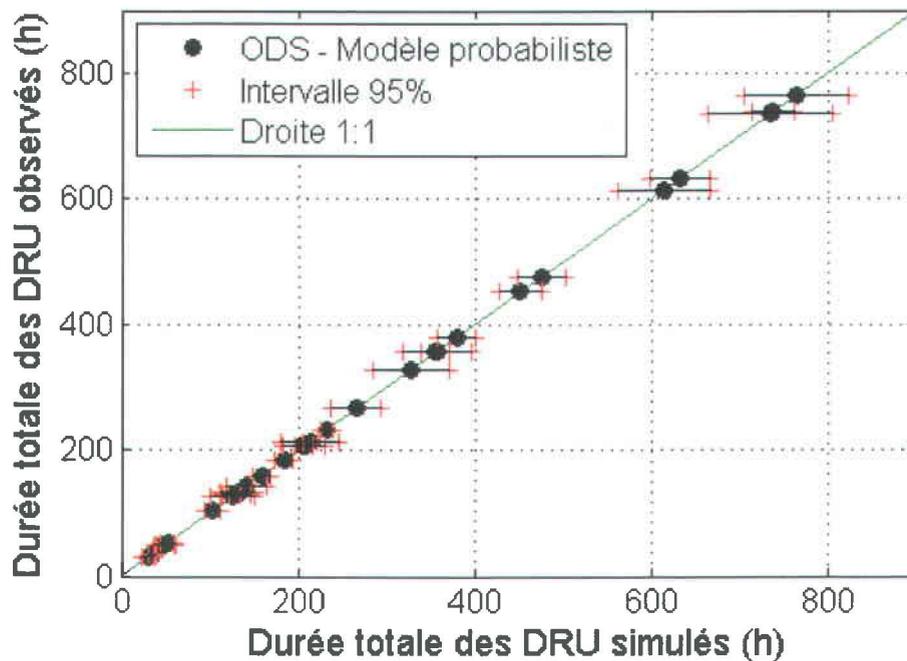


Figure 6.2 : Comparaison des durées totales simulée et observée des DRU à chaque ODS pour la période de 2007 à 2009. Les traits horizontaux représentent les limites de l'intervalle incluant 95% des réalisations de la méthode Monte-Carlo.

Ces résultats montrent que les sorties du modèle probabiliste reproduisent bien les moyennes à l'échelle de la période considérée (ce qui n'est pas réellement surprenant puisque le modèle a été développé à partir de ces données). On remarque, aux Figures 6.1 et 6.2, que les intervalles de confiance 95% deviennent de plus en plus grands à mesure que le nombre ou la durée totale observée des DRU augmente, et ce, de façon particulièrement évidente à la Figure 6.2. Cette situation peut s'expliquer par le fait que pour les ODS qui débordent davantage, il existe une plage de valeurs de hauteur de pluie où la probabilité de générer ou non un DRU change lentement. Ce faisant, le nombre de DRU simulés à ces ODS sera très variable et du coup, la durée également.

Sur la Figure 6.1, il est également possible de comparer les résultats issus de la méthode de la hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011) avec le nombre de DRU réellement observés pendant la période 2007 à 2009. On remarque l'importante dispersion des points autour de la droite 1 : 1, indiquant ainsi que le nombre de DRU estimé à partir de la méthode de la hauteur critique s'éloigne parfois des valeurs observées. Alors que dans certains cas la méthode sous-estime le nombre réel de DRU, il arrive parfois qu'elle en surestime le nombre.

L'importance de l'écart entre les deux méthodes peut être appréciée en observant la localisation des points résultant de l'utilisation de la méthode de la hauteur critique par rapport aux intervalles 95% résultant de l'utilisation de la méthode probabiliste (Figure 6.1). En effet, il n'est pas rare que le nombre de DRU prédit par la méthode de la hauteur critique se trouve à l'extérieur de cet intervalle. Par exemple, dans le pire cas, la méthode probabiliste estime à 74 le nombre de DRU avec un intervalle 95% de [63 85] alors que la méthode de la hauteur critique estime un total de 47 DRU, soit un total significativement inférieur à la réalité, soit 74 DRU.

## **6.2. Comparaison des nombres annuels de DRU entre 2007 et 2009**

Pour tester davantage la capacité du modèle à prédire le nombre et la durée des DRU, les données utilisées comme intrant dans le modèle probabiliste sont séparées année par année et les résultats sont comparés avec les données observées (Figure 6.3). Par exemple, si un total de 50 DRU est observé pour un ODS entre 2007 et 2009, réparti en 15, 25 et 10 pour chaque année respectivement, on cherche à vérifier si le modèle peut les estimer avec une répartition similaire.

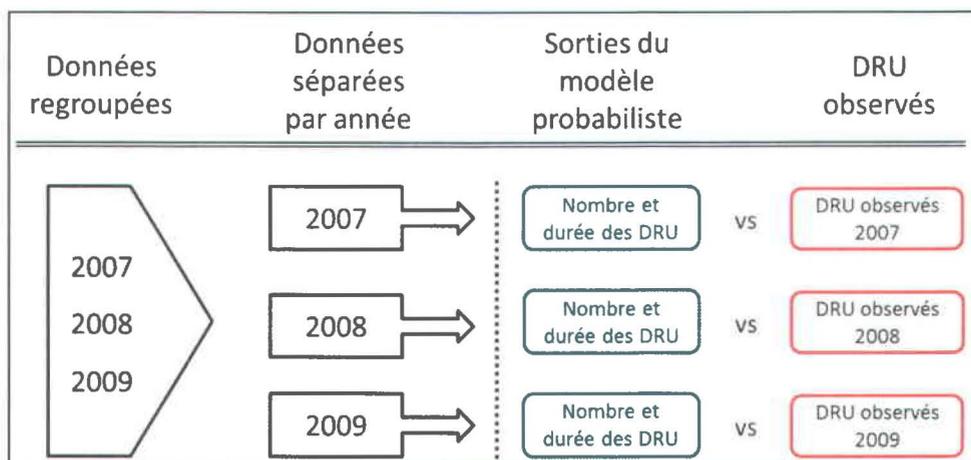


Figure 6.3 : Comparaison des valeurs annuelles (nombre et durée des DRU) simulées et observées à chaque ODS.

### 6.2.1. Fréquence des DRU

La Figure 6.4 permet d'apprécier la capacité du modèle probabiliste à prédire le nombre de DRU sur une base annuelle. Chaque point représente les résultats simulés pour un ODS et pour une année, pour un total de 90 points (3 années x 30 ODS).

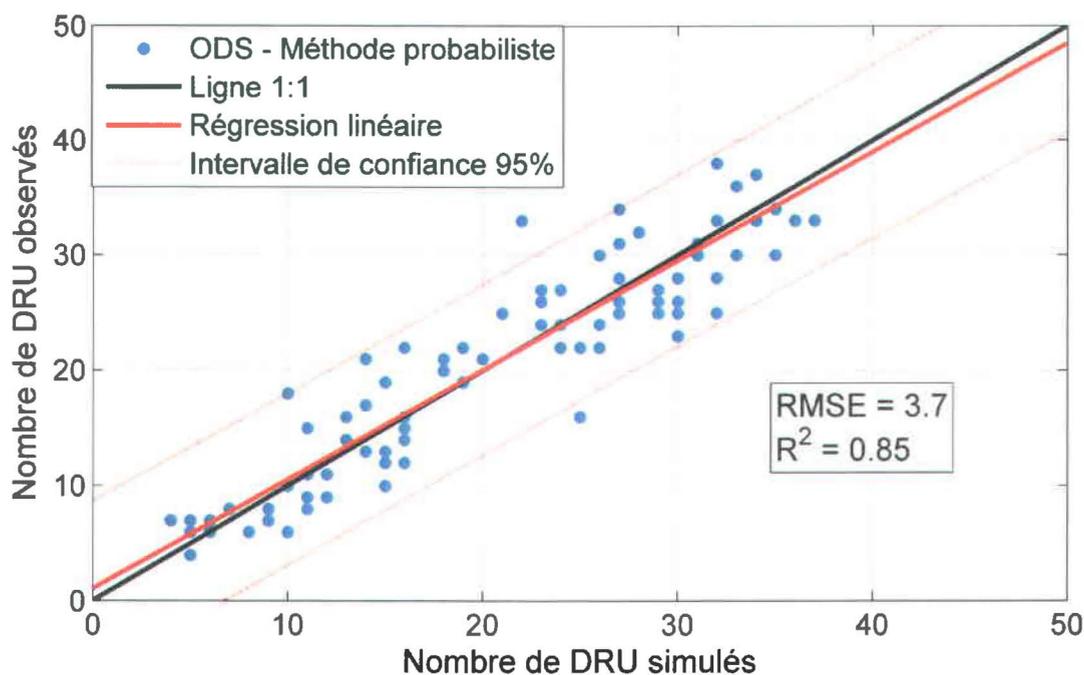


Figure 6.4 : Nombre de DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste pour les années 2007, 2008 et 2009 pour les 30 ODS. Chaque point représente un ODS pour une des trois années.

Tel qu'attendu, l'estimation du nombre de DRU par année n'est pas aussi exacte que lorsque le modèle est appliqué à l'ensemble des événements de pluie pour les trois années confondues, ce qui est tout à fait normal en raison de l'échantillon plus faible.

Les valeurs de la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) (Montgomery *et al.*, 1992) et du coefficient de détermination  $R^2$  ont été estimées. La faible valeur relative du *RMSE* et le coefficient de détermination  $R^2$  se rapprochant de 0,85 suggèrent des estimations de bonne qualité en matière de fréquence des DRU.

Une régression linéaire calculée à partir de la méthode des moindres carrés permet de déceler la présence ou non d'un biais entre les résultats du modèle et les observations. Or, tel qu'illustré à la Figure 6.4 précédente, la régression linéaire se rapproche de la droite 1 : 1, indiquant ainsi l'absence d'un biais. Un test d'analyse de la variance (ANOVA) permet de confirmer que la droite de régression n'est pas statistiquement différente de la ligne 1 : 1.

La Figure 6.5 illustre la même procédure de validation séparée année par année, mais en utilisant la méthode de la hauteur critique pour estimer le nombre de DRU.

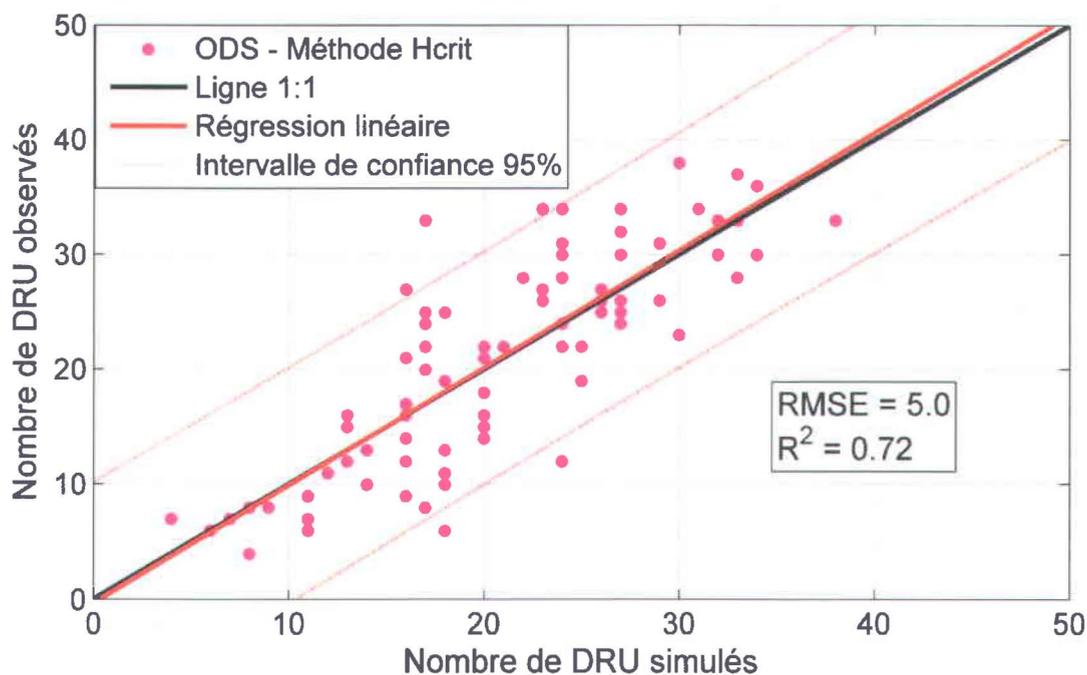
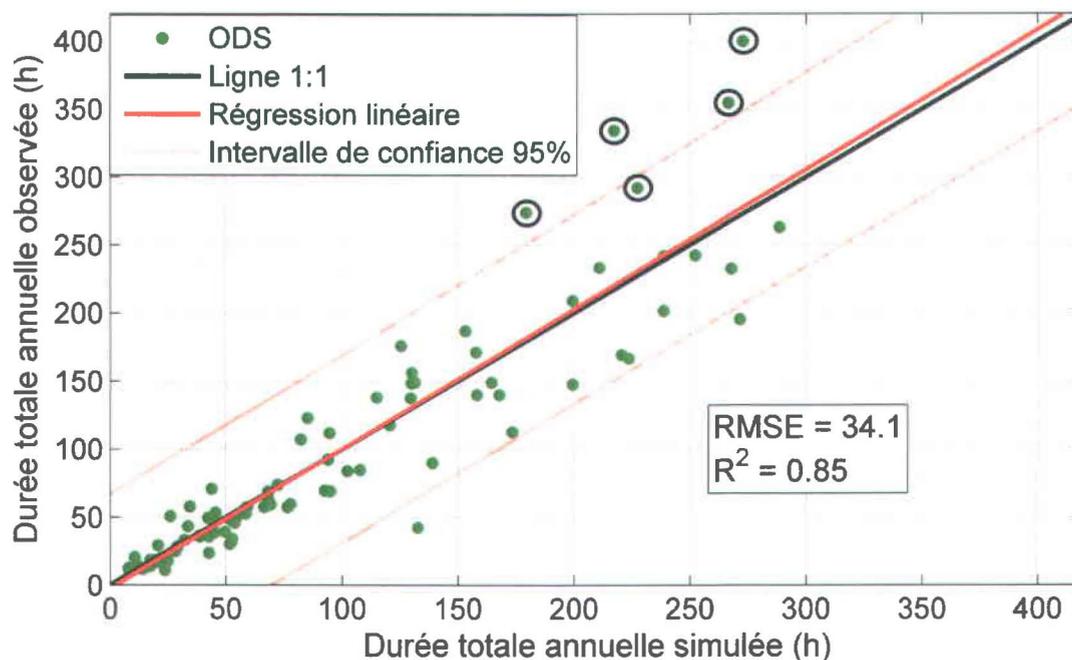


Figure 6.5 : Nombre de DRU observés et simulés avec la méthode de la hauteur critique pour les années 2007, 2008 et 2009 pour les 30 ODS. Chaque point représente un ODS pour une des trois années.

On remarque une différence entre la méthode de la hauteur critique et celle du modèle probabiliste. Un intervalle de confiance plus large, un RMSE plus grand et un coefficient de détermination  $R^2$  plus faible suggèrent une moins bonne capacité d'estimation du nombre de DRU par la méthode de la hauteur critique, comparativement au modèle probabiliste. Il reste néanmoins que la différence entre les deux méthodes est nettement moins marquée que par rapport aux analyses de la Section 6.1 lorsque les données des trois années sont confondues.

### 6.2.2. Durée totale annuelle des DRU

De façon similaire, la durée totale des DRU observés pour les années 2007, 2008 et 2009 peut être comparée avec la durée totale estimée par le modèle probabiliste pour les mêmes années (Figure 6.6).



**Figure 6.6 :** Durée totale annuelle des DRU observés et simulés avec la méthode probabiliste à partir des séries de pluie annuelles de 2007, 2008 et 2009, pour les 30 ODS. Les points encadrés représentent des ODS de la municipalité de Jonquière en 2008.

De même que pour la fréquence, l'estimation de la durée totale avec le modèle probabiliste est corrélée avec les durées observées avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,85. On remarque sur la Figure 6.6 que la dispersion est plus importante pour les ODS débordant pour une durée totale importante (entre 200 et 300 h) que pour ceux qui débordent moins longtemps (entre 0 et 50 h). Notons que les points encadrés sont tous issus d'ODS associés à la série de

pluie de la station météorologique de Jonquière au Saguenay, et ce, pour l'année 2008 seulement. Les DRU de l'année 2008 pour ces ODS sont caractérisés par deux ou trois DRU exceptionnels d'une durée de 24 h et plus qui ont ainsi conduit à une durée totale observée plus grande que celle estimée par le modèle. Ces données plus exceptionnelles n'ont pas été exclues des analyses de régression. En effet, la droite 1 : 1 de la figure se confond presque avec la ligne de régression linéaire, démontrant un modèle bien ajusté et exempt de biais. Un test d'analyse de la variance (ANOVA) permet de confirmer que la droite de régression n'est pas statistiquement différente de la ligne 1 : 1.



## CHAPITRE 7 : APPLICATION À UNE SÉRIE DE PLUIE HISTORIQUE

Les premiers résultats du modèle probabiliste, décrits au Chapitre 6, sont encourageants. Par contre, avant d'utiliser ce modèle pour estimer les DRU à partir des séries de précipitations simulées en climat futur, il est impératif d'étudier son comportement à l'aide d'une série historique comprenant des données réelles de précipitation sur le Québec couvrant plusieurs années. Ainsi, pour chaque année et pour chaque ODS, le modèle probabiliste permet d'estimer la fréquence et la durée des DRU à partir d'une série de pluie historique. Cet exercice permet d'apprécier la variation interannuelle des DRU et d'en tirer des conclusions quant à la corrélation entre le total de précipitations annuelles et la fréquence et la durée des DRU.

### 7.1. Série historique de précipitation considérée

La série de pluie historique choisie est celle de la station météorologique de la Ville de Thetford Mines (station no 7028441), car elle contient peu de données manquantes par rapport à l'ensemble des autres stations météorologiques dont les données sont disponibles. De plus, elle est l'une des rares à avoir été en fonction sur suffisamment d'années pour évaluer les variations interannuelles sur 28 ans. Puisque l'objectif de ce chapitre est d'offrir une idée de la variabilité interannuelle des DRU simulés par le modèle probabiliste et de vérifier la corrélation entre les DRU et le total annuel de précipitation, il est convenu que l'utilisation d'une seule série historique est appropriée. Nous supposons donc que la série de précipitation choisie est suffisamment représentative de la pluviométrie du Sud du Québec pour offrir une idée de la variabilité interannuelle des DRU simulés par le modèle. La fréquence et la durée des DRU estimées ne sont par contre pas représentatives de l'ensemble du territoire, ce qui ne compromet pas l'objectif de ce chapitre. Le modèle probabiliste est donc utilisé pour estimer le nombre et la durée des DRU entre les mois de mai et d'octobre, pour la période entre 1979 et 2006.

Lorsqu'il est question de données météorologiques, il faut considérer l'inévitable réalité des données manquantes. L'application du modèle probabiliste et de la méthode de la hauteur critique sur une série comportant un certain nombre de données manquantes générerait donc un nombre nécessairement moindre de DRU que pour un jeu de données complet. Pour pallier

ce problème, un protocole de normalisation est établi. En premier lieu, les années où il manque plus de 15% de données de précipitation horaire sont simplement ignorées. Notons qu'une année complète dans le cadre de ce projet est composée de 4 416 heures avec données, soit 184 jours (mai à octobre) x 24 h. Ensuite, pour les années où il manque moins de 15% de données, le total annuel de précipitation, le nombre de DRU simulés et la durée totale annuelle sont normalisés en fonction du pourcentage de données manquantes de l'année. Pour justifier cette normalisation, on fait l'hypothèse que les données disponibles sont représentatives des périodes où les données sont manquantes. Ainsi, à titre d'exemple, pour 15% de données manquantes au cours d'une année, le nombre de DRU simulés par le modèle probabiliste est divisé par 0,85.

Sur l'ensemble des 28 années, seulement quatre années sont manquantes pour la série historique de Thetford Mines, soit 1981, 1982, 1993 et 2000.

## **7.2. Variations interannuelles des DRU simulés**

Pour chaque année et chaque ODS, le nombre et la durée des DRU sont estimés par la méthode probabiliste et la méthode de la hauteur critique à partir de 5 000 réalisations Monte-Carlo. Les données d'entrée du modèle sont les hauteurs de pluie des événements formés à partir de la série historique de Thetford Mines entre 1979 et 2006. Les sorties du modèle sont analysées aux sections suivantes.

### **7.2.1. Fréquence annuelle des DRU**

Le nombre annuel moyen de DRU simulés pour l'ensemble des 30 ODS est présenté à la Figure 7.1. Chaque point représente la moyenne du nombre de DRU simulés à tous les ODS pour une année donnée. L'écart-type présenté est la moyenne des écart-types du nombre de DRU simulés à chacun des 30 ODS pour une année donnée.

Un premier coup d'œil à cette figure permet de constater l'importante variabilité interannuelle des cumuls de pluie tombée entre les mois de mai à octobre. Cette variabilité se reflète sur le nombre annuel de DRU simulés. Le coefficient de détermination est calculé entre la hauteur totale de pluie (mm) et le nombre de DRU moyen aux 30 ODS à chaque année. La méthode du

modèle probabiliste présente un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,59, alors que celui de la méthode de la hauteur critique est de 0,50. Ce résultat suggère que le nombre total annuel de DRU est corrélé avec le cumul de pluie enregistré pendant la période correspondante.

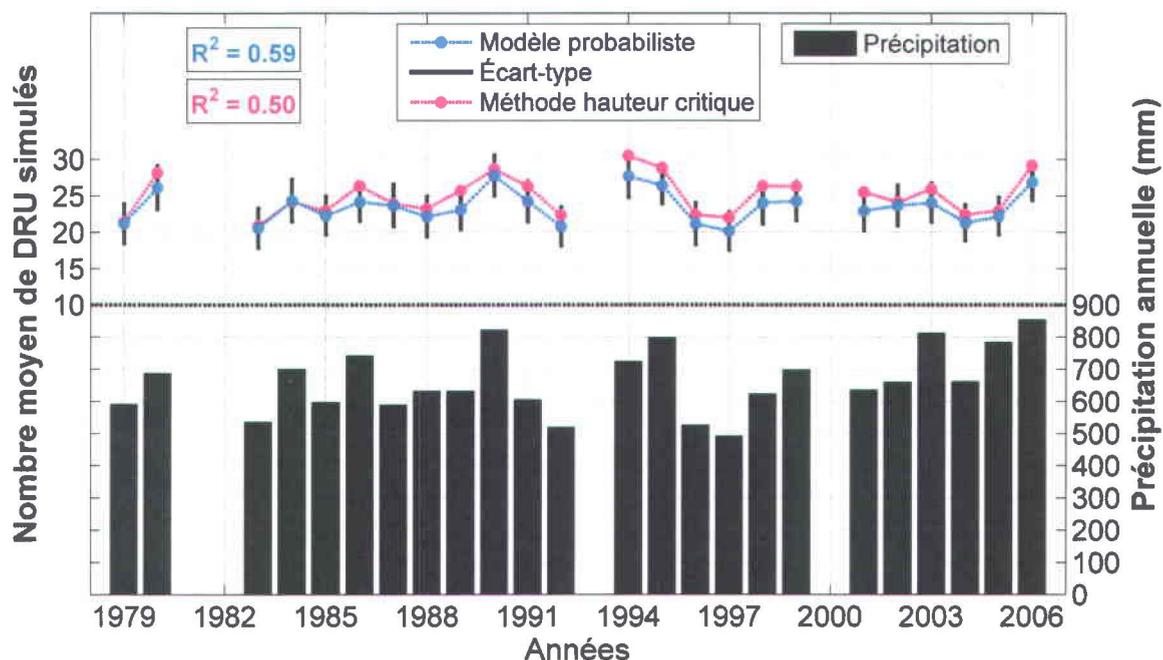


Figure 7.1 : Nombre moyen annuel de DRU simulés pour les 30 ODS selon le modèle probabiliste et la méthode de la hauteur critique à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Les  $R^2$  correspondent aux corrélations entre la hauteur de pluie totale et le nombre moyen de DRU simulé à tous les ODS pour chaque année.

### 7.2.2. Durée totale annuelle des DRU

La Figure 7.2 présente la durée totale annuelle moyenne des DRU simulés pour l'ensemble des 30 ODS. Encore une fois, la présence d'une importante variabilité interannuelle du climat se reflète dans les fluctuations de la courbe. En vertu du coefficient de détermination  $R^2$  de 0,98, une année pluvieuse se traduit directement en une année où la durée totale des débordements d'eaux usées non traitées sera plus longue.

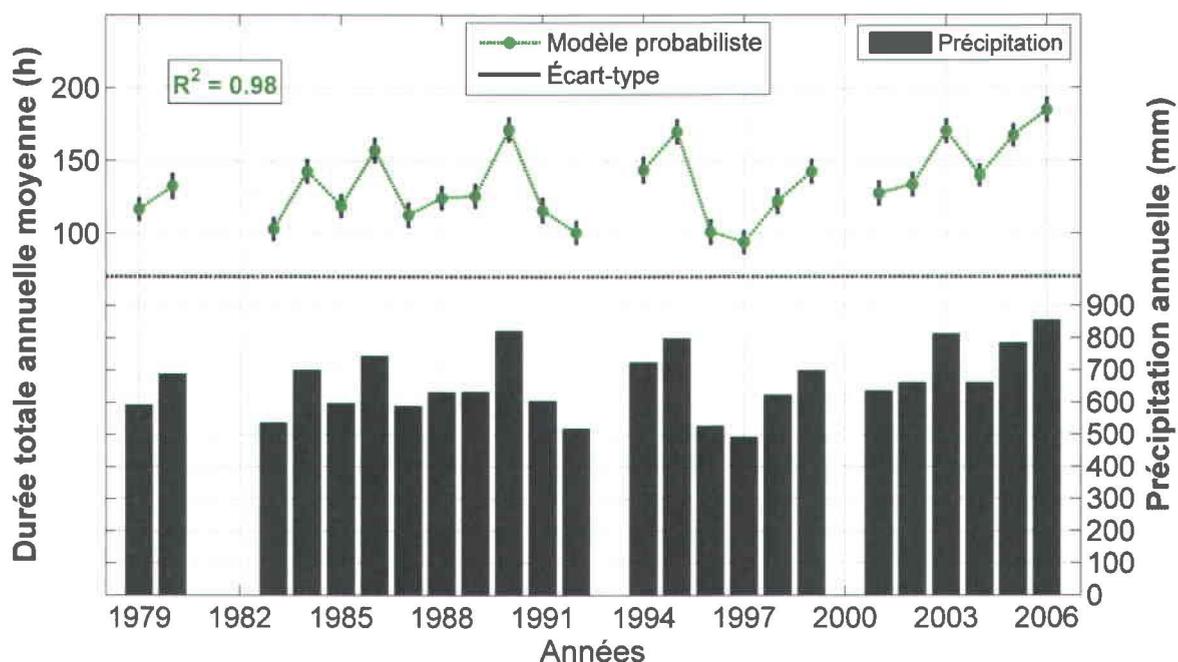


Figure 7.2 : Durée totale moyenne des DRU simulés pour les 30 ODS selon le modèle probabiliste à partir de la série de pluie historique de Thetford Mines sur 28 ans. Le  $R^2$  correspond à corrélation entre la hauteur de pluie totale et la durée totale moyenne des DRU simulée à tous les ODS pour chaque année.

Le Tableau 7.1 présente un résumé des résultats précédents. Pour l'ensemble des 30 ODS, la méthode de la hauteur critique donne un nombre moyen de DRU de 22,7, alors qu'il est de 21,2 pour le modèle probabiliste, soit une différence de 7,1%. Il semble donc que la méthode de la hauteur critique estime davantage de DRU par rapport à la méthode probabiliste.

Tableau 7.1 : Différence entre les résultats du modèle probabiliste et de la méthode de la hauteur critique pour l'ensemble des 30 ODS. Le RMSE est calculé sur l'écart entre le nombre annuel de DRU simulés et observés entre 2007 et 2009, Section 6.2.1. Le  $R^2$  est calculé à partir de la corrélation entre le total de précipitation et le nombre de DRU simulés pour une série historique entre 1977 et 2006, Figure 7.1.

Méthode	RMSE	$R^2$	Nombre annuel moyen de DRU
Probabiliste	3,7	0,59	21,2
Hauteur critique	5,0	0,50	22,7

En dépit de ses résultats moins probants, il n'en demeure pas moins que la méthode de la hauteur critique est beaucoup plus simple et facilement intégrable dans toute autre étude visant à estimer un nombre de DRU à partir d'une série de pluie. C'est d'ailleurs la méthode privilégiée

dans de nombreuses recherches modélisant les DRU à partir d'un modèle de gestion de l'eau en milieu urbain (Furlow *et al.*, 2007; Patz *et al.*, 2008; Riechel *et al.*, 2010; Schroeder *et al.*, 2011). La méthode probabiliste, légèrement plus complexe, est basée sur des méthodes mathématiques rigoureuses offrant des résultats qui s'approchent davantage de la réalité, malgré les nombreuses difficultés et incertitudes associées à la prévision des DRU. Elle est donc privilégiée pour étudier le comportement des DRU, dans un contexte de changements climatiques, d'autant plus qu'elle permet également d'estimer la durée totale probable de DRU aux différents ouvrages de surverse.

Les résultats de ce chapitre montrent également la présence d'une corrélation entre le cumul annuel de pluie et les fréquence et durée des DRU. Cela suggère qu'en l'absence de données pluviométriques à fine résolution temporelle, il serait tout de même possible d'obtenir une estimation des fréquence et durée des DRU à partir d'un cumul de pluie à plus grande résolution temporelle, soit journalière ou annuelle. Cet aspect n'est cependant pas analysé plus en profondeur dans le cadre de ce projet.



## CHAPITRE 8 : APPLICATION AUX SÉRIES DE PLUIE EN CLIMAT FUTUR

Dans le Chapitre 7, le modèle probabiliste a été appliqué à une série de pluies historiques de 28 années. Le présent chapitre se consacre à l'application de ce même modèle aux séries de pluies simulées en climat futur afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les débordements des réseaux d'égouts unitaires. Pour ce faire, des événements de pluie sont d'abord formés à partir des données du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) pour deux simulations distinctes. Les résultats issus des séries du MRCC sont ensuite comparés aux résultats issus des séries historiques pour la période de 1977 à 2009. Au final, pour chaque ODS, les écarts suivants entre climats futur et historique sont estimés : (1) la fréquence des DRU selon le modèle probabiliste; (2) la fréquence des DRU selon la méthode de la hauteur critique et (3) la durée totale des DRU selon le modèle probabiliste. Les variations entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 permettent d'évaluer l'ampleur des changements pour l'ensemble des mois de mai à octobre, de même que pour chacun des mois.

### 8.1. Séries de pluie simulées par le MRCC

Le MRCC, originalement développé à l'Université du Québec à Montréal, est basé sur une représentation physique des mécanismes et processus régissant le climat. Des équations d'Euler élastiques et non hydrostatiques sont résolues par un algorithme numérique semi-implicite et semi-lagrangien, ce qui permet d'obtenir de l'information à une fine échelle spatiale de 45 km x 45 km, avec un pas de temps de 15 minutes entre chaque intégration (Caya et Laprise, 1999; Laprise *et al.*, 1998). Les données proviennent de la version 4.2 du MRCC. Deux simulations pilotées par deux membres du modèle canadien CGCM3 sont utilisées dans le projet, soit les simulations *aef* et *aev* couvrant la période 1961-2100 (CCmaC, 2010). Elles utilisent les concentrations de gaz à effet de serre observées pour les années 1961-2000 et le scénario SRES A2 d'évolution future de ces concentrations pour les années 2001 à 2100, sur l'ensemble de l'Amérique du Nord (CCmaC, 2010; IPCC, 2000; Music et Caya, 2007).

### 8.1.1. Événements de pluie

Les données de précipitations issues des simulations *aet* et *aev* du MRCC sont disponibles pour des tuiles de 45 km X 45 km couvrant le Québec (Caya et Laprise, 1999). À partir de leurs coordonnées géographiques, chaque ODS est associé à sa tuile correspondante, pour un total de 12 tuiles utilisées. Ensuite, des événements de pluie sont définis de façon similaire à celle utilisée pour le développement des associations DRU-pluie entre 2007 et 2009, en regroupant d'abord les données à un pas de temps de 15 minutes en données horaires. Le Tableau 8.1 présente les critères utilisés pour définir les événements de pluie pour les deux simulations *aet* et *aev*.

**Tableau 8.1 : Critères de construction des événements de pluie à partir des séries du MRCC.**

Critère	Valeur	Procédure
Seuil horaire de pluie minimal	0,2 mm ou 0,3 mm	Si l'intensité horaire est inférieure au seuil, la donnée est considérée comme nulle (0 mm).
Temps sec inter-événement	12 heures	L'événement de pluie est borné par deux périodes de temps secs chacune d'une durée minimale de 12 h.
Hauteur totale minimale pour considérer un événement	0,5 mm	Si la hauteur totale de pluie de l'événement est inférieure à 0,5 mm, l'événement est ignoré.

Notons que le seuil horaire de pluie minimal est nécessaire puisqu'il est reconnu que les modèles climatiques génèrent trop d'événements de pluie de faible intensité (Sun *et al*, 2007). L'ajout d'un seuil s'avère donc une étape essentielle. Le seuil de 0,2 mm a été choisi car il offre un compromis acceptable entre le nombre d'événements et la « perte » de volume d'eau total associée aux valeurs en deçà du seuil. Un seuil de 0,3 mm pour les deux simulations *aet* et *aev* a également été considéré. Étant donné le faible impact du seuil sur les résultats, l'accent est mis dans ce qui suit sur le cas où le seuil est de 0,2 mm. On identifie par *aet02* et *aev02* les résultats relatifs aux simulations *aet* et *aev* utilisant un seuil de 0,2 mm et par *aet03* et *aev03* ceux obtenus à partir des simulations *aet* et *aev* utilisant un seuil de 0,3 mm.

### 8.1.2. Comparaison des résultats obtenus des simulations *aet* et *aev*

Puisque les sources d'incertitude liées à la simulation du climat par le MRCC et par le modèle global qui pilote ce dernier sont importantes, il faut interpréter les résultats de ces modèles avec prudence. Idéalement, l'évaluation de l'impact des changements climatiques devrait se faire à partir de données tirées de plusieurs simulations et de plusieurs GCM, ce qui permettrait une meilleure estimation des différentes sources d'incertitudes, notamment celles associées aux modèles eux-mêmes (Tebaldi et Knutti, 2007). La comparaison des résultats issus des deux simulations (*aet* et *aev*) permet, dans une certaine mesure, d'explorer l'impact de la variabilité interne du climat sur les résultats. La variabilité interne du modèle régional s'observe en raison d'une modification des conditions initiales du modèle global. La Figure 8.1 présente la hauteur de pluie et la fréquence des événements de pluie construits à partir des séries de précipitations *aet02* et *aev02* pour l'ensemble des 12 tuiles utilisées.

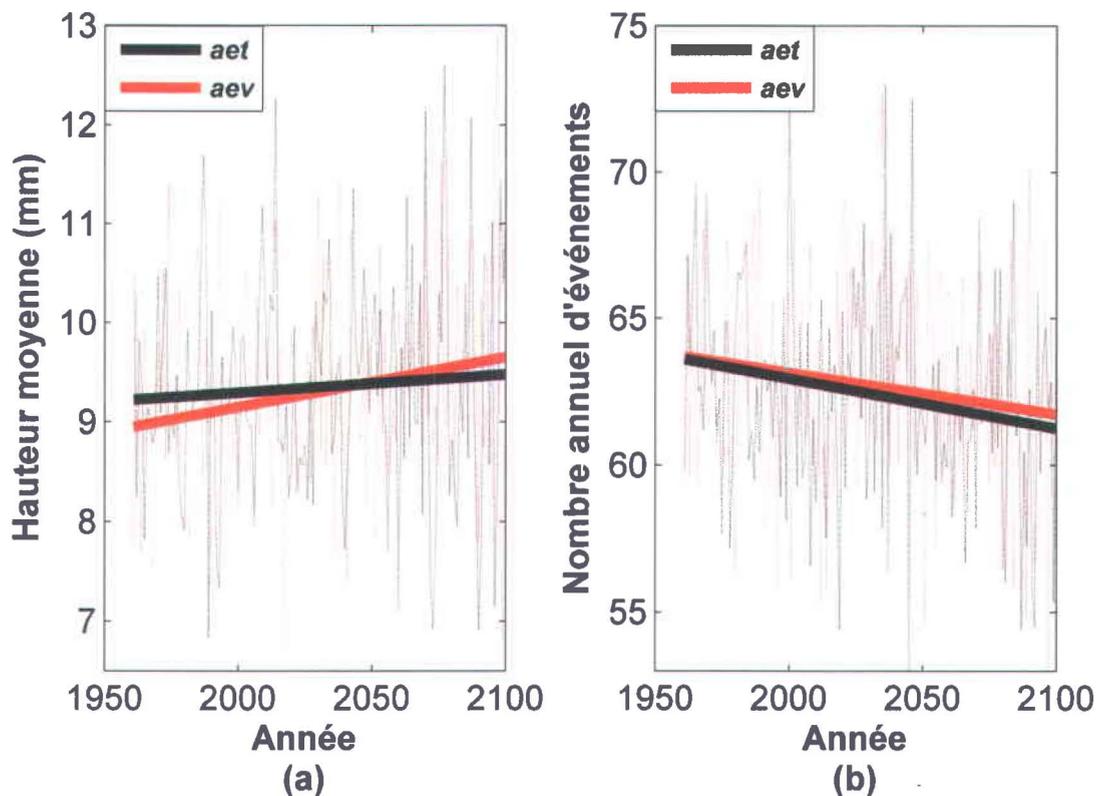


Figure 8.1 : Séries annuelles (période de mai à octobre inclusivement) des : a) hauteurs moyennes par événement et b) nombre d'événements annuels de pluie pour les simulations *aet02* et *aev02* pour les 12 tuiles utilisées et combinées du MRCC. Les traits continus représentent les régressions linéaires pour chacune des simulations.

Les droites de la Figure 8.1 représentent les régressions linéaires calculées sur les données fortement bruitées en raison de la forte variabilité interannuelle. En observant cette figure, on remarque d'abord que la hauteur de pluie des événements semble augmenter davantage dans le temps pour la simulation *aev* que pour la simulation *aef*. En faisant l'hypothèse que la probabilité d'observer un DRU suite à un événement de pluie est corrélée à la hauteur de pluie générée par ce dernier, hypothèse à la base du modèle probabiliste développé, on peut s'attendre à une augmentation relative dans le temps de la fréquence et de la durée des DRU plus grande pour la simulation *aev* que pour la simulation *aef*. De plus, toujours pour la simulation *aev*, on observe une diminution légèrement moins importante du nombre d'événements de pluie, ce qui renforce cette conclusion. Ce graphique montre que la variabilité interne du climat influence la tendance à long terme.

## **8.2. Comparaison des résultats obtenus à partir des séries du MRCC simulées en période historique et des séries historiques observées**

Les événements de pluie formés en climat futur permettent d'estimer la fréquence et la durée des DRU en utilisant le modèle probabiliste. Par contre, il est important de vérifier la présence d'un biais entre les résultats simulés à partir des séries de pluie du modèle du MRCC en climat historique et ceux simulés à partir des séries de pluie historiques observées. Tel que mentionné précédemment, les données du MRCC doivent être interprétées avec prudence, d'où l'importance de les comparer avec les données historiques et de corriger un éventuel biais.

Afin de constater la présence ou non d'un biais, les données de précipitations historiques entre 1977 et 2009 de quatre stations météorologiques sont utilisées avec le modèle probabiliste, soit les stations de Thetford Mines (7028441), de Trois-Rivières (701HE63), de Granby (7022800) et de Shawinigan (7018000). Ces stations ont été retenues puisqu'elles présentent les séries de précipitations les plus longues et les plus complètes. Les résultats du modèle probabiliste, soit le nombre et la durée des DRU, sont pondérés en fonction du pourcentage de données disponibles par année s'il manque moins de 15% de données (Section 7.1). Les années avec plus de 15% de données manquantes ne sont pas considérées, ce qui représente entre 7 et 14 années sur 33 ans selon la série de précipitation historique considérée.

### 8.2.1. Biais de mai à octobre

Les résultats du modèle probabiliste à partir des séries historiques entre 1977 et 2009 ont été comparés avec ceux obtenus à partir des données du MRCC pour la même période. La Figure 8.2 (*aef02*) et la Figure 8.3 (*aev02*) illustrent la présence d'un biais entre les résultats estimés avec les quatre séries historiques observées et la série simulée par le MRCC. Il y a 120 points par graphique, soit 30 ODS x 4 séries de pluie historiques. Les valeurs simulées (série MRCC) sont obtenues en utilisant les séries simulées aux tuiles où se trouve chaque ODS. Une régression linéaire est calculée à partir de la méthode des moindres carrés. Le coefficient de détermination  $R^2$  et le RMSE sont indiqués dans chaque cas. Notons que le RMSE est calculé à partir de la droite 1 : 1. Ainsi, une réalisation sans biais se traduirait par une régression linéaire se rapprochant de la droite 1 : 1 représentée par la ligne noire sur les graphiques et un RMSE de 0.

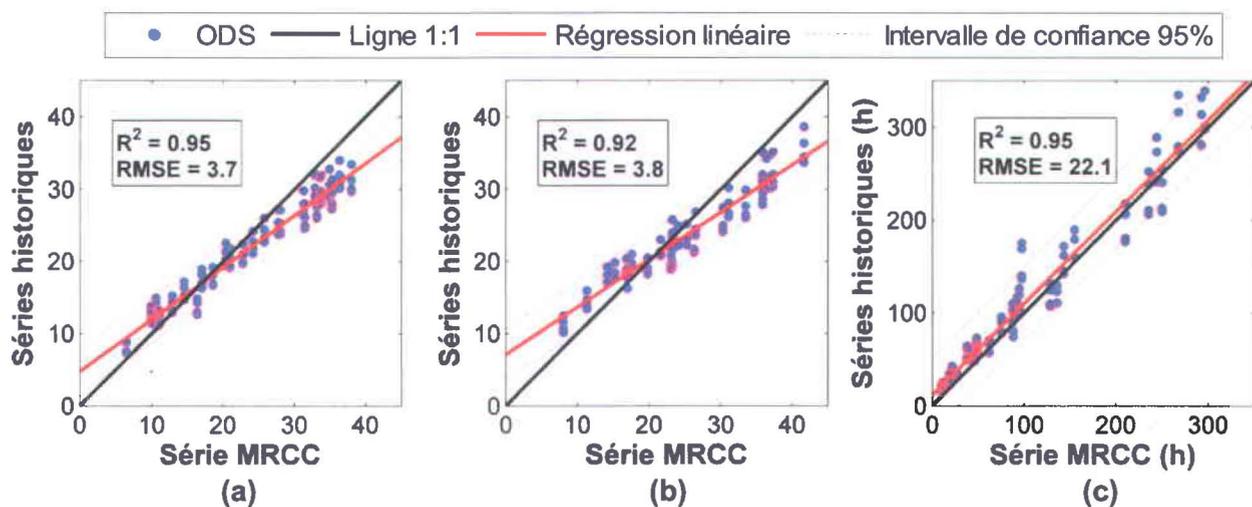


Figure 8.2 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC *aef02* entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) Nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste; b) Nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique; c) Durée totale annuelle moyenne (heures) des DRU simulés par le modèle probabiliste. Chaque point correspond à un ODS pour l'une des quatre séries de précipitations.

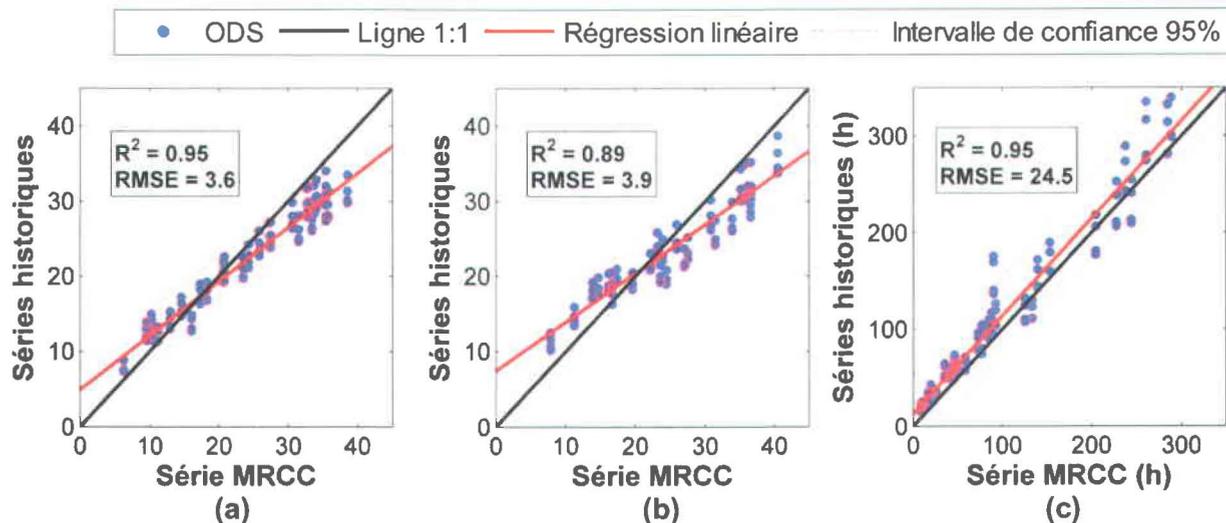


Figure 8.3 : Comparaison des résultats issus de quatre séries historiques observées et de la série du MRCC *aeV02* entre 1977 et 2009 pour les 30 ODS : a) Nombre annuel moyen de DRU simulés avec le modèle probabiliste; b) Nombre annuel moyen de DRU obtenus par la méthode de la hauteur critique; c) Durée totale annuelle moyenne (heures) des DRU simulés par le modèle probabiliste. Chaque point correspond à un ODS pour l'une des quatre séries de précipitations.

On remarque que les régressions linéaires des Figure 8.2a et 8.3a se distinguent de la droite 1 : 1 par une pente plus petite que 1 et une ordonnée à l'origine plus grande que 0. Ceci se traduit par une plus grande fréquence de DRU simulés avec le MRCC pour les ODS susceptibles de générer des DRU lors d'événements de pluie de faible intensité (i.e moyenne annuelle de DRU élevée) et à l'inverse, une plus faible fréquence de DRU simulés avec le MRCC pour les ODS susceptibles de générer des DRU lors de forts événements de pluie (i.e moyenne annuelle faible). En d'autres mots, le MRCC génère trop d'événements de faibles intensités d'où plus de DRU pour les ODS qui débordent souvent et trop peu d'événements de plus grandes intensités d'où moins de DRU pour les ODS qui débordent moins souvent. Cette observation n'est pas surprenante, puisqu'elle suit une tendance typique de plusieurs modèles climatiques qui tendent à minimiser l'intensité des événements de pluie extrêmes et à générer un plus grand nombre de pluies de faibles intensités (Sun *et al.*, 2007; Dai, 2006).

Un biais similaire est également observé avec la méthode de la hauteur critique (Figures 8.2b et 8.3b), avec un coefficient de détermination  $R^2$  légèrement moins élevé et une dispersion autour de la droite 1 : 1 légèrement plus grande (RMSE).

Les Figures 8.2c et 8.3c présentent le biais pour la durée totale annuelle moyenne des DRU simulés à l'aide de la série historique du MRCC et les séries historiques observées. À l'inverse de celle décrivant la fréquence, la pente de la régression est légèrement supérieure à 1, avec une ordonnée à l'origine supérieure à 0. La durée totale annuelle des DRU simulés à partir des

séries du MRCC est donc presque toujours inférieure à la durée totale annuelle simulée sur la série historique.

La présence d'un biais avec les séries historiques se constate en comparant les résultats de chaque série historique observée avec les résultats du MRCC en climat historique. Le Tableau 8.2 présente les coefficients de la régression linéaire permettant de qualifier le biais entre ces séries.

**Tableau 8.2 : Coefficients des régressions linéaires permettant de qualifier le biais entre les résultats du modèle probabiliste issus de quatre séries historiques observées et de la série *aet02* du MRCC en climat historique.**

	Coefficients $y = ax + b$	Station météorologique			
		Thetford Mines 7028441	Trois-Rivières 701HE63	Granby 7022800	Shawinigan 7018000
<b>Fréquence</b> Modèle probabiliste	a	0,76	0,70	0,71	0,71
	b	5,41	4,03	5,39	4,32
<b>Fréquence</b> Méthode hauteur critique	a	0,72	0,62	0,65	0,63
	b	7,55	7,09	7,23	6,82
<b>Durée totale</b>	a	1,09	0,92	1,03	0,91
	b	13,86	9,95	13,76	8,95

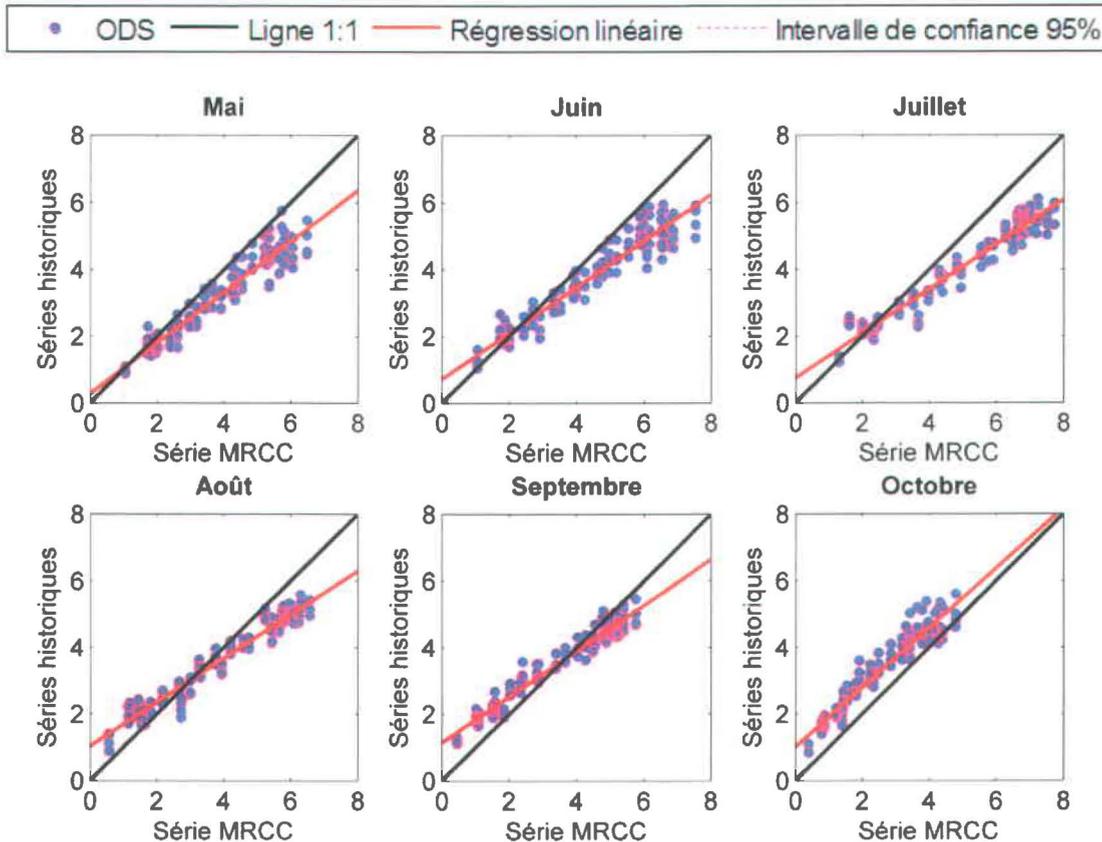
Puisque les coefficients de la régression linéaire qualifiant les biais sont approximativement similaires entre ces quatre séries, on suppose qu'il serait de même pour d'autres séries historiques du Sud du Québec. Cette observation est aussi valable avec la série *aev02* du MRCC. Ainsi, les résultats du modèle probabiliste issus du MRCC sont corrigés en utilisant la régression linéaire tirée de la comparaison effectuée avec les quatre séries historiques combinées.

### 8.2.2. Biais mensuel

En prévision d'analyses subséquentes sur une base mensuelle, il est important de considérer le biais propre à chaque mois pour appliquer les corrections nécessaires aux résultats mensuels des simulations de DRU. La même méthodologie est ainsi appliquée sur les données simulées mois par mois.

La Figure 8.4 illustre le biais observé pour chacun des mois étudiés, soit de mai à octobre. On remarque des différences marquées entre les mois puisque la pente et l'ordonnée à l'origine de

chaque régression linéaire varie considérablement d'un mois à l'autre, de même que la dispersion autour de cette dernière. Alors qu'un redressement de la droite de régression corrigerait le biais pour la plupart des mois, c'est plutôt une translation de la droite qui serait principalement nécessaire pour le mois d'octobre. Il semble donc que les pluies automnales des séries du MRCC génèrent globalement pour tous les ODS moins de DRU que les pluies d'octobre simulées à partir des séries historiques.



**Figure 8.4 : Comparaison des résultats issus de quatre séries de pluie historiques et de la série du MRCC *aet02* entre 1977 et 2009 pour le nombre mensuel moyen de DRU simulés avec la méthode probabiliste pour les 30 ODS.**

Le comportement mensuel des biais en optant pour la méthode de la hauteur critique est similaire à celui du modèle probabiliste et est illustré à l'Annexe E.

Les biais associés à la durée totale mensuelle des DRU (Figure 8.5) présentent des comportements différents de ceux concernant la fréquence (Figure 8.4). Pour la plupart des mois, la pente de la régression tend à se confondre avec la droite 1 : 1 mais est légèrement translaturée d'un côté comme de l'autre de cette dernière. Le mois d'octobre, quant à lui, est

fortement biaisé, mais peu dispersé, alors que le mois de juillet est peu biaisé mais fortement dispersé.

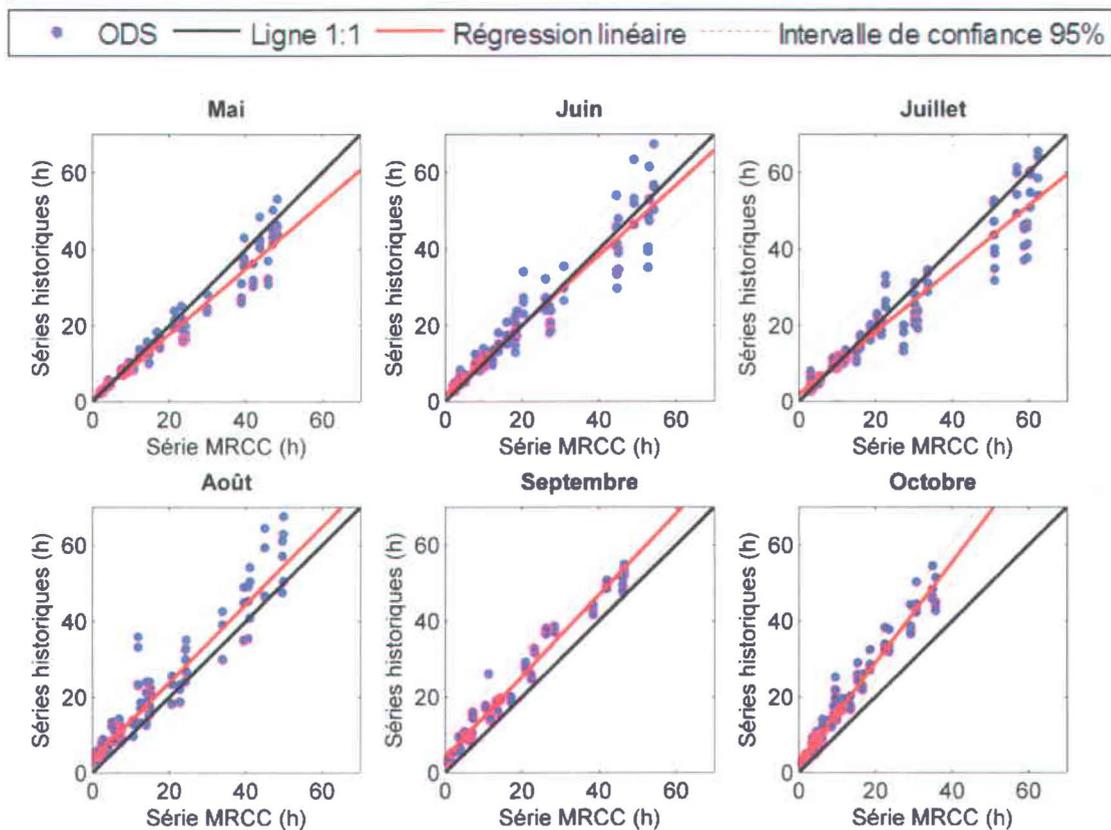


Figure 8.5 : Comparaison des résultats issus de quatre séries de pluie historiques et de la série du MRCC *aet02* entre 1977 et 2009 pour la durée totale mensuelle moyenne des DRU simulés avec la méthode probabiliste pour les 30 ODS.

Une correction sur une base mensuelle est donc totalement justifiée, en raison des importantes variations observées entre les mois, suite à l'analyse des Figure 8.4 et 8.5.

### 8.3. Correction du biais

Pour chacune des simulations *aet02*, *aev02*, *aev03* et *aev03*, les paramètres  $m$  et  $b$  des différentes régressions linéaires des Figures 8.2 à 8.5 sont les indicateurs des corrections à effectuer sur les résultats du modèle probabiliste appliqué aux séries du MRCC. En procédant ainsi, on suppose que le biais observé en climat historique demeure inchangé en climat futur.

Pour chaque résultat annuel ou mensuel tiré de l'application du modèle probabiliste à partir des séries du MRCC, une correction est effectuée en appliquant l'Équation (8.1).

$$y'_i = y_i m + b \quad (8.1)$$

où

$y'_i$  = Résultat avec correction de biais (Fréquence ou Durée (h))

$y_i$  = Sorties du modèle probabiliste ou méthode hauteur critique avec MRCC

$m$  = Pente de la droite de régression

$b$  = Ordonnée à l'origine de la droite de régression

$i$  = Année ou mois

La variable  $y_i$  représente soit le nombre annuel (Section 8.2.1) ou mensuel (Section 8.2.2) de DRU simulés par la méthode probabiliste ou la méthode de la hauteur critique avec une série du MRCC, soit la durée totale annuelle ou mensuelle des DRU également simulés.

Au final, on obtient une base de données comprenant, pour chaque année entre 1961 et 2100 et pour chaque ODS, le nombre de DRU estimés par le modèle probabiliste, leur durée totale en nombre d'heures et le nombre de DRU estimés par la méthode de la hauteur critique, le tout après correction du biais induit par l'application du modèle climatique.

#### 8.4. Méthodologie pour estimer la variation relative (%) de la fréquence et de la durée des DRU en climat futur

Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les DRU, le changement dans la fréquence et la durée des DRU dans le temps est évalué à partir des moyennes d'une période dite historique et de périodes futures. Les périodes sont divisées comme l'indique le Tableau 8.3.

**Tableau 8.3 : Définition des périodes.**

#	Période	Années
(1)	Présent	1961-1990
(2)	Futur proche	2040-2069
(3)	Futur lointain	2070-2100

### 8.4.1. Tendances de la fréquence et de la durée des DRU entre 1961 et 2100

En appliquant le modèle probabiliste sur les séries du MRCC et en corrigeant le biais, on obtient une estimation de la fréquence et de la durée totale des DRU pour la période 1961 à 2100 pour chaque ODS. La tuile du MRCC recouvrant le territoire de chacun des ODS est utilisée avec le modèle probabiliste et la méthode de la hauteur critique, pour un total de 12 tuiles. Pour illustrer l'ensemble des résultats des 30 ODS, la moyenne de ces derniers est calculée et illustrée à la Figure 8.6. Ces graphiques permettent de rapidement apprécier les changements attendus en ce qui a trait à la fréquence et la durée des DRU. Le nombre annuel moyen de DRU reste plutôt stable dans le temps. La méthode de la hauteur critique quant à elle présente des variations interannuelles légèrement plus importantes que le modèle probabiliste. Pour ce qui a trait à la durée totale des DRU, on remarque que la pente de la régression est positive, indiquant vraisemblablement que la durée totale annuelle des DRU risque d'augmenter en climat futur. Un test statistique de Mann-Kendall a été appliqué sur les données de chaque graphique de la Figure 8.6 pour vérifier la stationnarité des régressions linéaires (Kundzewicz et Robson, 2004). En résumé, la Figure 8.6 indique une augmentation significative de la durée des DRU (Figure 8.6c), sans augmentation ou diminution significative de la fréquence (Figures 8.6a et 8.6b).

Afin d'analyser de façon quantitative les changements prévus dans le nombre et la durée des DRU, des variations relatives sont calculées entre les différentes périodes en vertu de l'Équation (8.2). Cette dernière est appliquée sur chaque ODS individuellement.

$$V(\%) = \frac{\bar{y}'_{Hp} - \bar{y}'_{Hf}}{\bar{y}'_{Hp}} \times 100 \quad (8.2)$$

où

$V$  = Variation (%) pour la fréquence ou la durée

$\bar{y}'_{Hp}$  = Valeur moyenne pour la période historique

$\bar{y}'_{Hf}$  = Valeur moyenne pour la période future

Les valeurs que prennent les variables  $\bar{y}'$  correspondent, pour chaque période, à : 1) la moyenne annuelle du nombre de DRU et 2) la moyenne des durées totales annuelles des DRU, à chaque ODS.

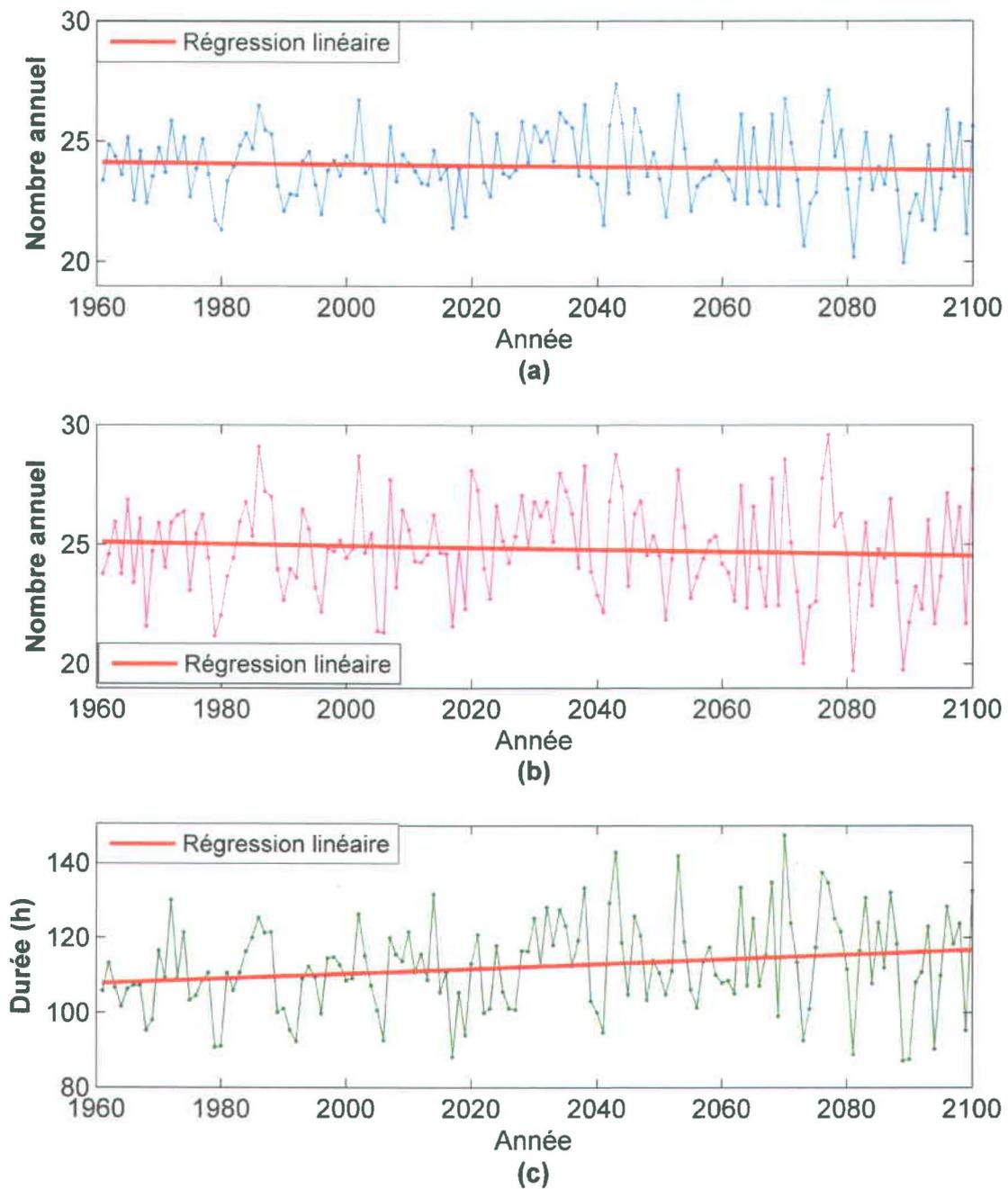


Figure 8.6 : Moyenne du nombre annuel de DRU pour les 30 ODS et les deux séries *aev02* et *aef02* obtenue à partir de : a) la méthode du modèle probabiliste; b) la méthode de la hauteur critique; et c) moyenne de la durée totale des DRU pour les 30 ODS. La régression linéaire indique la tendance générale des variations interannuelles (ligne rouge).

## 8.5. Variation relative de la fréquence et de la durée des DRU pour la période de mai à octobre entre 1961-1990 et 2070-2100

Pour chacune des simulations (*aet02*, *aev02*, *aet03* et *aev03*), les variations relatives pour la fréquence et la durée entre les périodes historiques et futures sont calculées pour chacun des 30 ODS et présentées à l'Annexe F sous forme de tableaux (*aet02* et *aev02* seulement). Ainsi, on a, pour le seuil de 0,2 mm par exemple, 60 variations relatives distinctes, soit 30 pour la simulation *aet02* et 30 pour la simulation *aev02*. L'ensemble de ces valeurs est présenté graphiquement aux Figures 8.7 et 8.8.

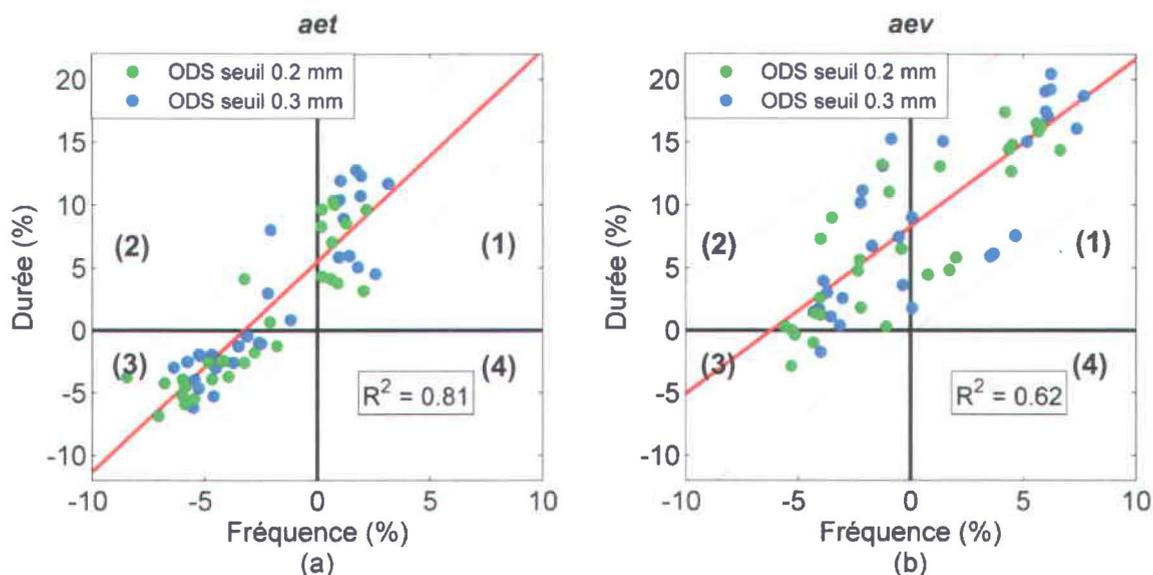


Figure 8.7 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les 30 ODS pour les deux seuils considérés (0,2 mm et 0,3 mm) pour la simulation : a) *aet* et b) *aev*. Le numéro des cadrans cartésiens est indiqué sur chaque graphique. Les lignes rouges indiquent la régression linéaire avec un intervalle de confiance de 95%.

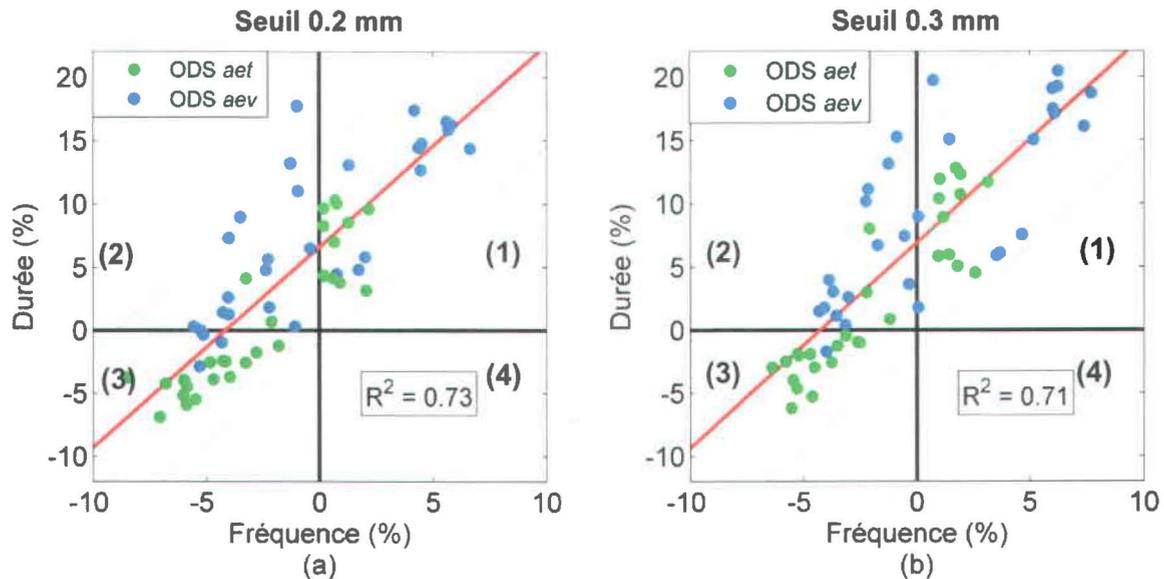


Figure 8.8 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les 30 ODS pour les simulations *aet* et *aev* pour un seuil de : a) 0,2 mm et b) 0,3 mm. Le numéro des cadrans cartésiens est indiqué sur chaque graphique. Les lignes rouges indiquent la régression linéaire avec un intervalle de confiance de 95%.

La Figure 8.7 permet de vérifier l'impact du choix du seuil lors de la construction des événements de pluie. En superposant les résultats sur le même graphique, on remarque que le fait d'utiliser un seuil de 0,3 mm, au lieu du seuil de 0,2 mm, n'influence pas les résultats de façon significative.

Les mêmes variations relatives peuvent être illustrées de façon à comparer les simulations entre elles. Autant pour le seuil de 0,2 mm (Figure 8.8a) que pour le seuil de 0,3 mm (Figure 8.8b), on remarque la présence d'un certain écart entre les simulations *aet* et *aev*. En effet, alors que la majorité des variations relatives pour les ODS se trouvent dans les cadrans (1) et (2) pour la simulation *aev* (points bleus), les résultats de la simulation *aet* (points verts) sont plutôt dispersés dans les cadrans (1) et (3). Ce résultat indique une augmentation plus importante de la durée totale des DRU pour l'ensemble des ODS entre les périodes historiques et futures lorsque la simulation *aev* est considérée.

Pour la simulation *aet*, on remarque, à l'exception d'un ODS, qu'une diminution de la fréquence s'accompagne d'une diminution de la durée totale des DRU de façon généralement linéaire, ce qui s'observe dans le cadran (3) des Figures 8.7a et 8.8a. On remarque également plusieurs ODS où l'augmentation de la fréquence est négligeable mais où la durée totale augmente. On en déduit donc que, pour ces cas, les événements de pluie génèrent des DRU d'une durée plus

longue pour la période 2070-2100 que pour la période 1961-1990. D'ailleurs, le fait que les ordonnées à l'origine des régressions linéaires soient positives indique que, globalement, la durée moyenne des DRU augmente.

Pour la simulation *aev*, représentée par les points bleus de la Figure 8.8a et 8.8b et l'ensemble des points de la Figure 8.7b, la durée totale augmente dans presque tous les cas, inconditionnellement à l'augmentation de la fréquence des DRU. Somme toute, en considérant que les deux simulations *aef* et *aev* sont équiprobables, la Figure 8.8a montre la présence d'une tendance linéaire avec un coefficient de détermination de 0,73, suggérant une corrélation entre la variation relative de la fréquence et celle de la durée totale des DRU. Par contre, il est intéressant de noter que l'impact des changements climatiques sur les DRU ne se traduit pas toujours par une augmentation de la fréquence et de la durée de ces derniers, ce qui est en accord avec les conclusions de la Figure 8.6. Alors que les résultats suggèrent une augmentation de la fréquence et de la durée des DRU pour certains ODS, ils suggèrent également, à l'inverse, une diminution de la fréquence et de la durée des DRU pour d'autres ODS.

La Figure 8.9 résume, de façon globale, les changements estimés quant à la fréquence annuelle des DRU et à leur durée totale, entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100. Les points représentent l'ensemble des 30 ODS dans le cas d'un seuil de 0,2 mm (les résultats pour le seuil de 0,3 mm ne sont pas présentés puisqu'ils sont sensiblement semblables à ceux du seuil de 0,2 mm). La fonction cumulative des variations relatives aux ODS est calculée à partir de l'estimateur empirique de Cunnane (Helsel et Hirsch, 1992) :

$$P_i = \frac{(i - 0.4)}{(n + 0.2)} \quad (8.3)$$

$P_i$  = Estimateur de Cunnane

$i$  = Rang

$n$  = Nombre de données

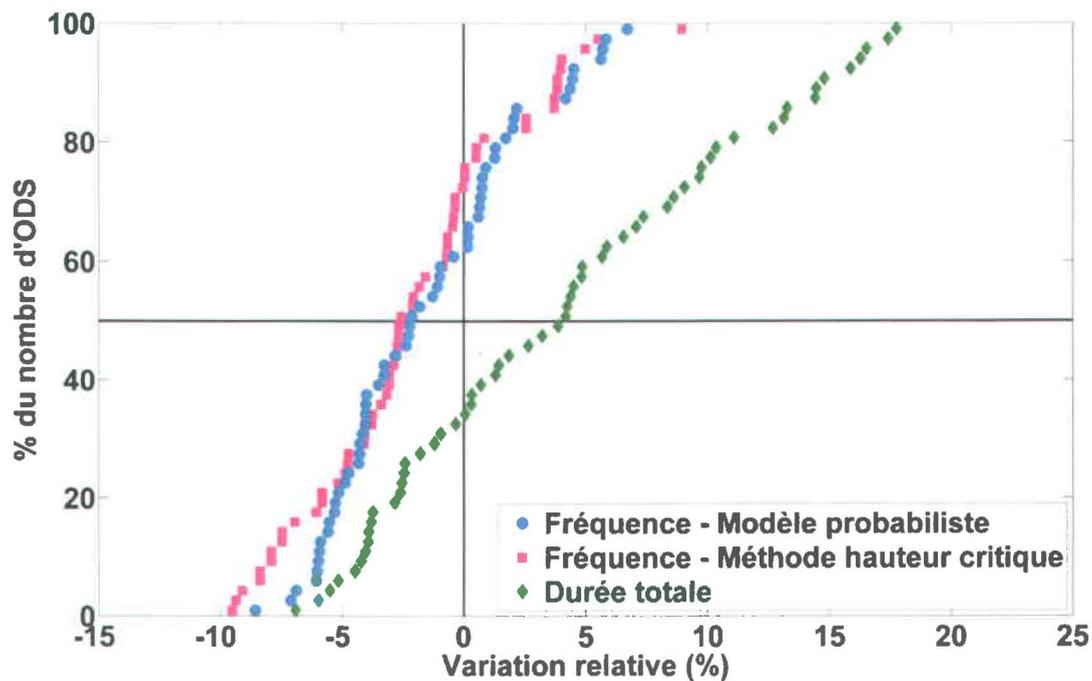


Figure 8.9 : Fonction cumulative des variations relatives entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations aet et aev pour un seuil de 0,2 mm.

La Figure 8.9 montre que des augmentations de fréquence des DRU sont observées pour 24% des ODS avec la méthode de la hauteur critique et 37% avec la méthode du modèle probabiliste, alors que les durées totales augmentent pour 65% des ODS. C'est donc dire que, dans plusieurs cas, le nombre de DRU sera plus faible alors que la durée totale aura augmenté. Notons également que les deux méthodes de calcul de la fréquence des DRU, soit la méthode probabiliste et la méthode de la hauteur critique, offrent des résultats semblables au final.

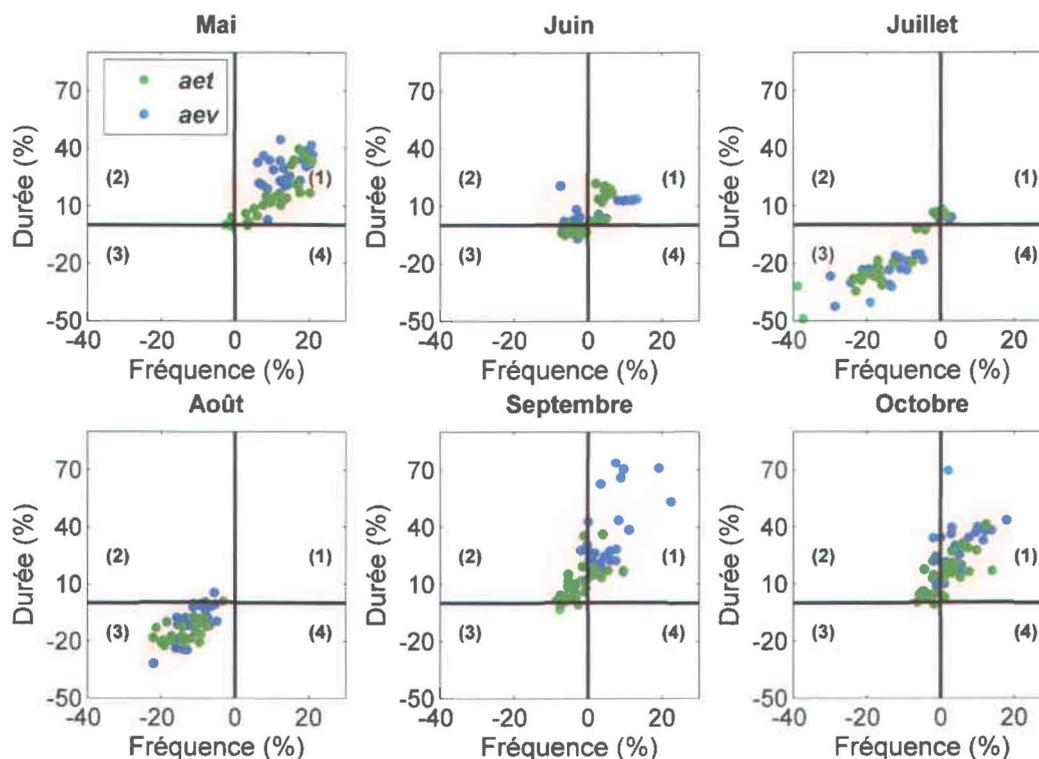
Le Tableau 8.4 regroupe les variations relatives minimales et maximales observées et tirées de la Figure 8.9, pour l'ensemble des ODS, entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100. La dispersion entre les ODS est légèrement plus marquée avec la méthode de la hauteur critique qu'avec le modèle probabiliste, vu l'écart plus grand entre la variation minimale et maximale qui sont respectivement de 18,5% et 15,1%.

**Tableau 8.4 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 minimale, maximale et moyenne pour les 30 ODS et pour les simulations *aet* et *aev* avec un seuil de 0,2 mm.**

Variables	Variation relative minimale	Variation relative maximale	Écart	Moyenne des 30 ODS
Fréquence modèle probabiliste	- 8,5 %	+ 6,6 %	+ 15,1%	-1,5 %
Fréquence méthode hauteur critique	- 9,5 %	+ 9,0 %	- 18,5 %	-2,1 %
Durée totale	- 6,8 %	+ 17,7 %	+ 24,5 %	+ 4,2 %

## 8.6. Variation relative (%) sur une base mensuelle

Dans la partie précédente, les débordements aux ODS était analysé en tenant compte de l'ensemble des précipitations survenant entre les mois de mai et d'octobre. Dans la partie suivante, les DRU sont estimés à partir des événements de pluie de chaque mois, de façon à mettre en évidence les variations intra annuelles des caractéristiques des DRU. La Figure 8.10 regroupe les variations relatives de la fréquence et de la durée entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour les simulations *aet02* et *aev02* combinées. Chaque point correspond à un ODS, à la manière de la Figure 8.8a, mais les résultats sont regroupés par mois.

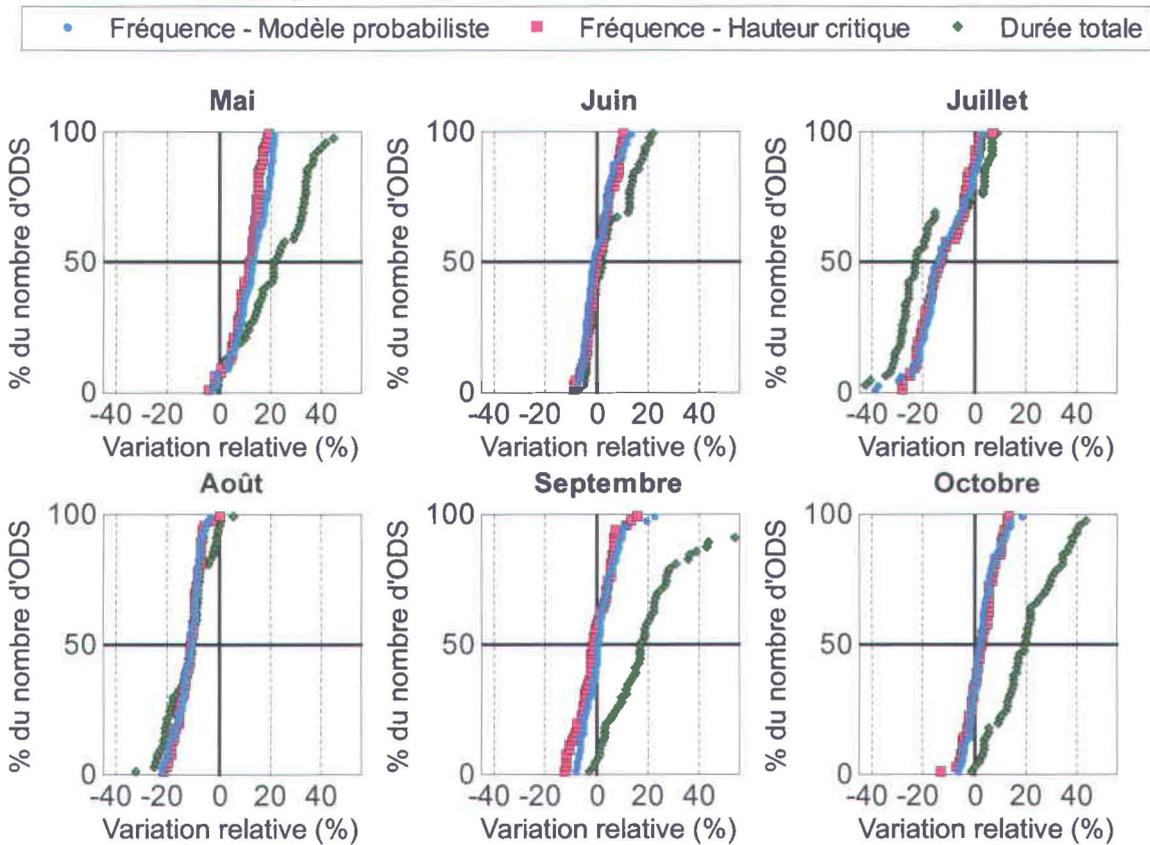


**Figure 8.10 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence avec le modèle probabiliste et de la durée totale des DRU à chaque ODS pour chaque mois, pour les simulations *aet02* et *aev02*. Les zones ombragées sont ajoutées à titre indicatif pour faciliter la lecture de la localisation générale des points.**

On note généralement une augmentation de la fréquence et de la durée des DRU pour les mois de mai et d'octobre. À l'inverse, les mois chauds d'été, soit juillet et août, présentent une diminution de la fréquence et de la durée à presque tous les ODS. Pour les mois de juin et septembre, le signal quant à la fréquence des DRU est moins important, puisque le nombre de DRU diminue pour certains ODS alors qu'il augmente pour d'autres. On note également un écart important entre les simulations *aet* et *aev* pour le mois de septembre, représenté par les positionnements des points bleus et verts sur la Figure 8.10. Le Tableau 8.5 résume les tendances observées à la Figure 8.10.

**Tableau 8.5 : Variation relative (%) moyenne entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 pour les mois de mai à octobre pour les 30 ODS et pour les simulations aef et aev avec un seuil de 0,2 mm.**

Mois	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre
Fréquence modèle probabiliste	12 %	0 %	-13 %	-12 %	1 %	3 %
Fréquence méthode hauteur critique	10 %	1 %	-13 %	-12 %	0 %	3 %
Durée totale	23 %	5 %	-17 %	-12 %	22 %	21 %



**Figure 8.11 : Fonction cumulative pour chaque mois de la période mai à octobre des variations relatives entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée des DRU pour les simulations aef et aev combinées pour un seuil de 0,2 mm.**

La distribution des variations relatives des ODS est présentée, mois par mois, sur la Figure 8.11. La position des points est calculée à partir de l'Équation (8.3). On remarque encore une fois une grande distinction entre les mois de juillet et août et ceux de mai et octobre. Il y a une augmentation générale pour les mois de mai et octobre, une diminution générale pour les mois

de juillet et d'août de même que des comportements plutôt mixtes pour les mois de juin et septembre. On arrive à ce constat en regardant la proportion des courbes qui se trouvent de part et d'autre de la ligne de changement de signe située à 0% en abscisse. Ainsi, pour les mois de juin et septembre, les ODS sont répartis à parts égales entre une variation relative positive et négative. On note également sur la Figure 8.11 que les variations relatives minimales et maximales à l'échelle mensuelle sont beaucoup plus grandes que celles calculées pour l'ensemble de la période de mai à octobre.

### 8.7. Variations relatives de la fréquence et de la durée des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2040-2069

Dans la littérature, nombreuses sont les études qui cherchent à estimer les impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau d'ici la fin du siècle. Les climats se définissant par une observation de la météorologie à long terme, alors que la durée de vie utile des infrastructures est souvent d'un ordre de grandeur plus petit. Même si les impacts pour la période 2040-2069 peuvent être moins importants que pour la période 2070-2100, il demeure intéressant de les estimer (Nie *et al.*, 2009). La Figure 8.12 illustre les résultats obtenus en considérant les périodes 2040-2069 et 2070-2100 avec le modèle probabiliste.

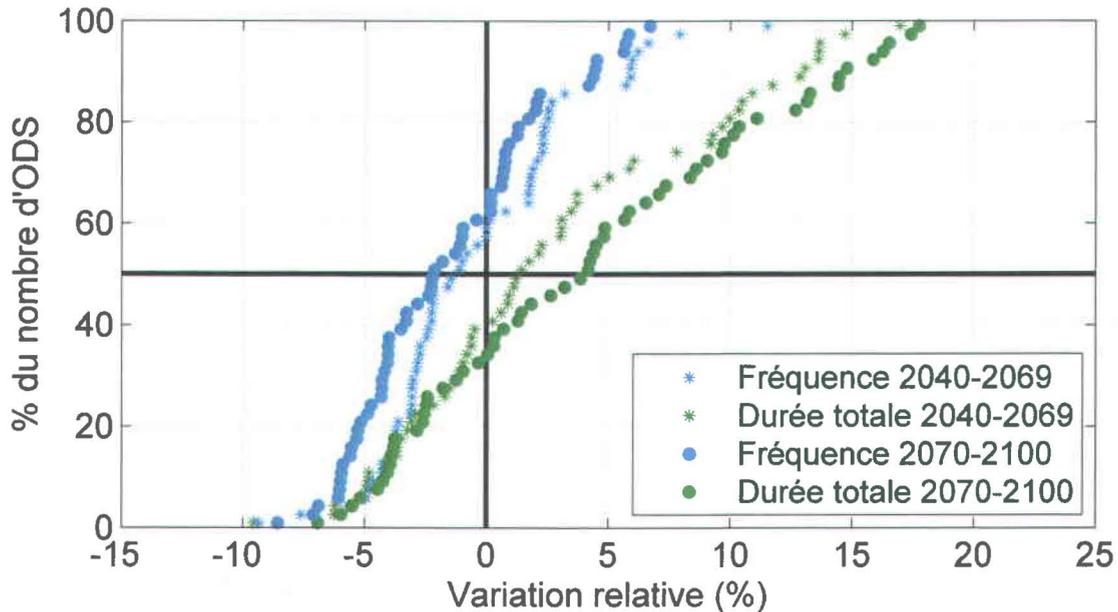


Figure 8.12 : Fonction cumulative des variations relatives entre la période 1961-1990 et les périodes 2040-2069 et 2070-2100 pour la fréquence et la durée des DRU simulés par la méthode du modèle probabiliste, pour les simulations aet02 et aev02 combinées entre les mois de mai et octobre.

On remarque que plus les projections climatiques utilisées sont lointaines dans le temps, plus les points de la fréquence des DRU se décalent vers la gauche, résultant ainsi en une diminution accentuée du nombre de DRU pour la période 2070-2100. En effet, pour la période 2040-2069, on note une diminution de la fréquence annuelle moyenne de DRU dans 58% des ODS alors que ce nombre augmente à 64% au cours des 30 années suivantes. Ainsi, on constate que l'impact des changements climatiques vers une diminution du nombre de DRU s'accroît avec le temps.

L'inverse s'observe en ce qui a trait à la durée totale annuelle des DRU. Le décalage vers la droite des points verts sur la Figure 8.12 suggère une diminution du nombre d'ODS pour lesquels on observe une variation relative négative, passant de 40% pour la période 2040-2069 à 34% pour la période 2070-2100. Ainsi, la durée totale des DRU sera plus grande à la fin du siècle que pour la période 2040-2069.



## **CHAPITRE 9 : DISCUSSION**

### **9.1. Sources d'incertitude**

Plusieurs sources d'incertitude sont à considérer lors du travail d'analyse et d'interprétation des résultats. Plusieurs hypothèses ont également été formulées afin de mener les analyses à leur terme. Dans la section suivante, il sera question des principales sources d'incertitude qui ont dû être prises en compte dans l'interprétation des résultats de ce projet.

#### **9.1.1. Les données**

L'ensemble de la méthodologie est fondée sur des données de pluviométrie et de DRU. Ces dernières n'étant pas soumises à un contrôle de qualité certifié, une certaine vigilance est requise quant à leur utilisation. À cet effet, il est pertinent de préciser à nouveau que la date et l'heure des DRU ne sont pas automatiquement enregistrées par certains instruments de mesure, mais que ces derniers ne font que comptabiliser le nombre total d'heures où il y a un DRU et que la tâche d'interpréter ces résultats revient à l'opérateur de chaque station d'assainissement. Or, la qualité de l'association DRU-pluie est directement liée à la qualité des données.

Il est important de noter que l'ensemble de cette étude repose sur l'analyse d'ODS qui débordent plus de 20 fois par année, selon un critère établi à la section 4.2.2. Ce choix est nécessaire afin de pouvoir développer le modèle probabiliste à partir d'un nombre minimal de DRU. Les conclusions de cette étude ne peuvent donc pas s'appliquer aux ODS qui débordent peu actuellement, c'est-à-dire moins de 20 fois par année, car le modèle probabiliste n'a pu être appliqué sur ceux-ci.

De plus, les données de DRU à partir desquelles le modèle probabiliste a été développé ne comprennent que trois années, soit 2007, 2008 et 2009. Cela rend plus difficile la prise en compte de la variabilité interannuelle dans l'évolution de la fréquence et de la durée des DRU puisque les modèles développés risquent de ne couvrir qu'une plage limitée de la climatologie régionale. Pour apprécier la robustesse du modèle développé, une analyse de la pluviométrie a été effectuée pour savoir où les régimes de pluie de 2007 à 2009 se trouvent par rapport à la

climatologie du passé récent (ex : années sèches, fortes averses etc.) Pour ce faire, la moyenne annuelle du total de pluie tombée entre mai et octobre, au cours des 30 dernières années pour les 13 stations météorologiques utilisées dans le projet, a été comparée avec le total annuel de 2007, 2008 et 2009. On note une année 2007 légèrement plus humide (+4%), une année 2008 considérablement plus humide (+18%) et une année normale en 2009.

### **9.1.2. L'association DRU - Pluie**

L'algorithme d'association DRU-pluie a été développé et ajusté suite à de nombreux essais nécessitant des analyses plus détaillées des associations, et ce, cas par cas. Il se peut que certains DRU aient été associés à un événement de pluie qui n'en était pas directement ou uniquement la cause, aux dépens d'un autre événement de pluie. Par contre, pour limiter ces situations, les résultats d'association des 30 ODS ont été vérifiés et corrigés manuellement à quelques reprises selon la procédure présentée à l'Annexe A.

De plus, il a été choisi de ramener chaque événement de pluie à la fin de la précipitation horaire dans l'algorithme d'association DRU-pluie (Équation 5.1). Il serait intéressant de ramener plutôt l'événement de pluie au centroïde de l'hétérogramme et de vérifier l'impact sur les associations.

### **9.1.3. Représentativité de la pluie mesurée**

La qualité de l'association DRU-pluie est également affectée par une importante source d'incertitude, soit la représentativité de la hauteur de pluie mesurée à la station météorologique à proximité par rapport à la pluie réellement tombée sur le territoire drainé par l'ODS. En effet, la distance entre l'ODS et la station météorologique peut aller jusqu'à 20 km dans certains cas, induisant ainsi des incertitudes quant à la valeur réelle de pluie tombée à l'endroit de l'ODS et du réseau d'égout. Par exemple, une importante pluie mesurée à la station météorologique peut être à peine perçue à l'endroit de l'ODS et de son territoire desservi, ne causant ainsi pas de DRU. À l'inverse, un orage important directement sur le bassin drainé par l'ODS peut causer un DRU et n'être que partiellement, voire aucunement, détecté par la station météorologique se trouvant à quelques kilomètres. Cette situation pourrait expliquer la présence de quelques DRU non associés, i.e les situations où aucun événement de pluie n'est enregistré durant les 48 heures précédant et suivant l'occurrence du DRU.

La Section 5.6 évalue l'effet de la distance entre l'ODS et la station météorologique sur la qualité des associations DRU-pluie. À la lumière de ces résultats, il n'a pas été possible de conclure que la distance était un facteur déterminant. Par contre, dans un monde idéal, il serait intéressant de refaire cette analyse avec des stations météorologiques localisées précisément sur les territoires drainés par chacun des ODS afin d'avoir une mesure plus directe de la pluie tombée à ces endroits. Il serait également intéressant de relaxer le critère de la distance maximale entre l'ODS et la station météorologique (20 km) dans la sélection des ODS et de vérifier l'impact sur la qualité des associations DRU-pluie. La distance entre l'ODS et la station météorologique associée pourrait ainsi être un facteur d'incertitude plus approfondi.

#### **9.1.4. Conditions initiales**

Un autre facteur qui influence les associations DRU-pluie et la corrélation de la durée des DRU avec la pluie est l'ensemble des conditions du territoire drainé par l'ODS antérieures à une pluie donnée. L'hypothèse de base veut que lorsque le terrain est partiellement saturé avant une pluie, ses capacités de rétention et d'infiltration limitées rendent plus probable l'éventualité d'un DRU. Bien que les résultats aient montré que l'ajout de la durée antérieure du temps sec dans les modèles d'estimation de la durée des DRU ne permettait pas d'améliorer les régressions, il reste que ce facteur est sans contredit une source d'incertitude qui, au final, peut influencer les DRU.

#### **9.1.5. Développement des modèles probabilistes**

Pour chaque ODS, des équations permettant d'estimer les DRU sont développées à partir de données observées sur le terrain entre 2007 et 2009. La justesse de ces modèles n'est valable que si l'on fait l'hypothèse de stationnarité pour la configuration et l'opération du réseau. En effet, une intervention effectuée sur des stations d'assainissement ou des ODS à l'étude au cours de ces années pourrait influencer leur réponse suite à un événement de pluie et rendre inadéquat le modèle développé. Les exigences environnementales toujours plus strictes et les infrastructures vieillissantes font en sorte qu'il est probable que des interventions aient été réalisées sur le terrain. Des informations à ce sujet ne sont toutefois pas compilées dans SOMAE. Néanmoins, cet aspect a également été considéré lors de l'analyse individuelle des associations et aucun indice témoignant d'un changement dans les configurations des réseaux

n'a pu être mis en évidence. Un tel changement se serait traduit par des comportements très différents d'une année à l'autre, par exemple.

### **9.1.6. Modèle climatique du MRCC**

L'impact des changements climatiques sur les DRU est évalué en considérant seulement deux simulations du MRCC qui reposent sur un seul scénario probable d'émission de GES. Ainsi, des résultats différents, en ce qui concerne la variation relative de la fréquence et de la durée de DRU en climat futur, pourraient être obtenus en considérant d'autres scénarios d'émission de GES, d'autres MGC comme pilote et d'autres MRC. L'évolution future des émissions de GES, qui dépend en bonne partie des choix socio-économiques qui seront faits dans le futur, est une première source d'incertitude à considérer. Une seconde source d'incertitude tient aux modèles eux-mêmes à leur habilité à simuler les processus responsables du climat. À ce chapitre, les connaissances demeurent incomplètes et la puissance de calcul disponible reste limitée. D'autres incertitudes résultent également de la variabilité naturelle présente à la fois dans le système climatique historique et dans les modèles de climat (Macher-Poitras, 2011).

Toutes ces incertitudes doivent être prises en compte lorsque l'on interprète les résultats de la présente étude. Il faut bien comprendre qu'on ne peut prédire le futur, mais que l'on peut évaluer les probabilités de l'occurrence de certains événements. Ainsi, au meilleur des connaissances actuelles dans le domaine des changements climatiques et avec les données de simulations climatiques disponibles dans le cadre de cette étude, un scénario possible d'impact sur les DRU a pu être dessiné et interprété.

## **9.2. Méthodologie**

### **9.2.1. Choix de la caractéristique hauteur de pluie pour estimer la durée et la fréquence des DRU**

Les différentes analyses de corrélation avec les six caractéristiques de pluie permettent de conclure que la hauteur de pluie de l'événement est la variable la mieux corrélée à la durée des DRU. Cette observation va à l'encontre de l'hypothèse intuitive qui veut qu'un DRU serait mieux expliqué en utilisant plus d'une caractéristique, comme la hauteur de pluie et la durée de l'événement de pluie, afin de conserver davantage d'informations sur le système

météorologique et ainsi mieux caractériser le DRU. Or, à la lumière des résultats, l'ajout d'une seconde caractéristique aux analyses de corrélation ne permet pas de mieux estimer leur durée. De plus, considérant que l'intensité moyenne d'un événement de pluie met *de facto* la hauteur de pluie et la durée de l'événement de pluie en relation, on pourrait s'attendre à ce que cette caractéristique puisse servir d'indicateur pour estimer la durée du DRU, ce qui n'est pas le cas, à la lumière des résultats.

Notons que de bons résultats de corrélation sont obtenus par l'utilisation simple de la caractéristique du nombre d'heures où l'intensité  $> 2$  mm/h. Effectivement, cette caractéristique, peu commune, offre tout de même un minimum d'informations sur l'importance de l'événement de pluie, car elle permet, d'une certaine façon, d'intégrer à la fois la hauteur et la durée de l'événement de pluie. Cependant, elle ne se démarque pas de façon significative par rapport à la hauteur d'eau seule. De plus, pour un gestionnaire désirant estimer la probabilité d'occurrence d'un DRU et sa durée, une démarche simple et rapide est souhaitable, ce qui n'est pas nécessairement le cas avec cette variable. En effet, il est beaucoup plus facile de chercher à connaître la hauteur d'eau d'un événement que le nombre d'heures où l'intensité horaire  $> 2$  mm/h, car l'obtention de cette donnée nécessite une instrumentation et un suivi plus complexes dans certains cas.

Pour ces raisons, il a été déterminé que la hauteur d'eau d'un événement de pluie est la caractéristique la plus représentative des DRU. La littérature dans le domaine abonde dans le même sens, puisqu'elle aborde généralement la problématique des DRU en faisant d'abord référence à la hauteur d'eau des événements de pluie (Section 3.2).

### **9.2.2. Choix de la fonction sigmoïde pour développer le modèle probabiliste**

Une fonction sigmoïde a été utilisée pour développer le modèle probabiliste à partir des données de DRU observés. Cette fonction a été choisie car elle possède toutes les caractéristiques désirées, entre autres qu'elle ne passe pas obligatoirement par (0,0) et qu'elle tend vers 1 lorsque  $h \rightarrow \infty$  (Section 5.4.2). Plusieurs essais ont été effectués avec d'autres distributions (Rayleigh, Maxwell-Boltzmann, Gamma) pour vérifier l'ajustement du modèle de façon qualitative. Il serait intéressant de vérifier si des tests d'adéquation des distributions

paramétriques avec les observations de DRU auraient pu être effectués pour être plus rigoureux. Malgré tout, nous supposons que le choix final aurait été fort probablement le même en considérant tous les essais effectués avant de choisir la fonction sigmoïde.

### **9.2.3. Durée vs volume**

Ce projet ne traite pas des volumes déversés lors des DRU, qualifiant plutôt leur importance par leur durée en nombre d'heures. Tel qu'indiqué au Chapitre 2, au Québec, il n'est toujours pas possible d'obtenir de l'information concernant les volumes déversés durant les épisodes de DRU dans les différents milieux récepteurs. Pourtant, l'impact des DRU sur ces milieux est sans doute mieux représenté par le volume des DRU que par leur durée. La gestion des DRU par les municipalités est un enjeu actuel appelé à évoluer au cours des années à venir. Pour aider les gestionnaires de réseaux à intégrer le suivi des volumes déversés, des études sur le sujet visent à déterminer la meilleure option technique, d'un point de vue rendement/coût, qui, à terme, se traduirait par le développement d'un modèle hydraulique et hydrologique simplifié de leurs ODS, afin d'atteindre leurs objectifs de rejet (voir p. ex. Nantel, 2012).

### **9.2.4. Représentativité des ODS retenus**

La méthodologie proposée permet de tirer des conclusions sur les variations de fréquence et de la durée des DRU, dans un contexte de changements climatiques, pour 30 ODS répartis sur le territoire du Québec. Or, il y a présentement plus de 4 300 ODS au Québec. Idéalement, une étude complète sur tous les ODS munis d'enregistreurs aurait dû être effectuée. Par contre, suite à l'examen détaillé des données, il est apparu impossible de procéder à une analyse de cette ampleur. Différents critères ont mené à la sélection de 30 ODS pour lesquels des informations DRU - pluie étaient disponibles. Les résultats de cette étude se limitent donc à ces 30 ODS qui débordent fréquemment, faisant l'hypothèse que les informations et conclusions ainsi tirées demeurent valables et transposables à l'ensemble des ODS de la province.

## CHAPITRE 10 : CONCLUSION

Les débordements de réseaux d'égouts unitaires constituent un enjeu environnemental de premier plan. Les ingénieurs municipaux doivent par ailleurs faire face à des problèmes de gestion de l'eau en milieu urbain causés par des infrastructures âgées et sous-dimensionnées. Face à un resserrement de la réglementation, plusieurs municipalités sont actuellement à mettre en place diverses infrastructures afin de réduire la fréquence des DRU. Devant l'ampleur des investissements en jeu, il y a lieu de s'interroger sur l'efficacité à long terme de ces mesures, dans un contexte de changements climatiques. Ce projet jette donc un éclairage nouveau sur ces enjeux et fournit aux municipalités des balises afin qu'elles puissent intégrer ces considérations dans la conception, la gestion et l'évaluation de la performance à long terme de leurs infrastructures.

C'est en répondant à la question : « Comment les changements climatiques influencent les débordements de réseaux d'égouts unitaires? » que ce projet contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine des infrastructures municipales.

Pour ce faire, ce projet a mis en relation des données de DRU saisies entre 2007 et 2009 pour 30 ouvrages de surverse (ODS) avec des données de pluviométrie de stations météorologiques situées à proximité des ODS sélectionnés. Des relations ont été établies dans le but de mettre au point un modèle probabiliste, à l'aide duquel la fréquence et la durée des DRU peuvent être estimées. Chaque simulation nécessite au préalable de définir les séries d'événements de pluie et d'estimer pour chacun la hauteur de pluie correspondante. Après avoir validé les modèles avec une série de précipitations historiques, les modèles ont été utilisés avec des séries de pluie simulées en utilisant deux simulations du MRCC, couvrant la période de 1961 à 2100. La différence relative entre les événements de DRU en climat historique (1961-1990) et en climat futur (2070-2100) a finalement été calculée, permettant ainsi d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les DRU, et ce, sur une base annuelle et sur une base mensuelle.

Une première conclusion de cette étude concerne le choix des caractéristiques de pluie à considérer afin d'estimer la durée des DRU. Des analyses de régression simple et multiple ont été réalisées pour mettre en relation la durée des DRU avec les différentes caractéristiques de pluie suivantes : 1) la hauteur de pluie, 2) la durée de l'événement de pluie, 3) l'intensité moyenne, 4) l'intensité maximale, 5) la durée où l'intensité > 2 mm/h et 6) le temps sec

antérieur. En ayant recours à des tests statistiques sur la pente de régression et les coefficients de détermination  $R^2$ , les analyses montrent que la hauteur de pluie est la caractéristique la mieux corrélée à la durée des DRU. L'intensité maximale et la durée de l'événement de pluie, quant à elles, s'avèrent des caractéristiques significatives pour 20 des 30 ODS.

La qualité de ces analyses de régression a également été mise en relation avec l'importance de la distance (entre 0 et 20 km) séparant l'ODS et sa station météorologique associée. En ce sens, aucune conclusion n'a pu être tirée à partir des résultats, infirmant ainsi l'hypothèse intuitive que plus un ODS est rapproché d'un pluviomètre, plus la pluie enregistrée au pluviomètre est représentative de la pluie effectivement tombée sur le bassin drainé par l'ODS et donc meilleures sont les relations durée du DRU – pluie.

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer la fréquence des DRU à partir d'une série de pluies, soit 1) la méthode de la hauteur critique et 2) le modèle probabiliste. À plusieurs reprises, les résultats favorisaient le modèle probabiliste en raison de sa meilleure qualité d'estimation mais également, et plus significativement, de la possibilité qu'il offre d'estimer la distribution des nombres de DRU possibles. Effectivement, en utilisant le modèle probabiliste, on obtient la distribution du nombre de DRU probables selon le nombre de réalisations, soit 5 000 dans le cadre de ce projet. La moyenne de cette distribution représentait ainsi le nombre de DRU estimés par le modèle.

En ce qui a trait aux résultats en climat futur, les deux méthodes utilisées offrent des résultats plutôt similaires quant aux variations relatives de la fréquence des DRU entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100. La moyenne des variations relatives pour les 30 ODS est de -1,6% avec le modèle probabiliste et de -2,1% pour la méthode de la hauteur critique, cette dernière conduisant à des variations relatives minimales et maximales plus importantes.

Les variations relatives pour la fréquence et la durée des DRU entre les périodes historique et future permettent de répondre à l'objectif principal du projet, ce dernier étant d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les DRU. Une répartition des variations relatives obtenues pour chaque ODS permet d'observer que les comportements ne sont pas uniformes pour l'ensemble des ODS ; alors que la fréquence des DRU augmente pour certains ODS, elle diminue pour d'autres. Les variations relatives varient entre -8,8% et +6,9% avec la méthode du modèle probabiliste, et de -9,6% à 9,0% avec la méthode de la hauteur critique. Somme toute,

on remarque une tendance moyenne à la baisse de -1,6% du nombre de DRU (modèle probabiliste) et une augmentation moyenne de la durée totale de +4,3%.

Les résultats montrent une augmentation plus marquée de la durée des DRU que de leur fréquence, puisque les changements prévus dans les précipitations causent des augmentations dans 65% des ODS pour la durée totale par rapport à seulement 37% de ODS pour la fréquence avec le modèle probabiliste. Globalement, on peut s'attendre à ce que la fréquence des événements de DRU reste relativement stable dans le temps, voire même qu'elle diminue, mais que la durée totale des DRU augmente légèrement, allant jusqu'à +18,2% dans le cas d'un ODS.

Sur une échelle mensuelle, les variations relatives présentent des écarts encore plus grands entre les 30 ODS. De plus, on observe des différences marquées selon les saisons et les mois. Alors que les résultats suggèrent une diminution significative du nombre et de la durée des DRU pour les mois de juillet et d'août, on observe, à l'opposé, une augmentation significative pour les mois de mai et octobre. Ces résultats suggèrent donc qu'il y aurait une redistribution des occurrences des DRU entre les mois de mai à octobre.

Les objectifs de ce projet ont donc tous été atteints. Des relations entre les DRU et les événements de pluie ont pu être effectuées, une méthodologie d'estimation des DRU a été développée et finalement utilisée pour évaluer les variations dans un contexte de changements climatiques.

Ce projet a également permis de mettre en évidence certaines lacunes dans le suivi des DRU au Québec. En réponse à la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales, le gouvernement du Québec et les municipalités devront mettre sur pied des programmes de suivi plus serrés afin de mieux gérer et contrôler les DRU, dans le but que chaque municipalité réponde avec succès à ses exigences de rejet. L'atteinte de ces objectifs est nécessaire pour assurer la bonne santé de nos cours d'eau en milieu urbain et protéger la santé des populations. En ce sens, il est impératif d'implanter des technologies permettant d'obtenir de l'information sur les volumes déversés dans les cours d'eau pour ainsi localiser les points critiques et appliquer les correctifs nécessaires aux réseaux d'égouts.

Cette perspective arrive à point nommé au moment où l'actualité rappelle sans cesse des sommes faramineuses qui doivent être investies dans les infrastructures du Québec (Mathieu 2012). Plusieurs réseaux d'égouts sont âgés et désuets, ce qui donnera lieu à des réfections importantes et grandement justifiées. Le moment est donc parfait pour intégrer des techniques d'acquisition de données de DRU plus efficaces, voire même mettre en place des mesures de contrôle en temps réel des eaux pluviales, dans une optique de prévention et de limitation des DRU. Dans un contexte de changements climatiques qui pourrait potentiellement causer une augmentation de la durée totale des DRU au printemps et à l'automne, les municipalités doivent mettre des mesures en place pour enrayer la problématique actuelle des DRU en répondant aux exigences de rejets, afin de protéger la qualité de leurs cours d'eau et la santé de leur population.

Des travaux de recherche futurs en lien avec ce projet permettraient d'approfondir davantage l'impact des changements climatiques sur les DRU. Il serait intéressant, par exemple, d'utiliser la méthodologie développée dans ce projet pour étudier un ODS pour lequel les volumes déversés sont connus. Le modèle probabiliste pourrait ainsi être adapté pour estimer la fréquence, la durée et le volume de DRU à partir de séries de pluie observées ou simulées. Le modèle probabiliste pourrait également être appliqué sur des données de DRU simulés par des modèles hydrologiques et hydrauliques développés pour une municipalité donnée. Une évaluation ainsi plus éclairée des performances des ODS de la municipalité faciliterait la conception et la gestion à long terme de ces infrastructures.

## RÉFÉRENCES

- Andres-Domenech I, Montanari A & Marco JB (2012). Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems under Climate Variability. *J Water Res Plan. & Manage.* - ASCE 138 (1): 36-46. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000144
- Berggren K, Olofsson, M, Viklander, M, Svensson, G, Gustafsson, A.-M. (2012). Hydraulic impacts on urban drainage systems due to changes in rainfall caused by climatic change. *J. Hydrol. Eng.*, 17 (1) : 92-98, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000406.
- Bloom AJ, Hassenzähl D (2012). IPCC Emission Scenarios. Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment), Washington D.C., [http://www.eoearth.org/article/IPCC\\_Emission\\_Scenarios?topic=54313](http://www.eoearth.org/article/IPCC_Emission_Scenarios?topic=54313) (Consulté le 18 décembre 2012)
- Bracken LJ, Cox NJ & Shannon J (2008). The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrological Processes* 22(5) : 683-696.
- Brière, FG (2006). Distribution et collecte des eaux. Deuxième édition, revue et corrigée, Presses internationales Polytechnique, Montréal, 401 p.
- Caya D, Laprise R (1999). A Semi-implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM. *Mon. Weather Rev.* 127(3): 341-362.
- CCmaC, (2010). Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, Données du MRCC4.2. Environnement Canada, <http://www.cccma.ec.gc.ca/data/crcm423/crcm423.shtml> (Consulté le 12 janvier 2012)
- Chiew FHS, Prosser IP & Post DA (2011). On climate variability and climate change and impact on water resources. 19<sup>th</sup> International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12 – 16 décembre 2011, p. 3553-3559.
- Coles S (2004). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics. Springer, Londres, 208 p
- CSA (2012). Technical Guide Development, interpretation, and use of rainfall intensity-duration frequency (IDF) information : Guideline for Canadian water resources practitioners. *Canadien Standards Association*, Ontario. 214 p
- D'Aoust S, Julien L & Comeau A (2012). CSO control in a changing climate: A practical approach to planning & design. *Journal of New England Water Environment Association* 46(1): 39-48.

- Dai A (2006). Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of Climate* 19(15): 3589-3606.
- Deniaux P (2009). Les quatre grandes familles de scénarios d'émission du RSSE. Actualisation Continue des Connaissances des Enseignants en Sciences (ACCES), Lyon, <http://acces.ens-lyon.fr/acces/aLaUne> (Consulté le 19 décembre 2012)
- Dunkerley D (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes* 22(26): 5024-5036. DOI: 10.1002/hyp.7122
- Easterling DR, Evans J, Groisman PY, Karl T, Kunkel K & Ambenje P (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin-American Meteorological Society* 81(3): 417-426.
- Environnement Canada (2007). Proposition de cadre réglementaire sur les eaux usées, (Gouvernement du Canada), p. 27.
- EPA (2008). Combined Sewer Overflows Demographics, Environmental Protection Agency <http://cfpub.epa.gov/npdes/cso/demo.cfm> (Consulté le 26 octobre 2012)
- Furlow J, Johnson T & Bierwagen B (2007). A Screening Assessment of the Potential Impacts of Climate Change on Combined Sewer Overflow (CS) Mitigation in the Great Lakes and New England Regions. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Global Change Research Program, Washington. 28 p.
- Gazette du Canada (2012). Règlement sur les effluents des systèmes d'assainissement des eaux usées. Gouvernement du Canada, Vol. 146 no 15 Partie II, Ottawa, <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2012/2012-07-18/html/sor-dors139-fra.html> (Consulté le 31 octobre 2012)
- Godmaire H & Demers A (2009). Eaux Usées et Fleuve Saint-Laurent : Problèmes et solutions. Union Saint-Laurent Grands Lacs et Coalition Eau Secours, 22 p. [http://www.glu.org/fr/system/files/eaux\\_usees\\_final.pdf](http://www.glu.org/fr/system/files/eaux_usees_final.pdf) (Consulté le 21 janvier 2013)
- Groisman, PY, Knight, RW, Easterling, DR, Karl, TR, Hegerl, GC, Razuvaev, VAN (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate* 18 (9), 1326-1350, DOI: 10.1175/jcli3339.1.
- Gruber G, Winkler S & Pressl A (2005). Continuous monitoring in sewer networks an approach for quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies. *Water Science and Technology* 52(12): 215-223.

- Helsel DR, Hirsch RM (1992). *Statistical methods in water resources*, Developments in Water Science Series. Elsevier Science, New-York, 522 p.
- Hines WW, Montgomery DC (1990). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*. John Wiley & Sons, 3e édition. 732 p
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer N, Van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, & Johnsons CA, (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 p.
- IPCC (2000). *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory, (US).
- Kharin VV, Zwiers FW (2005). Estimating extremes in transient climate change simulations. *Journal of Climate* 18 (8): 1156-1173.
- Kundzewicz ZW, Robson, AJ, (2004). Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrol. Sci. J.* 49 (1): 7–19.
- Lachapelle C (1986). *Utilisations abusives des méthodes de régression et de corrélation : Exemples d'applications en sciences de l'eau*. Mémoire de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE), 276 p.
- Laprise R (2008). Regional climate modelling. *Journal of Computational Physics* 227(7): 3641-3666. DOI: 10.1016/j.jcp.2006.10.024
- Laprise R, Caya D, Giguere M, Bergeron G, Côté H, Blanchet JP, Boer GJ & McFarlane NA (1998). Climate and climate change in western Canada as simulated by the Canadian Regional Climate Model. *Atmosphere-Ocean* 36(2): 119-167.
- Lessard P, Lavallée P (1985). Caractérisation des eaux usées de débordements de réseau unitaire. *Canadian journal of Civil Engineering* 12(3): 527-537.
- Macher-Poitras R (2011). Et si on adaptait nos infrastructures aux changements climatiques? Chronique du CERIU. *Contact Plus*, Association des ingénieurs municipaux du Québec (AIMQ) Printemps 2011(77), 32 pages.
- Mailhot A, Duchesne S (2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(2): 201-208. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000023

- Mailhot A, Kingumbi A, Talbot G & Poulin A (2010). Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada. *Journal of Hydrology* 388(3-4): 173-185. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2010.04.038
- Mailhot A, Duchesne S, Caya D & Talbot G (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology* 347(1-2): 197-210. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.019
- MAMROT (2000). Programme de suivi des ouvrages de surverses. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Direction des infrastructures, Québec, 10 p.
- Mathieu I (2012). 40% des infrastructures des villes à réparer, selon l'UMQ. *Journal Le Soleil, La Presse*, Québec, Article publié le 25 septembre 2012
- MDDEP (2008). Document synthèse sur le calcul et l'interprétation des objectifs environnementaux de rejet. Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs, 15 p.
- MDDEP (2012). Position sur les normes de performance de la Stratégie pancanadienne pour la gestion des effluents d'eaux usées municipales. Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs, Québec, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/strat-pancan/index.htm> (Consulté le 18 décembre 2012)
- MDDEP & MAMROT (2010). Guide de gestion des eaux pluviales: Stratégie d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain. Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs & Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Gouvernement du Québec, Chapitre 6. 38 p. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/pluviales/chap6.pdf> (Consulté le 31 octobre 2012)
- Meehl GA, Zwiers F, Evans J, Knutson T, Mearns L & Whetton P (2000). Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81(3): 427-436.
- Ministère de l'Environnement (1989). Directive 004 - Réseaux d'égouts. Gouvernement du Québec, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/dir004/1-intro.pdf> (Consulté le 21 janvier 2013)
- Montgomery DC, Peck EA & Vining GG (1992). Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons, 2e édition. 612 p.

- Moreira J (2010). Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2009. Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Gouvernement du Québec, 198 p.
- Music B, Caya D (2007). Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology* 8(5): 969-988. DOI: 10.1175/jhm627.1
- MyRWA (2012). Combined sewer overflows. Mystic River Watershed Association, Arlington, <http://mysticriver.org/csos> (Consulté le 12 décembre 2012)
- Nantel A (2012). Comparaison de trois méthodes d'évaluation du volume de débordement d'égout unitaire aux émissaires de débordement. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal. 113 p.
- Nie L, Lindholm O, Lindholm G & Syversen E (2009). Impacts of climate change on urban drainage systems - a case study in Fredrikstad. *Norway Urban Water Journal* 6(4): 323-332. DOI: 10.1080/15730620802600924
- Parent O (2011). Retour au fleuve: l'anse au Foulon, la plus propice à la baignade. *Journal Le Soleil, La Presse*, Québec, Article publié le 25 août 2011
- Passerat J, Ouattara NK, Mouchel J-M, Vincent R & Servais P (2011). Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Research* 45(2): 893-903. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.024
- Patz JA, Vavrus SJ, Uejio CK & McLellan SL (2008). Climate Change and Waterborne Disease Risk in the Great Lakes Region of the U.S. *American Journal of Preventive Medicine* 35(5): 451-458. DOI: 10.1016/j.amepre.2008.08.026
- Raval A, Ramanathan V (1989). Observational determination of the greenhouse effect. *Nature* 342: 758-761.
- Riechel M, Matzinger A, Rouault P, Schroeder K, Sonnenberg H, Pawlowsky-Reusing E & Leszinski M (2010). Application of stormwater impact assessment guidelines for urban lowland rivers—the challenge of distinction between background and stormwater impacts. 7<sup>e</sup> Conférence Internationale Novatech 2010. Lyon, France, 27 juin 2010.
- Rosenzweig C, Major DC, Demong K, Stanton C, Horton R & Stults M (2007). Managing climate change risks in New York City's water system: assessment and adaptation planning. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(8): 1391-1409. DOI: 10.1007/s11027-006-9070-5
- Samson C (2012). La baisse du niveau du fleuve : impact possible sur la santé humaine. *Journal La Presse*, Montréal, Article publié le 14 septembre 2012

- Schroeder K, Riechel M, Matzinger A, Rouault P, Sonnenberg H, Pawlowsky-Reusing E & Gnirss R (2011). Evaluation of effectiveness of combined sewer overflow control measures by operational data. *Water Science and Technology* 63(2): 325-330. DOI: 10.2166/wst.2011.058
- Semadeni - Davies A, Hernebring C, Svensson G & Gustafsson L (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology* 350(1-2): 100-113. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2007.05.028
- SERAM (2012) Collecter les eaux usées. Marseille Société d'exploitation du réseau d'assainissement de Marseille, Ville de Marseille, <http://www.seram-marseille.fr> (Consulté le 12 octobre 2012)
- Sierra Legal (2006). The Great Lakes sewage report card. Ecojustice, Novembre 2006, Toronto, <http://www.ecojustice.ca/publications/reports/the-great-lakes-sewage-report-card/attachment> (Consulté le 21 janvier 2013)
- Sonnenberg H, Pawlowsky-Reusing E, Riechel M, Caradot N, Toth E, Matzinger A & Rouault P (2011). Different methods of CSO identification in sewer systems and receiving waters. 12<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil, 11-16 septembre 2011.
- Stoianov I, Nachman L, Madden S, Tokmouline T & Csail M (2007). PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring. *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. Cambridge, Massachusetts, USA, 25-27 avril 2007, p. 264-273.
- Sun Y, Solomon S, Dai A & Portmann RW (2007). How often will it rain? *Journal of Climate* 20(19): 4801-4818. DOI: 10.1175/JCLI4263.1.
- Tebaldi C, Knutti R (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1857): 2053-2075. DOI: 10.1098/rsta.2007.2076
- Walsh CJ, Roy AH, Feminella JW, Cottingham PD, Groffman PM & Morgan RP (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. North Am. Benthol. Soc.* 24(3): 706-723.
- Watt, WE, Waters, D, McLean, R (2003). Climate change and urban stormwater infrastructure in Canada: Context and case studies. Toronto-Niagara Region study report and working paper series, Waterloo, Ontario (Report 2003-1), 27 p.

## Annexe A : Ajustement manuel des associations pluie – DRU

L'Équation (5.1) permet d'associer automatiquement les DRU à un événement de pluie selon les critères décrits au Chapitre 5. Il en résulte néanmoins des situations illogiques nécessitant quelques rares corrections manuelles. Un examen visuel de l'association entre les DRU et les événements de pluie à partir de figures semblables à la Figure 5.3 permet d'effectuer ces corrections.

Cinq types d'erreur à corriger ont été relevés :

- Dans certain cas, le DRU a probablement été causé par un événement de pluie important survenu le vendredi, mais l'occurrence du DRU n'a été relevée que le lundi suivant dans SOMAE.
- Un DRU d'une durée importante pouvait parfois être associé à un petit événement de pluie secondaire au lieu d'être associé à un événement majeur survenu tout juste avant.
- Lorsque deux petites pluies de courte durée et de faible intensité suivent de près un troisième événement de pluie majeur, ce dernier n'était pas considéré selon les critères de l'algorithme, alors qu'il peut logiquement être la cause du DRU.
- Dans de rares cas, l'approche cumulait deux DRU pour un seul événement de pluie, alors que visiblement deux pluies subséquentes avaient causé deux débordements.
- Exceptionnellement, il y avait une période évidente sans DRU saisi dans SOMAE, à chaque année entre les mois de juillet et août, qui pourrait être étroitement liée aux vacances de l'employé en charge des relevés de DRU. Les événements de pluie survenant durant ces périodes ont été exclus des analyses.

Dans tous ces cas, le ou les DRU impliqués ont été réassociés à un événement de pluie beaucoup plus susceptible d'en être la cause.

Notons que l'efficacité de l'approche proposée varie selon les ODS. Ainsi, un ajustement de l'approche qui améliorerait la qualité de l'association pluie-DRU pour un ODS pourrait, en contrepartie, la diminuer pour un autre. Il est donc difficile, voire impossible, d'automatiser à la perfection l'association entre les DRU inscrits dans la base de données du MAMROT et les données de pluviométrie.



## Annexe B : Informations sur les ODS étudiés

Tableau B – 1 : Hauteur critique (Schroeder *et al.*, 2011), nombre d'événements de pluie entre 2007 et 2009, nombre d'événements de pluie causant un DRU, nombre d'événements de pluie ne causant pas de DRU, nombre de DRU non associés et numéro de la station météorologique associée à chaque ODS.

#	Ouvrage de surverse	Hauteur critique (mm)	Nombre d'événements de pluie 2007 - 2009 (MJJASO*)	Nombre d'événements de pluie causant un DRU		Nombre d'événements de pluie sans DRU associé		Nombre de DRU non associés	# de la station météo à proximité
1	ENTRÉE DE LA STATION	5,9	159	95	60%	64	40%	2	7028441
2	No 04 LAVIOLETTE	8,0	162	59	36%	103	64%	0	7074240
3	No 02 BOSTONNAIS	7,0	169	77	46%	92	54%	1	7074240
4	No 05 LAEROPORT	7,0	164	71	43%	93	57%	0	7074240
5	PRINCIPAL	11,8	89	34	38%	55	62%	2	7777777
6	LAURENT	10,0	106	55	52%	51	48%	3	7022800
7	RUTHERFORD	6,8	116	59	51%	57	49%	5	7022800
8	ST-URBAIN	5,1	106	62	58%	44	42%	4	7022800
9	PRINCIPAL (O)	10,5	119	26	22%	93	78%	1	7015730
10	OUIMET (TP POMPÉ)	10,1	131	38	29%	93	71%	3	7015730
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	14,0	110	24	22%	86	78%	0	7028680
12	STATION (amont prétraitement)	4,1	125	71	57%	54	43%	2	7032362
13	P-17	10,5	191	74	39%	117	61%	2	7063370
14	OZANNE	4,3	198	84	42%	114	58%	1	7063370
15	P-14 (MONT-FORTIN)	4,2	191	92	48%	99	52%	2	7063370
16	MGR BÉGIN	4,1	198	93	47%	105	53%	2	7063370
17	P-12 (STE-FAMILLE)	3,1	198	104	53%	94	47%	0	7063370
18	SAINT-HUBERT	4,1	198	89	45%	109	55%	0	7063370
19	ANGERS	5,8	186	86	46%	100	54%	1	7063370
20	No 02 (TP POMPÉ)	17,7	99	14	14%	85	86%	1	7015730
21	No 01 (TP POMPÉ)	10,1	148	33	22%	115	78%	1	7015730
22	1 (POMPÉ)	10,7	145	47	32%	98	68%	3	7015730
23	MALTAIS	7,8	145	65	45%	80	55%	0	7027802
24	ENTRÉE MUNICIPALE	8,8	121	50	41%	71	59%	0	7013362
25	LIPPÉE (amont)	11,0	118	28	24%	90	76%	0	7028680
26	BLANCHARD (2e amont)	11,0	125	33	26%	92	74%	0	7028680
27	SAUVÉ (POMPÉ)	7,4	121	47	39%	74	61%	1	7028680
28	STATION DÉPURATION	10,2	140	40	29%	100	71%	0	7028502
29	ENTRÉE USINE	8,5	150	84	56%	66	44%	2	7027736
30	No 8 (JULIEN REHEL)	11,3	95	20	21%	75	79%	1	7056480
<b>Moyenne</b>		<b>8,4</b>	<b>144</b>	<b>58,5</b>	<b>39%</b>	<b>85,6</b>	<b>61%</b>	<b>1,3</b>	
<b>Médiane</b>		<b>8,3</b>	<b>143</b>	<b>59,0</b>	<b>42%</b>	<b>92,0</b>	<b>58%</b>	<b>1,0</b>	
<b>Écart-Type</b>		<b>3,4</b>	<b>35</b>	<b>25,8</b>	<b>13%</b>	<b>20,3</b>	<b>13%</b>	<b>1,3</b>	
<b>Max</b>		<b>17,7</b>	<b>198</b>	<b>104</b>	<b>60%</b>	<b>117</b>	<b>86%</b>	<b>5</b>	
<b>Min</b>		<b>3,1</b>	<b>89</b>	<b>14</b>	<b>14%</b>	<b>44</b>	<b>40%</b>	<b>0</b>	

\* MJJASO = Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre



**Annexe C : Coefficients de détermination et résultat des analyses de significativité des régressions linéaires entre les caractéristiques des événements de pluie et la durée des DRU**

**Tableau C - 1 : Hauteur de pluie**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination $R^2$	Statistique du test ( $t_0$ )	P-Value	$t_{\alpha/2, n-2}$ à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	1	0,46	8,94	< 0,001	1,99
2	No 04 LAVIOLETTE	1	0,53	8,08	< 0,001	2,00
3	No 02 BOSTONNAIS	1	0,20	4,29	< 0,001	1,99
4	No 05 LAEROPORT	1	0,47	7,84	< 0,001	1,99
5	PRINCIPAL	1	0,45	5,10	< 0,001	2,04
6	LAURENT	1	0,41	6,11	< 0,001	2,01
7	RUTHERFORD	1	0,11	2,64	0,011	2,00
8	ST-URBAIN	1	0,40	6,33	< 0,001	2,00
9	PRINCIPAL (O)	1	0,27	3,02	0,006	2,06
10	OUIMET (TP POMPÉ)	1	0,33	4,18	< 0,001	2,03
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	1	0,17	2,14	0,044	2,07
12	STATION (amont prétraitement)	1	0,20	4,09	< 0,001	1,99
13	P-17	1	0,43	7,31	< 0,001	1,99
14	OZANNE	1	0,59	10,82	< 0,001	1,99
15	P-14 (MONT-FORTIN)	1	0,37	7,20	< 0,001	1,99
16	MGR BÉGIN	1	0,40	7,79	< 0,001	1,99
17	P-12 (STE-FAMILLE)	1	0,30	6,58	< 0,001	1,98
18	SAINT-HUBERT	1	0,63	12,21	< 0,001	1,99
19	ANGERS	1	0,47	8,66	< 0,001	1,99
20	No 02 (TP POMPÉ)	1	0,52	3,57	0,004	2,18
21	No 01 (TP POMPÉ)	1	0,53	5,88	< 0,001	2,04
22	1 (POMPÉ)	1	0,39	5,41	< 0,001	2,01
23	MALTAIS	1	0,39	6,36	< 0,001	2,00
24	ENTRÉE MUNICIPALE	1	0,10	2,30	0,026	2,01
25	LIPPÉE (amont)	1	0,29	3,24	0,003	2,06
26	BLANCHARD (2e amont)	1	0,12	2,07	0,047	2,04
27	SAUVÉ (POMPÉ)	1	0,17	3,05	0,004	2,01
28	STATION DÉPURATION	1	0,32	4,21	< 0,001	2,02
29	ENTRÉE USINE	1	0,41	7,52	< 0,001	1,99
30	No 8 (JULIEN REHEL)	1	0,61	5,28	< 0,001	2,10

**Tableau C - 2 : Durée où l'intensité > 2 mm/h**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Statistique du test (t <sub>0</sub> )	P-Value	t <sub>α/2, n-2</sub> à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	1	0,40	7,92	< 0,001	1,99
2	No 04 LAVIOLETTE	1	0,35	5,59	< 0,001	2,00
3	No 02 BOSTONNAIS	1	0,20	4,36	< 0,001	1,99
4	No 05 LAEROPORT	1	0,55	9,24	< 0,001	1,99
5	PRINCIPAL	1	0,37	4,30	< 0,001	2,04
6	LAURENT	1	0,37	5,52	< 0,001	2,01
7	RUTHERFORD	1	0,12	2,81	0,007	2,00
8	ST-URBAIN	1	0,33	5,48	< 0,001	2,00
9	PRINCIPAL (O)	1	0,38	3,82	0,001	2,06
10	OUIMET (TP POMPÉ)	1	0,15	2,54	0,016	2,03
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	1	0,17	2,11	0,046	2,07
12	STATION (amont prétraitement)	1	0,11	2,94	0,004	1,99
13	P-17	1	0,42	7,20	< 0,001	1,99
14	OZANNE	1	0,55	9,95	< 0,001	1,99
15	P-14 (MONT-FORTIN)	1	0,27	5,80	< 0,001	1,99
16	MGR BÉGIN	1	0,40	7,82	< 0,001	1,99
17	P-12 (STE-FAMILLE)	1	0,25	5,85	< 0,001	1,98
18	SAINT-HUBERT	1	0,56	10,56	< 0,001	1,99
19	ANGERS	1	0,45	8,28	< 0,001	1,99
20	No 02 (TP POMPÉ)	1	0,68	5,01	< 0,001	2,18
21	No 01 (TP POMPÉ)	1	0,53	5,97	< 0,001	2,04
22	1 (POMPÉ)	1	0,17	3,03	0,004	2,01
23	MALTAIS	1	0,34	5,66	< 0,001	2,00
24	ENTRÉE MUNICIPALE	1	0,11	2,46	0,017	2,01
25	LIPPÉE (amont)	1	0,37	3,88	0,001	2,06
26	BLANCHARD (2e amont)	1	0,41	4,68	< 0,001	2,04
27	SAUVÉ (POMPÉ)	1	0,22	3,53	0,001	2,01
28	STATION DÉPURATION	1	0,12	2,29	0,028	2,02
29	ENTRÉE USINE	1	0,25	5,22	< 0,001	1,99
30	No 8 (JULIEN REHEL)	1	0,57	4,87	< 0,001	2,10

**Tableau C - 3 : Durée de l'événement de pluie**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Statistique du test (t <sub>0</sub> )	P-Value	t <sub>α/2, n-2</sub> à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	1	0,22	5,07	< 0,001	1,66
2	No 04 LAVIOLETTE	1	0,15	3,13	0,003	1,67
3	No 02 BOSTONNAIS	1	0,13	3,36	0,001	1,66
4	No 05 LAEROPORT	1	0,30	5,50	< 0,001	1,67
5	PRINCIPAL	1	0,29	3,62	0,001	1,69
6	LAURENT	1	0,10	2,46	0,017	1,67
7	RUTHERFORD	0	0,00	0,24	0,809	1,67
8	ST-URBAIN	1	0,11	2,73	0,008	1,67
9	PRINCIPAL (O)	0	0,02	0,62	0,542	1,71
10	OUIMET (TP POMPÉ)	0	0,00	0,09	0,925	1,69
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	0	0,07	1,28	0,213	1,71
12	STATION (amont prétraitement)	0	0,01	0,72	0,473	1,67
13	P-17	1	0,17	3,79	< 0,001	1,67
14	OZANNE	1	0,22	4,75	< 0,001	1,66
15	P-14 (MONT-FORTIN)	1	0,25	5,46	< 0,001	1,66
16	MGR BÉGIN	1	0,32	6,53	< 0,001	1,66
17	P-12 (STE-FAMILLE)	1	0,15	4,29	< 0,001	1,66
18	SAINT-HUBERT	1	0,31	6,25	< 0,001	1,66
19	ANGERS	1	0,32	6,25	< 0,001	1,66
20	No 02 (TP POMPÉ)	0	0,03	0,58	0,570	1,76
21	No 01 (TP POMPÉ)	0	0,00	0,15	0,886	1,69
22	1 (POMPÉ)	0	0,03	1,11	0,274	1,68
23	MALTAIS	1	0,17	3,54	0,001	1,67
24	ENTRÉE MUNICIPALE	1	0,07	1,86	0,070	1,68
25	LIPPÉE (amont)	0	0,06	1,26	0,217	1,70
26	BLANCHARD (2e amont)	1	0,14	2,21	0,034	1,69
27	SAUVÉ (POMPÉ)	0	0,02	0,97	0,338	1,68
28	STATION DÉPURATION	1	0,28	3,87	< 0,001	1,68
29	ENTRÉE USINE	1	0,07	2,49	0,015	1,66
30	No 8 (JULIEN REHEL)	1	0,43	3,67	0,002	1,72

**Tableau C - 4: Intensité maximale**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Statistique du test (t <sub>0</sub> )	P-Value	t <sub>α/2, n-2</sub> à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	1	0,16	4,24	< 0,001	1,99
2	No 04 LAVIOLETTE	1	0,24	4,27	< 0,001	2,00
3	No 02 BOSTONNAIS	1	0,06	2,14	0,036	1,99
4	No 05 LAEROPORT	1	0,07	2,28	0,025	1,99
5	PRINCIPAL	0	0,01	0,43	0,668	2,04
6	LAURENT	1	0,09	2,25	0,029	2,01
7	RUTHERFORD	1	0,10	2,46	0,017	2,00
8	ST-URBAIN	1	0,10	2,61	0,011	2,00
9	PRINCIPAL (O)	0	0,01	0,35	0,730	2,06
10	OUIMET (TP POMPÉ)	1	0,19	2,87	0,007	2,03
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	0	0,04	0,90	0,376	2,07
12	STATION (amont prétraitement)	1	0,08	2,43	0,018	1,99
13	P-17	1	0,10	2,85	0,006	1,99
14	OZANNE	1	0,13	3,56	0,001	1,99
15	P-14 (MONT-FORTIN)	1	0,10	3,13	0,002	1,99
16	MGR BÉGIN	1	0,07	2,67	0,009	1,99
17	P-12 (STE-FAMILLE)	1	0,11	3,56	0,001	1,98
18	SAINT-HUBERT	1	0,10	3,17	0,002	1,99
19	ANGERS	1	0,14	3,70	< 0,001	1,99
20	No 02 (TP POMPÉ)	0	0,13	1,33	0,208	2,18
21	No 01 (TP POMPÉ)	1	0,16	2,44	0,021	2,04
22	1 (POMPÉ)	1	0,32	4,58	< 0,001	2,01
23	MALTAIS	1	0,06	2,03	0,047	2,00
24	ENTRÉE MUNICIPALE	0	0,04	1,43	0,158	2,01
25	LIPPÉE (amont)	0	0,02	0,73	0,470	2,06
26	BLANCHARD (2e amont)	0	0,00	0,26	0,794	2,04
27	SAUVÉ (POMPÉ)	0	0,01	0,60	0,552	2,01
28	STATION DÉPURATION	0	0,00	0,08	0,938	2,02
29	ENTRÉE USINE	1	0,17	4,08	< 0,001	1,99
30	No 8 (JULIEN REHEL)	0	0,17	1,93	0,070	2,10

**Tableau C - 5: Intensité moyenne**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Statistique du test (t <sub>0</sub> )	P-Value	t <sub>α/2, n-2</sub> à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	1	0,04	2,07	0,042	1,99
2	No 04 LAVIOLETTE	0	0,01	0,54	0,594	2,00
3	No 02 BOSTONNAIS	0	0,00	0,05	0,957	1,99
4	No 05 LAEROPORT	0	0,00	0,42	0,675	1,99
5	PRINCIPAL	0	0,00	0,04	0,966	2,04
6	LAURENT	0	0,00	0,04	0,968	2,01
7	RUTHERFORD	0	0,02	1,08	0,284	2,00
8	ST-URBAIN	0	0,00	0,16	0,875	2,00
9	PRINCIPAL (O)	0	0,01	0,38	0,705	2,06
10	OUIMET (TP POMPÉ)	1	0,13	2,28	0,029	2,03
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	0	0,00	0,07	0,944	2,07
12	STATION (amont prétraitement)	1	0,11	2,86	0,006	1,99
13	P-17	0	0,03	1,38	0,172	1,99
14	OZANNE	0	0,02	1,41	0,163	1,99
15	P-14 (MONT-FORTIN)	0	0,00	0,58	0,562	1,99
16	MGR BÉGIN	0	0,00	0,41	0,685	1,99
17	P-12 (STE-FAMILLE)	0	0,02	1,29	0,200	1,98
18	SAINT-HUBERT	0	0,02	1,22	0,228	1,99
19	ANGERS	0	0,01	0,95	0,343	1,99
20	No 02 (TP POMPÉ)	1	0,54	3,72	0,003	2,18
21	No 01 (TP POMPÉ)	1	0,46	5,15	< 0,001	2,04
22	1 (POMPÉ)	1	0,24	3,76	< 0,001	2,01
23	MALTAIS	0	0,01	0,94	0,352	2,00
24	ENTRÉE MUNICIPALE	0	0,00	0,19	0,850	2,01
25	LIPPÉE (amont)	0	0,00	0,06	0,950	2,06
26	BLANCHARD (2e amont)	0	0,00	0,17	0,865	2,04
27	SAUVÉ (POMPÉ)	0	0,00	0,09	0,926	2,01
28	STATION DÉPURATION	0	0,01	0,73	0,470	2,02
29	ENTRÉE USINE	0	0,01	1,05	0,298	1,99
30	No 8 (JULIEN REHEL)	0	0,00	0,11	0,916	2,10

**Tableau C - 6: Temps sec antérieur**

#	Ouvrage de surverse	Régression significative 1 = oui 0 = non	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Statistique du test (t <sub>0</sub> )	P-Value	t <sub>α/2, n-2</sub> à 95%
1	ENTRÉE DE LA STATION	0	0,00	0,16	0,876	1,99
2	No 04 LAVIOLETTE	0	0,01	0,67	0,507	2,00
3	No 02 BOSTONNAIS	0	0,02	1,34	0,183	1,99
4	No 05 LAEROPORT	0	0,04	1,79	0,078	1,99
5	PRINCIPAL	0	0,00	0,11	0,909	2,04
6	LAURENT	0	0,00	0,43	0,670	2,01
7	RUTHERFORD	0	0,01	0,78	0,442	2,00
8	ST-URBAIN	0	0,01	0,64	0,523	2,00
9	PRINCIPAL (O)	0	0,00	0,04	0,967	2,06
10	OUIMET (TP POMPÉ)	0	0,03	1,09	0,285	2,03
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	0	0,01	0,43	0,673	2,07
12	STATION (amont prétraitement)	0	0,00	0,08	0,933	1,99
13	P-17	0	0,03	1,52	0,133	1,99
14	OZANNE	0	0,01	0,92	0,362	1,99
15	P-14 (MONT-FORTIN)	0	0,01	0,82	0,414	1,99
16	MGR BÉGIN	0	0,01	1,14	0,255	1,99
17	P-12 (STE-FAMILLE)	0	0,00	0,13	0,900	1,98
18	SAINT-HUBERT	0	0,00	0,46	0,649	1,99
19	ANGERS	0	0,02	1,29	0,201	1,99
20	No 02 (TP POMPÉ)	0	0,02	0,52	0,610	2,18
21	No 01 (TP POMPÉ)	0	0,00	0,00	0,997	2,04
22	1 (POMPÉ)	0	0,01	0,62	0,537	2,01
23	MALTAIS	0	0,04	1,68	0,099	2,00
24	ENTRÉE MUNICIPALE	0	0,02	1,02	0,311	2,01
25	LIPPÉE (amont)	0	0,01	0,49	0,628	2,06
26	BLANCHARD (2e amont)	0	0,05	1,31	0,202	2,04
27	SAUVÉ (POMPÉ)	0	0,00	0,01	0,996	2,01
28	STATION DÉPURATION	-1 *	0,12	2,31	0,027	2,02
29	ENTRÉE USINE	0	0,00	0,17	0,867	1,99
30	No 8 (JULIEN REHEL)	0	0,00	0,11	0,911	2,10

\* Régression négative

## Annexe D : Régression multiple : Résultats des tests de contribution des variables combinées

Tableau D – 1 : Régression multiple : résultat des tests de significativité des variables combinées à la hauteur de pluie

#	Ouvrage de surverse	Durée avec Intensité > 2 mm/h			Durée de l'événement (h)			Intensité maximale (mm/h)			TOTAL de contribution significative ( A + D + G )	
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)		
		Contribution significative 1 = oui 0 = non	Statistique du test F <sub>0</sub>	F <sub>0,05, r, n-r-1</sub> (Seuil)	Contribution significative 1 = oui 0 = non	Statistique du test F <sub>0</sub>	F <sub>0,05, r, n-r-1</sub> (Seuil)	Contribution significative 1 = oui 0 = non	Statistique du test F <sub>0</sub>	F <sub>0,05, r, n-r-1</sub> (Seuil)		
1	ENTRÉE DE LA STATION	0	0,87	3,94	0	0,09	3,94	0	5,27	3,94	0	
2	No 04 LAVIOLETTE	0	2,39	4,01	0	3,23	4,01	0	0,13	4,01	0	
3	No 02 BOSTONNAIS	0	1,06	3,97	0	1,70	3,97	0	2,23	3,97	0	
4	No 05 LAEROPORT	1	12,80	3,98	0	1,88	3,98	1	16,29	3,98	2	
5	PRINCIPAL	0	1,57	4,16	1	7,91	4,16	1	6,73	4,16	2	
6	LAURENT	0	0,21	4,03	0	1,45	4,03	0	0,79	4,03	0	
7	RUTHERFORD	0	0,83	4,01	1	4,34	4,01	0	1,22	4,01	1	
8	ST-URBAIN	0	0,00	4,00	0	0,95	4,00	0	0,64	4,00	0	
9	PRINCIPAL (O)	0	3,83	4,28	1	6,16	4,28	0	4,00	4,28	1	
10	OUIMET (TP POMPÉ)	0	1,13	4,12	0	2,59	4,12	0	0,00	4,12	0	
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	0	0,30	4,32	0	0,02	4,32	0	0,15	4,32	0	
12	STATION (amont prétraitement)	0	0,51	3,98	0	3,07	3,98	0	0,09	3,98	0	
13	P-17	0	1,67	3,98	0	0,15	3,98	1	6,97	3,98	1	
14	OZANNE	0	1,47	3,96	0	0,01	3,96	1	14,20	3,96	1	
15	P-14 (MONT-FORTIN)	0	1,05	3,95	0	3,39	3,95	1	5,72	3,95	1	
16	MGR BÉGIN	0	2,95	3,95	1	8,27	3,95	1	11,43	3,95	2	
17	P-12 (STE-FAMILLE)	0	0,00	3,94	0	0,55	3,94	0	1,56	3,94	0	
18	SAINT-HUBERT	0	0,63	3,95	0	3,51	3,95	1	32,88	3,95	1	
19	ANGERS	0	1,60	3,96	1	4,76	3,96	1	5,74	3,96	2	
20	No 02 (TP POMPÉ)	1	6,04	4,84	1	5,91	4,84	1	5,14	4,84	3	
21	No 01 (TP POMPÉ)	1	4,51	4,17	1	5,87	4,17	0	4,90	4,17	2	
22	1 (POMPÉ)	0	3,32	4,06	0	0,58	4,06	0	0,91	4,06	0	
23	MALTAIS	0	1,08	4,00	0	0,82	4,00	0	2,23	4,00	0	
24	ENTRÉE MUNICIPALE	0	0,91	4,05	0	1,20	4,05	0	0,15	4,05	0	
25	LIPPÉE (amont)	1	4,37	4,24	0	0,01	4,24	0	5,93	4,24	1	
26	BLANCHARD (2e amont)	1	18,53	4,17	0	2,07	4,17	1	16,27	4,17	2	
27	SAUVÉ (POMPÉ)	0	2,54	4,06	0	0,46	4,06	0	4,17	4,06	0	
28	STATION DÉPURATION	0	3,10	4,11	0	3,00	4,11	0	2,71	4,11	0	
29	ENTRÉE USINE	0	0,00	3,96	0	0,12	3,96	0	1,42	3,96	0	
30	No 8 (JULIEN REHEL)	0	0,90	4,45	0	1,45	4,45	0	2,43	4,45	0	
Somme		5			7			10			16 (54%)	0
%		17			23			33			7 (23%)	1
											6 (20%)	2
											1 (3%)	3



## Annexe E : Biais mensuel pour la fréquence des DRU avec la méthode de la hauteur critique

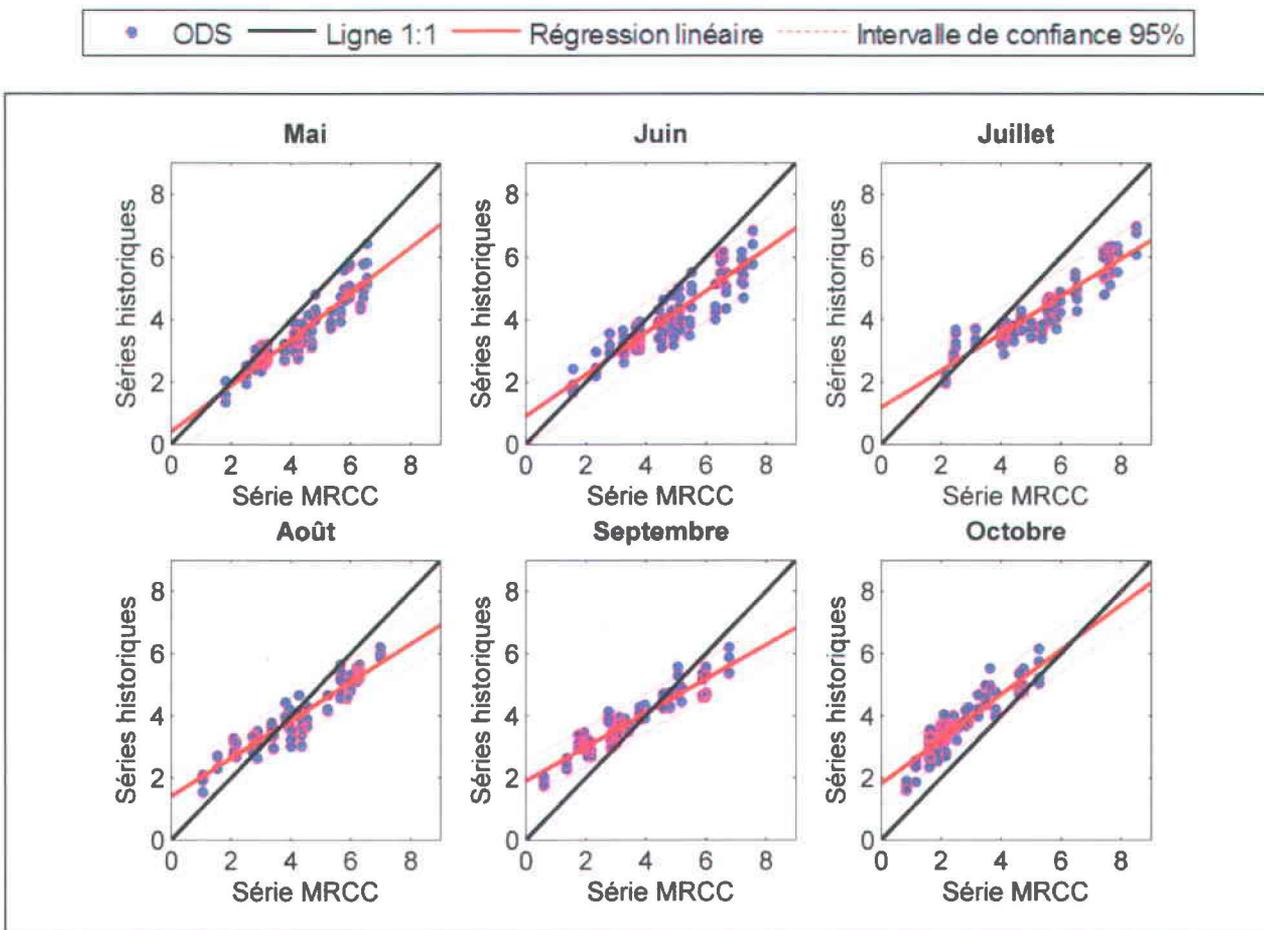


Figure E-1 : Biais mensuel entre les résultats des simulations issues d'une série d'événements de pluie historique et de la série MRCC *aet02* entre 1977 et 2009, pour le nombre annuel moyen de DRU obtenu à partir de la méthode de la hauteur critique.



## Annexe F : Variation relative de la fréquence et de la durée des DRU

Tableau F-1 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 de la fréquence et de la durée totale des DRU pour les 30 ODS et les simulations *aet* et *aev* avec un seuil de 0,2 mm.

#	Ouvrage de surverse (ODS)	Variation relative (%)					
		Fréquence - Modèle probabiliste		Fréquence - Méthode hauteur critique		Durée	
		<i>aet02</i>	<i>aev02</i>	<i>aet02</i>	<i>aev02</i>	<i>aet02</i>	<i>aev02</i>
1	ENTRÉE DE LA STATION	-1,8	-0,4	-2,9	-0,7	-1,2	6,6
2	No 04 LAVIOLETTE	0,9	1,8	0,5	2,6	4,1	5,1
3	No 02 BOSTONNAIS	0,2	2,1	0,1	3,8	4,5	6,0
4	No 05 LAEROPORT	2,1	0,8	0,1	3,8	3,3	4,7
5	PRINCIPAL	-2,2	-1,1	-3,8	-0,7	0,7	0,3
6	LAURENT	-6,0	-5,2	-7,0	-2,1	-4,5	-0,3
7	RUTHERFORD	-6,1	-5,4	-5,2	-4,8	-5,2	-2,9
8	ST-URBAIN	-6,1	-5,3	-4,9	-4,8	-4,0	0,1
9	PRINCIPAL (O)	-4,1	-1,0	-9,4	-3,2	-4,0	11,8
10	OUIMET (TP POMPÉ)	-6,1	-2,4	-8,4	-3,1	-6,2	5,0
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	-8,8	-4,2	-7,5	-7,5	-4,1	1,4
12	STATION (amont prétraitement)	-4,3	-4,4	-2,8	-2,7	-2,5	-1,0
13	P-17	2,2	5,8	0,5	9,0	9,7	16,0
14	OZANNE	0,8	5,7	-0,7	4,1	10,4	16,9
15	P-14 (MONT-FORTIN)	1,3	4,4	-0,4	4,0	8,7	14,6
16	MGR BÉGIN	0,2	4,6	-0,3	3,9	8,4	15,0
17	P-12 (STE-FAMILLE)	0,7	4,5	-0,8	2,6	7,1	12,8
18	SAINT-HUBERT	0,2	5,9	-0,3	3,9	9,9	16,6
19	ANGERS	0,7	4,3	0,9	5,6	10,4	17,5
20	No 02 (TP POMPÉ)	-2,9	1,4	-2,6	-1,8	-2,0	14,4
21	No 01 (TP POMPÉ)	-3,4	-1,3	-8,4	-3,1	-2,8	14,5
22	1 (POMPÉ)	-5,6	-3,6	-9,2	-3,4	-5,7	9,4
23	MALTAIS	-5,0	-2,3	-3,8	-1,6	-2,6	5,8
24	ENTRÉE MUNICIPALE	-4,2	-2,3	-4,1	-0,4	-2,5	1,9
25	LIPPÉE (amont)	-7,1	-4,2	-8,0	-5,9	-4,3	7,5
26	BLANCHARD (2e amont)	-4,9	-4,2	-8,0	-5,9	-4,1	2,7
27	SAUVÉ (POMPÉ)	-7,2	-4,4	-9,6	-2,1	-7,1	1,5
28	STATION DÉPURATION	-3,4	-1,0	-4,1	-2,7	4,3	18,2
29	ENTRÉE USINE	-6,1	-5,7	-6,1	-2,7	-4,1	0,3
30	No 8 (JULIEN REHEL)	0,6	6,9	0,0	5,0	4,5	15,4

<b>Moyenne</b>	<b>-2,9%</b>	<b>-0,3%</b>	<b>-3,9%</b>	<b>-0,4%</b>	<b>0,6%</b>	<b>7,9%</b>
<b>Moyenne <i>aet02</i> et <i>aev02</i></b>	<b>-1,6%</b>		<b>-2,1%</b>		<b>4,3%</b>	
<b>Médiane</b>	<b>-3,4%</b>	<b>-1,1%</b>	<b>-3,8%</b>	<b>-1,7%</b>	<b>-2,2%</b>	<b>6,3%</b>
<b>Écart-Type</b>	<b>3,3%</b>	<b>4,1%</b>	<b>3,5%</b>	<b>4,1%</b>	<b>5,8%</b>	<b>6,8%</b>
<b>Max</b>	<b>2,2%</b>	<b>6,9%</b>	<b>0,9%</b>	<b>9,0%</b>	<b>10,4%</b>	<b>18,2%</b>
<b>Min</b>	<b>-8,8%</b>	<b>-5,7%</b>	<b>-9,6%</b>	<b>-7,5%</b>	<b>-7,1%</b>	<b>-2,9%</b>

Tableau F-2 : Variation relative (%) entre les périodes 1961-1990 et 2040-2069 de la fréquence et de la durée totale des DRU pour les 30 ODS et les simulations aet et aev avec un seuil de 0,2 mm.

#	Ouvrage de surverse (ODS)	Variation relative (%)					
		Fréquence - Modèle probabiliste		Fréquence - Méthode hauteur critique		Durée	
		aet02	aev02	aet02	aev02	aet02	aev02
1	ENTRÉE DE LA STATION	0,0	0,8	-1,7	0,4	0,9	5,9
2	No 04 LAVIOLETTE	2,4	2,0	1,4	1,0	4,8	3,2
3	No 02 BOSTONNAIS	1,8	2,6	1,2	2,5	5,1	3,8
4	No 05 LAEROPORT	1,8	1,9	1,2	2,5	3,9	3,2
5	PRINCIPAL	-0,8	0,0	-0,5	-3,1	1,1	2,3
6	LAURENT	-3,1	-2,8	-3,5	-2,9	-3,3	1,2
7	RUTHERFORD	-4,8	-2,2	-2,2	-3,1	-3,7	-0,5
8	ST-URBAIN	-3,9	-2,3	-3,3	-1,9	-3,0	1,5
9	PRINCIPAL (O)	-5,1	-1,1	-4,2	-5,5	-4,5	2,3
10	OUIMET (TP POMPÉ)	-3,1	-3,0	-3,5	-5,4	-5,1	-0,8
11	PRINCIPAL (TP POMPÉ)	-9,6	-4,8	-8,3	-8,4	-6,7	-1,4
12	STATION (amont prétraitement)	-2,4	-2,8	-1,8	-1,3	-1,8	-0,6
13	P-17	3,2	6,1	3,5	6,5	10,0	13,7
14	OZANNE	2,6	6,7	2,6	5,8	10,7	14,0
15	P-14 (MONT-FORTIN)	2,1	6,0	2,9	5,9	9,2	13,0
16	MGR BÉGIN	2,4	6,3	2,6	6,4	9,4	13,3
17	P-12 (STE-FAMILLE)	1,8	6,0	2,0	6,6	7,8	11,8
18	SAINT-HUBERT	2,3	8,0	2,6	6,4	10,6	14,0
19	ANGERS	2,7	5,8	3,1	7,7	11,0	14,8
20	No 02 (TP POMPÉ)	-2,3	-1,0	-2,6	0,0	-3,8	3,8
21	No 01 (TP POMPÉ)	-3,2	-0,4	-3,5	-5,4	-4,0	3,4
22	1 (POMPÉ)	-3,8	-2,5	-4,9	-6,0	-5,1	0,6
23	MALTAIS	-3,1	-1,5	0,1	-2,7	-5,0	0,9
24	ENTRÉE MUNICIPALE	-2,2	-3,1	-0,2	-2,2	-1,5	-0,6
25	LIPPÉE (amont)	-7,8	-3,9	-8,1	-7,3	-9,7	0,3
26	BLANCHARD (2e amont)	-5,8	-4,4	-8,1	-7,3	-6,5	-1,0
27	SAUVÉ (POMPÉ)	-4,0	-4,4	-5,6	-4,9	-5,0	-2,2
28	STATION DÉPURATION	-1,6	0,1	-1,3	-2,1	-1,1	9,9
29	ENTRÉE USINE	-3,6	-2,8	-2,0	-2,9	-3,1	1,8
30	No 8 (JULIEN REHEL)	2,4	11,9	1,1	7,7	6,4	18,1

<b>Moyenne</b>	-1,5%	0,7%	-1,4%	-0,4%	0,6%	5,0%
<b>Moyenne aet et aev</b>	<b>-0,4%</b>		<b>-0,9%</b>		<b>2,8%</b>	
<b>Médiane</b>	-2,3%	-0,7%	-1,5%	-2,0%	-1,6%	2,8%
<b>Écart-Type</b>	3,5%	4,4%	3,5%	5,1%	6,3%	6,1%
<b>Max</b>	3,2%	11,9%	3,5%	7,7%	11,0%	18,1%
<b>Min</b>	-9,6%	-4,8%	-8,3%	-8,4%	-9,7%	-2,2%