

Université du Québec
INRS-Eau

**MODÈLE POUR LE CONTRÔLE EN TEMPS RÉEL DES
RÉSEAUX D'ÉGOUT SOUS SURCHARGE**

Par
Sophie Duchesne
B. Sc. A.

Thèse présentée
pour l'obtention
du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.)
en Sciences de l'Eau

Jury d'évaluation

Examineur externe

M. Gilles Patry
Vice-recteur aux études et professeur,
Université d'Ottawa

Examineur externe

M. Dominique Laplace
Ingénieur en chef, Société d'exploitation
du réseau d'assainissement de Marseille

Examineur interne

M. Pierre Lavallée
Professeur invité, INRS-Eau,
vice-président exécutif, Groupe-conseil BPR
et directeur général, BPR-CSO

Examineur interne

M. Alain Mailhot
Associé de recherche, INRS-Eau

Directeur de recherche

M. Jean-Pierre Villeneuve
Directeur et professeur, INRS-Eau

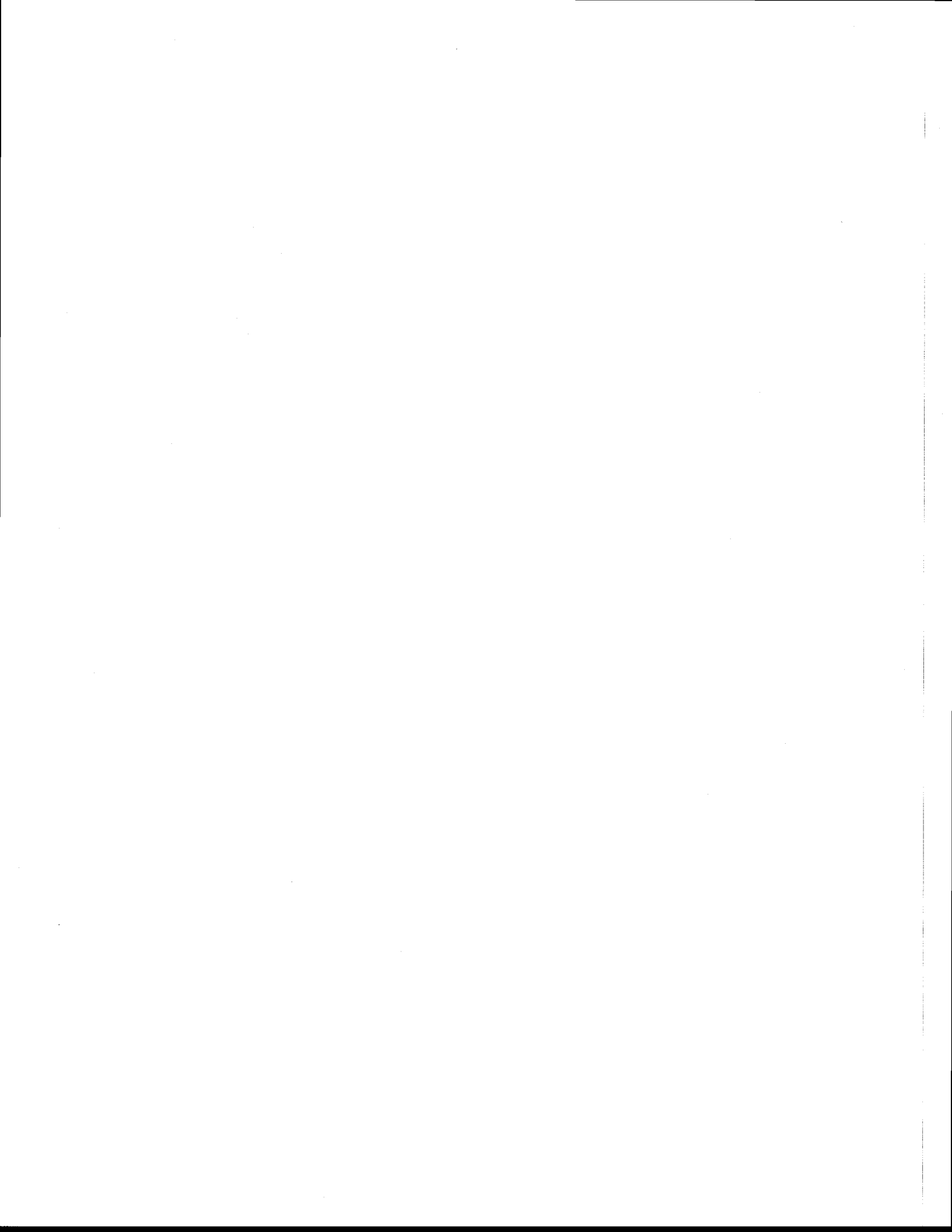
6 juillet 2001



RÉSUMÉ

En période de pluie, les déversements de réseaux d'égout unitaires (DRU) détériorent la qualité des cours d'eau urbains. Le contrôle en temps réel (CTR) de ces réseaux permet de réduire la fréquence et le volume des DRU par l'utilisation optimale de la capacité de stockage et de traitement des réseaux. À cette fin, une stratégie de CTR détermine comment doivent être opérés les ouvrages de régulation (tels les pompes, vannes, seuils, etc.) de façon à rencontrer certains objectifs de contrôle, tel par exemple la minimisation des volumes déversés. Le contrôle prédictif intégré (CPI) est une stratégie de CTR où les décisions de contrôle sont prises en fonction de l'état présent et futur de l'ensemble du réseau d'égout, estimé à l'aide de modèles de simulation à partir de prédictions des entrées au système.

Puisque la stratégie optimale de contrôle d'un CPI est déterminée à plusieurs reprises pendant le déroulement d'une pluie, la vitesse de résolution des modèles de simulation et des algorithmes d'optimisation utilisés est primordiale. Afin de respecter cette contrainte sur le temps de calcul, les stratégies de CPI existantes ont souvent recours à des modèles linéaires. Toutefois, de tels modèles ne peuvent reproduire le phénomène de refoulement, lequel peut survenir par exemple lors de la mise en charge de certaines conduites. Or ce dernier type d'écoulement peut être utilisé avantageusement par une stratégie de CTR en augmentant la capacité de stockage et de transport du réseau. C'est pourquoi la thèse propose un nouveau modèle permettant la simulation de tous les types d'écoulement en conduite, incluant les écoulements en charge, et dont la rapidité de résolution permet son utilisation en temps réel. Ce modèle a été validé sur un réseau d'égout réel ainsi que sur plusieurs réseaux hypothétiques. Une stratégie de CPI intégrant le modèle de simulation développé et l'algorithme d'optimisation du gradient réduit généralisé (GRG) a par la suite été élaborée. L'application de cette stratégie de contrôle sur le réseau d'égout de la ville de Laval (Canada) a démontré que la mise en charge des conduites permet de réduire de façon appréciable les volumes déversés en temps de pluie. Il a également été montré que la gestion d'intercepteurs en charge pouvait être réalisée sur de courts horizons de contrôle sans entraver la performance ni la fiabilité. Les résultats obtenus ont aussi conduit à la mise au point d'une stratégie de contrôle simplifiée pour les zones en charge, au sein desquelles les taux de propagation des débits sont généralement très élevés.



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Villeneuve, qui m'a fourni un cadre de travail idéal à la réalisation de cette thèse. Ses encouragements et la confiance qu'il m'a toujours manifestée ont sans contredit été essentiels à l'achèvement de ces travaux. Les responsabilités qu'il m'a confiées dans le cadre de ses cours ont également contribué d'une agréable façon à ma formation. Je ne pourrais enfin omettre de mentionner la pertinence des conseils qu'il a toujours su formuler au sujet de mes divers travaux de recherche.

Les travaux présentés dans cette thèse ont aussi bénéficié des réflexions d'Alain Mailhot, véritable modèle de rigueur scientifique, que j'aimerais remercier pour sa disponibilité, son attention ainsi que son amitié. Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté de réviser cette thèse. Je souhaite aussi remercier Claude Blanchette et Michel Roux, qui ont toujours su résoudre avec le sourire les diverses embûches informatiques que j'ai rencontrées lors de la réalisation de mes travaux.

Il m'importe également de remercier mes parents qui tout au long de mes études ont porté un intérêt soutenu à mes diverses activités et grâce auxquels j'ai toujours souhaité y mettre le meilleur de moi-même. L'aboutissement de ces travaux a également bénéficié des encouragements et du soutien quotidien de mon époux, Claude Fortin, que je remercie pour m'avoir accompagnée tout au long de la réalisation de cette thèse et pour m'avoir permis de réaliser une bonne partie de sa rédaction dans un décor enchanteur. Je souhaite enfin remercier mes divers collègues, dont notamment Geneviève Pelletier, qui ont égayé mon passage à l'INRS-Eau.

Cette recherche a été rendue possible grâce au soutien financier du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG), du Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR), de l'INRS-Eau et du professeur Jean-Pierre Villeneuve.

À mon oncle Georges, dont le souvenir m'a accompagnée tout au long de la rédaction de cette thèse.

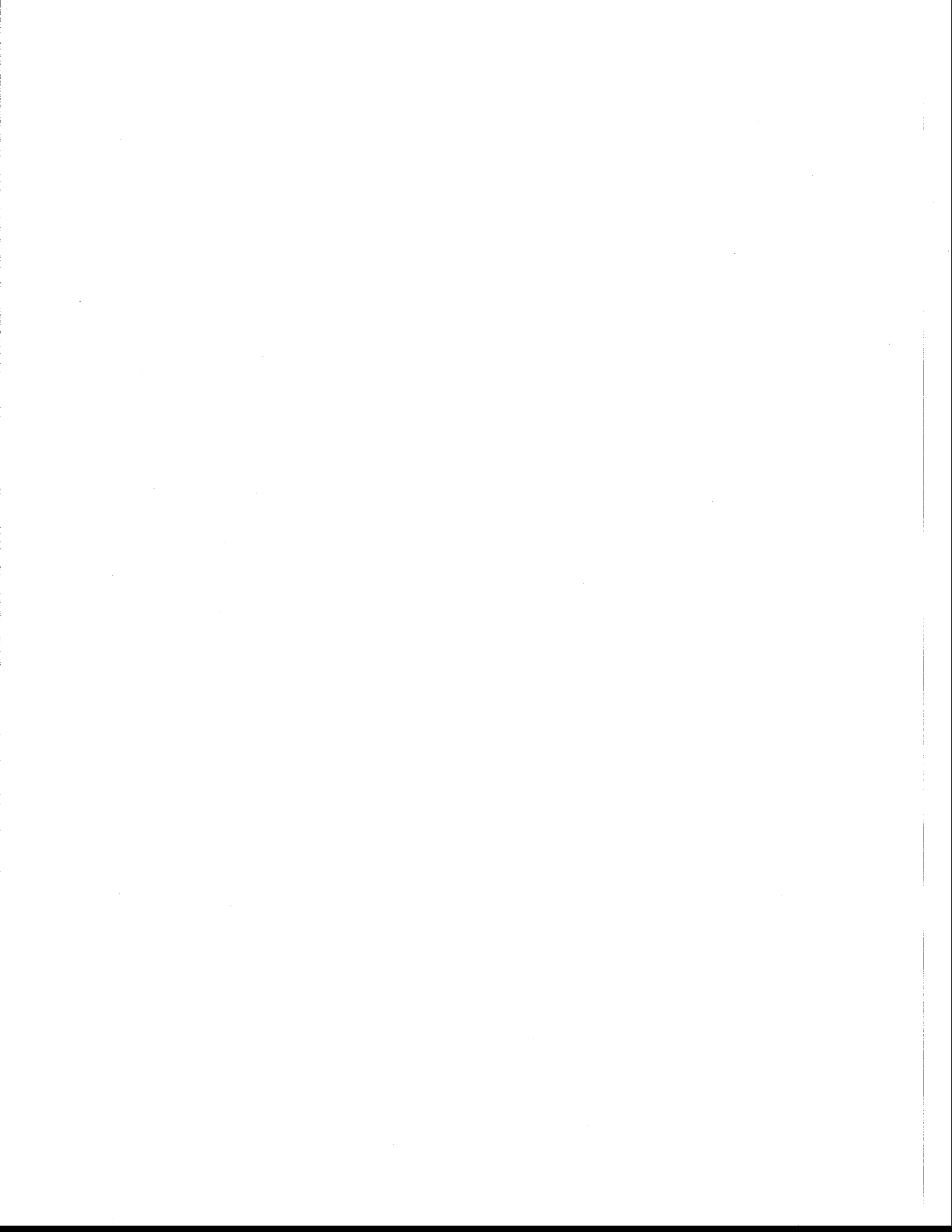


TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
1 INTRODUCTION	1
2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Méthodes de réduction des volumes et des charges polluantes déversés	5
2.2 Contrôle en temps réel des réseaux d'égout	6
2.2.1 Principes généraux	6
2.2.2 Cas d'application	10
2.2.3 Conclusion	13
2.3 Modélisation des écoulements en réseau d'égout	14
2.3.1 Modèles à base physique	14
2.3.1.1 Équations de St-Venant et leurs simplifications	14
2.3.1.2 Méthodes de résolution des équations de St-Venant	17
2.3.1.2.1 <u>Modèles simplifiés</u>	17
2.3.1.2.2 <u>Modèle dynamique complet</u>	18
2.3.1.3 Modèle détaillé d'étude des mises en charge	19
2.3.2 Autres types de modèles	19
2.3.2.1 Modèle Muskingum	19
2.3.2.2 Modèles stochastiques et fonctions de transfert	20
2.3.2.3 Utilisation d'un réseau neuronal	20
2.3.2.4 Modèles conceptuels	21
2.3.3 Conclusion	21
3 MODÈLE DE SIMULATION DES ÉCOULEMENTS EN CONDUITE D'ÉGOUT ...	23
3.1 Concept d'influence aval	23
3.2 Équations de base du modèle	25
3.2.1 Configurations particulières d'écoulement	25
3.2.1.1 Cas sans influence aval	26
3.2.1.2 Cas avec influence aval	27
3.2.1.2.1 <u>Influence aval causée par une hausse du niveau d'eau ou par une mise en charge</u>	28
3.2.1.2.2 <u>Influence aval causée par une condition limite particulière</u>	30
3.2.1.2.2.1 <u>Passage d'un écoulement fluvial à un écoulement torrentiel</u>	31
3.2.1.2.2.2 <u>Puits de pompage</u>	33
3.3 Méthode de résolution	34
3.4 Validation	38
3.4.1 Cas d'application	38

3.4.2	Résultats	42
3.4.3	Discussion	49
3.4.3.1	Validation avec les résultats du modèle EXTRAN	49
3.4.3.2	Validation avec les résultats du modèle SUPERLINK	54
3.4.3.3	Temps de calcul	56
3.5	Conclusion	57
4	STRATÉGIE DE CONTRÔLE	59
4.1	Description générale de la stratégie de contrôle	60
4.2	Formulation mathématique	63
4.3	Choix d'un algorithme d'optimisation	65
4.3.1	Cas simple d'application	66
4.4	Évaluation de la stratégie de contrôle	72
4.4.1	Données utilisées	73
4.4.2	Impact de la hauteur maximale permise	76
4.4.2.1	Évaluation de la performance	78
4.4.2.2	Évaluation de la fiabilité	85
4.4.3	Impact de la durée de l'horizon de contrôle	88
4.4.3.1	Évaluation de la performance	88
4.4.3.2	Évaluation de la fiabilité	93
4.4.4	Localisation optimale des points de régulation	96
4.4.4.1	Impact du nombre de régulateurs contrôlés	96
4.4.4.2	Impact de la position des régulateurs contrôlés	99
4.5	Stratégies de contrôle simplifiées	104
4.5.1	Contrôle de la hauteur d'eau dans le puits	104
4.5.2	Maximisation du débit à l'aval de l'intercepteur	105
4.5.3	Contrôle réactif local favorisant les mises en charge	108
4.6	Conclusion	112
5	CONCLUSION	115
ANNEXE A	Impact des eaux de ruissellement urbaines sur le milieu récepteur	121
ANNEXE B	Méthodes de réduction des volumes et des charges de polluants déversés	127
ANNEXE C	Méthodes de résolution des équations de St-Venant	141
ANNEXE D	Présentation du modèle EXTRAN de SWMM	155
ANNEXE E	Équations de régression utilisées par le modèle de simulation	159
ANNEXE F	Hydrogrammes des pluies utilisées pour la validation du modèle de simulation ..	165
ANNEXE G	Résultats de simulation	167
ANNEXE H	Description des algorithmes d'optimisation de Powell et GRG	179

ANNEXE I	Hyétogrammes et hydrogrammes des pluies utilisées pour les optimisations	185
ANNEXE J	Résultats d'optimisation	199
ANNEXE K	Évaluation du temps de réaction de l'intercepteur Marigot lorsqu'en charge	229
RÉFÉRENCES	235

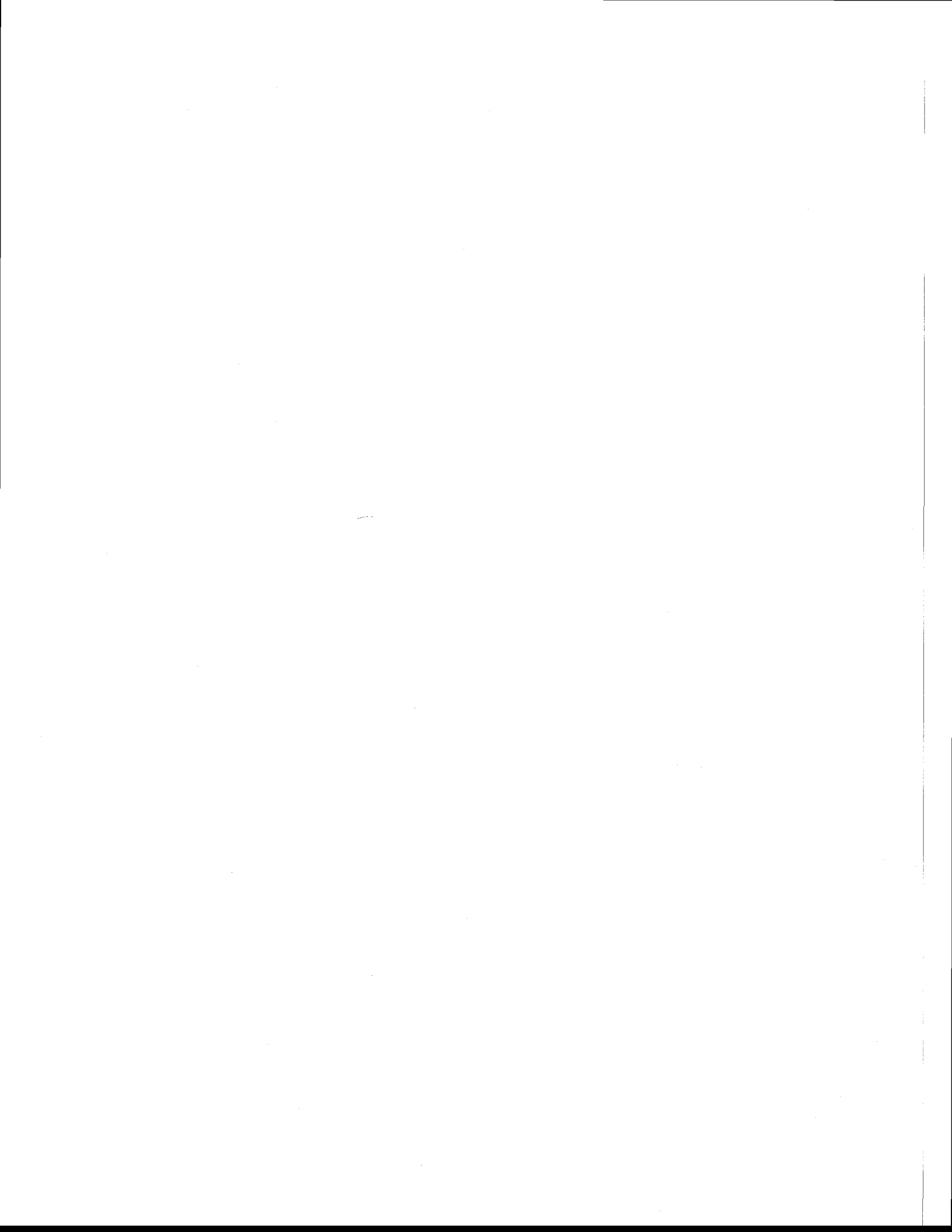
LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 :	Caractéristiques des réseaux modélisés pour la validation du modèle	40
Tableau 3.2 :	Principales caractéristiques des pluies utilisées pour la validation du modèle	41
Tableau 3.3 :	Combinaisons réseau-pluie simulées lors de la validation du modèle	42
Tableau 3.4 :	Pas de temps et temps de simulation	49
Tableau 4.1 :	Nombre total d'évaluations de la fonction objectif et temps de calcul requis par les trois méthodes d'optimisation pour chaque cas d'application	72
Tableau 4.2 :	Caractéristiques des pluies survenues au cours de l'été 1989 sur le territoire de Laval	74
Tableau 4.3 :	Volume total déversé pour l'été 1989 selon le type de contrôle en considérant un horizon de contrôle de 20 minutes pour le contrôle prédictif	79
Tableau 4.4 :	Hauteur maximale sur l'intercepteur Marigot selon le type de contrôle appliqué en considérant un horizon de contrôle de 20 minutes	86
Tableau 4.5 :	Déversements totaux (m ³) pour l'été 1989 en fonction de la durée de l'horizon de contrôle et de la hauteur maximale permise	89
Tableau 4.6 :	Hauteurs d'eau maximales atteintes et durées maximales des dépassements de contraintes au cours de l'été 1989 selon la durée de l'horizon de contrôle	93
Tableau 4.7 :	Hauteurs d'eau maximales atteintes et durées des dépassements de contraintes pour la pluie centennale selon la durée de l'horizon de contrôle	94
Tableau 4.8 :	Volume total déversé au cours de l'été 1989 selon le nombre de régulateurs contrôlés avec un horizon de contrôle de 20 minutes	98
Tableau 4.9 :	Hauteur d'eau maximale atteinte (m) au cours de l'été 1989 selon le nombre de régulateurs contrôlés	98
Tableau 4.10 :	Volume total déversé au cours de l'été 1989 selon la localisation des régulateurs contrôlés en utilisant un horizon de contrôle de 20 minutes	100
Tableau 4.11 :	Hauteur d'eau maximale atteinte (m) au cours de l'été 1989 selon la localisation des régulateurs contrôlés	101
Tableau 4.12 :	Volume d'eau reçu en temps de pluie aux huit derniers noeuds de l'intercepteur Marigot lors de l'été 1989 et position des régulateurs contrôlés	103
Tableau 4.13 :	Comparaison de la performance du CRL et du CPG (en considérant un horizon de contrôle de 20 minutes pour le CPG)	109

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 :	Profil de la ligne d'eau sans influence aval	27
Figure 3.2 :	Profil de la ligne d'eau avec influence aval (écoulement à surface libre)	29
Figure 3.3 :	Profil de la ligne d'eau avec influence aval (écoulement en charge)	30
Figure 3.4 :	Variation des termes d'énergie pour un exutoire à surface libre sous régime fluvial	32
Figure 3.5 :	Profil de la ligne d'eau lors du passage d'un écoulement fluvial à un écoulement torrentiel	33
Figure 3.6 :	Puits de pompage sans influence sur le réseau	34
Figure 3.7 :	Puits de pompage avec influence sur le réseau	34
Figure 3.8 :	Algorithme de résolution du modèle pour un pas de temps particulier	37
Figure 3.9 :	Ouvrages principaux du réseau d'égout de la ville de Laval	38
Figure 3.10 :	Représentation schématique de l'intercepteur Marigot	39
Figure 3.11 :	Débits simulés sur le réseau Marigot, pluie 118	44
Figure 3.12 :	Hauteurs simulées sur le réseau Marigot, pluie 118	44
Figure 3.13 :	Débits simulés sur le réseau 001, pluie 107	45
Figure 3.14 :	Hauteurs simulées sur le réseau 001, pluie 107	45
Figure 3.15 :	Débits simulés sur le réseau 010, pluie 106	46
Figure 3.16 :	Hauteurs simulées sur le réseau 010, pluie 106	46
Figure 3.17 :	Débits simulés sur le réseau 021, pluie 104	47
Figure 3.18 :	Hauteurs simulées sur le réseau 021, pluie 104	47
Figure 3.19 :	Débits simulés sur le réseau 035, pluie 119	48
Figure 3.20 :	Hauteurs simulées sur le réseau 035, pluie 119	48
Figure 3.21 :	Débits simulés sur le réseau 021, pluie 104 avec un pas de temps de 480 s pour le MIA	51
Figure 3.22 :	Débits simulés sur le réseau 021, pluie 104 avec un pas de temps de 15 s pour le MIA	51
Figure 3.23 :	Influence du pas de temps sur les résultats du MIA (pluie 104, réseau 021)	52
Figure 3.24 :	Influence du pas de temps sur les résultats d'EXTRAN (pluie 104, réseau 021) ...	53
Figure 3.25 :	Influence du pas de temps sur les résultats d'EXTRAN (pluie 107, réseau 001) ...	54
Figure 3.26 :	Comparaison des relations hauteur-débit	55
Figure 4.1 :	Schéma global de contrôle en temps réel	61
Figure 4.2 :	Progression dans le temps de l'horizon de contrôle pour un pas d'optimisation de 5 minutes	62
Figure 4.3 :	Valeur de la fonction objectif en fonction des débits interceptés pour le cas #1 ...	69
Figure 4.4 :	Valeur de la fonction objectif en fonction des débits interceptés pour le cas #2 ...	70
Figure 4.5 :	Position des régulateurs contrôlés sur l'intercepteur Marigot lors de la première série d'optimisations	77
Figure 4.6 :	Réduction par rapport au CRL du volume déversé lors des pluies de l'été 1989 pour diverses hauteurs piézométriques maximales	80
Figure 4.7 :	Réduction du volume total déversé par rapport à un contrôle évitant les mises en charge	82
Figure 4.8 :	Débits simulés à l'aval du tronçon 18 et hauteurs simulées au noeud 17 lors de la pluie 12	83

Figure 4.9 :	Profil de la hauteur piézométrique maximale selon différentes contraintes d'opération	84
Figure 4.10 :	Réduction du volume total déversé pour la pluie 12 par rapport à un contrôle évitant les mises en charge	85
Figure 4.11 :	Volume déversé en fonction de la durée de l'horizon de contrôle pour $h_{\max} = 10$ m	89
Figure 4.12 :	Volume déversé en fonction de la durée de l'horizon de contrôle pour $h_{\max} = 5$ m ..	89
Figure 4.14 :	Volume déversé en fonction de la durée de l'horizon de contrôle pour $h_{\max} = \text{diamètre}$	90
Figure 4.13 :	Volume déversé en fonction de la durée de l'horizon de contrôle pour $h_{\max} = 3$ m ..	90
Figure 4.15 :	Position des régulateurs contrôlés sur l'intercepteur Marigot lors de l'étude de l'impact du nombre de régulateurs	97
Figure 4.16 :	Position des régulateurs contrôlés sur l'intercepteur Marigot lors de l'étude de l'impact de la position des régulateurs	100
Figure 4.17 :	Volumes déversés lors des pluies de l'été 1989 selon deux objectifs différents avec $h_{\max} = 5$ m et un horizon de contrôle de 5 minutes	107
Figure 4.18 :	Réduction du volume déversé pour $h_{\max} = 5$ m lors de chaque pluie de l'été 1989 en considérant un horizon de contrôle de 20 minutes pour le CPG	111



1 INTRODUCTION

En période de pluie, les débits acheminés aux réseaux d'égout unitaires dépassent souvent la capacité de transport et/ou de traitement de ces réseaux. Les débits excédentaires sont alors stockés dans certains ouvrages prévus à cette fin puis déversés au milieu récepteur lorsque ces ouvrages atteignent leur pleine capacité. Les déversements de réseaux d'égout unitaires (DRU) ainsi générés sont reconnus comme une source importante de dégradation de la qualité des cours d'eau en milieu urbain. À titre d'exemple, 35 % de la pollution annuelle totale déversée dans les cours d'eau du Royaume-Uni proviendrait de ce type de déversement [Ellis 1986]. Une revue intensive de la littérature internationale réalisée par Makepeace et al. [1995] révèle également que les eaux de ruissellement urbain peuvent afficher des concentrations de polluants (solides totaux et en suspension, matières organiques, coliformes fécaux, contaminants inorganiques, etc.) jusqu'à dix fois supérieures aux normes de concentrations maximales pour la préservation de la vie aquatique. Dans la région de Québec, des études ont montré que les déversements d'orage entraînent une détérioration globale des milieux récepteurs pouvant se poursuivre jusqu'à deux à trois jours après la fin de la pluie [Lavallée et al. 1984].

L'importance des impacts occasionnés par les DRU a conduit au développement de nombreuses techniques visant la diminution du volume de ces déversements ou l'amélioration de la qualité des eaux déversées. Ainsi, certaines méthodes de contrôle à la source, telles la réduction des surfaces imperméables ou la limitation de l'usage de certains pesticides, permettent de réduire les volumes d'eau et les charges polluantes interceptés par les réseaux d'égout en temps de pluie. Également, la mise en place d'ouvrages de stockage et/ou de traitement aux points de déversement vers le milieu récepteur permet d'atténuer l'impact négatif des événements pluvieux sur la qualité des cours d'eau urbains. La construction de ces ouvrages peut toutefois s'avérer coûteuse et nécessiter l'utilisation de superficies importantes souvent difficiles à trouver en milieu urbain.

Le contrôle en temps réel (CTR) des réseaux d'égout unitaires permet quant à lui une utilisation optimale de la capacité de stockage existante des réseaux, afin de réduire la fréquence et le volume

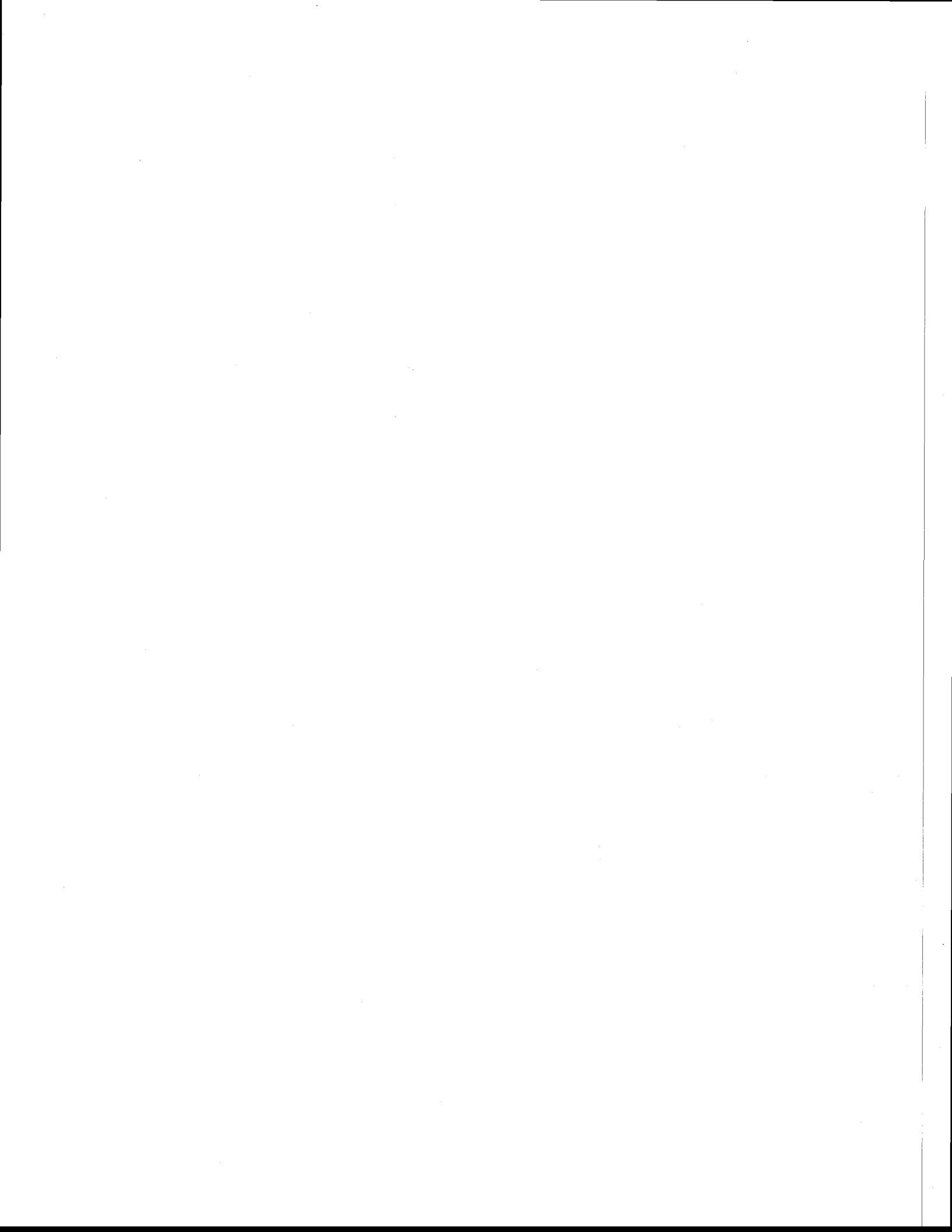
des déversements en diminuant considérablement les besoins en ouvrages de rétention. À cette fin, une stratégie de CTR détermine l'opération des ouvrages de régulation du réseau (tels les pompes, vannes, seuils, etc.) de façon à minimiser les volumes déversés. Un contrôle de type prédictif global (CPG) est une forme de CTR qui sélectionne les actions à entreprendre en fonction de l'état présent et futur de l'ensemble du réseau d'égout. Trois éléments sont essentiels à l'application d'un tel contrôle soit : 1) la prédiction sur une période de temps donnée des entrées au système (intensités de pluie ou débits de ruissellement) ; 2) un modèle de simulation calculant à partir des données d'entrée les débits et hauteurs d'eau en divers points du système et 3) un algorithme d'optimisation déterminant l'opération des ouvrages de régulation du réseau de façon à rencontrer les objectifs de contrôle.

La stratégie optimale d'un CPG devant être déterminée à plusieurs reprises pendant le déroulement d'une pluie en fonction des nouvelles informations disponibles, la vitesse de résolution des modèles de simulation et des algorithmes d'optimisation utilisés est primordiale. Afin de respecter cette contrainte sur le temps de calcul, les stratégies de CPG existantes ont souvent recours à des modèles simplifiés qui, sans l'ajout de paramètres pouvant être ajustés en temps réel en fonction d'informations mesurées en réseau, ne peuvent tenir compte des phénomènes se propageant vers l'amont, tel par exemple le refoulement provoqué par la mise en charge des conduites. Ainsi, plusieurs de ces systèmes limitent les débits en réseau à la capacité à surface libre des conduites afin d'éviter les écoulements en charge.

Si une stratégie de contrôle permettait la mise en charge des conduites afin d'utiliser au maximum les capacités de stockage et de transport du réseau, dans la mesure où les mises en charge admises respecteraient les caractéristiques physiques et topographiques du réseau, on peut dès lors penser que les volumes déversés en seraient d'autant réduits. Afin de vérifier cette hypothèse, cette thèse propose un mode de contrôle en temps réel des réseaux d'égout unitaires permettant la mise en charge de certaines conduites. Les objectifs particuliers de la thèse sont de : 1) développer un modèle simulant tout type d'écoulement en conduite, incluant les écoulements en charge, et dont

la rapidité de résolution permet son utilisation en temps réel ; 2) mettre en place une stratégie de contrôle prédictif intégré visant la minimisation des volumes déversés en temps de pluie en permettant la mise en charge de certaines conduites ; 3) comparer les résultats de cette stratégie de contrôle avec ceux d'un contrôle réactif local (c'est-à-dire d'un contrôle dont les décisions de gestion sont prises en fonction de variables mesurées localement dans le système) ; 4) évaluer la performance et la fiabilité de la stratégie développée en fonction de divers paramètres et 5) proposer une méthodologie de sélection de ces paramètres en fonction des résultats obtenus.

Le chapitre suivant de la thèse présente d'abord une revue de littérature des méthodes de réduction des volumes et des charges polluantes déversées en temps de pluie en s'attardant plus particulièrement sur le contrôle en temps réel des réseaux d'égout. Un recensement des modèles de simulation des écoulements en conduite d'égout y est par la suite présenté. Au Chapitre 3, consacré au modèle de simulation développé dans le cadre de cette thèse, les équations du modèle et la méthode de résolution appliquée sont tout d'abord introduits. Par la suite, le modèle est validé sur un réseau d'égout réel et sur plusieurs réseaux hypothétiques afin d'en vérifier la performance dans divers cas d'application. Le Chapitre 4 expose finalement la stratégie de CPG développée, cette dernière faisant appel au modèle de simulation précédent pour déterminer en temps réel le fonctionnement optimal des ouvrages de régulation d'un réseau d'égout. Les objectifs du contrôle y sont tout d'abord définis, puis la méthode d'optimisation est choisie en fonction des spécificités du problème à résoudre. La stratégie de contrôle est ensuite appliquée à un des intercepteurs de la ville de Laval (Canada) pour évaluer sa performance en fonction des périodes d'optimisation retenues, des contraintes opérationnelles à respecter et de la distribution des ouvrages de contrôle. Les résultats obtenus nous amènent à proposer un mode de contrôle adapté aux réseaux d'égout unitaires sous surcharge.



2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les déversements de réseaux d'égout unitaires (DRU) sont reconnus comme l'une des principales causes de la détérioration de la qualité des cours d'eau en milieu urbain. L'origine de cette pollution ainsi que la nature des impacts qu'elle engendre sont détaillées à l'Annexe A. Le présent chapitre présente quant à lui les diverses mesures pouvant être mises en oeuvre pour atténuer l'effet des événements pluvieux sur la qualité des cours d'eau récepteurs. On y portera une attention particulière au contrôle en temps réel (CTR) des réseaux d'égout puis nous présenterons une revue des modèles existants de simulation des écoulements en conduite, lesquels sont nécessaires à la mise en oeuvre d'un CTR de type prédictif.

2.1 Méthodes de réduction des volumes et des charges polluantes déversés

L'importance des impacts occasionnés par les déversements de réseau d'égout sur la qualité de l'eau des milieux récepteurs a mené au cours des dernières années au développement de nombreuses mesures visant à diminuer la quantité de polluants déversés en temps de pluie. Parmi ces mesures, certaines ont comme objectif principal la diminution des volumes déversés, tandis que d'autres tentent d'améliorer la qualité des eaux déversées. Une revue détaillée des méthodes mentionnées ci-dessous apparaît à l'Annexe B.

La réduction des volumes déversés peut tout d'abord être réalisée par le contrôle à la source des débits de ruissellement, lequel vise la diminution des pointes de débit et des volumes de ruissellement avant leur entrée dans le réseau d'égout. L'augmentation de la capacité de stockage du réseau par la construction d'ouvrages de rétention permet également de réduire le volume des déversements. Le contrôle en temps réel conduit aussi à la réduction des volumes déversés sur certains réseaux, en utilisant de façon judicieuse la capacité de stockage des ouvrages existants. Cette forme de contrôle consiste à opérer de façon dynamique les pompes, vannes ou autres ouvrages de régulation d'un réseau afin d'utiliser de façon optimale ses capacités de stockage et

de transport. Les décisions d'un contrôle dit réactif ne sont basées que sur la valeur de variables mesurées, tandis que le contrôle prédictif utilise l'ensemble de l'information disponible afin de prévoir l'état futur du système et de prendre une décision s'appuyant sur ces prédictions. Chacun de ces types de contrôle peut être appliqué localement ou en tenant compte de l'état du système en entier. La section 2.2 présente une revue plus détaillée des types de contrôle en temps réel et de divers cas d'application.

Certaines techniques visent plutôt l'amélioration de la qualité des eaux déversées. Parmi celles-ci, on retrouve d'abord la réduction des apports en polluants sur les bassins urbains et la réalisation d'ouvrages interceptant une partie de la charge polluante des eaux de ruissellement avant leur introduction dans le réseau d'égout. Avant leur rejet dans le milieu récepteur, les eaux déversées peuvent également subir divers traitements de types mécanique, chimique ou biologique. Enfin, certains systèmes de contrôle en temps réel privilégient le déversement des eaux les moins polluées pour améliorer la qualité des eaux déversées.

2.2 Contrôle en temps réel des réseaux d'égout

2.2.1 Principes généraux

La majorité des réseaux d'égout unitaires sont gérés de façon statique, c'est-à-dire en maintenant fixes les paramètres de fonctionnement des ouvrages de régulation (taux de pompage, ouverture des vannes, taux de vidange des réservoirs, etc.) pendant toute la durée de la pluie. De cette façon, même en présence de diverses mesures visant la réduction des volumes et/ou polluants entraînés, la performance optimale ne peut être obtenue que lors de l'avènement de la pluie de conception [Schilling 1994]. Pour la majorité des événements pluvieux, des déversements vers le milieu récepteur pourront donc survenir même si le stockage disponible n'est pas utilisé à pleine capacité [Jorgensen et al. 1995]. Le contrôle en temps réel (CTR) permet de corriger cette situation en déterminant, en temps de pluie, l'opération des ouvrages de régulation permettant d'atteindre des objectifs de contrôle spécifiques. Outre la minimisation des volumes déversés, le CTR peut être

appliqué afin de rencontrer divers objectifs tels la réduction des coûts de pompage, la protection contre les inondations, la régulation des débits transmis à la station de traitement, la diminution des charges polluantes déversées, etc. Certains de ces objectifs s'avérant parfois contradictoires, la mise en place d'une stratégie de CTR nécessite la définition de priorités de gestion [Capodaglio 1994a].

Le CTR est dit réactif lorsque les décisions de gestion se basent sur la mesure de différentes variables d'état du système. Les ouvrages de régulation sont alors opérés en fonction des valeurs mesurées en réseau (débits, hauteurs d'eau, etc.) afin de tendre vers un état désiré. Un contrôle réactif peut être appliqué localement, lorsque seules les valeurs mesurées au voisinage d'un ouvrage de contrôle déterminent son opération, ou encore globalement, lorsque l'état du système en d'autres points du réseau est également pris en compte pour opérer cet ouvrage [Carstensen et al. 1996]. Divers cas d'application du contrôle réactif sont présentés à l'Annexe B.

La performance d'un CTR peut être améliorée par la prise en compte, en plus d'informations mesurées dans le réseau, de prédictions concernant l'état futur de ce système. Le contrôle est alors de type prédictif et permet de considérer le temps de propagation des débits d'un ouvrage de contrôle à un autre. Ce type de contrôle nécessite de prédire les intrants futurs du système (intensités de pluie ou débits de ruissellement) et de calculer la propagation de ces intrants à travers le réseau d'égout à l'aide de modèles de simulation. En plus de fournir des prédictions fiables, les modèles utilisés dans ce contexte doivent être rapides d'exécution, puisque l'optimisation du fonctionnement du réseau nécessite plusieurs simulations de l'état du système sur la période de contrôle choisie. D'un point de vue pratique, l'application d'un contrôle prédictif global nécessite l'installation d'équipements permettant de mesurer l'état du système et/ou de prédire les intrants futurs (ex. radar). Les informations ainsi recueillies sont transférées par un réseau de communication vers un organe central de contrôle qui, en fonction des données reçues, détermine l'opération optimale des ouvrages de contrôle à l'aide des modèles appropriés. Les consignes à appliquer en réseau sont par la suite transmises aux contrôleurs locaux, lesquels

définissent les ajustements à entreprendre au niveau des régulateurs (pompes, vannes, etc.) afin de respecter ces consignes [Schilling et Petersen 1987].

Dans ce contexte, la présente thèse s'intéresse plus particulièrement à la façon dont l'organe central de contrôle détermine les consignes à appliquer sur le réseau en fonction des informations reçues. Trois principaux types de méthodes permettent de définir ces consignes afin d'atteindre les objectifs du contrôle (réduction des volumes déversés ou autre), soit les méthodes heuristiques, les méthodes par scénarios et les techniques d'optimisation mathématique. Le premier type de méthodes définit une base de règles à appliquer en réponse à diverses situations. Ces règles sont établies en fonction de l'expérience du concepteur et de la connaissance *a priori* de la réponse du système sous certaines sollicitations. Parmi ces méthodes, on trouve notamment les systèmes experts et la logique floue [Marinaki et al. 1999]. La méthode par scénarios procède plutôt par comparaison de l'efficacité de diverses solutions préalablement définies [Cunge et al. 1994]. Quant aux techniques d'optimisation mathématique, elles visent la maximisation ou la minimisation d'une fonction objectif, laquelle représente mathématiquement les objectifs de contrôle. Selon Stirrup et al. [1997], cette méthode demeure la plus rigoureuse, puisqu'elle permet de comparer les stratégies sur une base plus formelle et, dans certains cas, assure le caractère optimal de la solution choisie. Pour appliquer l'optimisation mathématique dans un contexte de contrôle en temps réel, le problème est généralement représenté sous la forme suivante :

$$\text{minimiser} \left[\sum_{t=1}^T f(\underline{x}(t), \underline{u}(t)) \right] \quad (2.1)$$

avec f , une fonction objectif dépendante des variables d'état du système $\underline{x}(t)$ et des variables de contrôle $\underline{u}(t)$ et T , l'horizon de contrôle, c'est-à-dire la période de temps sur laquelle on souhaite effectuer l'optimisation. Le problème consiste alors à déterminer la valeur des variables de contrôle, $\underline{u}(t)$, qui minimisent la fonction objectif tout en respectant certaines conditions. Parmi celles-ci, on retrouve notamment les conditions initiales $(\underline{x}(0), \underline{u}(0))$, les contraintes physiques du système (débits maximaux, capacités de stockage, etc.), les valeurs inférieures et