

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Sc.A.

PAR
Guillaume COURSOL TELLIER

ADAPTATION D'UNE MÉTHODE DE SECTORISATION DES RÉSEAUX DE
DISTRIBUTION D'EAU POTABLE ET APPLICATION AUX RÉSEAUX DE DEUX
MUNICIPALITÉS AU QUÉBEC

MONTREAL, LE 8 MAI 2015



Guillaume Coursol Tellier, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Annie Poulin, directrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Baraer, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Ouimet, membre du jury externe
Aqua Data Inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 AVRIL 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Annie Poulin, de m'avoir laissé carte blanche sur le sujet de mon mémoire. Ta disponibilité et ta rigueur au travail ont grandement augmenté la qualité de mon travail. Je te remercie de tes conseils avisés qui, par moment, dépassaient le cadre du travail.

De plus, je remercie ma superviseure en milieu industriel, Christine Ouimet, qui a su apporter une dimension pratique au mémoire. Je te remercie d'avoir pris tout ce temps pour mon mémoire malgré tes nombreux autres projets. Je remercie aussi Stéphane Alarie de l'IREQ qui a m'a fourni plusieurs informations pertinentes concernant le domaine de l'optimisation.

En faisant partie du groupe de recherche du DRAME, j'ai été choyé de côtoyer des collègues qui sont devenus des amis. Je remercie plus particulièrement Dorian avec qui j'ai pu me changer les idées par des sorties de ski et des projets de construction, Philippe pour les nombreuses pauses cafés et Pierre-Luc pour l'atmosphère agréable que tu as instaurée dans ce local. Je n'oublie pas les autres étudiants avec lesquels j'ai passé de bons moments.

Finalement, je remercie ma famille qui m'a soutenu durant mes 2 ans de maîtrise en me demandant, à un intervalle d'une à deux semaines, l'état de l'avancement de mes travaux. Un merci tout spécial à Stéphanie qui m'a soutenu moralement pendant la rédaction de mon mémoire.

ADAPTATION D'UNE APPROCHE POUR LA SECTORISATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE ET APPLICATION AUX RÉSEAUX DE DEUX MUNICIPALITÉS DU QUÉBEC

Guillaume COURSOL TELLIER

RÉSUMÉ

Le Québec est la province canadienne ayant la consommation d'eau la plus élevée (795 litres/personne/jour en 2006). Cet important volume d'eau est en partie dû au pourcentage élevé de pertes en réseau de distribution d'eau potable (26%). Dans ce contexte, la sectorisation consiste en la division d'un réseau en plusieurs secteurs permanents ou non, délimités par des vannes fermées et des débitmètres (points d'entrée). Pour chaque secteur, un suivi des débits peut être effectué à une échelle qui permet de distinguer, après analyse des débits de nuit, la consommation normale et les fuites.

À ce jour, quelques études européennes se sont concentrées sur le développement d'approches visant à informatiser la sectorisation tout en respectant un ensemble de critères. Toutefois, les caractéristiques des réseaux de distribution d'eau potable nord-américains rendent difficile l'application directe de ces méthodes puisque trois principaux facteurs diffèrent : (1) la topologie des réseaux nord-américains est habituellement plus maillée (et moins ramifiée) que celle des réseaux européens; (2) les réseaux nord-américains sont composés de conduites de plus grands diamètres pour assurer la protection contre les incendies, ce qui n'est pas le cas des réseaux européens et (3) la formation des secteurs des réseaux européens est généralement déterminée dès la phase de conception (contrairement aux réseaux nord-américains).

Dans le cadre de ce mémoire, une approche heuristique récemment développée par DiNardo et DiNatale (2011) a été adaptée de façon à définir les frontières des secteurs des réseaux de distribution d'eau potable québécois (délimitation des secteurs, identification du nombre et de la localisation des vannes à fermer et des débitmètres à installer). Les travaux, réalisés en collaboration avec l'entreprise Aqua Data Inc., guident l'utilisateur vers l'obtention d'une solution parmi un ensemble de solutions de sectorisation géographiquement et hydrauliquement semblables tout en tenant compte des besoins en matière de protection contre les incendies. Contrairement aux travaux existants, les frontières des secteurs finaux considèrent les vannes disponibles et opérables. Cet aspect des travaux repose sur les recours à un algorithme d'optimisation. Les réseaux de distribution d'eau potable de deux municipalités québécoises sont à l'étude; ceux-ci possèdent des caractéristiques topologiques (maillage et ramification) et topographiques (présence de paliers hydrauliques) différentes, ce qui permet de vérifier la pertinence de l'applicabilité des présents travaux.

Les résultats obtenus avec la sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011) et la sectorisation issue des présents travaux sont comparés pour les deux réseaux d'étude québécois, à l'aide d'un ensemble d'indicateurs de natures hydraulique et topologique. Cette comparaison démontre la pertinence d'appliquer la méthode adaptée dans le cadre des

VIII

présents travaux pour obtenir une solution hydrauliquement convenable pour des réseaux nord-américains. La comparaison des indices évaluant la performance de l'ensemble du réseau met en perspective l'approche nouvellement développée (avantages, limites, utilités).

Mots clés : Réseau de distribution d'eau potable, sectorisation, méthode heuristique, vannes d'isolement, optimisation

ADAPTATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORK SECTORISATION APPROACH AND ITS APPLICATION TO TWO QUEBEC MUNICIPALITIES NETWORK

Guillaume COURSOL TELLIER

ABSTRACT

Quebec is the Canadian province with the highest water consumption (795 liters/person/day in 2006). This large water volume is partially due to the high percentage of water loss in the water distribution networks (WDNs) (26%). Network sectorisation (district metering) consists in partitioning a WDN into several district metering areas (DMAs), permanent or not, delimited by closed valves and by flow meters (entry points) at their boundaries. For each DMA, after minimum night flow analysis, a follow-up of the inflows can be made in order to distinguish leakage from normal consumption.

Some computerized approaches have recently been developed for WDN sectorisation while respecting a set of criteria. However, these studies have mostly concentrated on European WDNs. There are three fundamental differences between the North American WDNs and the European WDNs which make the direct application of the existing approaches a challenging task: (1) the topology of North American WDNs tends to be more looped than the European WDNs (generally more branched), (2) North American WDNs are designed to meet fire protection requirements and water consumption needs therefore they are composed of larger diameter pipes than the European WDNs which are designed to meet only the water consumers' needs (3) the creation of DMAs in European WDNs is generally determined during the design phase (unlike in Quebec's WDNs).

A heuristic approach developed by DiNardo and DiNatale (2011) was adapted to define DMA boundaries (delimitation of DMAs, identification of the boundary valves to be closed and of the entry points – flow meters to be installed). The resulting approach, developed in association with Aqua Data inc., was applied to two WDNs located in the province of Quebec and having different topological (looped and branched) and topographic (district pressure) characteristics. The approach guides the user towards a solution among a set of solutions which are geographically and hydraulically similar, and takes into account fire protection requirements. Contrary to the existing works, the boundaries of the DMAs take into consideration the available and operable valves. This part of the present works is based on the use of an optimization algorithm.

The results obtained with the sectorisation approach developed by DiNardo and DiNatale (2011) and with the sectorisation approach developed in these works are compared for the two Quebec WDNs, using a set of hydraulic and topological indicators. This comparison demonstrates the relevance of applying the newly developed method into North American WDNs, to obtain hydraulically suitable solutions. The comparison of the performance indicators of the studied WDNs puts into perspective this new approach (advantages, limitations and purposes).

Keywords: Water distribution network, sectorisation, heuristic method, valves, optimization

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION À LA SECTORISATION D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE	1
1.1 L'état des infrastructures des réseaux de distribution d'eau potable dans les municipalités canadiennes et québécoises	1
1.2 Les habitudes de consommation d'eau potable	2
1.3 Présentation et objectifs de la stratégie québécoise d'économie de l'eau potable.....	3
1.4 Exemples d'application de la sectorisation d'un réseau de distribution d'eau potable et pertinence des présents travaux.....	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Types de fuites dans un réseau de distribution d'eau potable.....	7
2.2 Méthodes de réduction des pertes réelles.....	10
2.3 Considérations générales sur la sectorisation d'un réseau de distribution d'eau potable.....	12
2.4 Revue des approches de sectorisation développées et critères pris en compte.....	14
2.4.1 Critères de conception traditionnels empiriques.....	14
2.4.2 Approches informatisées existantes pour la délimitation des secteurs	15
2.4.3 Méthodes d'isolement des conduites	19
2.5 Critères d'évaluation de la performance d'un réseau de distribution d'eau potable.....	20
2.5.1 Critères hydrauliques	20
2.5.2 Critères associés à la vulnérabilité d'un réseau	21
2.5.3 Critères de performance topologiques	22
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET APERÇU DES TRAVAUX RÉALISÉS DANS LE PRÉSENT MÉMOIRE	23
3.1 Problématique	23
3.2 Objectifs des travaux.....	24
3.2.1 Aperçu général des travaux réalisés.....	25
3.2.2 Hypothèses et limitations générales des présents travaux	27
3.2.3 Présentation des réseaux à l'étude	28
CHAPITRE 4 SECTORISATION INITIALE D'UN RDEP	33
4.1 Présentation de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)	33
4.1.1 Description de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) .	33
4.1.2 Hypothèses sous-jacentes à l'application de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011).....	38
4.1.3 Application de la méthode au réseau <i>Anytown, USA</i>	39
4.1.4 Application de la méthode aux deux réseaux d'étude québécois	45
4.2 Adaptation de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)	49
4.2.1 Poids de la matrice d'adjacence du réseau principal	49
4.2.2 Répartition des consommations par secteur.....	52
4.2.3 Les zones d'influence des sources	52

4.2.4	Calcul des fréquences	54
4.2.5	Indices de performance des RDEP	55
4.2.6	La protection contre les incendies.....	57
4.3	Validation de la méthode	59
4.4	Application de la méthode adaptée aux réseaux d'étude	61
4.4.1	Réseau de Ville-Mont-Royal	61
4.4.2	Réseau d'Aylmer	68
CHAPITRE 5 SECTORISATION FINALE D'UN RDEP		73
5.1	Description du problème de la sectorisation finale.....	73
5.1.1	Présentation du problème d'optimisation pour l'identification des vannes aux frontières des secteurs	76
5.1.2	Connectivité des nœuds d'un secteur à une source.....	77
5.1.3	Déformation des secteurs initiaux – $g(x)$	78
5.1.4	Nombre de vannes d'isolement fermées – $h(x)$	79
5.1.5	L'absence de vannes d'isolement – $j(x)$	79
5.1.6	Détermination des poids des critères de la fonction objectif	80
5.2	Description de l'algorithme génétique.....	81
5.1	Solutions obtenues au terme de l'optimisation	82
5.2	Détermination des secteurs finaux pour les RDEP à l'étude	83
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		89
6.1	Résultats obtenus à partir des méthodes de sectorisation initiale	89
6.1.1	Analyse des pressions	89
6.1.2	Cas particulier du réseau d'Aylmer	94
6.1.3	Analyse des vitesses.....	94
6.1.4	Analyse des indices de performance en fonction des modifications apportées à la méthode de sectorisation initiale développée par DiNardo et DiNatale (2011)	96
6.1.5	Analyse de la performance de la protection contre les incendies	101
6.1.6	Comparaison des sectorisations initiales avec la sectorisation manuelle pour le réseau de Ville-Mont-Royal	103
6.2	Comparaison des RDEP sectorisés selon la méthode de sectorisation finale.....	104
6.2.1	Point de vue hydraulique	104
6.2.2	Point de vue de la performance des RDEP	106
6.2.3	Point de vue de l'optimisation	109
CONCLUSION.....		113
ANNEXE I CONCEPTS DE LA MODÉLISATION D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE		117
ANNEXE II REPRÉSENTATION HIÉRARCHIQUE DES MÉTHODES DE SECTORISATION INITIALE		129

ANNEXE III DIFFÉRENCES DES SECTEURS SELON LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR DiNardo et DiNatale (2011) ET LA MÉTHODE ADAPTÉE.....	135
ANNEXE IV RÉPARTITION DES COTES DE LA PERFORMANCE DE LA PROTECTIONCONTRE LES INCENDIES POUR LES RÉSEAUX QUÉBÉCOIS À L'ÉTUDE	139
ANNEXE V DÉTERMINATION DES PONDÉRATIONS (PÉNALITÉS) ASSOCIÉES AUX CRITÈTES DE LA FONCTION OBJECTIF À OPTIMISER	143
ANNEXE VI RÉSULTATS DE LA SECTORISATION EXÉCUTÉE MANUELLEMENT	147
BIBLIOGRAPHIE	149

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparaison des consommations journalières résidentielles3
Tableau 2.1	Répartition des consommations, Tiré de AWWA (2009).....8
Tableau 2.2	Méthodes de sectorisation existantes15
Tableau 4.1	Exemple comparatif des coûts w_{xy} des conduites du RDEP <i>Anytown, USA</i> 44
Tableau 4.2	Différence de coût w_{xy} entre la méthode de sectorisation de DiNardo et DiNatale (2011) et la méthode adaptée.....51
Tableau 4.3	Résultats du calcul des zones d'influence des sources 1 et 2 de la Figure 4.7.....54
Tableau 4.4	Indicateurs de la capacité des bornes d'incendie à fournir le débit requis pour la protection contre les incendies Tiré de MAMOT (2013a)58
Tableau 4.5	Indices de performance du RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée, avant de considérer la protection contre les incendies.....65
Tableau 4.6	Performance de la protection contre les incendies du RDEP de VMR.....66
Tableau 4.7	Indices de performance du RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée en considérant la protection contre les incendies67
Tableau 4.8	Indices de performance du RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode adaptée70
Tableau 4.9	Performance de la sécurité contre les incendies du RDEP d'Aylmer.....71
Tableau 5.1	Valeurs de la fonction objectif et des différents critères suite à l'obtention des secteurs finaux pour les RDEP de VMR et d'Aylmer en considérant les vannes disponibles.....85
Tableau 5.2	Valeurs de la fonction objectif et des différents critères suite à l'obtention des secteurs finaux pour les RDEP de VMR et d'Aylmer en considérant les vannes opérables.....86
Tableau 6.1	Tableau résumé des RDEP sectorisés.....90
Tableau 6.2	Analyse hydraulique de vitesses d'écoulement95

Tableau 6.3	Comparaison des temps de séjour des réseaux initiaux et sectorisés à l'aide des méthodes de sectorisation initiale.....	96
Tableau 6.4	Comparaison des indices de performance des RDEP initiaux et des RDEP sectorisés suivant les méthodes de sectorisation initiale.....	97
Tableau 6.5	Comparaison des diamètres moyens des conduites fermées pour les méthodes de sectorisation initiale	98
Tableau 6.6	Diamètres des conduites d'entrée des secteurs pour les méthodes de sectorisation initiale	99
Tableau 6.7	Comparaison de la performance de la sécurité contre les incendies selon les méthodes de sectorisation initiale.....	102
Tableau 6.8	Écarts maximaux (50 optimisations) des vitesses d'écoulement suite à l'application de la méthode de sectorisation finale.....	106
Tableau 6.9	Écarts maximaux (50 optimisations) des indices de performance suite à l'application de la méthode de sectorisation finale.....	107
Tableau 6.10	Densité des vannes d'isolement aux frontières des secteurs.....	110

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1 Les quatre méthodes de réduction des pertes réelles, Tirée de AWWA (2009).....	9
Figure 2.2 Analyse des débits pompés du RDEP de Kenmount, NL Adaptée de Phillips (2010, p. 34).....	13
Figure 3.1 Schéma conceptuel des principales étapes menant à la mise en place de la sectorisation au sein d'un RDEP.....	26
Figure 3.2 Réseau de distribution d'eau potable d'un secteur de VMR.....	30
Figure 3.3 Réseau de distribution d'eau potable de VMR	30
Figure 3.4 Réseau de distribution d'eau potable d'un secteur de la municipalité d'Aylmer	31
Figure 4.1 Réseau Anytown, USA et sa représentation hiérarchique	36
Figure 4.2 Réseau Anytown, USA initial.....	40
Figure 4.3 Sectorisation initiale du réseau Anytown, USA selon la méthode développée	42
Figure 4.4 RDEP sectorisé de VMR selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)	46
Figure 4.5 RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)	47
Figure 4.6 Répartition des pressions des nœuds du secteur 2 suite à l'application de la méthode de DiNardo et DiNatale (2011) sur le réseau d'Aylmer	48
Figure 4.7 Exemple de schématisation des zones d'influence	53
Figure 4.8 Sectorisation initiale du réseau Anytown, USA selon la méthode adaptée.....	61
Figure 4.9 RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée	62
Figure 4.10 RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode adaptée	69

Figure 5.1	Exemple des nœuds (en bleu et en noir) se trouvant à une distance de trois nœuds de part et d'autre de conduites (en magenta) sans vanne d'isolement.....	75
Figure 5.2	Représentation d'une solution considérée lors de l'optimisation	76
Figure 5.3	Exemple de secteur déconnecté d'une source.....	78
Figure 5.4	Représentation des composantes d'un algorithme génétique	82
Figure 5.5	Exemple de déformation des secteurs initiaux (RDEP de VMR).....	84
Figure 6.1	Comparaison des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suivant les méthodes de sectorisation initiale pour le RDEP de VMR	91
Figure 6.2	Comparaison des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suivant les méthodes de sectorisation initiale pour le RDEP d'Aylmer	91
Figure 6.3	Variation des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suite à 50 essais de sectorisation finale pour les RDEP à l'étude.....	105

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AG	Algorithme génétique
AWWA	American Water Works Association
BI	Borne d'incendie
ICI	Institutions, commerces et industries
MAMOT	Ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du Territoire
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
PVC	Chlorure de polyvinyle
RDEP	Réseau de distribution d'eau potable
VMR	Ville-Mont-Royal
VRP	Vanne régulatrice de pressions
WRC	Water Research Center

CHAPITRE 1

INTRODUCTION À LA SECTORISATION D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Les réseaux de distribution d'eau potable (RDEP) sont conçus pour distribuer une eau de qualité à des pressions adéquates aux usagers et assurer la protection contre les incendies. L'analyse de ces infrastructures n'est pas simple à réaliser compte tenu de l'interaction de leurs composantes physiques (Annexe I). La modification de la topologie du réseau par son expansion continue complexifie l'estimation des volumes d'eau produits et consommés, de même que la localisation et la quantification des bris de conduites sur l'ensemble du territoire concerné. Ce chapitre introduit les caractéristiques liées aux RDEP au Québec et présente des exemples d'application d'une méthode de gestion des réseaux.

1.1 L'état des infrastructures des réseaux de distribution d'eau potable dans les municipalités canadiennes et québécoises

Avec ses 4 500 rivières et son demi-million de lacs, la province de Québec possède 3 % de l'eau douce renouvelable de la planète (MDDEP, 2002). Ayant un accès privilégié à cette ressource, la majorité des résidents québécois (90 %) sont alimentés par un RDEP tandis qu'une minorité (10 %) possède des puits privés (Environnement Canada, 2011). Toutefois, plusieurs exemples de cas survenus en 2010 témoignent de problèmes liés à la disponibilité de cette ressource, notamment: (1) un réaménagement de la rivière des Mille-Îles qui a dû être effectué en raison d'un niveau d'eau trop bas au cours de l'été, (2) le prélèvement d'eau dans la rivière Yamaska qui a atteint 1,6 fois son débit en période d'étiage, (3) de nombreux problèmes concernant les prises d'eau dans le fleuve Saint-Laurent et (4) des niveaux critiques atteints par certaines nappes d'eau souterraine (MAMOT, 2013b). Selon une enquête auprès de 738 municipalités du Canada représentant 21,1 millions de personnes, 86 municipalités ont mentionné avoir connu des problèmes d'approvisionnement en eau entre les années 2007 et 2009 (Environnement Canada, 2011). Dans ce contexte, l'évaluation et l'entretien des équipements de distribution d'eau potable défaillants sont les premières

actions à implanter dans le but de réduire les pertes d'eau, outre la sensibilisation des usagers en ce qui a trait à leur consommation.

Au Canada, près de 20 % de l'eau s'écoulant dans les conduites de distribution est associée aux pertes, tandis qu'au Québec, 12 % des conduites des RDEP sont affectées par une fréquence de bris jugée intolérable (Environnement Québec, 1999). Plus de 620 millions de mètres cube d'eau sont distribués annuellement sur l'ensemble du RDEP de la Ville de Montréal; près de 33% de l'eau destinée à la consommation représentent des pertes. (Ville de Montréal, 2013). Ceci est, en partie, la conséquence de l'âge des infrastructures souterraines : le RDEP de Montréal possède plus de 50% de conduites ayant plus de 50 ans comparativement à 22 %, en moyenne, en Amérique du Nord (Flokman, 2012). De plus, le type de matériau des conduites (une importante partie du réseau montréalais est constitué de fonte grise), la corrosivité du terrain, les mouvements de sols et les pratiques de construction inadéquates contribuent activement à la détérioration prématurée des infrastructures souterraines (Hunaidi, 2010b).

1.2 Les habitudes de consommation d'eau potable

Le Québec est reconnu comme étant l'un des plus grands consommateurs d'eau potable en Amérique du Nord. La consommation globale québécoise se situe à environ 800 litres/personne/jour comparativement à la consommation globale canadienne, qui est de 600 litres/personne/jour. Selon le Tableau 1,1, la consommation résidentielle québécoise surpasse la consommation résidentielle canadienne en plus d'être près de deux fois plus élevée que la consommation résidentielle européenne. Le haut taux de fuites dans les RDEP expliquent en grande partie cet écart significatif.

Tableau 1.1 Comparaison des consommations journalières résidentielles

Consommation journalière résidentielle	
Moyenne au Québec	400 litres/personne/jour
Moyenne au Canada	350 litres/personne/jour
Moyenne en France	200 litres/personne/jour
Moyenne au Royaume-Uni	150 litres/personne/jour

1.3 Présentation et objectifs de la stratégie québécoise d'économie de l'eau potable

La stratégie québécoise d'économie de l'eau potable a été élaborée suite aux observations à l'effet que les volumes d'eau distribués dans les municipalités québécoises sont supérieurs aux moyennes nord-américaines et européennes (MAMOT, 2013b). Ainsi, les municipalités doivent restreindre la construction de nouveaux ouvrages d'approvisionnement en eau et l'augmentation de leurs capacités si aucune augmentation importante de la population n'est observée et plutôt favoriser l'entretien et la réhabilitation des infrastructures existantes. Cette stratégie vise l'atteinte de deux principaux objectifs, entre les années 2011 et 2017 :

1. Réduire d'au moins 20 % la quantité moyenne d'eau consommée par personne par jour par rapport à l'année 2001. Cette réduction vise à ramener la consommation à la moyenne canadienne de 2001, soit 622 litres par personne par jour.
2. Réduire le taux de fuites pour les RDEP à un maximum de 20 % du volume d'eau distribué et à un maximum de 15 mètres cubes par jour par kilomètre de conduite.

Ces mesures encouragent la production de bilans sectoriels des pertes d'eau, ce qui vise à permettre la réalisation de programmes ciblés de détection de fuites (Environnement Québec, 2002). Dans un contexte québécois où les coûts de production, de distribution, de collecte et de traitement d'un mètre cube d'eau totalisent plus de 1,50\$ (MAMOT, 2013b), il est impératif de diminuer cette consommation afin de préserver la pérennité de la ressource en eau.

1.4 Exemples d'application de la sectorisation d'un réseau de distribution d'eau potable et pertinence des présents travaux

La majorité des municipalités du Canada possèdent leurs propres stratégies de gestion des fuites qui consistent à : (1) quantifier le volume d'eau perdu, (2) détecter les fuites du réseau, (3) localiser et réparer les fuites et (4) gérer la pression dans les conduites. Celles-ci utilisent des méthodes acoustiques pour détecter les fuites sur l'ensemble du réseau à une fréquence d'environ deux ans (Hunaidi, 2010b). En pratique, la fréquence optimale d'auscultation des fuites dépend du coût associé à la distribution de l'eau, du taux d'apparition des fuites et du coût de l'auscultation du RDEP. Toutefois, les bénéfices de la sectorisation, introduite au début des années 1980 au Royaume-Uni, encouragent son utilisation. Elle consiste à diviser un réseau en plusieurs secteurs délimités par des vannes fermées et des points d'entrée d'eau munis de débitmètres afin de répertorier efficacement les fuites et les bris de conduites, et de gérer les pressions de chaque secteur. La formation de secteurs permanents pour le contrôle et la détection des fuites est répandue dans plusieurs pays. Les villes de Limassol en Chypre, de Bangor au Pays de Galles, de Johor en Malaisie, de Jakarta en Indonésie (Morisson et al., 2007) et de Philadelphie aux États-Unis (Fanner et al., 2007) sont des exemples d'application de la sectorisation.

La sectorisation peut être à l'origine de nombreux bénéfices comme en témoigne l'application de cette technique en Italie. Le programme de sectorisation a été implanté sur 93% du réseau de la Ville d'Enna, divisé en 260 secteurs. Selon les observations faites suite à la formation des secteurs, la consommation moyenne par personne par jour a chuté de 16% et le nombre de réparations des composantes du réseau a diminué de 20% grâce à l'abaissement de la pression. Par exemple, la pression excessive du secteur de Quattrocassella a été réduite de 12.5% (de 50 mètres à 43,7 mètres de colonne d'eau) et la fréquence des bris a diminué de 40% (Fantozzi et al., 2009).

Plus récemment, la sectorisation permanente a été implantée dans la Ville de Halifax, au Canada. En raison de la topographie très variable du territoire de la ville, il existe 50 paliers de pression déjà déterminés. Ces zones ont été utilisées comme point de départ pour

implanter 60 secteurs permanents analysés par plus de 100 débitmètres opérés par le système télésurveillance et d'acquisition de données (SCADA)¹. Le principal bénéfice observé se traduit par la diminution de *l'infrastructure leakage index (ILI)*², qui est passé de 9,0 à 3,8 (Yates, 2005).

Avec les infrastructures vieillissantes et un taux de fuites élevé des réseaux, la mise en place de la sectorisation dans les municipalités québécoises est pertinente. Dans un contexte où les pertes d'eau représentent un pourcentage élevé de l'eau distribuée, la sectorisation permet d'identifier et quantifier un débit de fuites et réduire ces pertes efficacement. Ce travail, en partenariat avec l'entreprise Aqua Data Inc., propose l'adaptation d'une méthode de sectorisation pour les RDEP québécois. De façon générale, la sectorisation temporaire ou permanente d'un réseau est complétée de façon « manuelle », avec l'appui d'outils de modélisation, par des ingénieurs spécialisés. La procédure par essais et erreurs alors employée requiert un temps considérable et ne peut pas garantir une solution semblable d'un concepteur à un autre puisqu'elle est principalement basée sur leur expérience. Ce mémoire présente une méthode de sectorisation des RDEP québécois où l'utilisateur est dirigé vers un ensemble de solutions semblables en considérant les particularités des réseaux québécois, de même que des considérations hydrauliques et topologiques des réseaux et la protection contre les incendies.

¹ Ce système permet aux municipalités d'observer en temps réel les conditions hydrauliques du réseau telles que les débits, les pressions et la qualité de l'eau (AWWA, 2009).

² Cet indice correspond au ratio des pertes d'eau réelles annuelles (voir la définition au chapitre 2) et des pertes d'eau inévitables annuelles du réseau (par exemple, les raccords des conduites) (Farley et Trow, 2003).

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

En premier lieu, ce chapitre permet de distinguer les types de fuites. Par la suite, les critères généraux de la sectorisation sont présentés, suivis des méthodes pertinentes de définition des frontières des secteurs. Finalement, quelques règles de base de la disposition des vannes d'isolement dans un réseau et les critères de performance des RDEP sont exposés.

2.1 Types de fuites dans un réseau de distribution d'eau potable

Les pertes d'eau dans un RDEP se calculent par un bilan hydrique entre les volumes d'eau entrant (pompe et traité) et sortant (consommé). La consommation se divise en deux principaux sous-ensembles qui rassemblent tous les volumes d'eau associés à la consommation autorisée par l'instance qui achemine l'eau aux usagers et ceux associés aux pertes, tel que présenté au Tableau 2.1.

Les volumes d'eau perdus se divisent en deux classes distinctes, soient les pertes réelles et les pertes apparentes. Les pertes réelles proviennent des débordements des réservoirs et des fuites le long des conduites d'eau potable, aux joints et aux raccords (Farley et Trow, 2003). Ce volume d'eau est perdu avant d'être utilisé par l'utilisateur. Les pertes apparentes sont les volumes d'eau associés principalement aux imprécisions des débitmètres. Toutefois, elles considèrent les volumes d'eau non comptabilisés qui sont consommés par les utilisateurs (consommations non-autorisées).

Tableau 2.1 Répartition des consommations,
Tiré de AWWA (2009)

Volume d'eau entrant	Consommation autorisée	Consommation autorisée et facturée	Volume d'eau consommé et mesuré incluant le volume d'eau exporté dans un autre système (ex. : consommation résidentielle)
			Volume d'eau consommé et non mesuré
		Consommation autorisée et non facturée	Volume d'eau mesuré et non facturé (ex. : infrastructures municipales)
			Volume d'eau non mesuré et non facturé (ex. : nettoyage du réseau)
	Pertes	Pertes apparentes	Consommation non autorisée
			Imprécision des débitmètres
			Erreurs de manipulation des données
		Pertes réelles	Fuites provenant des conduites d'amenée
			Fuites provenant des conduites du RDEP
			Débordement des réservoirs
			Fuites des connexions de service

Lorsque les deux types de pertes ne sont pas distingués, les pertes réelles et les consommations réelles des usagers tendent à être surestimées (un débit plus élevé qu'en réalité est considéré). Une plus grande quantité d'eau est prélevée à la source ce qui engendre un surdimensionnement des diamètres des conduites de distribution. De plus, il est possible de mieux évaluer l'état structural des infrastructures souterraines en dissociant les deux types de pertes (le volume d'eau associé aux pertes réelles est moins important).

Les pertes d'eau réelles peuvent avoir des impacts importants tels que le prélèvement excessif de la ressource d'eau, l'augmentation des coûts associés au traitement et à l'acheminement de l'eau aux usagers, et la détérioration des autres infrastructures pluviales et sanitaires à proximité. C'est pourquoi la réduction des pertes d'eau réelles est primordiale et se fait par l'entremise de quatre actions présentées à la Figure 2.1, décrites plus en détails à la section 2.2.

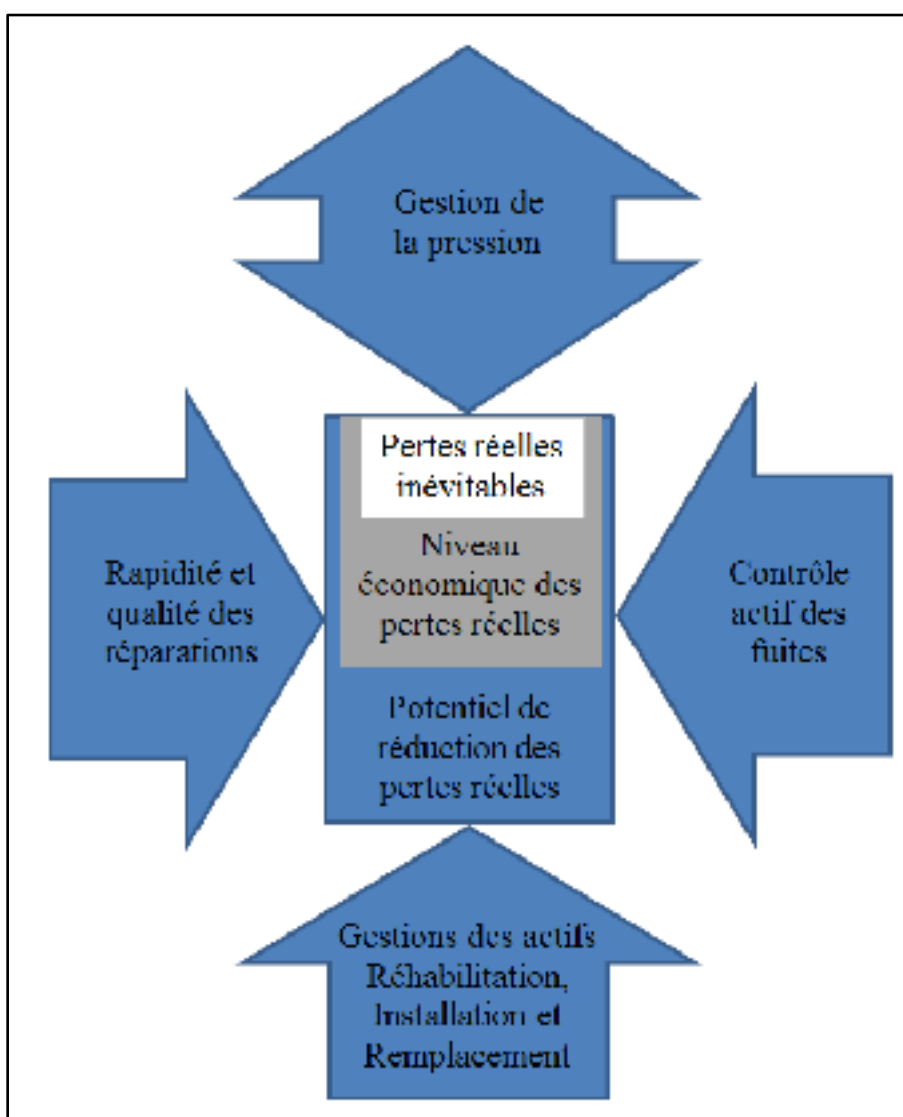


Figure 2.1 Les quatre méthodes de réduction des pertes réelles,
Tirée de AWWA (2009)

Ces actions visent à intervenir à trois niveaux différents tel qu'illustré par les sections rectangulaires de la Figure 2.1. Le premier niveau (en bleu) correspond à l'état initial du réseau c'est-à-dire aux fuites annuelles actuelles réelles et indique donc le potentiel de réduction des pertes réelles. En appliquant une ou plusieurs actions (section 2.2), le volume associé aux pertes d'eau peut être réduit considérablement. Le deuxième stade (en gris) correspond à l'équilibre entre les coûts de réparation ou d'entretien d'une fuite et les coûts engendrés par cette même fuite. Si les coûts de réparation ou d'entretien d'une fuite excèdent les coûts associés aux volumes d'eau perdus et à la variation de la pression générée par cette même fuite, la réparation n'est pas effectuée (AWWA, 2009). L'objectif de réduction des fuites des municipalités est l'atteinte de ce stade économique. Le niveau optimal des pertes d'un RDEP est atteint lorsque les seules pertes réelles présentes sont inévitables (en blanc sur la Figure 2.1; ce type de pertes est calculé en considérant la longueur des conduites principales, la longueur de conduites totales et le nombre de connexions (Farley et Trow, 2003).

2.2 Méthodes de réduction des pertes réelles

Les quatre méthodes de réduction des pertes réelles montrées à la Figure 2.1 sont présentées dans cette section.

Contrôle actif des fuites

Le contrôle actif des fuites implique l'auscultation du RDEP (les méthodes acoustiques sont souvent utilisées) dans le but de localiser précisément les fuites. Ceci peut être effectué par le suivi des débits afin de distinguer la consommation normale et celle des fuites par l'isolement des secteurs temporaires ou permanents.

Gestion des actifs

La réhabilitation ou le remplacement des conduites sont des actions prévues selon un plan d'intervention précis de renouvellement des infrastructures basé sur l'état de dégradation dans le but d'obtenir un impact immédiat sur les pertes réelles. Le nombre de bris et le taux de réparations sont des critères d'analyse pour cibler les tronçons prioritaires.

Gestion de la pression

La gestion de la pression est une méthode efficace pour réduire le volume d'eau provenant des fuites et augmenter la durée de vie des conduites. La réduction de la pression sur l'ensemble du réseau résulte en une diminution du volume d'eau des fuites suivant l'équation (2.1) où Q_0 est le débit à l'état initial, Q_1 est le débit à l'état final, P_0 est la pression initiale, P_1 la pression finale et N_1 varie de 0.5 à 2.5 selon le type de fuites et le matériau des conduites. Les pertes réelles provenant des joints et des raccords ainsi que les pertes provenant des conduites de polychlorure de vinyle (PVC) ont généralement un indice $N_1 = 1,5$ tandis que les pertes détectables des conduites en métal ont une valeur $N_1 = 0,5$. En l'absence de données tangibles, cette relation est valable en considérant $N_1 = 1$ (relation linéaire) (Lambert, 2002).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_1} \quad (2.1)$$

La principale méthode de la gestion des pressions consiste à introduire une ou des vannes régulatrices de pression (VRP) à des endroits stratégiques tels qu'à l'entrée d'un palier de pression (Annexe I). De plus, le contrôle de la pression peut s'effectuer à la sortie de l'usine de pompage, aux surpresseurs et aux réducteurs existants. La division du RDEP en secteurs fait partie de cette méthode de réduction des fuites, et optimise l'opération de chaque secteur par l'abaissement de la pression en tenant compte du nœud critique (nœud ayant la plus faible pression).

Rapidité et efficacité de réparation des fuites

La rapidité et l'efficacité de réparation des fuites sont primordiales afin de réduire les pertes d'eau. La localisation des fuites est rapidement exécutée lorsque le réseau est composé de plusieurs secteurs puisque l'étendue de recherche se limite aux secteurs concernés contrairement à l'ensemble du réseau.

2.3 Considérations générales sur la sectorisation d'un réseau de distribution d'eau potable

Le développement des appareils acoustiques a grandement influencé la recherche active des fuites sur l'ensemble des RDEP. Toutefois, cette tâche peut s'avérer laborieuse et coûteuse et, c'est pourquoi, la division en secteurs permanents présente une alternative efficace proposée par Morisson et al., (2007). La sectorisation consiste à diviser un réseau en plusieurs sous-secteurs ayant des charges hydrauliques et des conditions géographiques (proximité et élévation) semblables et délimités par des vannes fermées et des débitmètres. Elle permet : (1) de comptabiliser le volume des pertes d'eau dans chaque secteur, en comparant le débit entrant mesuré et la consommation durant la période de consommation journalière minimale (consommation nocturne), et donc d'établir un bilan hydrique, (2) de répertorier les nouvelles fuites et bris de conduites dans un secteur par l'analyse de la fluctuation des débits entrants de chaque secteur, et (3) de gérer la pression secteur par secteur afin d'opérer l'ensemble du réseau à un niveau de pression optimal. La détection des fuites est effectuée par l'analyse des variations des débits pompés par l'usine tel que présenté à la Figure 2.2 (ou des débits mesurés par le débitmètre installé en tête d'un secteur). La description des cas de variations observées à partir de la Figure 2.2 est répertoriée ici-bas :

Cas 1– Débit d'incendie

Cas 2 – Débit d'alimentation d'un hôpital

Cas 3 – Bris d'une conduite principale

Cas 4 – Bris d'une conduite principale combinée à un problème d'une VRP

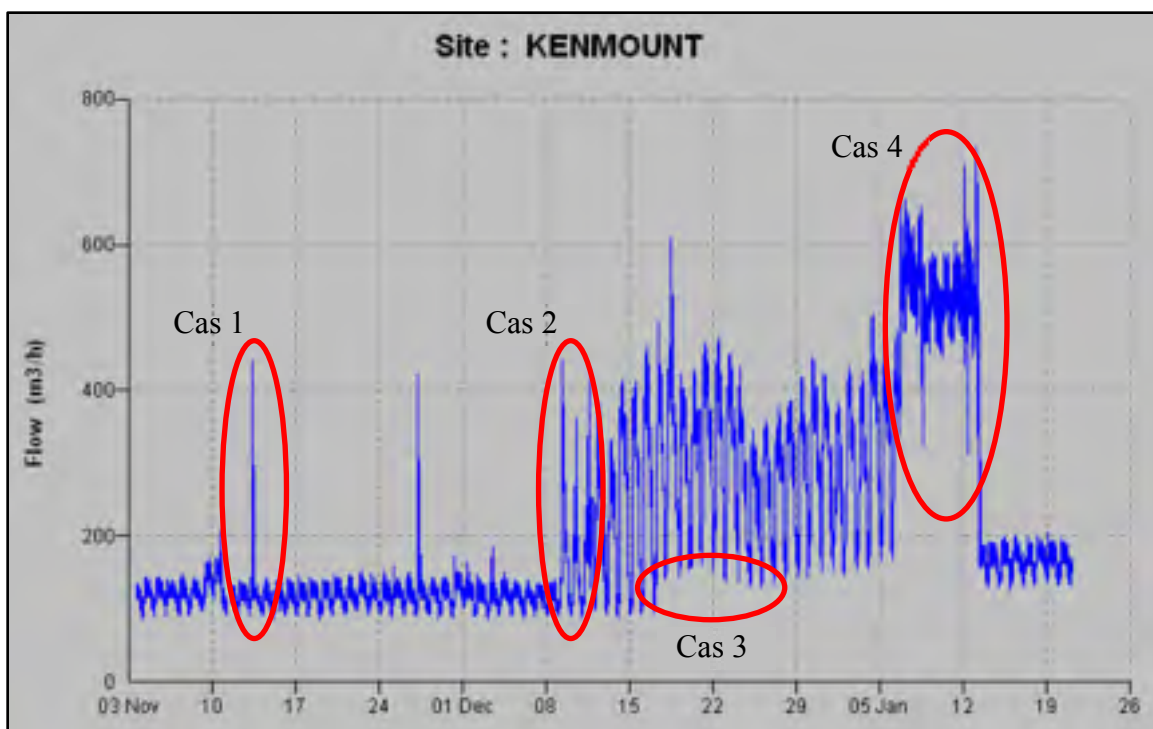


Figure 2.2 Analyse des débits pompés du RDEP de Kenmount, NL
Adaptée de Phillips (2010, p. 34)

La sectorisation peut être mise en place de façon temporaire ou permanente, et l'envergure des secteurs dépend du but visé par la sectorisation et des différents niveaux de partitionnement souhaités (WRC, 1999). La sectorisation peut être mise en place afin d'effectuer un bilan hydrique pour chaque municipalité d'une même ville tandis qu'une municipalité peut sectoriser son RDEP afin de gérer ses fuites. Dans ces deux cas, leurs buts sont différents et les secteurs définis ont des tailles différentes (WRC, 1999).

Un secteur est alimenté préférentiellement par un seul point d'alimentation (qui peut être une conduite liant le secteur et un autre secteur voisin, ou encore une source d'alimentation du réseau) puisque le calcul du bilan hydrique est plus facilement réalisable et les coûts associés à l'implantation des débitmètres sont inférieurs. Toutefois, dépendamment du réseau à l'étude, plusieurs points d'entrée peuvent être acceptables, surtout en Amérique du Nord où les RDEP sont généralement plus maillés par rapport aux réseaux européens notamment (Fanner et al., 2007). La formation des secteurs modifie de façon significative le

comportement hydraulique du RDEP et tend à augmenter la vulnérabilité (voir la section 2.5.2) du réseau par la diminution du nombre de mailles (modifications topologiques; (Alperovits et Shamir, 1977).

2.4 Revue des approches de sectorisation développées et critères pris en compte

Les critères de conception typiquement pris en compte dans les approches de sectorisation sont d'abord revus, ensuite les approches de sectorisation existante sont présentées. Certaines techniques d'isolement de conduites suivies des critères de performance hydrauliques, énergétiques et topologiques sont présentés dans cette section.

2.4.1 Critères de conception traditionnels empiriques

Les RDEP sont traditionnellement conçus selon des normes hydrauliques à respecter (concernant les vitesses et les pressions minimales ou maximales dans une conduite) et les coûts de construction (coûts directs tel que le coût des conduites et indirects tel que le coût associé au ralentissement de la circulation routière). Tel que mentionné à la section précédente, l'implantation des secteurs par la fermeture ou l'introduction de vannes a des impacts hydrauliques et topologiques sur les RDEP. Afin de maintenir un niveau d'opération acceptable, les principaux éléments à considérer sont : (1) le maintien de la protection contre les incendies, (2) le maintien de temps de séjour de l'eau acceptables (indicateur de la qualité de l'eau en réseau), (3) le maintien de la sécurité lors de l'introduction d'un contaminant et (4) le maintien d'un niveau acceptable de vulnérabilité du réseau (Grayman et al., 2009). Ainsi, la définition des secteurs dans les RDEP existants qui n'ont pas été conçus pour une éventuelle sectorisation devrait être effectuée de façon à minimiser, dans la mesure du possible, la perturbation des fonctions principales d'opération des réseaux. Ce type de problème n'est généralement pas simple à résoudre puisque la modification topologique des réseaux entraîne habituellement une dégradation des conditions hydrauliques.

La définition des secteurs repose d'abord sur des critères empiriques. D'après la littérature consultée, un secteur comprend typiquement entre 500 et 3 000 connexions (WRC, 1999) ou entre 2 500 et 12 500 habitants (Butler, 2000). De plus, Morisson et al. (2007) mentionnent la possibilité de dimensionner les secteurs selon le nombre de kilomètres de conduites lorsque le RDEP a une faible densité (dispersion importante des points de consommation, par exemple en milieu rural). L'impact de la taille des secteurs est significatif. La sectorisation d'un réseau par la définition de secteurs de petite envergure engendre des coûts supérieurs car le nombre de vannes et de débitmètres à manipuler et/ou à ajouter au réseau sont élevés, contrairement à la conception de secteurs de plus grande envergure. En contrepartie, la conception de secteurs de petite envergure permet l'identification et la localisation rapide des fuites donc les coûts liés aux volumes d'eau perdus sont réduits (Morisson et al., 2007). Le choix de la taille des secteurs peut se baser sur un horizon temporel d'intervention établi pour (1) l'identification du débit d'une fuite, (2) la localisation de cette fuite (par exemple : méthodes acoustiques) et (3) sa réparation (Yates, 2005). Hunaidi (2010a) propose la détermination de la taille des secteurs par l'évaluation de critères économiques lors du recensement et de la détection d'une fuite majeure (par exemple, les coûts engendrés par le volume d'eau perdu).

2.4.2 Approches informatisées existantes pour la délimitation des secteurs

Cette section présente une revue des différentes méthodes qui permettent la délimitation de secteurs temporaires ou permanents, de façon informatisée. Ces approches de sectorisation ont toutes des buts semblables à ceux qui ont été présentés à la section 2.3. Toutefois, certaines méthodes se sont intéressées à un but spécifique tel que l'établissement du bilan hydrique de chaque secteur. De plus, ces méthodes reposent sur différents critères de conception qui ont une incidence sur la délimitation des secteurs. Certaines méthodes de sectorisation (principalement celles qui sont itératives) évaluent la configuration des secteurs selon des critères de performance qui varient, selon la méthode (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Méthodes de sectorisation existantes

	DiNardo et al. (2013a)	DiNardo et al. (2013b)	DiNardo et DiNatale (2011)	Tzatchkov et al. (2007)	Herrera et al. (2010)	Izquierdo et al. (2011)	Deuerlein (2008)	Gomes, Marques et Sousa (2012b)	Gomes, Marques et Sousa, (2012a)
But de la sectorisation	Non spécifié, se référer aux principaux buts à la section 2.3	Non spécifié, se référer aux principaux buts à la section 2.3	Non spécifié, se référer aux principaux buts à la section 2.3	Diminution des pertes	Détection des fuites par la réduction de l'espace d'auscultation	Bilan hydrique	Bilan hydrique	Gestion des infrastructures du RDEP après sectorisation	Gestion des infrastructures du RDEP après sectorisation
Critères de conception	Critères énergétiques	Différents critères déterminés par l'utilisateur	Critère économique	Aucun	Critères liés aux données des RDEP	Critères hydrauliques et énergétiques	Critère topologique	Critère économique	Critère économique
Type d'approche	Automatisée	Automatisée	automatisation partielle (intervention de l'utilisateur)	automatisation partielle (intervention de l'utilisateur)	Automatisée	Automatisée	Automatisée	automatisation partielle (intervention de l'utilisateur)	automatisation partielle (intervention de l'utilisateur)
Méthode de définition des secteurs	Détermination des zones d'influence et utilisation de l'algorithme génétique	Décomposition des graphes inspirée du réseau de calcul maillé	Définition des secteurs par l'utilisateur	Définition des secteurs par l'utilisateur	Méthode semi-supervisée qui considère les informations des RDEP	Méthode multi-agents	Décomposition des graphes	Définition à partir d'un point spécifique, modification manuelle au besoin	Définition à partir d'un point spécifique, modification manuelle au besoin
Critères de performance	Critères hydrauliques, énergétiques et statistiques	Critères hydrauliques, énergétiques et statistiques	Puissance dissipée et nombre de débits	Aucun	Au choix (le diamètre, l'âge ou les coûts de réhabilitation des conduites)	Consommation et élévation moyennes et puissance dissipée	Vulnérabilité	Normes et critères traditionnels	Normes et critères traditionnels
Secteurs indépendants	OUI	NON	NON	OUI	NON	OUI	NON	NON	NON

Gomes et al., (2012a,b) identifient le nombre optimal de secteurs, leurs points d'entrée optimaux, les vannes aux frontières et les interventions (entretien et réparation) sur une période de temps donnée. L'expansion des secteurs est effectuée à partir de nœuds de référence et le concepteur peut modifier la configuration des secteurs pour répondre aux normes et critères empiriques traditionnels. Toutefois, la majorité des travaux concernant la sectorisation d'un RDEP s'intéresse à la définition des frontières des secteurs alors que ces deux méthodes s'intéressent principalement aux actions à entreprendre une fois le réseau sectorisé.

Deuerlein (2008) introduit le concept de la décomposition des graphes en deux principaux systèmes liés par un ensemble de conduites, soient le graphe principal (constitué de mailles) et le graphe secondaire (constitué d'arborescences). Cette méthodologie automatisée simplifie le calcul d'équilibre entre les débits entrant et sortant du réseau et détermine les conduites qui lient des blocs connexes (secteurs). Une autre méthodologie automatisée de sectorisation d'un RDEP basée sur un système multi-agent (Izquierdo et al., 2011) fait varier les agents (par exemple, chaque nœud de consommation) de façon autonome ou en coopération avec d'autres agents afin d'obtenir plusieurs scénarios (état de simulation statique). La formation des secteurs doit correspondre à des critères empiriques préétablis tels que la longueur totale de conduites par secteur ou la consommation totale par secteur. Aussi, le nombre de secteurs est déterminé par l'utilisateur et la qualité de l'eau n'est pas abordée dans ces travaux. Herrera et al. (2010) proposent l'insertion de critères pondérés considérant toutes les caractéristiques pertinentes du réseau comme l'âge et le diamètre des conduites selon une approche qui prédit le regroupement de points dans des classes (secteurs déjà déterminés à partir de la connaissance du RDEP). Cependant, cette méthodologie requiert la calibration complète du réseau ainsi qu'un suivi rigoureux des infrastructures. Ces méthodes automatisées ne considèrent pas la performance des RDEP dans l'étape de la définition des frontières des secteurs (étape de conception). C'est suite à l'obtention de la solution par l'une de ces méthodes que cette solution est évaluée selon des critères de performance. Dans le cas d'une solution ne pouvant atteindre un niveau de performance adéquat en matière de pression minimale requise, de puissance dissipée totale d'un réseau ou de qualité de l'eau, la solution

ne peut pas être modifiée. C'est pourquoi, certaines études se sont concentrées sur des méthodes de résolution manuelle ou heuristique qui permettent d'atteindre les seuils des critères de performance établis par l'utilisateur.

Tzatchkov, Alcocer-Yamanaka et Ortiz (2007) abordent la sectorisation permanente d'un réseau selon un algorithme basé sur la théorie des graphes afin de former des secteurs alimentés par une source unique et complètement autonomes (secteurs indépendants) à partir de l'analyse des zones d'influence. L'évaluation de la performance et des conditions hydrauliques du nouveau réseau sectorisé n'est pas abordée mais les zones d'influence contribuent à la considération générale de ces conditions. Contrairement à cette méthode, DiNardo et DiNatale (2011) proposent la sectorisation permanente d'un réseau en se basant sur des critères économiques tels que le nombre de débitmètres et la puissance dissipée minimale dans les conduites. Cette approche requiert la détermination manuelle des frontières sans tenir compte de la présence des vannes sur les conduites appartenant aux frontières. La méthode est itérative de sorte que la performance de chaque solution obtenue, en cours de résolution, est évaluée selon des critères énergétiques, hydrauliques et statistiques.

Récemment, des méthodes automatisées délimitent les frontières des secteurs et considèrent des critères de performance tels que la puissance dissipée. La méthodologie proposée par DiNardo et al. (2013b) est basée sur la décomposition des graphes. Elle automatise la formation des secteurs en comparant différentes topologies compilées selon différents critères. DiNardo et al. (2013a) présentent une méthodologie de délimitation automatisée des frontières de secteurs indépendants basée sur la détermination des plus courts chemins entre chaque source et chaque nœud selon la puissance dissipée minimale. Les zones d'influence de chaque source sont délimitées et les nœuds alimentés par plusieurs sources sont répartis de manière ordonnée par l'utilisation d'un algorithme génétique (AG). La sectorisation obtenue est celle ayant la pression moyenne la plus basse sur l'ensemble du réseau tout en respectant des critères énergétiques. Ce type de problème requiert un temps de calcul considérable

lorsque le RDEP possède plusieurs sources et l'incertitude découlant de l'utilisation d'une méthode d'optimisation métaheuristique³ n'est pas mentionnée.

2.4.3 Méthodes d'isolement des conduites

Dans un RDEP, il existe quatre types de vannes, soient (1) les vannes d'isolement, (2) les vannes de contrôle, (3) les vannes anti-retour, et (4) les vannes d'évacuation d'air (Ysusi, 1999). Dans un contexte où des secteurs sont créés dans un RDEP, les vannes d'isolement sont celles qui sont utilisées. Il est nécessaire de connaître leurs emplacements optimaux et l'ensemble des vannes à fermer pour isoler une partie du RDEP (Walski, 1993). Une fois l'ensemble des conduites à fermer ciblées par les méthodologies citées ci haut (section 2.4.2), un ensemble de vannes doit être manipulé afin de créer les secteurs. Selon le nombre et l'emplacement réel des vannes sur les RDEP, il est possible qu'il n'y ait pas de vannes existantes positionnées sur toutes ces conduites. Une règle de base simple mentionne l'installation de $n-1$ vannes à toutes les intersections de plus de 3 conduites (n est le nombre de conduites qui se rejoignent) (Walskiet al., 2007). Par contre, ce nombre de vannes n'est pas toujours disponibles dans la réalité. Un problème d'optimisation doit alors être résolu pour connaître la disposition des vannes, à chaque intersection, possédant la meilleure fiabilité.

Dans les secteurs commerciaux, une vanne doit être placée à tous les 150 mètres tandis que dans les autres types de secteurs, une vanne est installée aux 240 mètres (AWWA, 1986). Dans une étude menée par Hasit et al., (2004) auprès de 26 municipalités (23 aux États-Unis, deux au Royaume-Uni et un en Australie), le nombre de vannes par kilomètre de conduites se situait entre 5,4 et 17,4. En règle générale, il existe 2,2 vannes pour chaque borne d'incendie (BI) positionnée sur le RDEP (*Nathalie Periche* mars 2014, communication personnelle). Toutefois, bien que présentes sur le RDEP, celles-ci ne sont pas nécessairement opérables puisqu'elles peuvent être inaccessibles ou leur mécanisme d'ouverture et de fermeture peut être inopérable (*Nathalie Periche* mars 2014, communication personnelle).

³ Ce terme est expliqué à la section 5.1 du présent mémoire.

Jun et Loganathan (2007) ont proposé un algorithme qui identifie, lors de l'occurrence d'un bris de conduite, les vannes à fermer pour isoler un secteur minimal (le nombre d'usagers affectés) et les secteurs isolés involontairement. Ces derniers sont les secteurs déconnectés des sources d'eau et constituent un effet secondaire de l'isolement d'un secteur. La représentation du réseau modifié par la fermeture des vannes est le principal avantage de cette méthode. L'isolement d'une conduite ne possédant pas de vannes requiert l'identification d'un ensemble de vannes alternatives. Giustolisi et Savic (2010) décrivent un algorithme basé sur la topologie du réseau et qui tient compte de l'existence des vannes sur le réseau. La fermeture d'un ensemble de vannes augmente la vulnérabilité du réseau ainsi que des possibles interruptions de service. Cette méthode optimise (1) le nombre de vannes d'isolement dans le réseau et (2) le nombre de conduites qui correspond au secteur à isoler afin de limiter la portée des interruptions.

2.5 Critères d'évaluation de la performance d'un réseau de distribution d'eau potable

Plusieurs critères doivent être respectés lors de la conception d'un RDEP afin que les usagers puissent avoir accès à une eau de qualité, en quantité suffisante, en tout temps. Cette section énumère des normes de base et des indices de performance considérés lors de la conception, lesquels s'avèrent également pertinents dans le contexte de la sectorisation d'un réseau.

2.5.1 Critères hydrauliques

Pour un réseau assurant une protection contre les incendies, la pression résiduelle minimale à maintenir est de 140 kPa sous la condition la plus défavorable entre les consommations de pointe horaire et les consommations maximales journalières additionnées au débit d'incendie afin d'assurer l'alimentation adéquate des usagers (Ministère de l'Environnement, 1984). De plus, la pression maximale dans le réseau ne doit pas excéder 760 kPa afin d'éviter une détérioration prématurée des infrastructures souterraines. La pression lors de l'opération normale du réseau ne devrait pas être inférieure à 275 kPa (Ministère de l'Environnement, 1984).

2.5.2 Critères associés à la vulnérabilité d'un réseau

Plusieurs ouvrages ont analysé la conception optimale d'un RDEP en minimisant les coûts des infrastructures (Alperovits et Shamir, 1977; Da Conceicao et al., 1999; Savic et Walters, 1997). Toutefois, cette technique de conception des RDEP est problématique puisqu'elle ne fournit aucune redondance (le réseau est conçu de façon arborescente). L'optimisation multi-objective permet de minimiser le coût des infrastructures et la vulnérabilité du réseau (Kapelán et al., 2005).

La vulnérabilité d'un RDEP peut être comptabilisée à l'aide de l'indice de résilience introduit par Todini (2000). Cet indice correspond à la capacité intrinsèque du réseau à surmonter un bris, il est directement lié à la redondance du réseau. Un ensemble de Pareto ayant pour objectifs (1) la minimisation des coûts de construction et (2) la maximisation de l'indice de résilience est déterminé afin de permettre au concepteur d'identifier la solution la plus adaptée. Un indice de résilience élevé correspond à une conception majoritairement maillée ce qui engendre des coûts de construction élevés tandis qu'un indice de résilience faible correspond à un réseau arborescent ce qui engendre des coûts de construction plus faibles. Prasad et Park (2003) ont introduit une modification de l'indice de résilience par l'ajout d'un coefficient qui tient compte des diamètres des conduites incidentes au nœud. Goulter (1995) définit la vulnérabilité comme étant la capacité du réseau à alimenter adéquatement les usagers dans diverses conditions. Elle est calculée par la probabilité que la pression d'un nœud soit supérieure à la pression minimale de conception. Walski et Gessler (1999) ont introduit l'indice du surplus de la charge minimale qui consiste à trouver le nœud du réseau où la différence entre sa charge et la charge de conception est minimale (il s'agit du nœud critique du réseau). Dans cette optique, Prasad et Park (2003) effectuent la somme de l'indice du surplus de la charge minimale de tous les nœuds du réseau afin de représenter le surplus de la charge piézométrique du réseau. De plus, les pertes de charge constituent l'énergie perdue par tous les chemins entre chaque source et chaque nœud. Il est possible de caractériser un RDEP par sa capacité à dissiper cette énergie dans ces conduites; on

s'intéresse alors à la puissance que doit fournir la (les) station(s) de pompage du réseau pour obtenir ces conditions hydrauliques.

2.5.3 Critères de performance topologiques

Seuls quelques travaux se sont intéressés à la disposition géométrique des RDEP par l'analyse de la connectivité et de la topologie. Wagner et al. (1988) ont développé trois indices : (1) la probabilité qu'un nœud du réseau soit connecté à une source, (2) la probabilité que tous les nœuds du réseau soient connectés à au moins une source et (3) la probabilité que le réseau puisse alimenter adéquatement un nœud. Ces mesures sont déterminées par deux algorithmes élaborés par Satyanarayana et Wood (1982) et par Rosenthal (1977). Selon Jacobs et Goulter (1989), la fiabilité des RDEP est optimale lorsque le nombre de conduites est équivalent au nombre de nœuds. Un peu plus récemment, Ostfeld et Shamir (1996) ont introduit, de façon générale, la conception de réseaux de secours qui se créent lorsque, par exemple, un bris survient (changement de topologie). Par ailleurs, Buhl et al. (2006) évaluent la fraction entre le nombre total de mailles et le nombre de mailles indépendantes (une maille indépendante est formée de plusieurs conduites formant une maille triangulaire) selon l'indice de maillage pour des réseaux routiers. Cet indice indique le degré de maillage d'un réseau : plus cet indice est élevé, plus le réseau est maillé (un nœud peut être alimenté par plusieurs chemins dans l'éventualité d'un bris de conduite). Finalement, Ostfeld (2005) identifie, parmi plusieurs possibilités de graphes orientés d'un même réseau, celui qui est optimal par rapport aux lois de la conservation de la masse et de l'énergie soit par l'énumération complète des possibilités (pour un réseau simple) ou par l'utilisation de l'AG (pour des réseaux généraux) afin d'évaluer le degré de connectivité et d'accessibilité des nœuds.

CHAPITRE 3

OBJECTIFS ET APERÇU DES TRAVAUX RÉALISÉS DANS LE PRÉSENT MÉMOIRE

3.1 Problématique

Il existe plusieurs exemples d'implantation de la sectorisation permanente d'un RDEP dans de nombreux pays tel que présenté à la section 1.4 du présent mémoire. Les ouvrages de référence (AWWA, 2009; Morisson et al., 2007; WRC, 1999; Wrc/WSA/WCA, 1994) proposent que l'identification des secteurs repose sur des critères empiriques tels que le nombre de connections ou d'utilisateurs par secteur et la fermeture d'un nombre minimal de vannes. Ces principes généraux guident le concepteur vers une diversité de solutions acceptables sans les distinguer davantage l'une par rapport à l'autre. De plus, ces seuls critères ne sont pas suffisants pour assurer l'obtention d'une solution acceptable au sens des conditions hydrauliques et de l'alimentation des utilisateurs.

Selon les travaux présentés à la section 2.4.2, plusieurs méthodes informatisées ont été développées pour la délimitation des secteurs. Les buts spécifiques des méthodes de sectorisation d'un RDEP sont différents (Tableau 2.2) mais ils correspondent aux principaux buts présentés à la section 2.3. Toutefois, la définition des frontières entre les secteurs diffère d'une méthode à l'autre puisque leurs critères de conception sont distincts (Tableau 2.2). Parmi les méthodes existantes, aucune n'a été appliquée aux réseaux québécois, ou même développée dans le contexte de ces réseaux. La très vaste majorité des études s'est plutôt concentrée sur les réseaux européens. Il est bien connu que les réseaux nord-américains sont différents des réseaux européens, notamment de par : (1) leur topologie puisque les réseaux québécois sont habituellement plus maillés (et moins ramifiés) que les réseaux européens; (2) la formation des secteurs des réseaux européens qui est généralement déterminée dès la phase de conception (contrairement aux réseaux québécois); et (3) la présence de conduites de plus grands diamètres dans les réseaux québécois pour assurer la protection contre les incendies, ce qui n'est pas le cas des réseaux européens. Les critères de conception pour la délimitation

des secteurs qui ne sont pas indépendants (ou alimentés par leur propre source) peuvent être bonifiés par la considération d'éléments supplémentaires soient, dans le cadre des présents travaux, *les zones d'influence de chaque source* qui regroupent plusieurs facteurs hydrauliques et énergétiques (par exemple, les pertes de charge, les débits circulant dans les conduites et la conservation de l'énergie) de même que *la présence des grands consommateurs* et *la prise en compte de l'ossature principale (conduites de grands diamètres) de réseaux majoritairement maillés*. La capacité du réseau sectorisé à assurer *la protection contre les incendies* doit également faire partie des critères qui évaluent la performance du réseau sectorisé. Par ailleurs, les méthodes existantes de sectorisation impliquent l'identification des frontières entre les secteurs, définies par la fermeture de vannes d'isolement et la présence de débitmètres (points d'entrée aux secteurs et/ou de communication entre les secteurs) sur les conduites ciblées. La majorité des méthodologies existantes supposent la présence réelle d'au moins une vanne sur chaque conduite du RDEP devant être fermée. Cette hypothèse impliquerait, en pratique, des travaux sur le RDEP pour installer des vannes aux endroits, le long d'une frontière, où aucune vanne n'est présente. Aucune approche ne s'est intéressée, plutôt, à tenter d'identifier les secteurs ainsi que leurs frontières en tenant compte des vannes disponibles (ou opérables) sur un RDEP.

3.2 Objectifs des travaux

Dans cette optique, les présents travaux visent à structurer une méthode heuristique pour déterminer les frontières des secteurs et comportent deux objectifs :

- (1) Adapter la méthodologie de sectorisation permanente développée par DiNardo et DiNatale (2011) aux RDEP québécois suivant les quatre éléments principaux énoncés à la section précédente (en italique);
- (2) Établir les frontières des secteurs finaux en considérant les vannes disponibles et opérables.

L'utilisateur intervient pour déterminer les frontières des secteurs de la méthode itérative de DiNardo et DiNatale (2011) où la performance de chaque solution est évaluée. De plus, cette méthode prévoit un faible nombre de débitmètres à insérer ce qui considère le côté

opérationnel des RDEP. Pour ces raisons, cette méthode est sélectionnée et elle est appliquée sur deux RDEP au Québec (présentés à la section 3.2.3) possédant des caractéristiques différentes.

3.2.1 Aperçu général des travaux réalisés

À la Figure 3.1, les principales étapes menant à la mise en place de la sectorisation au sein d'un RDEP, au sens du présent mémoire, sont schématisées pour une meilleure compréhension de la procédure à suivre. Les étapes grisées sont l'objet des présents travaux (Étapes 1 à 7). Les étapes laissées en blanc ne sont pas couvertes dans le cadre de ce mémoire (Étapes 8 à 10). La première étape qui guide la configuration finale des secteurs consiste à établir les critères de conception de la délimitation des secteurs (Étape 1, Figure 3.1). La présente recherche favorise les conduites de grand diamètre (au détriment des conduites de petit diamètre qui engendrent les pertes de charge les plus élevées). De plus, la présence des grands consommateurs et des zones d'influence de chaque source sont considérées. Par la suite, à l'Étape 2, une simplification du RDEP est exécutée en tenant compte des éléments considérés à l'Étape 1 (ces éléments sont schématisés sur le réseau simplifié). À partir de cette représentation, l'utilisateur intervient et détermine le nombre de secteurs et leurs frontières (sectorisation initiale). À l'Étape 3, les valeurs de certains indices de performance sont comptabilisées, et ensuite comparées à des valeurs de référence. De plus, la dégradation de la protection contre les incendies du RDEP est évaluée. L'Étape 4 évalue les secteurs initiaux : si un indice se trouve en deçà des valeurs acceptables et/ou la dégradation de la protection contre les incendies est trop importante, la configuration des secteurs est modifiée (ajout de points d'entrée aux secteurs) jusqu'à l'obtention d'une solution convenable en matière de performance du réseau. Une fois la sectorisation initiale complétée, une modification des frontières est exécutée de façon à minimiser le nombre de conduites aux frontières sans vannes, en tenant compte des vannes disponibles et opérables (Étape 5). L'Étape 6 consiste à évaluer de nouveau les secteurs finaux suivant les critères de l'Étape 4. La sectorisation finale, telle que conçue dans le cadre des présents travaux, est obtenue à l'Étape 7.

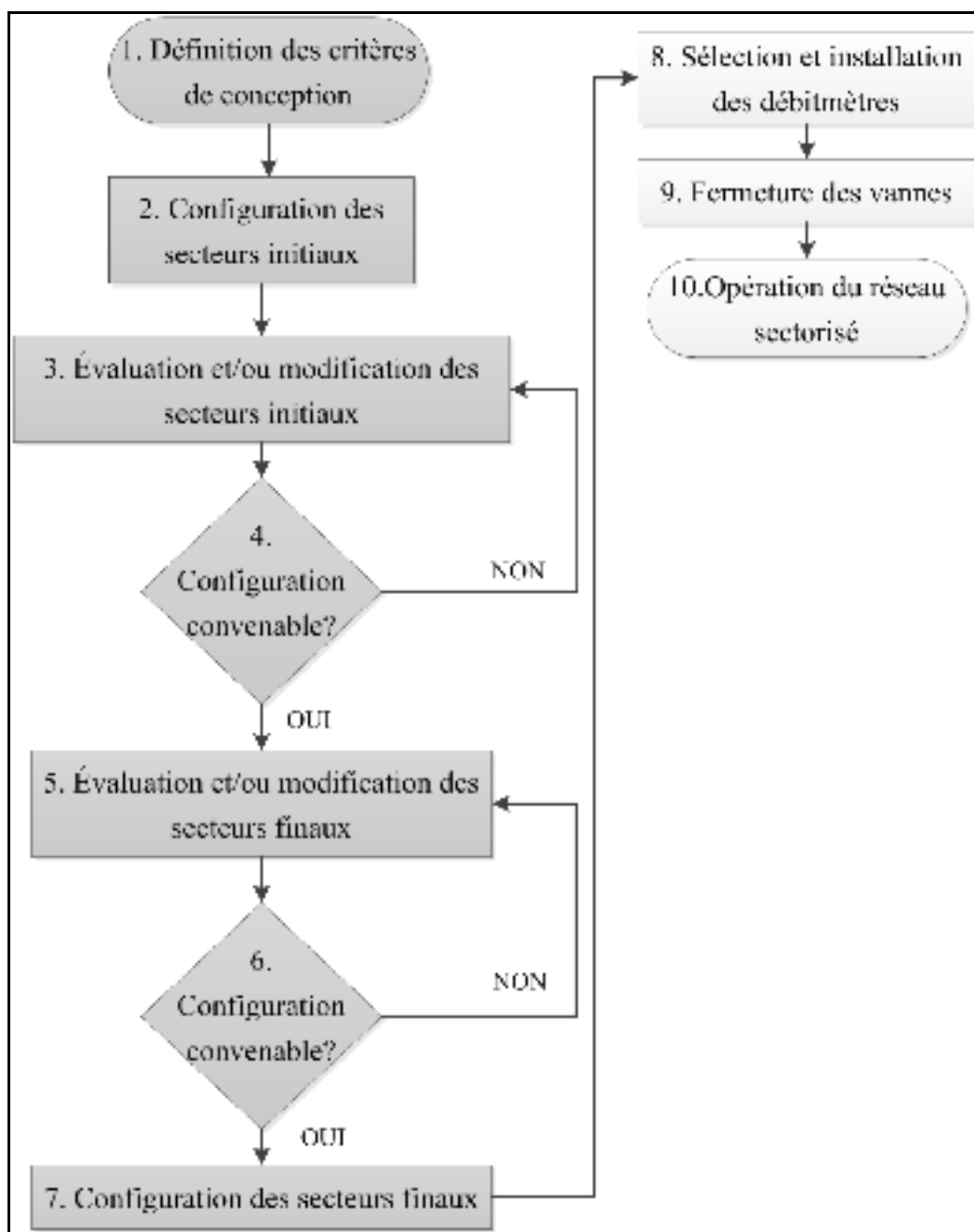


Figure 3.1 Schéma conceptuel des principales étapes menant à la mise en place de la sectorisation au sein d'un RDEP

3.2.2 Hypothèses et limitations générales des présents travaux

Il est important de rassembler, en premier lieu, les informations topologiques, les caractéristiques physiques des conduites et l'historique des interventions afin de créer un modèle hydraulique du RDEP. Ensuite, les pressions à tous les nœuds ainsi que les débits circulant dans toutes les conduites sont simulés à l'aide de l'outil de modélisation aquaGEO (Aqua Data, 2014), développé par l'entreprise Aqua Data Inc. (partenaire des présents travaux). Les modèles développés, pour les réseaux d'étude, ont été validés par Aqua Data (informations concernant les RDEP et prises de mesure ponctuelles sur les pressions et débits) et il est supposé que ces modèles demeurent valides et représentatifs des conditions existantes de ces RDEP.

Les simulations hydrauliques sont effectuées selon un régime permanent, et la consommation horaire maximale est considérée puisqu'il s'agit de l'un des deux scénarios de consommation à respecter (section 2.5.1). De plus, il est connu que la perturbation des conditions hydrauliques est maximale sous ce régime (DiNardo et DiNatale, 2011). Pour l'un des RDEP sectorisés à l'étude, les surpresseurs et les réducteurs ont été fermés pour simplifier l'analyse hydraulique lors de la sectorisation finale. Deux paliers de pressions indépendants ont ainsi été créés.

Le processus de sectorisation initiale élaboré dans ces travaux est heuristique et implique la participation de l'utilisateur dans l'obtention d'une solution. Cette méthode s'inspire de la théorie de graphes en considérant des critères hydrauliques mais repose, en partie, sur l'expérience de l'utilisateur. Par conséquent, la solution obtenue peut varier en fonction des choix de l'utilisateur. Toutefois, les solutions sont semblables (sur les plans hydraulique et topologique) étant donné que les contraintes (règles décisionnelles) développées dans cette méthode restreignent l'étendue des choix possibles de l'utilisateur. Enfin, l'identification de l'ensemble des vannes à fermer pour la création des secteurs finaux se fait selon l'AG qui est une méthode métaheuristique. L'utilisation de cet algorithme permet d'identifier une solution dans un intervalle de temps acceptable mais ne garantit pas l'obtention d'un optimum global.

comme en témoignent plusieurs études concernant les RDEP (section 5.2). L'incertitude liée aux diverses solutions obtenues est tout de même examinée (Annexe V).

3.2.3 Présentation des réseaux à l'étude

Avant de présenter les réseaux d'étude, il importe de mentionner que des versions simplifiées des réseaux initialement modélisés par l'entreprise Aqua Data Inc. ont été utilisées. Ainsi, une « optimisation » des réseaux d'étude a préalablement été exécutée à l'aide d'une fonctionnalité d'aquaGEO afin de réduire les nombres de conduites et de nœuds pour simplifier les représentations graphiques et l'analyse des réseaux. Cette optimisation vise à rassembler un ensemble de conduites en série de mêmes caractéristiques physiques (diamètre, matériau et coefficient de frottement interne) afin d'obtenir une seule conduite. Cette opération est répétée chaque fois que de tels groupes de conduites sont rencontrés. Ce faisant, les nœuds associés aux jonctions entre les conduites initiales sont retirés du modèle et, le cas échéant, les consommations aux nœuds sont regroupées. De plus, certaines zones en périphérie ont été éliminées pour réduire le nombre de nœuds et de conduites de sorte que les consommations des secteurs simplifiés ont été regroupées à un nœud du RDEP. Les vannes existantes, essentielles à la présente étude, sont cependant toutes conservées.

Réseau de la municipalité de Ville-Mont-Royal

Le RDEP de la municipalité de Ville Mont-Royal (VMR) possède, après optimisation, 431 nœuds et 593 conduites, suivant sa représentation dans aquaGEO. Il est alimenté par 3 sources provenant du RDEP de la Ville de Montréal. Ces sources alimentent près de 20 000 habitants et près de 500 entreprises réparties sur une superficie de 7,43 km² (Statistique Canada, 2011). Le réseau entier comporte 632 vannes distribuées sur la majorité des conduites constituant 80,5 kilomètres de conduites (7,9 vannes par kilomètre de conduites). Le réseau secondaire est constitué de conduites ayant un diamètre de 200 millimètres rattachées à une conduite principale de 300 millimètres. Une autre conduite de 300 millimètres de diamètre alimente un secteur industriel qui a été simplifié par le regroupement

de sa consommation à un seul noeud. Ces conduites forment des mailles et, par conséquent, le réseau est dit maillé. Le RDEP de VMR ne présente pas de paliers de pression. La Figure 3.3 représente le RDEP tel que schématisé par le logiciel aquaGEO.

Réseau de la municipalité d'Aylmer

La Ville de Gatineau a entrepris des initiatives de réduction des volumes d'eau perdus sur l'ensemble de son réseau. Le raffinement des bilans hydriques a été entrepris par la création de secteurs permanents regroupant les zones de forte consommation : le réseau d'Aylmer constitue l'un de ces secteurs. Une fois optimisé, le RDEP de la municipalité d'Aylmer, tel que représenté dans aquaGEO, possède 683 nœuds et 856 conduites. Il est alimenté, d'une part, par la Ville de Gatineau par l'entremise d'un secteur adjacent et, d'autre part, par une source d'eau se trouvant à l'intérieur du secteur d'Aylmer. La municipalité d'Aylmer alimente en eau potable plus de 35 000 habitants sur une superficie de 8,8 km² (Ouimet et Lacombe, 2009). Le RDEP optimisé est constitué de 689 vannes distribuées sur 93,1 km de conduites (7,4 vannes par kilomètre de conduites). La Figure 3.3 représente le RDEP selon le logiciel aquaGEO. Le réseau est en partie maillé et en partie arborescent. Il comporte cinq surpresseurs et réducteurs puisqu'il est divisé en deux paliers de pression (tel qu'indiqué par la ligne noire transversale à la Figure 3.3); les élévations des nœuds varient entre 60 et 120 mètres.

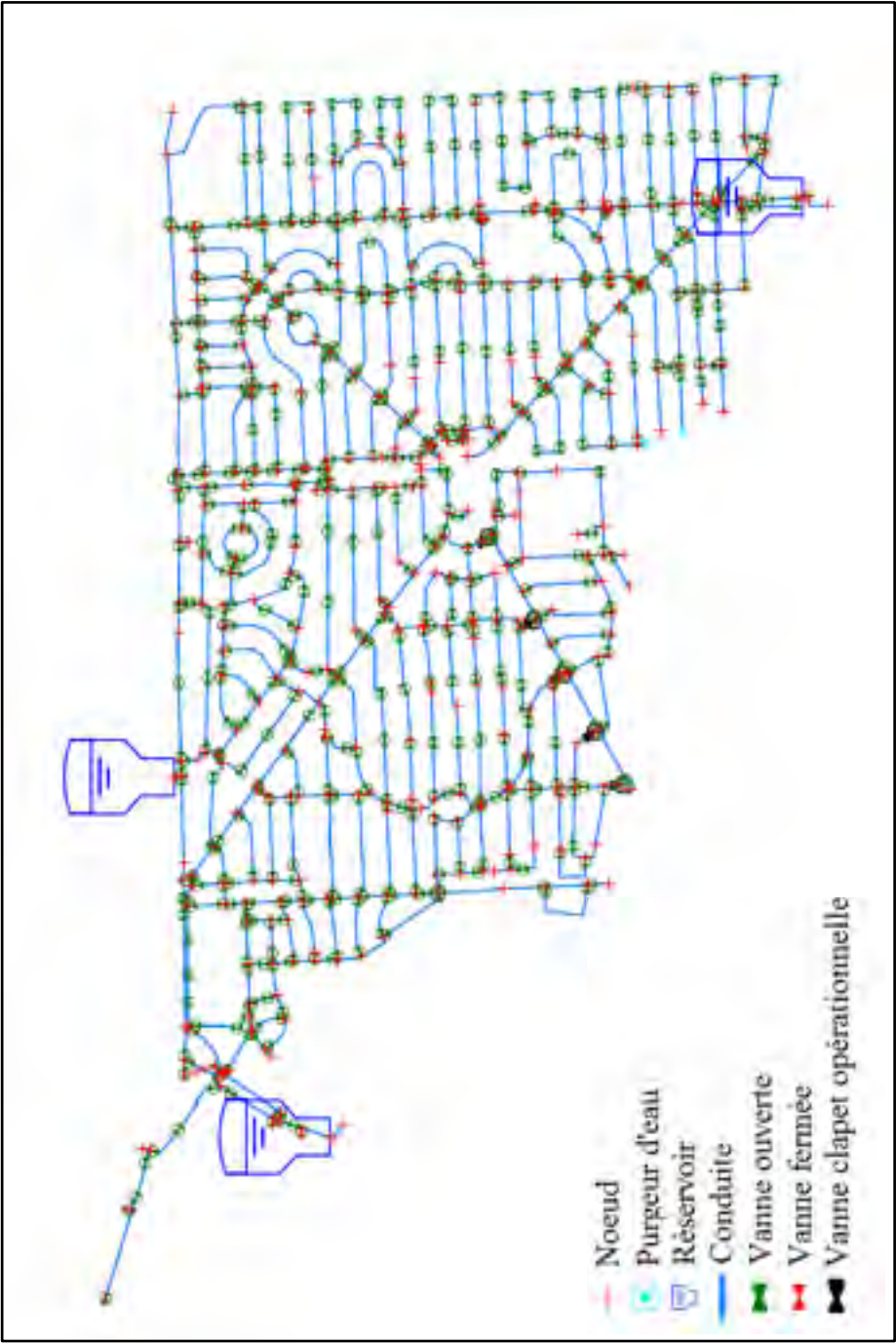


Figure 3.2 Réseau de distribution d’eau potable d’un secteur de VMR

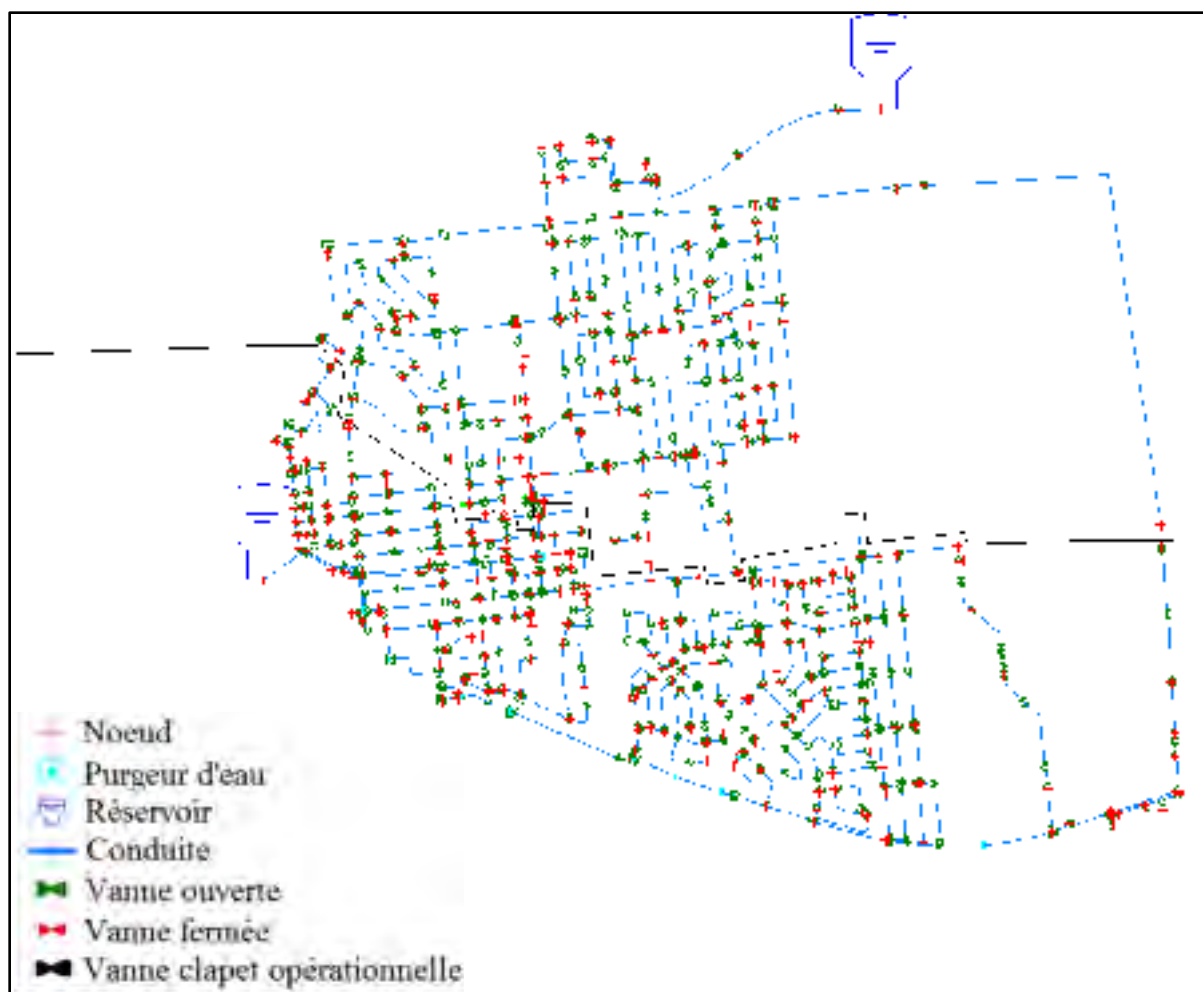


Figure 3.4 Réseau de distribution d'eau potable d'un secteur de la municipalité d'Aylmer

CHAPITRE 4

SECTORISATION INITIALE D'UN RDEP

Cette section présente d'abord la méthode de sectorisation initiale développée par DiNardo et DiNatale (2011), et l'application de cette méthode au RDEP nommé *Anytown* (Walski et al., 1987) et à deux RDEP québécois. Par la suite, une version adaptée de cette méthode, développée dans le cadre du présent mémoire, est présentée de même que les hypothèses sous-jacentes à la méthode et sa validation. Finalement, la méthode adaptée est appliquée aux deux réseaux québécois à l'étude.

4.1 Présentation de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

DiNardo et DiNatale (2011) ont développé une méthode de sectorisation permanente s'appliquant aux réseaux existants; le problème posé par l'implantation des secteurs sur un RDEP existant a été exposé à la section 2.4.1. Conceptuellement, la sectorisation d'un RDEP est effectuée par le regroupement de nœuds géographiquement rapprochés. Les conduites comprises entre deux nœuds de même secteur font nécessairement partie de ce secteur tandis que les conduites aux frontières lient deux nœuds de secteurs différents.

4.1.1 Description de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

Cette méthode, inspirée de la théorie des graphes, débute par la simulation hydraulique du RDEP existant afin d'en établir les conditions hydrauliques initiales. L'interaction entre les composantes du RDEP est déterminée par la formation de la matrice d'adjacence A et de la matrice d'incidence I telles que présentées à l'annexe I. Le coût w_{xy} associé à chaque élément de la matrice d'adjacence évaluée est basé sur la puissance dissipée dans chaque conduite liant les nœuds ax et ay . Il est calculé selon l'équation (4.1) :

$$w_{xy} = Q_j * \Delta H_{xy} = Q_j (H_x - H_y) \quad (4.1)$$

où Q_j est le débit dans la conduite j , H_x est la hauteur piézométrique au nœud x , H_y est la hauteur piézométrique au nœud y , et ΔH_{xy} est la perte de charge dans la conduite liant les nœuds x et y . L'ensemble des chemins entre chaque source s et chaque nœud α_i , noté p^{s,α_i} , est établi une fois que la matrice d'adjacence valuée orientée A' (le sens de l'écoulement est considéré) de coût w_{xy} a été obtenue :

$$p^{s,\alpha_i} = \{p_1^{s,\alpha_i}, \dots, p_z^{s,\alpha_i}\} \quad (4.2)$$

où z dénombre tous les chemins possibles entre une source s et chacun des nœuds α_i alimentés par cette même source. L'ensemble p^{s,α_i} exprime les chemins par une succession de nœuds adjacents et, grâce à la matrice d'incidence I , il est possible d'exprimer ces chemins en termes de conduites (pour simplifier le calcul de l'équation (4.3) ci-après).

Un RDEP étant en partie maillé, plus d'un chemin peut exister pour une même combinaison « source-nœud ». Parmi cet ensemble de chemins possibles, il en existe un pour lequel la puissance dissipée est minimale (problème du plus court chemin). Pour chaque combinaison « source-nœud », le plus court chemin est obtenu, dans cette étude, à l'aide de l'algorithme de Dijkstra (Dijkstra, 1959). Tous les chemins les plus courts entre chaque source s et les nœuds α_i , en matière de puissance dissipée, forment alors l'ensemble $\{p\}_{min}^s$:

$$\{p\}_{min}^s = \{p_{min}^{s,\alpha_1}, \dots, p_{min}^{s,\alpha_n}\} \quad (4.3)$$

où n est le nombre total de nœuds dans un réseau. La puissance dissipée est l'énergie supplémentaire par unité de temps que les pompes doivent fournir pour alimenter les usagers selon un scénario de consommation donné. Par conséquent, en introduisant le concept des chemins minimaux en termes de puissance dissipée, la solution obtenue correspond à une sectorisation permanente économique du point de vue des coûts de pompage de l'eau (DiNardo et DiNatale, 2011). À partir des plus courts chemins déterminés, la fréquence d'occurrence des conduites dans les chemins les plus courts (c'est-à-dire le nombre de fois où une conduite est présente divisé par le nombre de chemins totaux) est calculée :

$$f_j = \frac{t_j}{s * n} \quad (4.4)$$

où f_j est la fréquence de la conduite j , $s * n$ est le nombre total de chemins les plus courts calculés pour un réseau et t_j dénombre les occurrences de la conduite j dans l'ensemble $\{p\}_{min}^s$. Les conduites de fréquence nulle sont exclues, ce qui mène à la formation d'une nouvelle matrice d'adjacence orientée non valuée A'' , laquelle représente ce qui est appelé le réseau principal. Cette matrice considère le sens d'écoulement dans les conduites mais ne tient pas compte de la puissance dissipée en réseau :

$$A''_{xy} = \begin{cases} 1 \text{ si } A'_{xy} \neq 0 \text{ ET } f_j > 0 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \quad (4.5)$$

Le réseau principal est ensuite schématisé par l'analyse hiérarchique des prédécesseurs et des successeurs. Il s'agit d'une représentation arborescente du réseau principal où chaque niveau correspond à un degré de connectivité des nœuds se trouvant sur ce niveau à une source. La Figure 4.1 montre, à titre d'exemple, le réseau *Anytown, USA* (présenté plus en détails à la section 4.1.3) et la représentation hiérarchique du réseau principal (Sugiyama et al., 1981) obtenue suivant la méthode de Di Nardo et Di Natale (2011). Le nœud 20 (la source principale du réseau) se situe au premier niveau tandis que le nœud 1 se retrouve au second niveau puisqu'il est le seul nœud adjacent en aval du nœud 20. Plusieurs nœuds peuvent se retrouver sur un même niveau tel que démontré au troisième niveau où les nœuds 2, 12, 13, 41 et 42 sont présents. Les nœuds 2, 12 et 13 sont adjacents et en aval du nœud 1 (au deuxième niveau) tandis que les sources 41 et 42 sont présentes sur ce niveau afin de concorder avec l'adjacence des nœuds (par exemple, le nœud 14 est lié au nœud 2 donc il doit se trouver au quatrième niveau : par conséquent, le nœud 41, qui est adjacent et en amont du nœud 14, doit se retrouver à un niveau supérieur à celui du nœud 14 c'est-à-dire au troisième niveau).

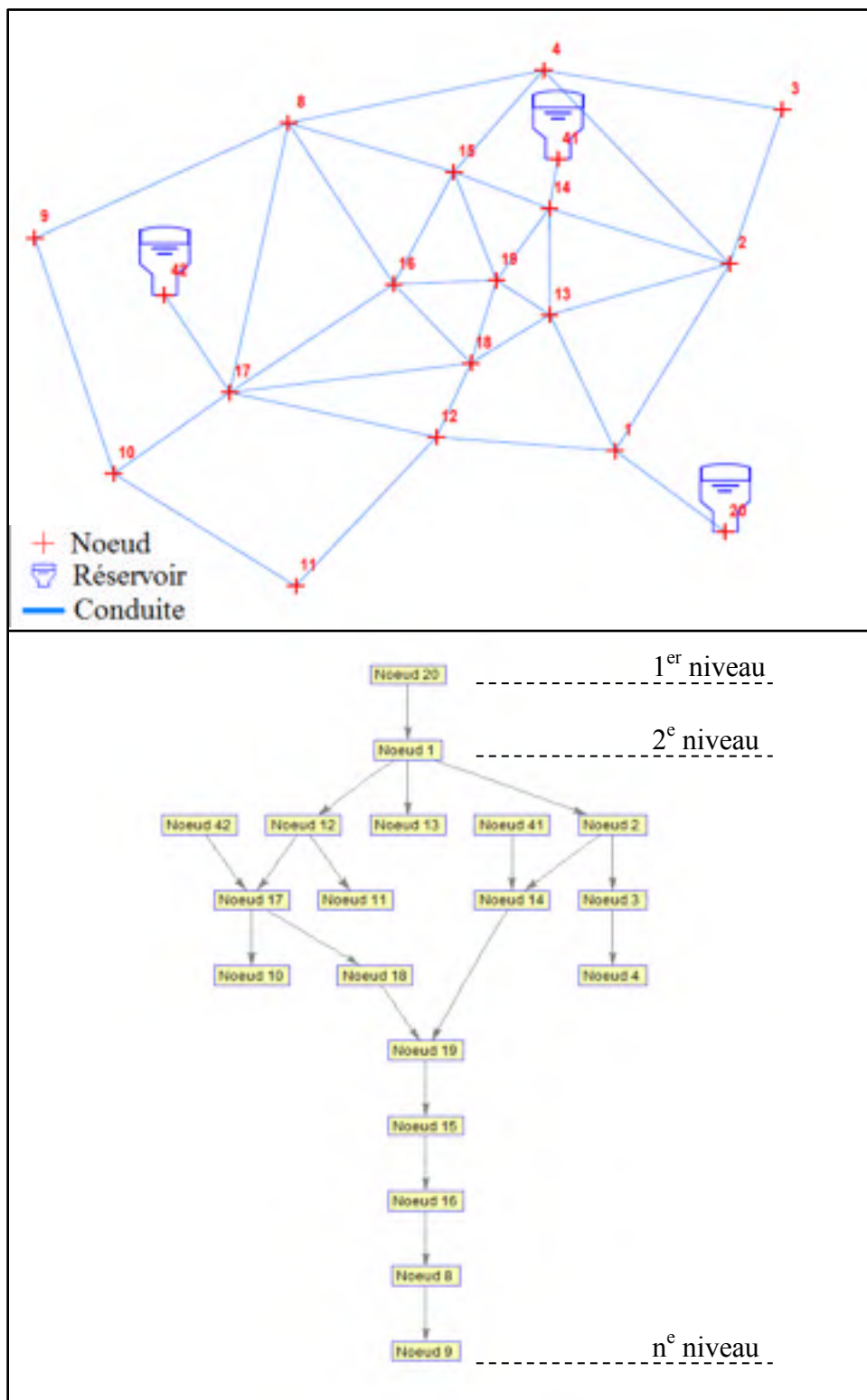


Figure 4.1 Réseau *Anytown, USA* et sa représentation hiérarchique

D'après l'analyse du réseau principal, le nombre de secteurs est déterminé par l'utilisateur en considérant la taille typique des secteurs (voir section 2.4.1) et le nombre de débitmètres qu'il souhaite à insérer à l'entrée de chaque secteur (nombre de points d'entrée). Tel que mentionné à la section 2.3, il est préférable d'identifier une solution où chaque secteur possède le moins possible de points d'entrée puisque le bilan hydrique est plus facilement réalisable. Trois règles gouvernent la définition des frontières des secteurs par l'utilisateur :

- (1) Plus le nombre de conduites fermées est élevé, plus le nombre de diamètres disponibles pour l'écoulement est faible;
- (2) Favoriser la fermeture des conduites de fréquences faibles;
- (3) La fermeture d'une conduite de fréquence élevée entraîne une augmentation significative de la puissance dissipée par un chemin alternatif.

À ce stade de la méthode, il existe plusieurs solutions possibles qui ne peuvent pas être distinguées sans une analyse plus rigoureuse de l'impact de la sectorisation obtenue sur les conditions hydrauliques en réseau et divers indices de performance. Ainsi, une fois les secteurs identifiés, une nouvelle simulation hydraulique est exécutée en tenant compte des modifications à apporter au réseau (fermetures de vannes, points de communication entre secteurs voisins). Des indices de performance énergétiques, statistiques et hydrauliques du réseau sont compilés pour évaluer l'impact de la nouvelle configuration du réseau (similaires aux indices présentés à la section 2.5). Tout en conservant les mêmes secteurs, l'utilisateur peut choisir de réduire le nombre de débitmètres à l'entrée d'un secteur (si ce secteur possède plusieurs points d'entrée) en remplaçant un débitmètre par une vanne d'isolement sur une conduite ayant une faible fréquence. À chaque fois que le nombre de débitmètre est réduit, une nouvelle simulation hydraulique est exécutée et les indices de performance sont calculés. Ce processus prend fin soit (1) lorsque le remplacement de quelconque débitmètre par une vanne d'isolement crée la déconnexion d'un secteur (c'est-à-dire que chaque secteur possède seulement un point d'entrée), (2) les indices de performance sont sous le seuil de performance déterminé par l'utilisateur ou (3) une combinaison des deux premières situations. L'utilisateur peut employer la logique inverse en identifiant un seul point d'entrée par secteur et, par la suite, ajouter des points d'entrée supplémentaires par l'insertion de débitmètres au besoin.

4.1.2 Hypothèses sous-jacentes à l'application de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

Cette méthode repose sur la simulation des conditions hydrauliques en régime permanent, associées à la consommation horaire maximale. Selon les auteurs de la méthode, la consommation horaire maximale représente les pires conditions en termes de sollicitation du réseau qui peuvent être rencontrées dans les réseaux qu'ils ont étudiés (DiNardo et DiNatale, 2011). Ce choix méthodologique est motivé par l'importante variation de la performance hydraulique créée par la modification de la configuration d'un réseau, suite à la sectorisation. Une fois la sectorisation initiale complétée, il est supposé que les conditions hydrauliques (pressions et vitesses) rencontrées suivant les différents scénarios de consommation au cours d'une journée permettent d'alimenter les usagers adéquatement (revoir au besoins la section 2.5.1 pour un rappel des valeurs de conception minimales et maximales des pressions et des vitesses dans un RDEP).

La méthode de sectorisation suppose que toutes les conduites peuvent être fermées de façon à empêcher l'écoulement entre des secteurs voisins. L'introduction d'une vanne sur une conduite qui n'en posséderait pas en réalité est donc toujours supposée, de façon à créer les frontières entre les secteurs. Le coût engendré par l'ajout de vannes n'est donc pas considéré dans le calcul de la solution économique développée par DiNardo et DiNatale (2011). De plus, il est supposé que les vannes à fermer aux frontières des secteurs ont préalablement été testées pour assurer leur bon fonctionnement et l'étanchéité de celles-ci afin d'empêcher les échanges d'eau non comptabilisés entre deux secteurs.

Aucune restriction n'est prévue quant aux pressions exigées pour les bâtiments institutionnels (hôpitaux et écoles), commerciaux et industriels (ICI). Par exemple, le système de gicleurs d'un bâtiment commercial peut exiger une pression minimale pour assurer la protection contre les incendies. Seules les pressions minimales et maximales exigées au réseau (section 2.5.1) sont considérées. De plus, la qualité de l'eau est supposée invariante même si la création de bouts morts par la fermeture des vannes aux frontières est susceptible d'entraîner

une dégradation de la qualité de l'eau par l'augmentation du temps de séjour de l'eau en réseau.

4.1.3 Application de la méthode au réseau *Anytown, USA*

Le réseau fictif nommé *Anytown, USA* est sélectionné pour une première application de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011). Il s'agit d'un réseau simple, très utilisé dans la littérature scientifique (par exemple : Dondhwi, Doosun et Lansey, 2012; Herstein et Fillion, 2012; Murphy et al., 1994; Walters et al., 1999), qui présente tout de même les caractéristiques typiques des réseaux réels (Walski et al., 1987). Ce réseau théorique, présenté à la Figure 4.2, possède une source principale soit le nœud 20, deux réservoirs de stockage (les nœuds 41 et 42), 17 nœuds numérotés en rouge et 35 conduites numérotées en bleu. Les consommations moyennes journalières fournies par Walski et al. (1987) ont été multipliées par un coefficient de pointe (2,6) (Ministère de l'Environnement, 1984; Walski et al., 2003) afin d'obtenir la consommation horaire maximale. Le réseau est muni de trois conduites en tête de réseau de grands diamètres : les conduites 1 et 2 ont chacune un diamètre de 300 millimètres tandis que la conduite 3 possède un diamètre de 400 millimètres. Les pertes de charge engendrées par l'écoulement de l'eau la conduite 3 sont nécessairement plus faibles, à débit égal. Toutefois, le débit transitant dans cette conduite est élevé. À titre indicatif, selon la simulation hydraulique en consommation horaire maximale, le débit dans la conduite 3 est deux fois plus élevé que le débit dans la conduite 2.

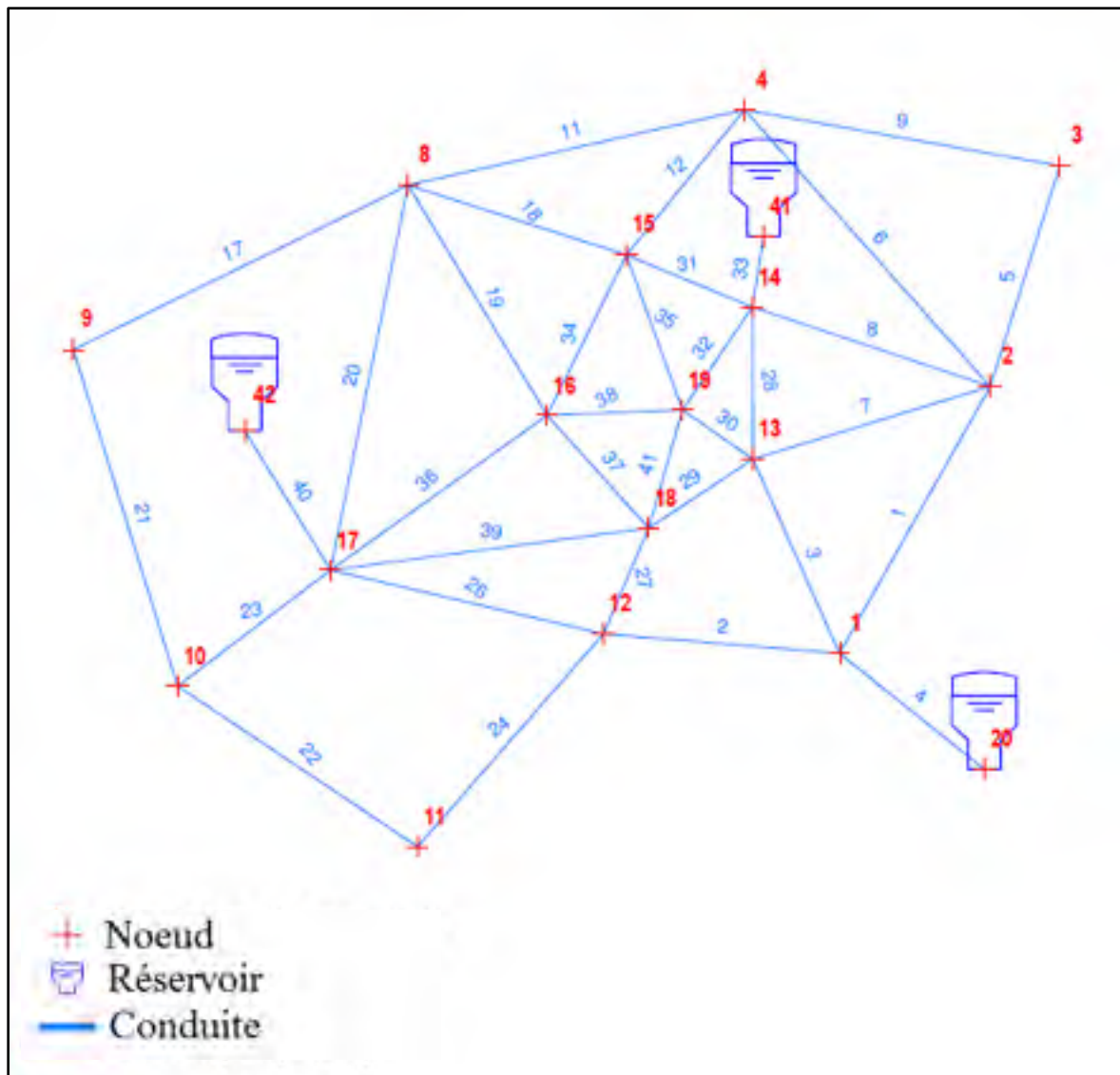


Figure 4.2 Réseau *Anytown, USA* initial

La sectorisation initiale est effectuée à partir de la schématisation hiérarchique du réseau principal (Figure 4.1). La sectorisation initiale du réseau *Anytown, USA* est présentée à la Figure 4.3. La consommation totale moyenne journalière du réseau représente 35 000 m³/jour ce qui correspond à 45 000 équivalent-habitants en considérant la consommation québécoise moyenne par habitant de 795 L/personne/jour (Environnement Canada, 2006). Tel que mentionné à la section 2.4.1, le nombre d'habitants par secteur devrait varier de 2 500 à 12 500 habitants (ce qui résulte en une valeur médiane de 7 500 habitants par secteur). Par conséquent, en théorie, le réseau *Anytown, USA* doit être composé de 5 secteurs d'environ

7 500 habitants. Toutefois, le nombre d'habitants présents sur certains nœuds (l'équivalent de la consommation à ces nœuds) est de l'ordre de 4 000 habitants ce qui pourrait correspondre à un secteur à lui seul (ceci est l'effet de la simplification de ce réseau). La formation de 5 secteurs entraîne la fermeture de près de 45% des conduites du réseau (15 conduites) et l'insertion de 4 débitmètres à l'entrée des secteurs (puisque'il est désiré, au départ, de maintenir un seul point d'entrée par secteur). Cette solution donne lieu à des pressions négatives sur la majorité des nœuds du réseau en raison d'un trop grand nombre de secteurs qui engendrent la fermeture d'un nombre élevé de conduites. Par conséquent, un nombre de secteurs fixé à trois a été retenu afin de sectoriser le réseau *Anytown, USA*. Cette configuration présente des secteurs d'un peu plus de 12 500 habitants soit la valeur maximale mentionnée par Butler (2000). Tel que présenté à la Figure 4.3, le réseau sectorisé est composé de trois secteurs dont un qui ne possède pas de source ou de réservoir de stockage.

Les conduites représentées en rouge, sur la Figure 4.3, sont les points d'entrée des secteurs. En considérant la configuration où seul un point d'entrée par secteur est permis, la conduite faisant circuler le débit le plus élevé est la conduite 2 (diamètre de 300 mm) puisqu'elle alimente les secteurs 2 et 3 : la perte de charge dans cette conduite est élevée. Des pressions négatives sont alors observées sur près de 60% des nœuds (10 nœuds) du réseau. Les nœuds ayant des pressions négatives sont représentés en bleu à la Figure 4.3 et ne rencontrent évidemment pas le critère de pression minimale requise qui est de 140 kPa (section 2.5.1). À l'entrée de la conduite 2, la pression est de 846 kPa tandis qu'à la sortie de cette même conduite la pression est de -406 kPa.

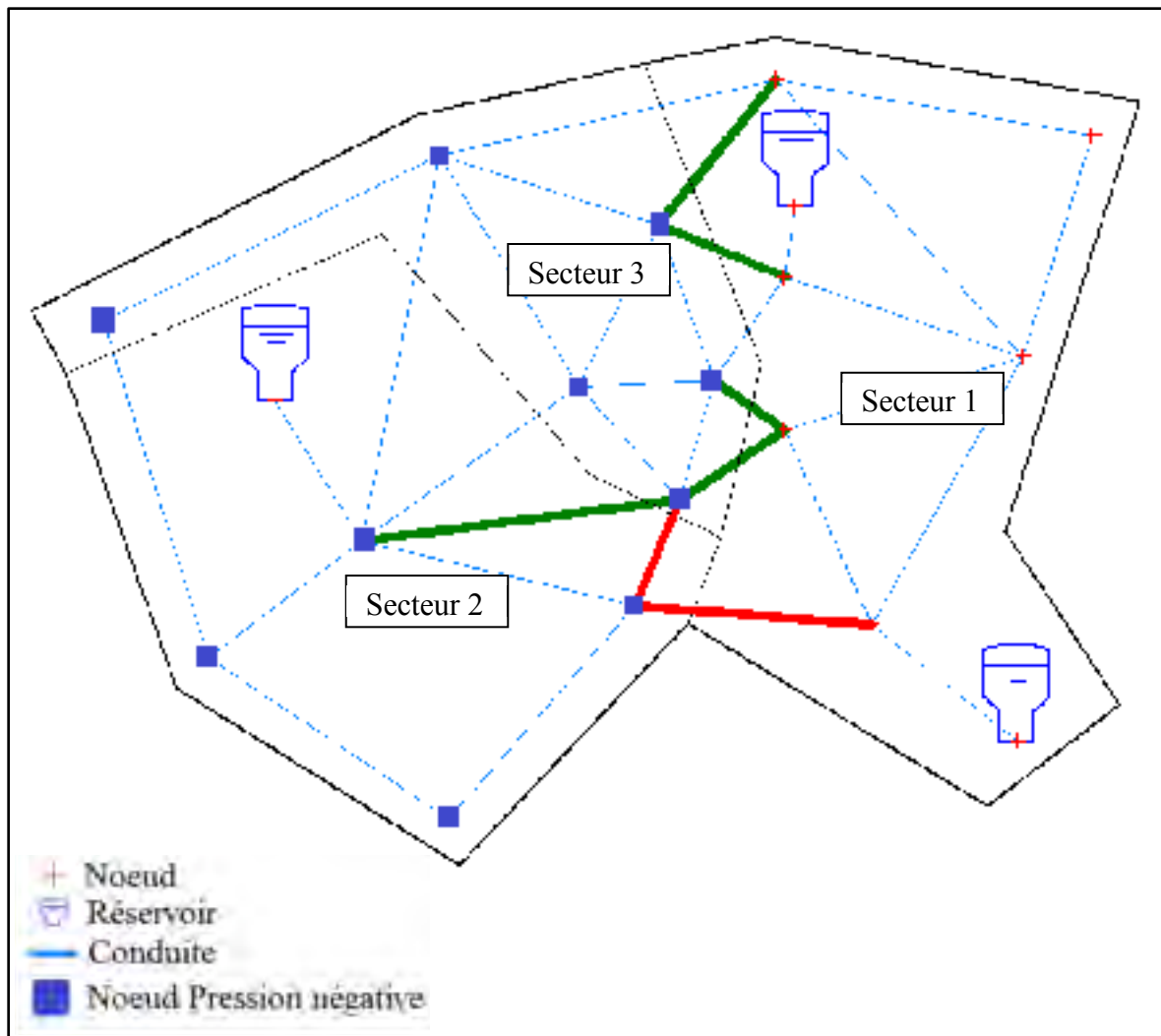


Figure 4.3 Sectorisation initiale du réseau *Anytown, USA* selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

Lors de la sectorisation d'un réseau, il est préférable de conserver les conduites possédant les diamètres les plus importants afin de générer une perte de charge moins importante. La méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) considère le point d'entrée du secteur 2 par une conduite de 300 millimètres laissant transiter un débit moins élevé dans la conduite 3 de 400 millimètres de diamètre. Le calcul des chemins les plus courts selon la puissance dissipée défavorise les conduites dans lesquelles transitent des débits élevés tel que démontré aux équations (4.6) et (4.7) :

$$w_{xy} = Q_j * \Delta H_{xy} = Q_j * H_f \quad (4.6)$$

où w_{xy} est le poids de la matrice d'adjacence valuée orientée A' (la puissance dissipée [W]), Q le débit [m^3/s] de la conduite j , et ΔH_{xy} est la perte de charge [m] entre les nœuds x et y , laquelle correspond à H_f la perte de charge linéaire [m] (Annexe I) calculée par l'équation de Hazen-Williams :

$$w_{xy} = Q_j * \left(10,625 * L * \left(\frac{Q_j}{CHW} \right)^{1,852} * \frac{1}{D^{4,87}} \right) = \frac{10,625 * L}{CHW} * \frac{Q_j^{2,852}}{D^{4,87}} \quad (4.7)$$

où $10,625$ est un facteur de conversion utilisé pour le système international d'unités (SI), L est la longueur de la conduite [m], CHW est le coefficient de Hazen-Williams, et D est le diamètre interne de la conduite [m].

Selon l'équation (4.7), lors de la compilation des chemins les plus courts, les conduites possédant un diamètre élevé sont avantagées $\left(\frac{1}{D^{4,87}} \right)$ mais ces mêmes conduites peuvent aussi être défavorisées puisqu'elles transportent normalement des débits élevés ($Q^{2,852}$). Le Tableau 4.1 présente une comparaison des valeurs obtenues pour les conduites 2 et 3 du réseau d'*Anytown, USA* où le coût w_{xy} de la conduite 3, de plus grand diamètre, est supérieur au coût w_{xy} de la conduite 2, de plus faible diamètre. À noter que les deux conduites ont exactement les mêmes longueurs et coefficients de Hazen-Williams (c'est pourquoi le coefficient C est introduit). Ces conduites se trouvent en tête de réseau et sont celles sur lesquelles les conduites de plus petits diamètres sont raccordées (conduites secondaires).

Tableau 4.1 Exemple comparatif des coûts w_{xy} des conduites du
RDEP *Anytown, USA*

		Méthode développée par (DiNardo et DiNatale) 2011 $C * \frac{Q^{2,852}}{D^{4,87}}$	Méthode développée par (DiNardo et DiNatale) 2011 $\frac{10,625 * L * Q^{2,852}}{CHW D^{4,87}}$
Conduite 3	Débit = 0,1286 m ³ /s Diamètre = 400 mm	$w_{xy} = C * 0,25$	$w_{xy} = 138,8$
Conduite 2	Débit = 0,0715 m ³ /s Diamètre = 300 mm	$w_{xy} = C * 0,19$	$w_{xy} = 105,5$

De plus, la méthode de sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011) ne considère pas la répartition des débits entrant dans chaque secteur. La répartition de la consommation par secteur qui peut être transposée en nombre d'habitants ou en nombre de connexions n'est pas abordée dans ces travaux. Ceci donne la possibilité de définir des secteurs possédant des débits entrants élevés ce qui crée une perte de charge importante tel qu'observé dans la conduite 2.

Néanmoins, la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) est itérative et considère la possibilité d'introduire plusieurs points d'entrée pour un même secteur. En effectuant cette opération, il est possible d'obtenir une configuration de secteurs où les pressions sont supérieures à la pression minimale requise (140 kPa). Cette configuration est obtenue par l'ajout de 5 points d'entrée (débitmètres) sur les conduites 12, 29, 30, 31 et 39 qui possèdent des fréquences élevées. Ces conduites sont indiquées en vert à la Figure 4.3. Il est remarqué que les conduites 29 et 30 qui alimentent le secteur 3 sont directement en aval de la conduite 3 de diamètre 400 millimètres qui achemine un débit élevé (contrairement à la configuration des secteurs où seul un point d'entrée est permis). Cette configuration implique un nombre de débitmètres à insérer qui est élevé considérant, d'une part, le nombre de conduites du réseau et, d'autre part, les possibles complications engendrées sur le calcul du bilan hydrique étant donné la présence de 6 points d'entrée au secteur 3 (section 2.3).

4.1.4 Application de la méthode aux deux réseaux d'étude québécois

La méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) a aussi été appliquée aux RDEP des municipalités de VMR et d'Aylmer (section 3.2.3). Afin d'identifier le nombre de secteurs sur chacun des réseaux, un nombre de 7 500 habitants, en moyenne par secteur, est considéré pour obtenir des secteurs de taille moyenne (sections 4.1.3 et 2.4.1). En divisant le nombre total de résidents de VMR (soit 20 000) par la valeur de 7 500, le nombre de secteurs se situe à trois. Toutefois, la présence de plus de 500 entreprises fait en sorte que quatre secteurs ont été déterminés pour sectoriser ce RDEP. La formation de quatre secteurs est choisie pour la municipalité d'Aylmer étant donné la taille de la population (plus de 35 000 habitants) et la présence de trois paliers hydrauliques. Ainsi, la population moyenne par secteur est donc quelque peu supérieure à la valeur de 7 500 habitants.

Les résultats de sectorisation pour les réseaux de VMR et d'Aylmer sont présentés aux Figures 4.4 et 4.5, respectivement. Sur ces figures, les nœuds de même couleur appartiennent aux mêmes secteurs (délimités par des lignes noires) tandis que les conduites en rouge représentent les points d'entrée des secteurs. Ces points d'entrée sont déterminés lors de l'identification des frontières sur la représentation hiérarchique du réseau principal (Figure-A II-1 et Figure-A II-3 à l'Annexe II) : ils correspondent aux conduites « coupées » par la définition des secteurs mais qui demeureront ouvertes.

Tel que le montrent les Figures 4.4 et 4.5, l'application de la méthode entraîne, respectivement, la fermeture de 19 et de 33 conduites formant ainsi quatre secteurs pour chaque réseau. Pour ce qui est du réseau de VMR, étant donné la présence de trois sources, les secteurs ne peuvent être exclusivement alimentés par une seule source. Bien que le secteur 4 possède sa propre source, celle-ci ne peut pas alimenter tous les nœuds de ce secteur puisque le débit qui en sort est trop faible. C'est pourquoi le secteur 3 alimente le secteur 4 (Figure 4.4). De plus, le secteur 1 alimente le secteur 2 qui ne possède aucune source. La Figure 4.4 démontre la sectorisation du RDEP de VMR en quatre secteurs possédant chacun un seul point d'entrée. L'implantation des secteurs est évaluée, en premier

lieu, par l'analyse des pressions à chaque nœud, de façon similaire à l'analyse effectuée pour le réseau *Anytown, USA* (section 4.1.3).

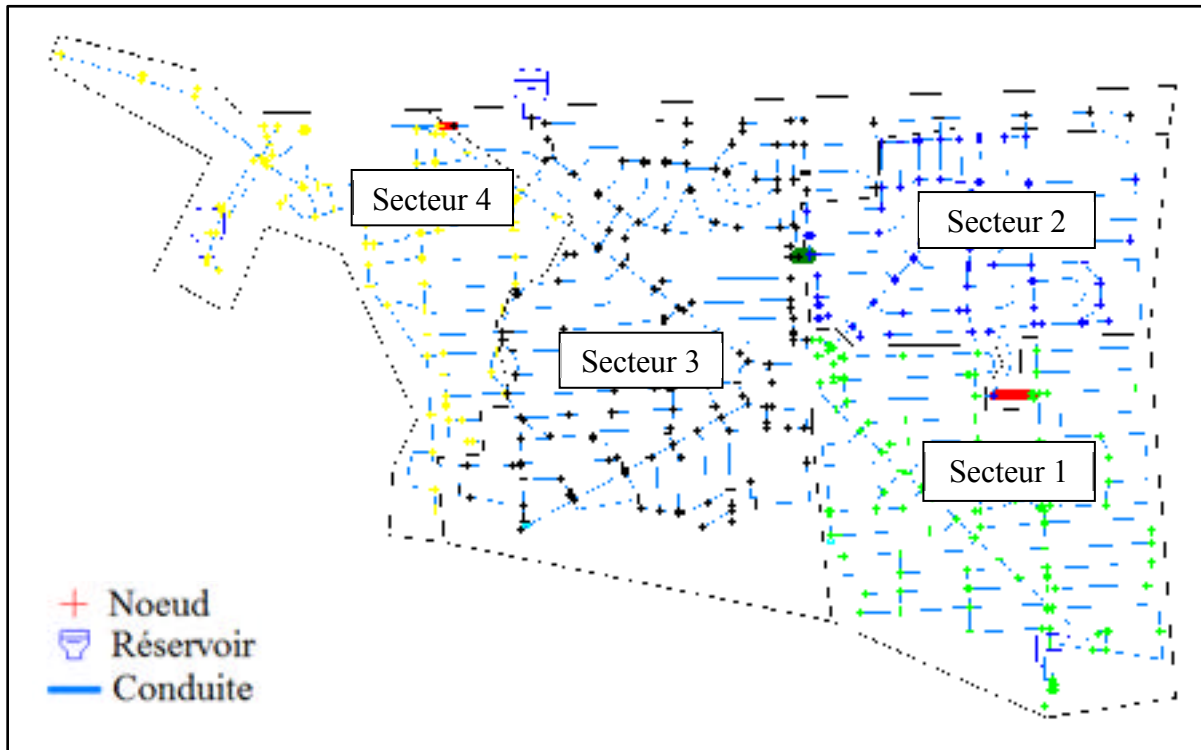


Figure 4.4 RDEP sectorisé de VMR selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

Suite à la fermeture des conduites aux frontières en considérant un seul point d'entrée par secteur, des pressions négatives sont observées sur près de 15% de l'ensemble des nœuds du réseau de VMR. Tous les nœuds du secteur 2 ont des pressions négatives. Une pression négative signifie une perte de charge trop élevée entre le nœud et la source qui l'alimente, causée notamment par un débit élevé dans une conduite de faible diamètre. Le réseau ne peut donc pas être opéré selon cette configuration puisque certains usagers ne pourront pas être alimentés adéquatement. Selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011), tout secteur problématique, dans ce cas-ci le secteur 2, doit se munir d'un point d'entrée supplémentaire représenté par la conduite en vert. Le point d'entrée retenu correspond à la conduite qui possède la fréquence la plus élevée liant le secteur 2 au secteur 4. Ainsi, un

débitmètre supplémentaire doit être inséré sur une conduite de 300 millimètres de diamètre afin de comptabiliser le volume d'eau entrant dans le secteur 2. Les pressions aux nœuds du secteur 2 sont alors supérieures à la pression minimale requise et, par conséquent, cette solution peut être retenue.

La municipalité d'Aylmer possède 2 sources. Le secteur 1 alimente le secteur 2 tandis que le secteur 4 alimente le secteur 3 tel que présenté à la Figure 4.5. Suite à l'analyse des pressions aux nœuds en considérant un seul point d'entrée par secteur, il est observé que tous les nœuds possèdent des pressions positives. Toutefois, le secteur 2 possède plusieurs nœuds critiques ayant une pression inférieure à la pression minimale requise de 140 kPa. La répartition des nœuds selon leur pression, dans ce secteur, est illustrée à la Figure 4.6.

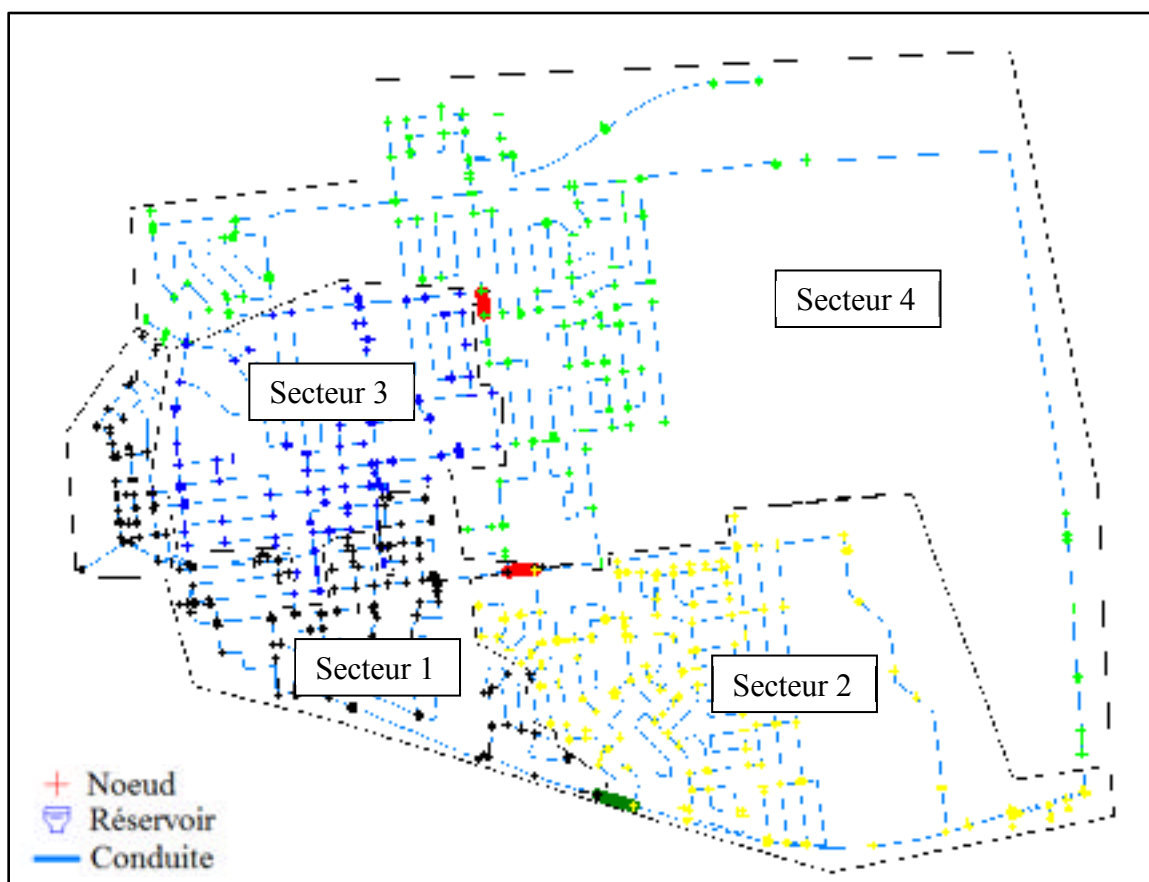


Figure 4.5 RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

Ainsi, selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011), le secteur 2 doit se munir d'un point d'entrée supplémentaire représenté par la conduite en vert à la Figure 4.5. Le point d'entrée ajouté correspond à la conduite qui possède la fréquence la plus élevée liant ce secteur au secteur 1. Ainsi, un débitmètre supplémentaire doit être inséré sur une conduite de 350 millimètres de diamètre. Les pressions aux nœuds du secteur 2 sont alors supérieures à la pression minimale requise et, par conséquent, cette solution peut être retenue.

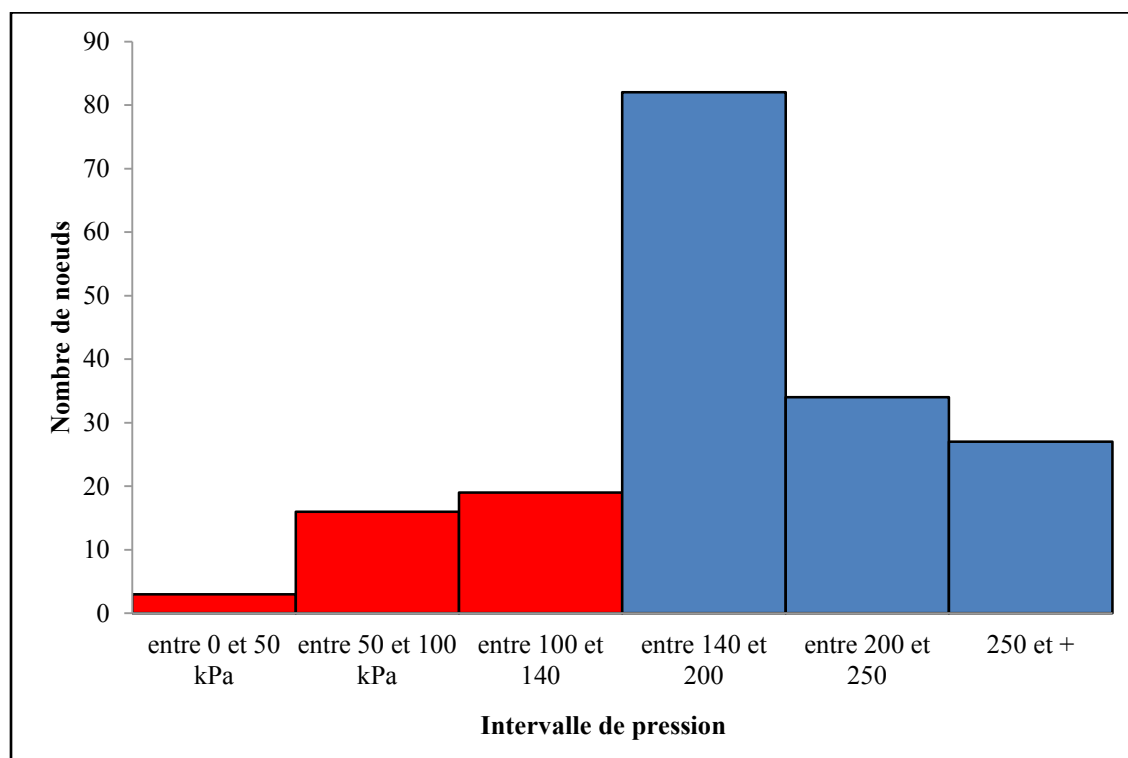


Figure 4.6 Répartition des pressions des nœuds du secteur 2 suite à l'application de la méthode de DiNardo et DiNatale (2011) sur le réseau d'Aylmer

La méthode de sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011) ne dirige pas de façon précise l'utilisateur lors de la délimitation des frontières des secteurs à partir de la représentation hiérarchique du réseau principal. En effet, les indications sont peu nombreuses quant aux regroupements des nœuds pour former les secteurs : seule la taille typique des secteurs (en nombres d'habitants) et l'emplacement des débitmètres sont considérés. Ainsi, il est possible que les frontières des secteurs varient considérablement d'un utilisateur à un autre, surtout à une échelle où les réseaux possèdent plusieurs nœuds et plusieurs conduites

(RDEP de VMR et d'Aylmer, notamment). En effet, selon la Figure-A III-1 et la Figure-A III-2 de l'Annexe III, trois utilisateurs, connaissant les trois règles établies par cette méthode (section 4.1.1) ont sectorisé les RDEP de VMR et d'Aylmer. Ces sectorisations diffèrent l'une de l'autre géographiquement. De plus, l'inclusion ou l'exclusion de nœuds possédant un nombre d'habitants élevé (consommation importante) lors de la définition des secteurs peut avoir des impacts hydrauliques à considérer, d'autant plus que le réseau *Anytown, USA* sectorisé selon cette méthode requiert sept conduites d'entrée dont six conduites d'entrée pour le secteur 3 : sans ces conduites d'entrée, des pressions négatives sont observées à certains nœuds. Suivant cette méthode, une configuration de secteurs choisie où les conditions hydrauliques sont défavorables, comme par exemple où le nombre d'habitants pour un secteur est trop élevé, considère l'ajout de points d'entrée jusqu'à ce que le réseau soit opérable. Il apparaît judicieux de déterminer les frontières des secteurs en considérant plusieurs aspects hydrauliques afin de diriger les utilisateurs vers un ensemble de solutions semblables et performantes des points de vue hydraulique et géographique, en plus de considérer la protection contre les incendies, qui est une fonction importante des réseaux québécois.

4.2 Adaptation de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)

À la lumière des précédents constats concernant la méthode de sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011), cette section présente les améliorations apportées à cette méthode. Cette nouvelle méthode de sectorisation (ci-après appelée méthode adaptée) considère les particularités des RDEP québécois en plus d'établir des règles décisionnelles supplémentaires dans la définition des secteurs initiaux (Figure 4.1).

4.2.1 Poids de la matrice d'adjacence du réseau principal

La méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) favorise une solution économique par l'obtention d'une configuration où la puissance dissipée est minimale. Habituellement, les conduites de grands diamètres sont les conduites principales qui alimentent ensuite le réseau secondaire composé de conduites de plus petits diamètres. D'après l'équation (4.7), la

détermination des chemins les plus courts selon la puissance dissipée désavantage les conduites dans lesquelles transitent les débits les plus élevés qui sont à la fois les conduites de diamètre élevé; la méthode adaptée modifie le poids w_{xy} de la matrice d'adjacence valuée orientée A' (cette matrice considère le sens d'écoulement) suivant l'équation (4.8). La matrice d'adjacence orientée non valuée A'' qui représente le réseau principal est donc modifiée. D'après cette relation, les conduites dans lesquelles transitent des débits élevés sont moins défavorisées lors de la détermination de chemins les plus courts selon le poids w_{xy} entre les nœuds x et y tel que démontré par l'équation (4.9).

$$w_{xy} = \frac{1}{Q_j} * \Delta H_{xy} = \frac{1}{Q_j} * H_f \quad (4.8)$$

où w_{xy} est le poids de la matrice d'adjacence valuée orientée A' (la puissance dissipée [W]), Q le débit [m^3/s] de la conduite j , et ΔH_{xy} est la perte de charge [m] entre les nœuds x et y , laquelle correspond à H_f la perte de charge linéaire [m] calculée par l'équation de Hazen-Williams :

$$w_{xy} = \frac{1}{Q_j} * \left(10,625 * L * \left(\frac{Q_j}{CHW} \right)^{1,852} * \frac{1}{D^{4,87}} \right) = \frac{10,625 * L}{CHW} * \frac{Q_j^{0,852}}{D^{4,87}} \quad (4.9)$$

où 10,625 est un facteur de conversion utilisé pour le système international d'unité (SI), L est la longueur de la conduite [m], CHW est le coefficient de Hazen-Williams, D est le diamètre interne de la conduite [m].

Les conduites principales sont habituellement munies d'un diamètre plus élevé qui engendre une plus faible perte d'énergie, à débit égal. Par conséquent, ces conduites doivent obtenir un faible coût w_{xy} afin qu'elles soient le plus souvent présentes dans la plupart des chemins les plus courts. Comme ces conduites sont généralement celles dans lesquelles les débits les plus importants transitent, leur poids suivant la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) peut tout de même être élevé (en raison du débit) ce qui conduit à la sélection de

conduites où le débit est plus faible et donc dont le diamètre est un peu plus faible aussi. Selon l'équation (4.9), l'exposant associé au débit de la méthode adaptée est de 0,852 (comparativement à la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) où l'exposant est de 2,852). La différence de coût w_{xy} est démontrée au Tableau 4.2 où C représente les caractéristiques physiques invariantes des conduites 2 et 3 du réseau *Anytown, USA* (L et CHW) et le facteur de conversion (10,625) (comme dans le Tableau 4.1).

Tableau 4.2 Différence de coût w_{xy} entre la méthode de sectorisation de DiNardo et DiNatale (2011) et la méthode adaptée

		Méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) $C * \frac{Q^{2,852}}{D^{4,87}}$	Méthode adaptée $C * \frac{Q^{0,852}}{D^{4,87}}$
Conduite 3	Débit = 0,1286 m ³ /s Diamètre = 400 mm	$w_{xy} = C * 0,25$	$w_{xy} = C * 15,1$
Conduite 2	Débit = 0,0715 m ³ /s Diamètre = 300 mm	$w_{xy} = C * 0,19$	$w_{xy} = C * 37,2$

Ainsi, selon la méthode adaptée, le coût w_{xy} des conduites possédant un diamètre élevé est plus faible que le coût des conduites de plus faible diamètre. Par conséquent, les premières conduites devraient être présentes dans la plupart des chemins les plus courts compilés contrairement à la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011). De plus, la modification du coût w_{xy} a pour effet de modifier la représentation hiérarchique du réseau principal puisque les chemins les plus courts obtenus par la méthode adaptée sont différents de ceux obtenus par la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011). Ainsi, les nœuds des RDEP ne se retrouvent plus sur les mêmes niveaux hiérarchiques puisque l'interaction entre ces nœuds est différente (la connectivité est différente); l'utilisateur choisira nécessairement une configuration de secteurs différente de celle obtenue par la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011).

4.2.2 Répartition des consommations par secteur

Tel que mentionné à la section 2.3, il est préférable *apriori* que chaque secteur possède un seul point d'entrée c'est-à-dire qu'une seule conduite lie un secteur à un autre. Le débit circulant dans cette conduite est la somme des consommations de tous les nœuds du secteur. À l'entrée d'un secteur où la consommation totale est importante, le débit circulant dans la conduite d'entrée est élevé ce qui a nécessairement un impact sur les pressions dans le secteur. Il est donc important de répartir les consommations dans chaque secteur. Pour ce faire, il est possible de transformer les consommations imposées aux nœuds en équivalent-habitants (section 4.1.3) en considérant la consommation moyenne journalière par habitant (795 L/personne/jour) (Environnement Canada, 2006). À partir de la schématisation hiérarchique du réseau principal, la méthode adaptée représente, en rouge foncé, les grands consommateurs (plus de 200 habitants dû au regroupement des consommateurs engendré par l'opération « d'optimisation » des RDEP mentionnée à la section 3.2.3) et représente, en blanc, les nœuds sans consommation (voir la représentation hiérarchique du RDEP de VMR à la Figure-A II-2 de l'Annexe II). À noter que la valeur de 200 a été retenue dans le cadre de cette étude mais qu'elle peut être modifiée selon le niveau de détail des réseaux à l'étude. L'ajout de cette nouvelle représentation constitue une règle décisionnelle qui guide l'utilisateur : la sectorisation d'un RDEP s'effectue en distribuant (au possible) les grandes consommations dans chaque secteur afin d'obtenir des consommations par secteur les plus similaires possibles.

4.2.3 Les zones d'influence des sources

Un RDEP maillé possédant une ou plusieurs sources peut alimenter un nœud par plusieurs chemins. Lors de la sectorisation, la configuration du réseau varie, ce qui a pour effet de changer les chemins d'alimentation des nœuds. Toutefois, la méthode adaptée propose que la même source alimente majoritairement un nœud avant et après l'implantation des secteurs. Par conséquent, la perturbation hydraulique est moins importante.

Le logiciel aquaGEO permet d'identifier les zones d'influence de chaque source. Ce calcul détermine la contribution de chaque source à un nœud donné par l'évaluation des débits incidents pour ce nœud, tel que le montrent la Figure 4.7 et le Tableau 4.3. Sur la Figure 4.7, les chiffres en rouge correspondent aux consommations aux nœuds [m^3/s] et les chiffres en bleu sont les débits [m^3/s] circulant dans les conduites. La contribution de chacune des deux sources (réservoirs) à l'alimentation des nœuds est illustrée, proportionnellement, à l'aide des couleurs rose (source 1) et verte (source 2). La méthode détaillée de calcul des zones d'influence peut être retracée dans les travaux de Byoung et al. (1992) et est illustrée au Tableau 4.3.

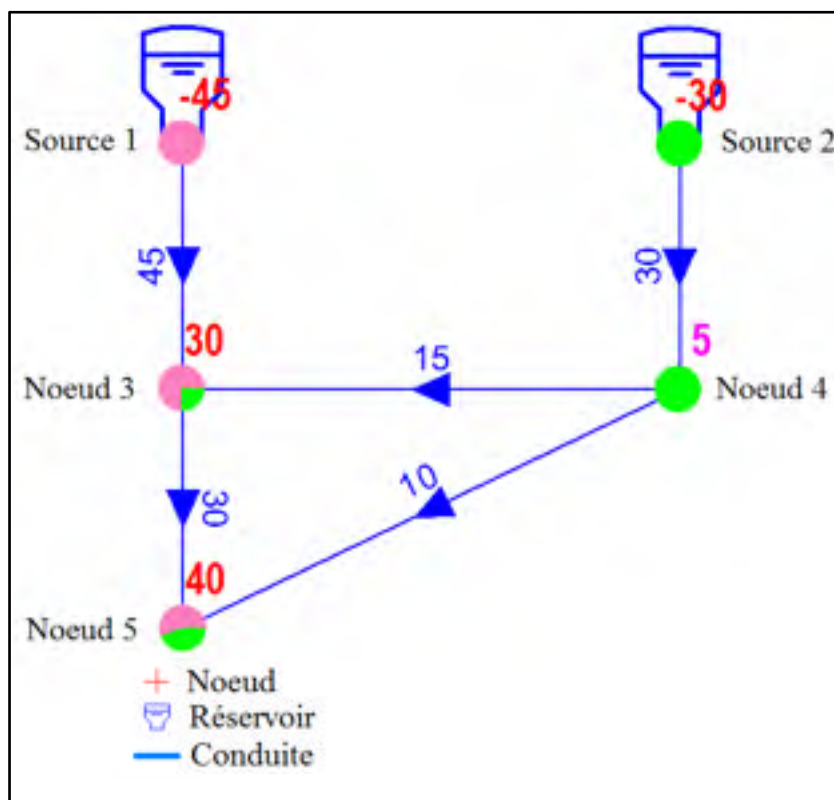


Figure 4.7 Exemple de schématisation des zones d'influence

Tableau 4.3 Résultats du calcul des zones d'influence des sources 1 et 2 de la Figure 4.7

Noeud	Contribution : source 1	Contribution : source 2
Source 1	100% (45 m ³ /s)	0%
Source 2	0%	100% (30 m ³ /s)
Noeud 3	75% (45 m ³ /s / 60 m ³ /s)	25% (15 m ³ /s / 60 m ³ /s)
Noeud 4	0	100% (30 m ³ /s / 30 m ³ /s)
Noeud 5	56% (75% * 30m ³ /s / 40 m ³ /s)	44% (100% * 10m ³ /s / 40m ³ /s + 25% * 30m ³ /s / 40m ³ /s)

Une fois les contributions de toutes les sources déterminées pour chaque nœud du réseau, seule la source qui alimente majoritairement le nœud est considérée. Au sein de la représentation hiérarchique du réseau principal, les couleurs des nœuds sont modifiées pour être de la même couleur que la source qui les alimente majoritairement (voir la représentation hiérarchique du RDEP de VMR à la Figure-A II-2 de l'Annexe II). Ainsi, l'utilisateur doit effectuer un choix décisionnel lors de la sectorisation initiale : dissocier le moins de nœuds possible de la source principale qui les alimente avant la sectorisation. Dans la situation où la zone d'influence est trop importante pour contenir un seul secteur, le fractionnement de la zone d'influence de la source en plusieurs secteurs est effectué. Les secteurs regroupent préférentiellement des nœuds influencés par la même source.

4.2.4 Calcul des fréquences

Les conduites de fréquences nulles selon l'équation (4.4) sont ignorées dans la représentation graphique hiérarchique du réseau principal et les frontières des secteurs se définissent par la fermeture des conduites de faibles fréquences. D'après la méthode adaptée, les fréquences

des conduites sont inscrites sur la représentation hiérarchique du réseau principal de façon à mieux guider l'utilisateur dans l'identification des frontières des secteurs.

De plus, la conduite ayant la fréquence la plus élevée qui lie un nœud alimenté majoritairement par une source à un nœud alimenté majoritairement par une autre source est identifiée sur la représentation hiérarchique (conduite en rouge; voir la Figure-A II-2 et la Figure-A II-4 de l'Annexe II). L'ajout de cette nouvelle représentation constitue une règle décisionnelle qui guide l'utilisateur : dans l'éventualité où un secteur alimente un autre secteur, le point d'entrée à privilégier est cette conduite.

4.2.5 Indices de performance des RDEP

La méthode de définition des frontières des secteurs repose sur une représentation graphique qui vise à guider l'utilisateur vers une solution hydrauliquement performante à l'intérieur des limites imposées par la sectorisation. Toutefois, la méthode adaptée doit considérer des indices de performance afin de vérifier et de quantifier la viabilité hydraulique des solutions obtenues. L'évaluation des charges hydrauliques minimale, maximale et moyenne par secteur identifie les variations excessives à l'intérieur d'un même secteur. Une variation importante entre ces trois données indique soient une différence d'élévation ou une différence de pression importantes. Les valeurs des pressions minimale et maximale déterminent le(s) nœud(s) critique(s) d'un secteur, conformément aux valeurs indiquées à la section 2.5.1 (140 et 760 kPa, respectivement). Les indices considérés dans ce mémoire sont décrits de l'équation (4.10) à l'équation (4.16) ci-après. Pour une description de chacun de ces indices, le lecteur peut consulter la section 2.5 de la revue de littérature.

$$\text{Indice}_{\text{hauteur piézométrique excédentaire (de l'auteur de ce mémoire)}} \quad (4.10)$$

$$= \sum_{n=1}^{n_n} H_n - H_c$$

où n_n est le nombre de nœuds total du réseau, H est la hauteur piézométrique [m] du nœud n et H_c est la hauteur piézométrique minimale de conception [m] (dans le cas présent, élévation du nœud + 140 kPa).

$$Indice_{puissance\ dissipée} (Di\ Nardo\ et\ Di\ Natale, 2011) = \sum_{n=1}^{n_c} \rho Q_c g \Delta H_c \quad (4.11)$$

où n_c est le nombre de conduites total dans le réseau, ρ est la masse volumique de l'eau [kg m⁻³], Q_c est le débit [m³ s⁻¹] dans la conduite c , g est l'accélération gravitationnelle [m s⁻²] et ΔH_c est la perte de charge [m] dans la conduite c .

$$Indice_{maillage} (Buhl\ et\ al., 2006) = \frac{m - n + 1}{2n - 5} \quad (4.12)$$

où m est le nombre de conduites et n le nombre de nœuds d'un réseau.

$$Indice_{vulnérabilité} (Todini, 2000) = \frac{\sum_{j=1}^N Q_j * (ha_j - hr_j)}{\sum_{r=1}^R Q_r H_r - \sum_{j=1}^N Q_j hr_j} \quad (4.13)$$

où Q_j est la consommation [m³ s⁻¹] au nœud j , N est le nombre total de nœuds, ha_j et hr_j sont respectivement les charges hydrauliques disponible et requise (cette charge hydraulique correspond habituellement à l'énergie de pression minimale d'opération + élévation du noeud) [m] au nœud j , R est le nombre de réservoirs, Q_r et H_r sont le débit de décharge [m³ s⁻¹] et la charge hydraulique [m] du réservoir r .

$$Indice_{vulnérabilité} (Prasad\ et\ Park, 2003) = \frac{\sum_{j=1}^N c_j * Q_j * (ha_j - hr_j)}{\sum_{r=1}^R Q_r H_r - \sum_{j=1}^N Q_j hr_j} \quad (4.14)$$

où c_j est défini à l'équation (4.15) :

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^p D_{ij}}{p * \max(D_{ij})} \quad (4.15)$$

où D_{ij} est le diamètre de chaque conduite délimitée par les nœuds i et j et qui est incidente au nœud j [m], et p est le nombre total de conduites incidentes du nœud j .

DiNardo et DiNatale (2011) mentionnent la corrélation directe entre le nombre de conduites fermées et le nombre de diamètre disponible (section 4.1.1). Ainsi, il est pertinent de déterminer le diamètre total disponible pour l'écoulement de l'eau dans les conduites. Un faible indice représente la presque totalité de la fermeture des conduites tandis qu'un indice élevé indique la fermeture d'un faible nombre de conduites.

$$Indice_{diamètre\ disponible\ (Di\ Nardo\ et\ Di\ Natale, 2011)} = K * \sum_{c=1}^{n_c} D_c \quad (4.16)$$

où K est une constante qui prend la valeur de 1 si la conduite c est disponible et 0 si la conduite c est fermée, n_c est le nombre total de conduites du réseau et D_c est le diamètre [mm] de la conduite c .

4.2.6 La protection contre les incendies

Conformément aux critères de conception des RDEP québécois (Ministère de l'Environnement, 1984), l'évaluation de la protection contre les incendies repose sur le scénario de la consommation journalière maximale additionnée au débit incendie en considérant chacune des BI individuellement. Ainsi, le nombre de simulations hydrauliques requises correspond au nombre de BI présentes sur le réseau. Ces simulations consistent à imposer un débit incendie à une BI et évaluer les pressions résiduelles aux nœuds; la valeur de la consommation imposée dépend des besoins des bâtiments à proximité de la BI. Pour les réseaux à l'étude, une valeur typique et à titre de comparaison seulement de 455 m³/heure est choisie. Toutefois, ce débit ne représente pas la valeur réelle des débits requis pour chaque BI des RDEP étudiés (*Christine Ouimet*, septembre 2014, communication personnelle) tandis

que la pression résiduelle minimale est fixée à 140 kPa (Ministère de l'Environnement, 1984).

La performance de la protection contre les incendies (équation (4.17)) s'évalue selon le débit que le réseau est en mesure de fournir à la BI tout en maintenant une pression résiduelle de 140 kPa (Q_{140kPa}). Ensuite, ce débit est divisé par le débit requis pour assurer la protection contre les incendies ($Q_{requis} = 455 \text{ m}^3/\text{h}$). Le ratio obtenu est classifié suivant les cotes indiquées au Tableau 4.4.

$$ratio (\%) = \frac{Q_{140kPa}}{Q_{requis}} \quad (4.17)$$

Tableau 4.4 Indicateurs de la capacité des bornes d'incendie à fournir le débit requis pour la protection contre les incendies
Tiré de MAMOT (2013a)

Statut	Cote	Protection contre l'incendie État actuel (Q_{140kPa} / Q_{requis})
Excellent	1	Plus de 100 %
Bon	2	>80 % et 100 %
Moyen	3	>70 % et 80 %
Mauvais	4	≥ 50 % et 70 %
Très mauvais	5	Moins de 50 %

L'évaluation de la protection contre les incendies est effectuée en comparant le réseau initial et le réseau sectorisé. Le réseau initial n'assure pas nécessairement la protection contre les incendies à toutes les BI et, par conséquent, le réseau sectorisé ne pourra normalement pas améliorer la situation puisqu'il est connu que la sectorisation dégrade les conditions hydrauliques du réseau. Ainsi, la variation de cette performance est évaluée en tenant compte de la performance du réseau initial. La méthode de sectorisation adaptée dans le cadre de ce

mémoire prévoit l'insertion d'un (ou plusieurs) point(s) d'entrée supplémentaire(s) dans l'éventualité d'une dégradation trop importante pour les secteurs problématiques (secteurs dont les capacités des BI sont inférieures à 70% ; Tableau 4.4). La conduite à la frontière du secteur problématique qui possède la fréquence la plus élevée (équation (4.4)) correspond au point d'entrée supplémentaire. Par la suite, une simulation hydraulique du réseau sectorisé possédant un ou plusieurs points d'entrée supplémentaires est exécutée suivie de la compilation, à nouveau, des indices de performance et de la capacité de protection contre les incendies (Figure 3.1, étape 4). Ce processus se termine lorsque les indices de performance et la performance de la protection contre les incendies sont supérieurs au seuil déterminé par l'utilisateur. Une dégradation convenable de la performance de la protection contre les incendies consiste à obtenir une faible augmentation des pourcentages des BI possédant des cotes qualifiées de « mauvaises » ou « très mauvaises ». L'analyse des BI ayant ces cotes peut être évaluée selon l'occupation du territoire à proximité. Par exemple, une BI possédant une capacité de 50% qui est à proximité d'un faible nombre de bâtiments résidentiels peut tout de même assurer la protection contre les incendies contrairement à cette même BI qui assurerait la protection contre les incendies de plusieurs bâtiments commerciaux de grande superficie (Brière, 2012).

Ainsi, le scénario de protection contre les incendies (consommation maximale + débit requis pour assurer la protection) n'est pas directement considéré dans l'élaboration des frontières des secteurs mais vérifié suite à l'obtention de la configuration des secteurs. À titre de rappel, il est à noter que, tout comme pour la méthode de DiNardo et DiNatale (2011), la définition des frontières repose, pour sa part, sur le scénario de consommation horaire maximale.

4.3 Validation de la méthode

La méthode adaptée est appliquée au RDEP *Anytown, USA* afin de valider, dans un premier temps, les changements apportés et décrits aux sections 4.2.1 à 4.2.5. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode adaptée avant l'évaluation de la protection contre les incendies sont comparés avec ceux que produit la méthode de DiNardo et DiNatale (2011). Tel que le

montre la Figure 4.8, les frontières des secteurs sont différentes (comparativement à la Figure 4.3) étant donné que les représentations hiérarchiques sont différentes et que, par conséquent, l'utilisateur est dirigé vers d'autres solutions. La compilation des pressions à chaque nœud du réseau sectorisé est également effectuée dans le cadre de cet exercice de validation.

Sur la Figure 4.8, les conduites en rouge représentent des conduites d'entrée des secteurs. Ainsi, la conduite 2 d'un diamètre de 300 millimètres est le point d'entrée du secteur 2 tandis que la conduite 3 de 400 millimètres de diamètre est le point d'entrée du secteur 3. Les pressions aux nœuds sont supérieures à la pression minimale requise (140 kPa) en tout point du réseau. Selon la définition des secteurs, l'une des conduites d'entrée possédant un diamètre de 300 millimètres (conduite 1) est fermée. La répartition des consommations et la représentation hiérarchique de la méthode adaptée font en sorte que le débit le plus important transite par la conduite 3 (400 millimètres) ce qui engendre une perte d'énergie plus adéquate, comparativement à la solution indiquée à la Figure 4.3 (secteurs et points d'entrée ou conduites en rouge). De plus, la méthode adaptée considère la fermeture de 17% des conduites (six conduites) ce qui représente tout de même un pourcentage de fermeture de conduites élevé mais inférieur à ce qui était indiqué à la Figure 4.3 (secteurs et points d'entrée en rouge) où 10 conduites devaient être fermées. Ainsi, la méthode adaptée permet d'obtenir des résultats viables hydrauliquement parlant sans nécessiter, à ce stade, l'ouverture de points d'entrée supplémentaires (conduites qui étaient représentées en vert sur la Figure 4.3).

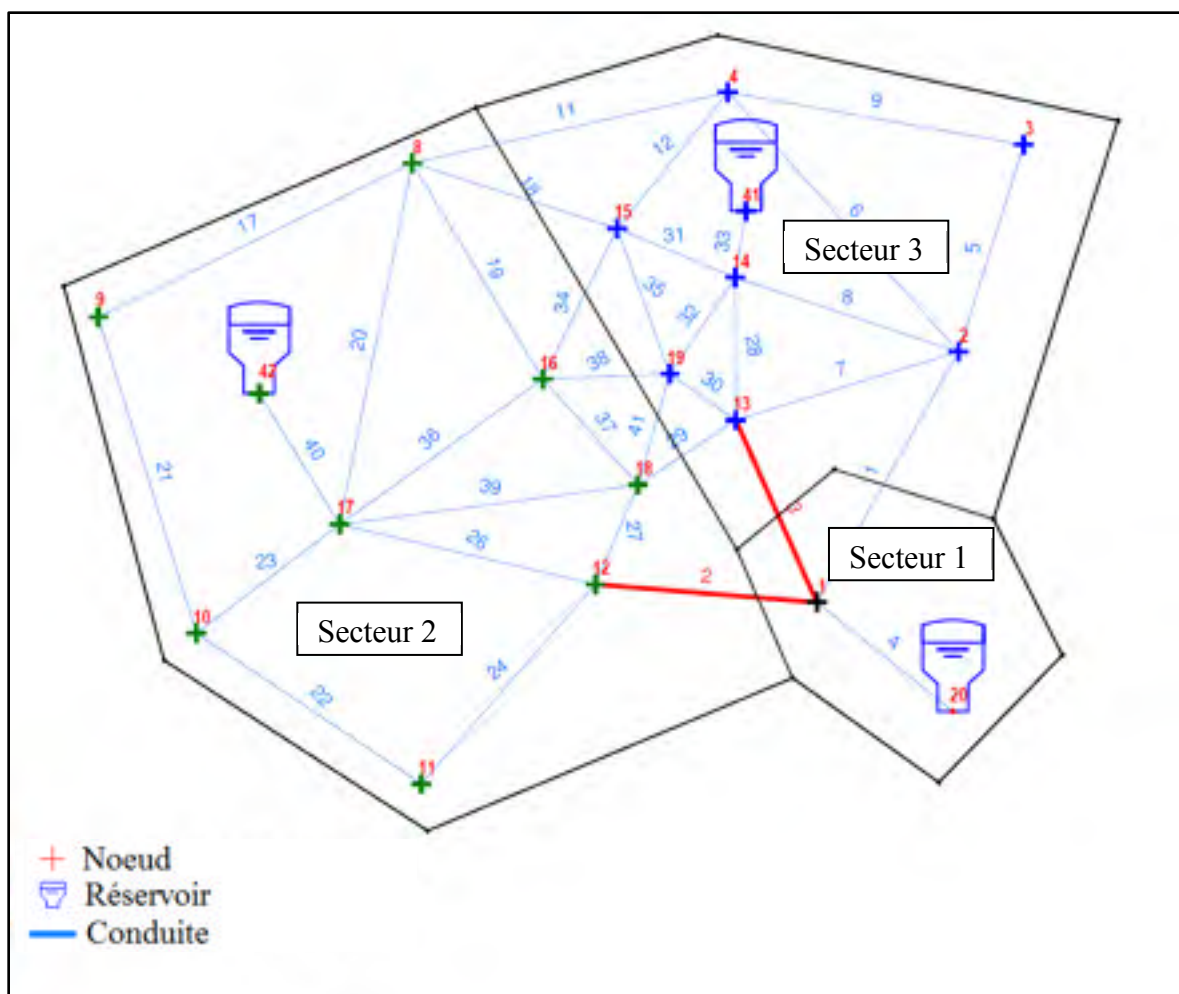


Figure 4.8 Sectorisation initiale du réseau *Anytown, USA* selon la méthode adaptée

4.4 Application de la méthode adaptée aux réseaux d'étude

Cette section présente, pour chacun des RDEP québécois à l'étude, les résultats obtenus suite à l'application de la méthode de sectorisation adaptée, soient les frontières des secteurs, les indices de performance et la performance de la protection contre les incendies.

4.4.1 Réseau de Ville-Mont-Royal

La sectorisation initiale du RDEP de VMR, présentée à la Figure 4.9, entraîne la fermeture de près de 5% des conduites (25 conduites fermées). Le réseau est divisé en deux grands

secteurs indépendants soient les regroupements des secteurs 1 et 2 et des secteurs 3 et 4. Comme pour les figures précédentes, les conduites aux frontières (conduites fermées) sont celles qui croisent la délimitation des secteurs (ligne noire). Les nœuds de même couleur appartiennent aux mêmes secteurs tandis que les conduites en rouge représentent les points d'entrée des secteurs et les conduites en vert sont les points d'entrée supplémentaires, identifiés suite à l'analyse de la protection contre les incendies (Tableau 4.6).

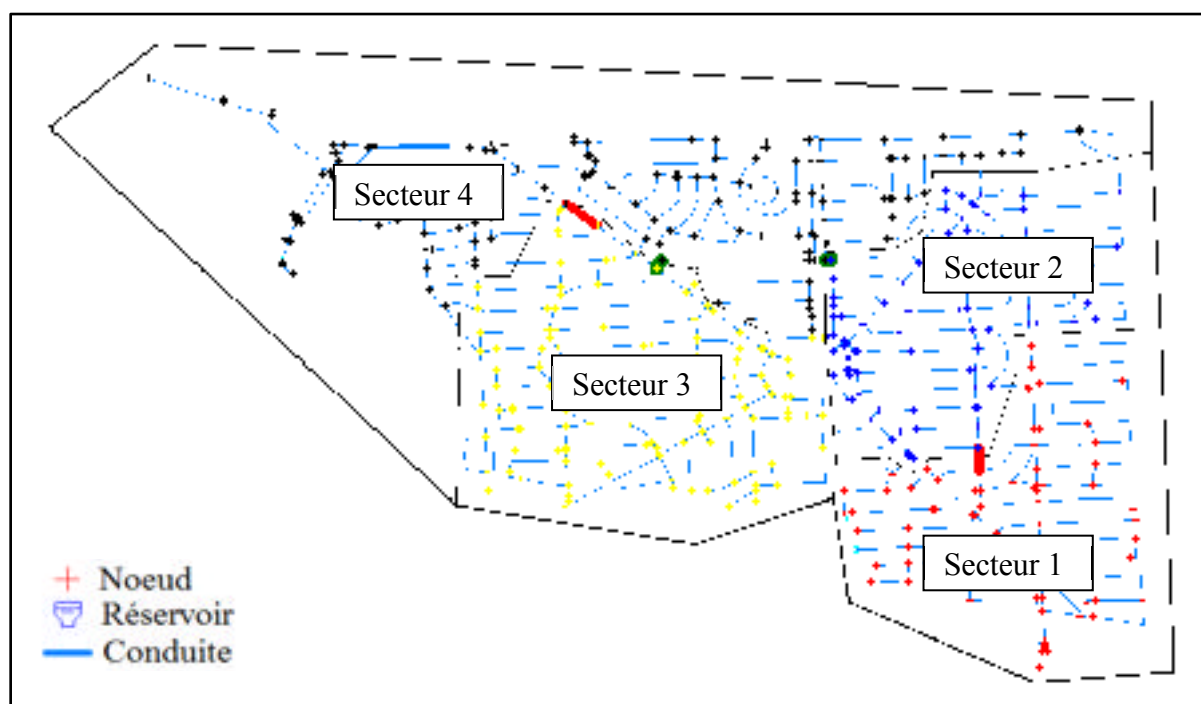


Figure 4.9 RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée

Le réseau sectorisé présente des pressions supérieures à la pression minimale requise. Le nœud critique du RDEP se situe dans le secteur 3 et possède une pression de 260 kPa. Le secteur 4 est celui dont les pressions sont les plus élevées. La pression moyenne est de 517 kPa tandis que la pression maximale est de 614 kPa mais ces deux valeurs demeurent inférieures à la pression maximale de conception de 760 kPa. Les secteurs 2 et 3 ne possèdent pas de sources mais chacun d'eux est alimenté par un seul point d'entrée de 300 millimètres de diamètre. Les indices de performance comptabilisés sont présentés au Tableau 4.5. Dans ce tableau, les valeurs indiquées aux six premières lignes s'appliquent au réseau

entier alors que les valeurs suivantes (sept autres lignes) sont indiqués par secteur. Les valeurs indiquées aux sept dernières lignes représentent les résultats des secteurs déterminés sans avoir fermé les conduites aux frontières. Il est donc possible de déterminer une dégradation de la performance du RDEP en comparant les valeurs par secteur des RDEP initial et sectorisé.

Les indices de performance du réseau sectorisé ont subi une perturbation par rapport au réseau initial (non sectorisé) : le réseau sectorisé peut tout de même opérer dans ces conditions hydrauliques. Toutefois, la configuration du réseau entraîne une dégradation importante de la protection contre les incendies, tel que le montre la quatrième colonne du Tableau 4.6 par rapport au réseau non sectorisé (troisième colonne du Tableau 4.6). Ainsi, des points d'entrée supplémentaires (conduites en vert sur la Figure 4.9) sont insérés aux secteurs 2 et 3 qui présentent une importante détérioration. Ces conduites sont sélectionnées puisqu'elles possèdent les fréquences (équation (4.4)) les plus élevées des conduites présentes sur la frontière. Ces conduites sont les celles qui possèdent des caractéristiques hydrauliquement favorables (diamètre et coefficient de Hazen-Williams). Les résultats ainsi obtenus, en matière de protection contre les incendies, sont montrés dans la cinquième colonne du Tableau 4.6.

Les indices de performance sont calculés de nouveau (Tableau 4.7). La performance du réseau est supérieure puisque l'ajout d'un point d'entrée pour un secteur permet d'obtenir une meilleure performance à l'intérieur de ce secteur. Cette configuration est retenue puisque les indices de performance sont convenables (voir section 6.1.3). Toutefois, une faible dégradation de la performance de la protection contre les incendies est constatée par une augmentation des BI possédant une capacité inférieure à 70% : cette dégradation (10 % des BI du RDEP sectorisé comparativement à 4 % pour le RDEP initial) peut être jugée tout de même acceptable si la sectorisation est temporaire (*Christine Ouimet* avril 2014, communication personnelle). Cette dégradation est surtout observée aux BI qui sont en fin de réseau ou aux limites des secteurs puisque les chemins entre les sources et ces BI sont longs (succession de plusieurs conduites qui entraîne une baisse de pression importante). La

Figure-A IV-1 et la Figure-A IV-2 de l'Annexe IV montrent la répartition sur le réseau des cotes de la protection contre les incendies avant et après la sectorisation en considérant l'insertion de points d'entrée supplémentaires.

Tableau 4.5 Indices de performance du RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée, avant de considérer la protection contre les incendies

	Réseau sectorisé	/	Réseau initial	
Indice diamètre disponible	125383	/	131283 mm	
Indice hauteur piézométrique excédentaire	12041	/	14272 m	
Indice maillage	0,18	/	0,19	
Indice puissance dissipée	70012	/	46661 W	
Indice résilience développé par (Prasad et Park, 2003)	0,68	/	0,72	
Indice resilience développé par (Todini, 2000)	0,73	/	0,77	
Réseau sectorisé				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	93	80	77	85
Charge hyraulique maximale (m)	105	90	84	103
Charge hydraulique moyenne (m)	98	85	78	95
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	387	340	260	429
Pression maximale (kPa)	474	416	423	614
Pression moyenne (kPa)	435	375	309	517
Élévation moy (m)	54	47	46	42
nombre d'habitants par secteur	4514	7078	6821	12316
Réseau initial				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	93	80	77	85
Charge hyraulique maximale (m)	105	90	84	103
Charge hydraulique moyenne (m)	98	85	78	95
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	400	421	396	434
Pression maximale (kPa)	476	494	515	614
Pression moyenne (kPa)	441	453	443	504
nombre d'habitants total	30729			

Les valeurs indiquées dans le Tableau 4.5 montrent que le RDEP de VMR alimente 31 000 équivalent-habitants comparativement aux 20 000 habitants (résidents) mentionnés à la

section 3.2.3. Cette différence de 11 000 habitants correspond à la transposition des consommations des entreprises (500 entreprises) en équivalent habitants (section 4.2.2). Malgré la répartition des consommateurs dans chaque secteur, il existe un écart important entre le nombre d'habitants des secteurs (par exemple, la différence entre le secteur 1 et le secteur 4). La présence d'un secteur industriel dans le secteur 4 est à noter, ce qui augmente considérablement le nombre d'équivalent-habitants. Toutefois, le secteur 4 n'est pas alimenté par un autre secteur ce qui fait en sorte qu'une perte d'énergie due à un débit important transitant dans une conduite d'entrée ne se produit pas.

Tableau 4.6 Performance de la protection contre les incendies du RDEP de VMR

	% Capacité	RDEP initial	RDEP sectorisé 1 point d'entrée (méthode adaptée)	RDEP sectorisé points d'entrée supplémentaires (méthode adaptée)
excellent	Plus de 100 %	87%	35%	67%
bon	>80 % et 100 %	7%	11%	16%
moyen	>70 % et 80 %	1%	10%	7%
mauvais	≥50 % et 70 %	3%	34%	7%
très mauvais	Moins de 50 %	1%	10%	3%

Tableau 4.7 Indices de performance du RDEP sectorisé de VMR selon la méthode adaptée en considérant la protection contre les incendies

Réseau sectorisé /		Réseau initial	
Indice diamètre disponible	125983 /	131283 mm	
Indice hauteur piézométrique excédentaire	13347 /	14272 m	
Indice maillage	0,18 /	0,19	
Indice puissance dissipée	56991 /	46661 W	
Indice résilience développé par (Prasad et Park, 2003)	0,70 /	0,72	
Indice resilience développé par (Todini, 2000)	0,75 /	0,77	

Réseau sectorisé				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	95	85	86	89
Charge hyraulique maximale (m)	105	93	90	103
Charge hydraulique moyenne (m)	99	89	87	93
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	406	385	350	413
Pression maximale (kPa)	477	461	485	614
Pression moyenne (kPa)	448	418	399	496
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Élévation moy (m)	54	47	46	42
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
nombre d'habitants par secteur	4514	7078	6821	12316

Réseau initial				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	93	80	77	85
Charge hyraulique maximale (m)	105	90	84	103
Charge hydraulique moyenne (m)	98	85	78	95
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	400	421	396	434
Pression maximale (kPa)	476	494	515	614
Pression moyenne (kPa)	441	453	443	504
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
nombre d'habitants total	30729			

4.4.2 Réseau d'Aylmer

La sectorisation initiale du RDEP d'Aylmer, présentée à la Figure 4.10, entraîne la fermeture de près de 4% des conduites (34 conduites fermées). Le réseau est divisé en deux secteurs indépendants : une source alimente les secteurs 3 et 4 tandis qu'une autre source alimente les secteurs 1 et 2. Sur la Figure 4.10, les nœuds de même couleur appartiennent aux mêmes secteurs tandis que les conduites en rouge représentent les points d'entrée des secteurs. Le nœud critique du réseau, possédant une pression de 171 kPa, se retrouve dans le secteur 2. Des écarts importants entre la pression minimale et la pression maximale sont observés dans la plupart des secteurs (secteurs 1, 2 et 4). Les secteurs 2 et 3 sont exclusivement alimentés par un seul point d'entrée soit une conduite de 400 millimètres. Toutefois, la protection contre les incendies de cette configuration (où un seul point d'entrée par secteur est déterminé) est perturbée de façon importante (Tableau 4.9, quatrième colonne). C'est pourquoi une conduite d'entrée, illustrée en vert à la Figure 4.10, est ajoutée au secteur 2.

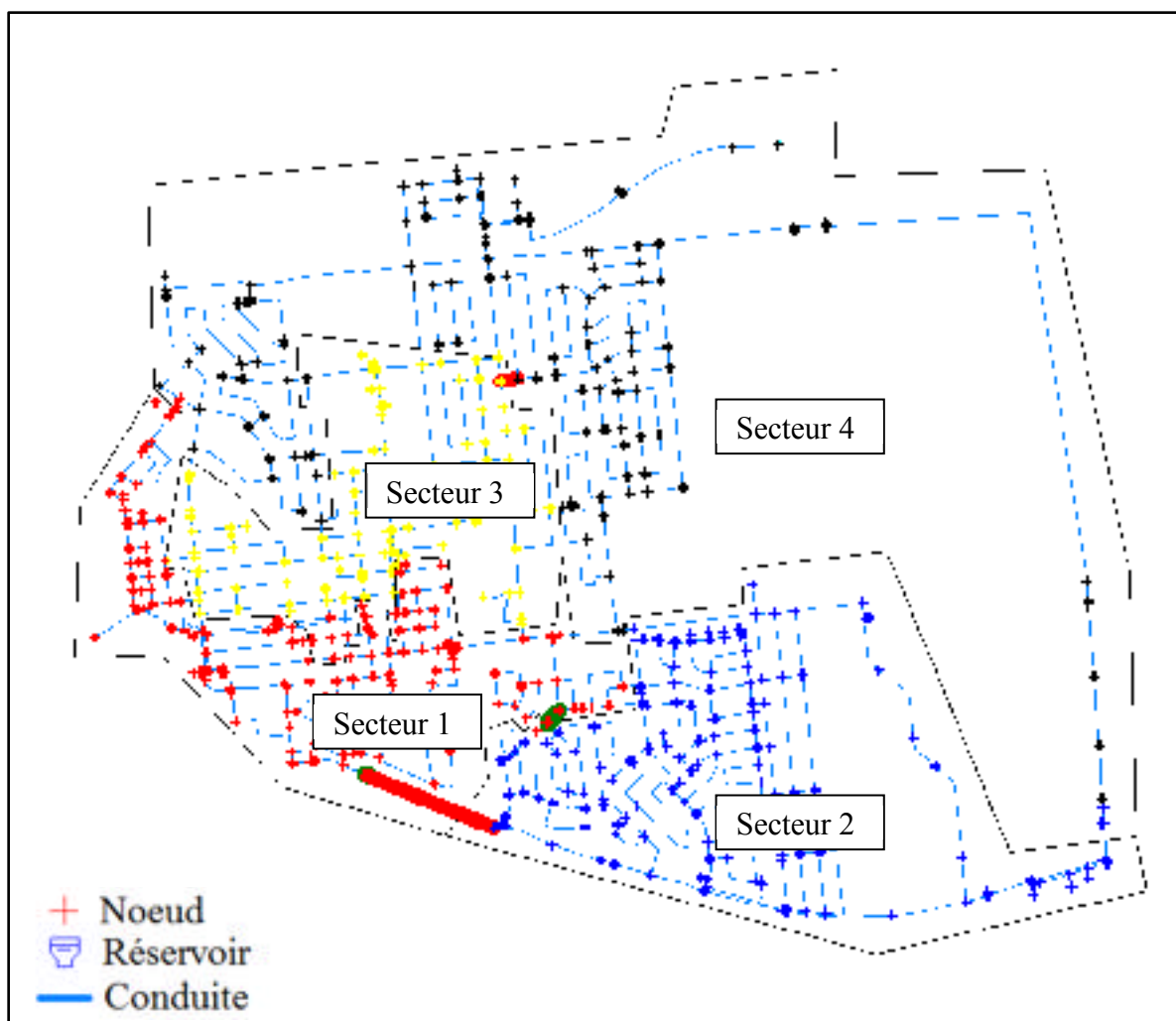


Figure 4.10 RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode adaptée

Les indices de performance du réseau sectorisé, en effectuant une itération suite à l'ajout de la conduite d'entrée supplémentaire au secteur 2, sont présentés au Tableau 4.8 en comparaison avec les indices de performance du réseau initial.

Tableau 4.8 Indices de performance du RDEP sectorisé d'Aylmer selon la méthode adaptée

Réseau sectorisé / Réseau initial				
Indice diamètre disponible	183512 /		188412 mm	
Indice hauteur piézométrique excédentaire	14241 /		13964 m	
Indice maillage	0,12 /		0,13	
Indice puissance dissipée	65057 /		71827 W	
Indice résilience développé par (Prasad et Park, 2003)	0,60 /		0,59	
Indice resilience développé par (Todini, 2000)	0,72 /		0,70	
Réseau sectorisé				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	109	98	115	112
Charge hyraulique maximale (m)	110	109	131	167
Charge hydraulique moyenne (m)	109	107	125	134
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	209	171	276	236
Pression maximale (kPa)	483	439	481	586
Pression moyenne (kPa)	356	317	368	339
Élévation moy (m)	73	75	88	99
nombre d'habitants par secteur	7516	8806	6794	13036
Réseau initial				
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Charge hydraulique minimale (m)	107	99	107	107
Charge hyraulique maximale (m)	132	151	136	167
Charge hydraulique moyenne (m)	111	111	121	129
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Pression minimale (kPa)	189	179	207	182
Pression maximale (kPa)	480	480	458	586
Pression moyenne (kPa)	355	329	340	336
nombre d'habitants total	36152			

Il est à noter que le secteur 4 comprend plus d'habitants que le nombre maximal (12 500 habitants) indiqué par Butler (2000). Ceci s'explique par une concentration des grands consommateurs qui y sont regroupés. Ainsi, selon la sectorisation effectuée à partir de la représentation hiérarchique (Figure-A II-4), ces grands consommateurs peuvent difficilement

être séparés (cet aspect est abordé plus en détails à la section 6.1.3). Les résultats de l'évaluation de la performance de la protection contre les incendies, avant cette sectorisation, sont présentés au Tableau 4.9 (colonne 3). La performance obtenue est jugée faible : 20% des nœuds possèdent une cote qualifiée de «mauvaise» ou «très mauvaise». Les BI du RDEP initial (avant sectorisation) qui possèdent des cotes mauvaise ou très mauvaise sont réparties sur l'ensemble du réseau (voir la Figure-A IV-3 et la Figure-A IV-4 de l'Annexe IV).

Tableau 4.9 Performance de la sécurité contre les incendies du RDEP d'Aylmer

	% Capacité	RDEP initial	RDEP sectorisé 1 point d'entrée (méthode adaptée)	RDEP sectorisé points d'entrée supplémentaires (méthode adaptée)
excellent	Plus de 100 %	57%	40%	47%
bon	>80 % et 100 %	19%	20%	16%
moyen	>70 % et 80 %	5%	3%	5%
mauvais	≥50 % et 70 %	9%	16%	18%
très mauvais	Moins de 50 %	11%	21%	14%

Suite à la sectorisation du réseau, une dégradation de la performance de la sécurité contre les incendies est observée telle que présentée dans la colonne 4 du Tableau 4.9. En considérant un seul point d'entrée par secteur, près de 37% des BI ont une capacité inférieure à 70%. Toutefois, l'ajout de deux points d'entrée supplémentaires au secteur 2 (secteur le plus problématique) entraîne une amélioration de la performance de la protection contre les incendies. Les secteurs 1 et 3 représentent des secteurs problématiques puisque plusieurs BI possèdent une faible capacité. Toutefois, celles-ci possèdent des faibles cotes (« mauvais » ou « très mauvais ») avant même la mise en place des secteurs. Une augmentation de 3% des BI (c'est-à-dire 4 BI) possédant une capacité inférieure à 50% est observée par rapport au réseau non sectorisé. De plus, l'ajout de points d'entrée supplémentaires aux secteurs problématiques (faible protection contre les incendies) n'améliore pas de façon significative la capacité des BI. Une analyse plus approfondie des indices de performance du RDEP d'Aylmer et de la protection contre les incendies est présentée à la section 6.1.5.

CHAPITRE 5

SECTORISATION FINALE D'UN RDEP

La sectorisation initiale identifie les conduites qui doivent être fermées pour former les secteurs, toutefois ces conduites ne sont pas toutes munies de vannes d'isolement. La sectorisation finale s'intéresse donc à identifier l'ensemble des vannes d'isolement à fermer pour la création des secteurs finaux. L'identification de cet ensemble de vannes est posée sous la forme d'un problème d'optimisation, lequel est résolu par l'utilisation de l'AG qui sera plus précisément décrit.

5.1 Description du problème de la sectorisation finale

Les conduites aux frontières déterminées par la méthode de sectorisation initiale adaptée (Chapitre 4) ne possèdent pas nécessairement toutes des vannes d'isolement. Afin de conserver les mêmes secteurs, l'introduction de vannes d'isolement sur les conduites du RDEP s'avère possible mais requiert un investissement monétaire supplémentaire lors de la mise en place des secteurs de réseaux. L'identification d'un ensemble de vannes disponibles et opérables, à fermer pour délimiter les secteurs, est l'avenue qui est examinée dans ce mémoire pour les réseaux de VMR et d'Aylmer. Dans un premier temps, l'ensemble des vannes disponibles sur chacun de ces réseaux est considéré. Ensuite, le nombre de vannes près des frontières des secteurs est volontairement diminué (les vannes sont « retirées » du modèle du réseau dans aquaGEO) afin de simuler la présence des vannes d'isolement qui seraient inopérables. Certaines vannes d'isolement ne peuvent être opérées lorsque, par exemple, leur mécanisme d'ouverture et de fermeture est défectueux ou encore lorsque ces dernières ne sont plus accessibles en raison de réaménagements (pavage routier ou trottoir, par exemple). De plus, une vanne restant dans une position (ouverte ou fermée) pour une longue période de temps peut s'avérer inopérable (les vannes devraient être manipulées au moins une fois par année) Ysusi (1999).

Les secteurs initiaux (méthode adaptée, Chapitre 4) candidats à la sectorisation finale sont formés à partir de critères hydrauliques et liés à la protection contre les incendies, notamment, c'est pourquoi la définition des secteurs finaux repose en premier lieu sur une déformation minimale de ces secteurs initiaux. Le processus d'optimisation déforme les secteurs initiaux en procédant de la manière générale suivante, pour chaque frontière ou ensemble de conduites liant deux secteurs voisins :

- Chaque fois qu'une conduite sans vanne est identifiée, une alternative (autre(s) vanne(s) à fermer) est recherchée;
- Les conduites (ou vannes, Annexe VI) candidates sont identifiées à partir de la sélection d'un ensemble de nœuds se trouvant de part et d'autre de la frontière : une conduite sans vanne est toujours délimitée par deux nœuds tel que présenté à l'Annexe VI; à partir de chacun de ces nœuds, tous les nœuds se trouvant à une distance de trois nœuds par tous les chemins possibles (sans tenir compte des sens d'écoulement) sont considérés dans le problème d'optimisation. La Figure 5.1 représente un exemple des nœuds considérés à une distance de trois (nœuds de même couleur – bleus et noirs) des conduites aux frontières sans vannes d'isolement (conduites en magenta).

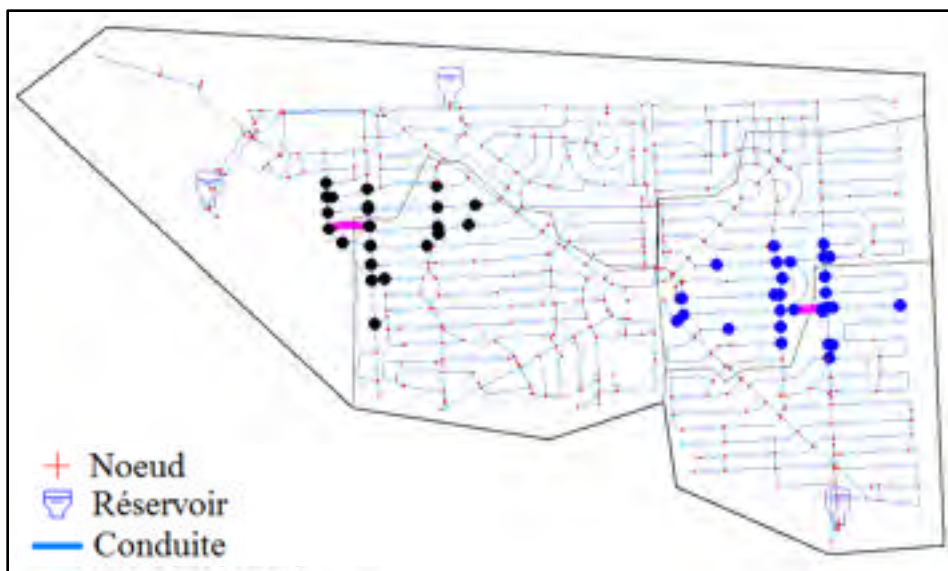


Figure 5.1 Exemple des nœuds (en bleu et en noir) se trouvant à une distance de trois nœuds de part et d'autre de conduites (en magenta) sans vanne d'isolement

Le choix méthodologique de tenir compte de ces nœuds (distance de trois nœuds) représente un juste équilibre entre le nombre de solutions et le nombre de vannes considérées à proximité des frontières. Ainsi, à partir de ces nœuds, il est probable d'obtenir un nombre suffisant de vannes d'isolement pour former les secteurs. De plus, en restreignant le nombre de nœuds considérés, la déformation des secteurs initiaux demeure faible.

- Lorsque toutes les conduites sans vanne d'une même frontière ont été évaluées, une autre frontière est considérée; l'optimisation débute par la frontière qui possède le plus de conduites sans vannes d'isolement puisque la modification de la configuration d'une frontière peut influencer la configuration d'une autre frontière (lorsqu'une conduite est à proximité de deux frontières); dès l'instant qu'une frontière est modifiée, ce changement est permanent et la frontière en question ne peut plus être modifiée (en cours de résolution).

5.1.1 Présentation du problème d'optimisation pour l'identification des vannes aux frontières des secteurs

Les variables indépendantes du problème d'optimisation sont les nœuds considérés (distance de trois nœuds de part et d'autre de conduites aux frontières sans vannes) et la solution prend la forme vectorielle suivante (Figure 5.2):

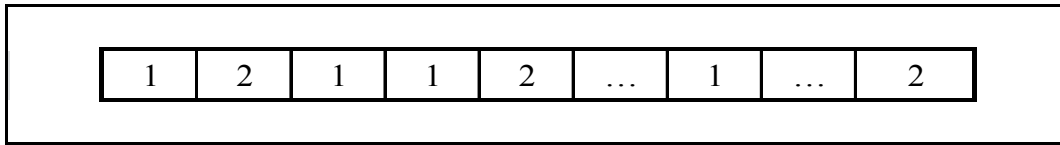


Figure 5.2 Représentation d'une solution considérée lors de l'optimisation

La taille du vecteur est $N_{nœud}$ et ce problème est binaire puisqu'un nœud peut prendre les valeurs entières 1 ou 2 c'est-à-dire qu'il peut se trouver dans l'un ou l'autre des deux secteurs liés par la conduite à la frontière évaluée. La fonction objectif du problème d'optimisation est composée d'un filtre (connectivité d'un secteur à une source, section 6.1.2) et d'une somme pondérée de trois critères représentant : (1) la déformation des secteurs initiaux (section 6.1.3), (2) le nombre de vannes d'isolement(ou conduites) fermées (section 6.1.4), et (3) l'absence de vannes (section 6.1.5). La minimisation de la somme de ces éléments correspond à la fonction objectif donnée à l'équation (6.1) :

$$F.O. = \min (f(x)) + F \quad (5.1)$$

où $f(x)$ est définie à l'équation (5.2) et F est le filtre.

$$f(x) = \begin{matrix} P_1 * \text{déformation secteurs initiaux} & + \\ P_2 * \text{nombre conduites fermées} & + \\ P_3 * \text{absence vannes} \end{matrix} \quad (5.2)$$

où P_1 , P_2 et P_3 sont des coefficients de pénalité de valeurs différentes de façon à hiérarchiser les critères. La détermination des valeurs de ces coefficients est abordée à la section 5.1.6 ainsi qu'à l'Annexe V.

5.1.2 Connectivité des nœuds d'un secteur à une source

Avant d'évaluer les trois critères de la fonction objectif, un filtre est mis en place afin de déterminer la faisabilité des solutions proposées selon la connectivité entre chaque nœud d'un secteur et une source d'alimentation du réseau. Lors de la formation des secteurs, tous les nœuds doivent être alimentés par au moins une source c'est-à-dire qu'il existe au moins un chemin entre chaque nœud et une source. Ces chemins sont déterminés par une recherche en profondeur (Tarjan, 1972) qui consiste à parcourir tous les nœuds du réseau sans égard au sens d'écoulement. Le filtre rejette les solutions dans lesquelles une portion de secteur se trouve déconnectée d'une source suite aux changements des frontières des secteurs. Cette situation est représentée par les nœuds se trouvant à l'intérieur du trait rouge pointillé à la Figure 5.3 (sur cette figure, le trait en noir identifie la frontière entre deux secteurs).

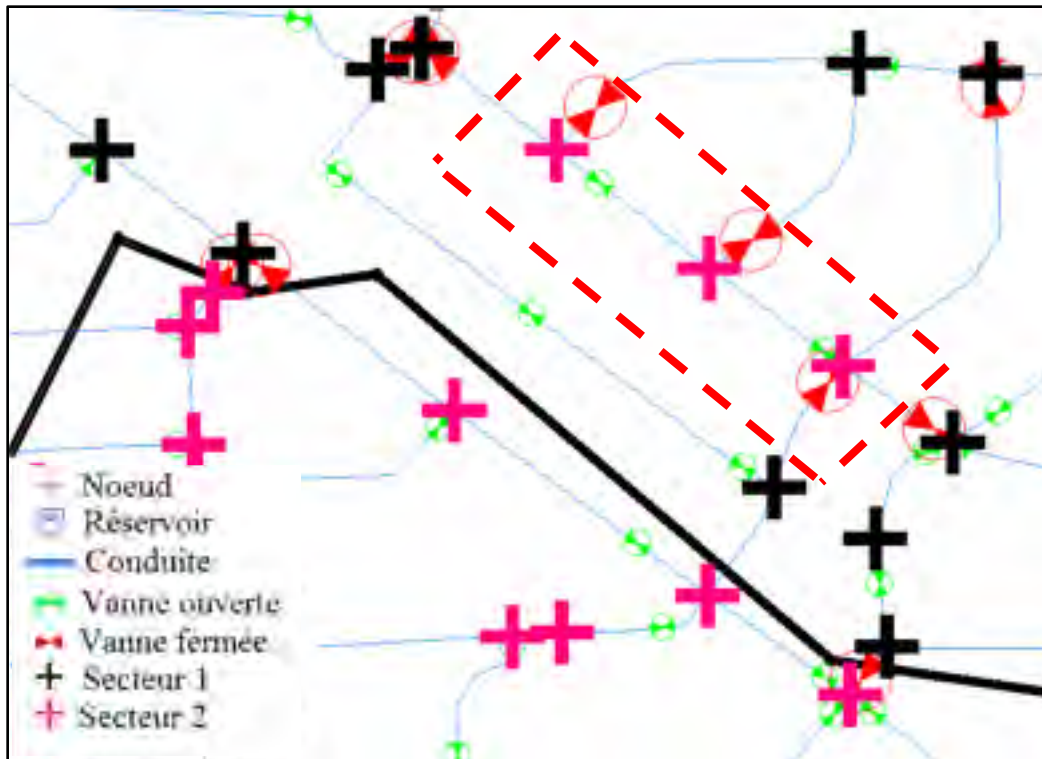


Figure 5.3 Exemple de secteur déconnecté d'une source

Dans l'éventualité où il y a absence de connectivité entre au moins un nœud et une source, le filtre prend la valeur « *Infini* » puisqu'une telle solution ne peut être retenue. Dans le cas contraire, une valeur nulle est associée au filtre (tous les nœuds sont connectés à au moins une source). Par conséquent, lorsque la valeur du filtre est nulle, le problème d'optimisation consiste à minimiser la fonction $f(x)$ (équations (5.1) et (5.2)).

5.1.3 Déformation des secteurs initiaux – $g(x)$

La définition des secteurs initiaux est basée sur des critères hydrauliques. De plus, suivant les conditions hydrauliques simulées, ces secteurs sont considérés performants (section 4.2.5). Par conséquent, la configuration des secteurs finaux doit être semblable à la configuration des secteurs initiaux. La déformation des secteurs initiaux doit donc être minimale afin de préserver des conditions hydrauliques semblables. Ce critère comptabilise le nombre de

nœuds qui ont changé de secteur lors de l'évaluation d'une conduite à la frontière sans vanne d'isolement et ce nombre est multiplié par le coefficient de pénalité P_1 (section 5.1.6).

5.1.4 Nombre de vannes d'isolement fermées – $h(x)$

Une conduite délimitée par au moins un nœud de degré égal à deux est nécessairement en série avec une autre conduite. Dans ce cas, si l'une des conduites en série possède une vanne, le nombre de vannes d'isolement fermées pour la formation des secteurs finaux est égal au nombre de conduites sur la (les) frontière(s) pour la formation des secteurs initiaux. Toutefois, lorsque les nœuds possèdent un degré supérieur à deux (ce qui est majoritairement le cas dans ces travaux), le nombre de vannes d'isolement fermées pour définir les secteurs finaux est plus élevé; une réduction de la performance du RDEP en ce qui a trait à l'indice du diamètre disponible peut être observée. Le critère du nombre de vannes fermées pour la formation des secteurs finaux consiste à comptabiliser toutes les conduites fermées sur l'ensemble du réseau, pour la formation des secteurs finaux et de multiplier ce nombre par le coefficient P_2 (section 5.1.6). Ce critère représente par ailleurs le nombre de bouts morts créés et le nombre d'interventions sur le réseau (manipulation et introduction des vannes) pour de la formation des secteurs.

5.1.5 L'absence de vannes d'isolement – $j(x)$

Étant donné que le nombre de nœuds considéré est limité afin de ne pas déformer de façon importante les secteurs initiaux, il est possible d'obtenir une solution où une ou plusieurs conduites à la frontière ne possèdent pas de vannes d'isolement. Ainsi, lorsqu'une vanne doit être insérée, une pénalité représentée par le coefficient P_3 est appliquée (section 5.1.6); ce critère est évalué pour toutes les conduites aux frontières de sorte qu'il est possible de déterminer, à partir de la valeur de la fonction objectif, le nombre de vannes d'isolement à insérer sur l'ensemble du réseau (section 5.4).

5.1.6 Détermination des poids des critères de la fonction objectif

L'approche considérant une somme pondérée de critères a été adoptée dans le cadre de ces travaux puisque cette méthode est l'une des plus simples et des plus utilisées pour la résolution de problème multi-objectifs (Deb, 2001). Une attention particulière a été portée à l'attribution des valeurs P_1 , P_2 et P_3 , tel que démontré à l'Annexe V. Des valeurs appropriées, pour ces trois coefficients de pénalité, permettent d'éviter ou de limiter la présence de solutions équivalentes associées au chevauchement des valeurs prises par les trois critères (des valeurs des coefficients de pénalité appropriées font en sorte que les critères n'ont pas d'impact les uns sur les autres lors de l'optimisation). Les valeurs des coefficients P_1 , P_2 et P_3 utilisées dans le cadre de ces travaux sont indiquées dans l'équation (5.3). Ces valeurs reflètent l'ordre de priorité accordé aux critères par l'auteur de ce mémoire en ce qui concerne l'identification des vannes d'isolement des secteurs de réseaux. Dans le cadre d'études différentes, les poids des trois critères devraient être étudiés à nouveau et fixés adéquatement (Annexe V).

En remplaçant numériquement les coefficients de pénalité qui multiplient chacun des critères de la fonction objectif, l'équation 5.2 devient :

$$\text{F.O.} = \min \left(\begin{array}{c} 5 * g(x) \\ 200 * h(x) \\ 100\,000 * j(x) \end{array} + \right) + F \quad (5.3)$$

où $g(x)$, $h(x)$ et $j(x)$ correspondent aux critères associés respectivement à la déformation des secteurs, au nombre de conduites fermées et à l'absence de vannes. Ainsi, dans les présents travaux, la pénalité la plus grande est accordée aux solutions qui minimisent le nombre de conduites sans vannes aux frontières des secteurs, ensuite le nombre de conduites fermées et finalement le nombre de nœuds qui ont varié d'un secteur à un autre.

5.2 Description de l'algorithme génétique

Dans la littérature, l'AG est souvent sélectionné pour résoudre des problèmes liés aux RDEP (Dandy et al., 1996; DiNardo et al., 2013a; Halhal et al., 1997; Savic et Walters, 1997; Vairavamoorthy et Ali, 2000; VanDijk et al., 2008; Walters et al., 1999) puisqu'il se montre particulièrement efficace pour la résolution de ce type de problèmes non-linéaires (Savic et Walters, 1997). Les principales caractéristiques de l'AG sont les suivantes (Goldberg, 1989) : (1) il utilise le codage des paramètres et non les paramètres (par exemple, l'algorithme modifie les paramètres du domaine du problème d'optimisation par un codage binaire), (2) il recherche une solution en considérant une population de points, et non un seul point; de cette manière l'algorithme est moins susceptible de trouver un extremum local, (3) il appartient à la catégorie des méthodes métaheuristiques (section 5.3), applicables pour la résolution des problèmes d'optimisation de « boîte noire » (Blackbox Optimization) ou sans dérivées (dans ce type de problème, la structure du problème et l'information provenant des dérivées ne sont pas accessibles), (4) il utilise des règles de transition probabilistes et non des règles déterministes, (5) cet algorithme est évolutif puisqu'il est basé sur des mécanismes qui permettent de créer un ensemble de solutions à partir de l'ensemble de solutions précédent.

L'AG est inspiré de la théorie de la sélection naturelle, un processus biologique selon lequel les individus les plus puissants ont une plus grande probabilité de survivre dans un environnement de compétition. Une population est un ensemble d'individus ayant chacun des caractéristiques différentes. L'AG fait évoluer une population initiale sur plusieurs générations jusqu'à un critère d'arrêt établi. À chaque génération, les individus de la population sont évalués selon une fonction objectif et les individus les plus performants sont sélectionnés. L'AG est basé sur le principe que deux géniteurs de bonne qualité devraient engendrer un descendant de meilleure qualité que ses prédécesseurs. Des processus de croisement et de mutation sont appliqués aux individus sélectionnés pour générer la prochaine population. Dans le contexte d'un problème d'optimisation, les caractéristiques des individus (ou des chromosomes) sont la représentation d'une solution sous la forme d'un vecteur, les éléments d'un vecteur sont les gènes et leurs valeurs sont les allèles (information

génétique du gène d'un «géniteur») (Figure 5.4). Pour de plus amples informations sur l'AG, le lecteur intéressé est invité à consulter Goldberg (1989).

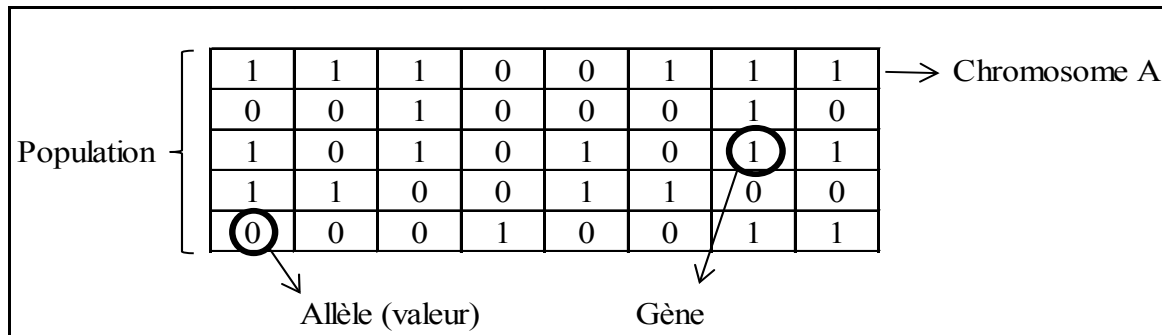


Figure 5.4 Représentation des composantes d'un algorithme génétique

5.1 Solutions obtenues au terme de l'optimisation

Suivant la classification de Coello et al., (2007), les techniques d'optimisation peuvent être divisées en trois catégories : énumérative, déterministe et stochastique. Les techniques énumératives évaluent toutes les solutions réalisables faisant partie d'un ensemble fini de solutions peu nombreuses. Une telle méthode est nécessairement inefficace lorsque le domaine de solutions est large puisque le temps requis pour trouver la solution optimale est élevé. Les techniques déterministes tentent d'obtenir une solution réalisable parmi un nombre de solutions élevé dans un temps acceptable. Ces dernières se basent sur la connaissance du domaine des solutions possibles ; la recherche en profondeur, la recherche en largeur et la méthode *branch and bound* sont des exemples de techniques déterministes. Les techniques stochastiques telles que le recuit simulé, la recherche taboue et les algorithmes évolutifs (comme l'AG) sont utilisées lorsque le domaine de recherche est irrégulier. Elles identifient dans un temps raisonnable une bonne solution sans garantir une solution optimale (méthodes métaheuristiques; Hillier et Lieberman, 2005).

Les nœuds se trouvant à une distance de trois nœuds d'une conduite frontalière sans vanne sont considérés dans la formation des secteurs finaux. Le nombre de nœuds inclus est dépendant du degré de chaque nœud. Pour les deux RDEP à l'étude, le domaine des solutions

du problème d'optimisation contient environ 10^4 solutions pour chaque conduite sans vanne d'isolement. Le choix de considérer à une distance de trois nœuds permet d'obtenir une bonne solution dans un temps de calcul raisonnable. Le critère d'arrêt pour chaque optimisation correspond à un nombre de générations où la valeur de la fonction objectif n'a pas varié (cette valeur est fixée à 100). Bien que le nombre de solutions soit élevé par la considération d'un nombre important de nœuds (ce qui inclut un nombre important de conduites), il demeure possible que l'AG aboutisse à une solution dans laquelle il reste des conduites aux frontières sans vannes d'isolement (des vannes devront être introduites), selon la configuration du réseau étudié.

5.2 Détermination des secteurs finaux pour les RDEP à l'étude

Les RDEP de VMR et de la municipalité d'Aylmer possèdent respectivement 632 et 689 vannes. Lors de la sectorisation initiale du RDEP de VMR, 5 conduites aux frontières ne possèdent pas de vanne d'isolement tandis que ce nombre est de 10 pour le RDEP de la municipalité d'Aylmer. Un exemple de déformation des secteurs initiaux, suite à la formation des secteurs finaux, est présenté à la Figure 5.5. Sur cette figure, les nœuds de même couleur représentent les secteurs finaux (déterminés par l'AG) délimités par la ligne pointillée grise puisque la conduite à la frontière en rouge (identifiée lors de la formation des secteurs initiaux) ne possède pas de vanne d'isolement. La ligne noire représente la frontière déterminée par la méthode de sectorisation initiale adaptée.

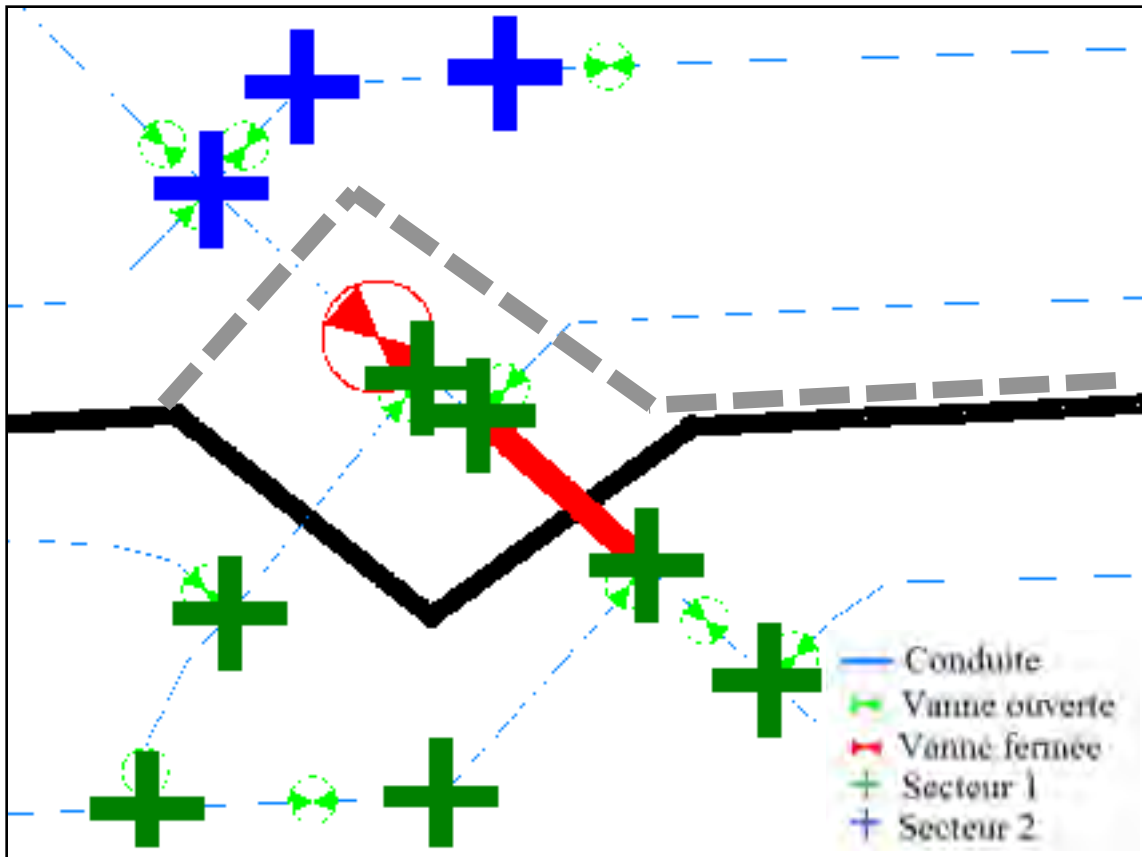


Figure 5.5 Exemple de déformation des secteurs initiaux (RDEP de VMR)

De manière à examiner l'incertitude sur le résultat final, le problème de la sectorisation finale a été résolu 50 fois à l'aide de l'AG pour les deux réseaux à l'étude afin d'identifier les différentes configurations retenues. Cette démarche est exécutée en raison de la nature métaheuristique de l'AG (sections 5.2 et 5.3). Le Tableau 5.1 présente les différentes valeurs des critères de la fonction objectif pour les réseaux à l'étude, en considérant d'abord les vannes disponibles. Sept solutions différentes ont été obtenues pour le RDEP de VMR tandis que 25 solutions différentes ont été obtenues pour le RDEP d'Aylmer.

Tableau 5.1 Valeurs de la fonction objectif et des différents critères suite à l'obtention des secteurs finaux pour les RDEP de VMR et d'Aylmer en considérant les vannes disponibles

RDEP de Ville-Mont-Royal				RDEP d'Aylmer			
valeur F.O.	$g(x)$	$h(x)$	$j(x)$	valeur F.O.	$g(x)$	$h(x)$	$j(x)$
5655	11	28	0	106520	24	32	1
5840	8	29	0	106705	21	33	1
5850	10	29	0	106715	23	33	1
6035	7	30	0	106740	28	33	1
6250	10	31	0	106900	20	34	1
6435	7	32	0	106910	22	34	1
6445	9	32	0	106925	25	34	1
				107095	19	35	1
				107100	20	35	1
				107120	24	35	1
				107290	18	36	1
				107295	19	36	1
				107485	17	37	1
				107490	18	37	1
				107495	19	37	1
				107505	21	37	1
				107680	16	38	1
				107685	17	38	1
				107695	19	38	1
				107710	22	38	1
				107880	16	39	1
				107895	19	39	1
				108075	15	40	1
				206880	16	34	2
				207895	19	39	2

Suite à l'obtention de ces résultats, le nombre de vannes près de la frontière a été diminué afin de simuler la présence de vannes d'isolement inopérables sur les RDEP, tel que mentionné précédemment (section 5.1). Les RDEP « modifiés » sont donc munis de 396 (VMR) et 458 (Aylmer) vannes d'isolement, et comportent chacun 17 conduites sans vannes d'isolement aux frontières des secteurs. La diminution du nombre de vannes est effectuée par l'élimination systématique d'une vanne sur trois sur les conduites considérées lors de l'optimisation (les conduites comprises parmi les nœuds se trouvant à une distance de trois

nœuds de la frontière, tel que présenté à la Figure 5.1). La démarche de sectorisation finale a été exécutée 50 fois pour les deux réseaux et les valeurs des critères de la fonction objectif sont présentées au Tableau 5.2. Après ces 50 optimisations, en considérant les vannes d'isolement opérables, 22 solutions ont été obtenues pour le RDEP de VMR tandis que 31 solutions ont été obtenues pour le RDEP d'Aylmer.

Tableau 5.2 Valeurs de la fonction objectif et des différents critères suite à l'obtention des secteurs finaux pour les RDEP de VMR et d'Aylmer en considérant les vannes opérables

RDEP de Ville-Mont-Royal				RDEP de la municipalité d'Aylmer			
valeur F.O.	$g(x)$	$h(x)$	$j(x)$	valeur F.O.	$g(x)$	$h(x)$	$j(x)$
5740	28	28	0	206555	31	32	2
5945	29	29	0	206740	28	33	2
6130	26	30	0	305525	25	27	3
6135	27	30	0	305710	22	28	3
6320	24	31	0	306310	22	31	3
6330	26	31	0	306330	26	31	3
6520	24	32	0	405510	22	27	4
6735	27	33	0	405695	19	28	4
6740	28	33	0	405705	21	28	4
6750	30	33	0	405920	24	29	4
6925	25	34	0	406085	17	30	4
6940	28	34	0	406500	20	32	4
7125	25	35	0	406540	28	32	4
7130	26	35	0	406930	26	34	4
7315	23	36	0	505100	20	25	5
7335	27	36	0	505285	17	26	5
105730	26	28	1	505285	17	26	5
106105	21	30	1	505295	19	26	5
106535	27	32	1	505480	16	27	5
106710	22	33	1	505700	20	28	5
107115	23	35	1	506080	16	30	5
206320	24	31	2	506100	20	30	5
				506110	22	30	5
				506125	25	30	5
				506275	15	31	5
				506710	22	33	5
				605465	13	27	6
				605880	16	29	6
				605885	17	29	6
				606090	18	30	6
				606470	14	32	6

L'analyse des valeurs de la fonction objectif (Tableaux 5.1 et 5.2) donne une indication quant aux solutions obtenues. Par exemple, le nombre de vannes d'isolement à introduire correspond à la division entière de la valeur de la fonction par 100 000 (valeur du coefficient de pénalité de $j(x)$, équation (5.3)). De plus, en comparant les valeurs de deux solutions ne nécessitant pas l'introduction des vannes sur le réseau, par exemple 5470 et 6320 (provenant du Tableau 5.2 pour le RDEP de VMR), la solution associée à la plus petite valeur est généralement celle qui considère la fermeture d'un nombre de conduites inférieur (critère $h(x)$, équation (5.3)). L'analyse du critère $g(x)$ doit être exécutée en considérant la valeur de $h(x)$ puisque le critère $g(x)$ multiplié par son coefficient de pénalité peut atteindre la valeur de 200 (valeur du coefficient P_2). Une analyse plus approfondie des solutions obtenues à partir de la méthode de sectorisation finale est présentée à la section 6.2.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section résume et compare les principaux résultats obtenus dans ces travaux pour les deux RDEP à l'étude. Les différences de la performance des réseaux sectorisés selon, d'une part, les deux méthodes de sectorisation initiale (la méthode de DiNardo et DiNatale, 2011, et la méthode adaptée) et, d'autre part, la méthode de sectorisation finale, sont mises en évidence par une discussion sur les principales causes de ces écarts.

6.1 Résultats obtenus à partir des méthodes de sectorisation initiale

En premier lieu, les résultats obtenus à l'aide des méthodes de sectorisation initiale sont examinés (1) du point de vue hydraulique, c'est-à-dire en considérant de façon plus spécifique les pressions aux nœuds des réseaux et les vitesses dans les conduites, et (2) du point de vue de la performance des réseaux par les indices de performance et la protection contre les incendies. En second lieu, la méthode de sectorisation finale est examinée en ce qui a trait à l'hydraulique des réseaux, à leur performance et à l'optimisation.

6.1.1 Analyse des pressions

D'après la section 4.2.5 où les pressions à chaque nœud des réseaux sont évaluées, il est possible de déterminer rapidement la faisabilité d'une configuration d'un réseau. Les RDEP à l'étude possèdent, avant sectorisation, des pressions permettant d'alimenter adéquatement les usagers suivant le scénario de consommation horaire maximale (Tableaux 4.5 et 4.7). Une fois le réseau perturbé par la fermeture des conduites pour délimiter les frontières des secteurs, les pressions varient puisque les chemins d'écoulement sont modifiés. À certains nœuds des réseaux sectorisés, la pression est inférieure à la pression des réseaux initiaux puisque le changement des chemins d'écoulement entraîne une hausse des pertes de charge. Dans certains cas plus rares, la pression peut être supérieure après la sectorisation étant donné, par exemple, les changements de direction des écoulements (dus aux fermetures des

conduites). Tel que vu au chapitre 4, la méthode de sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011) requiert la présence de plus d'un point d'entrée sur certains secteurs des deux réseaux à l'étude pour obtenir des pressions supérieures à la pression minimale requise (140 kPa) en considérant le scénario de la consommation maximale horaire : il s'agit du secteur 2 du RDEP de VMR et du secteur 2 du RDEP d'Aylmer. De plus, les secteurs 2 et 3 du RDEP de VMR et le secteur 2 du RDEP d'Aylmer sectorisés selon la méthode adaptée possèdent un point d'entrée supplémentaire (2 points d'entrée chacun) afin d'assurer un niveau de protection contre les incendies s'approchant (au possible) de la situation observée avant la sectorisation (section 4.2.3). Pour ces deux réseaux, toutefois, la méthode adaptée a permis d'obtenir des pressions supérieures à la pression minimale requise avec un seul point d'entrée par secteur. Le Tableau 6.1 synthétise le nombre de secteurs pour chaque RDEP sectorisé, le nombre de points d'entrée et le nombre de conduites fermées.

Tableau 6.1 Tableau résumé des RDEP sectorisés

	RDEP de Ville-Mont-Royal	RDEP d'Aylmer
nombre de secteurs	4	4
nombre de points d'entrée	4	3
nombre de conduites fermées	25	33

Les pressions minimales, moyennes et maximales obtenues par secteur à l'aide la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) et de la méthode adaptée (avec points d'entrée supplémentaires dans les deux cas) sont présentées aux Figures 6.1 et 6.2. Les valeurs ponctuelles de ces pressions obtenues pour le scénario de la consommation maximale horaire sont représentées par les groupes de trois paliers délimités par les lignes verticales noires (délimitation des secteurs).

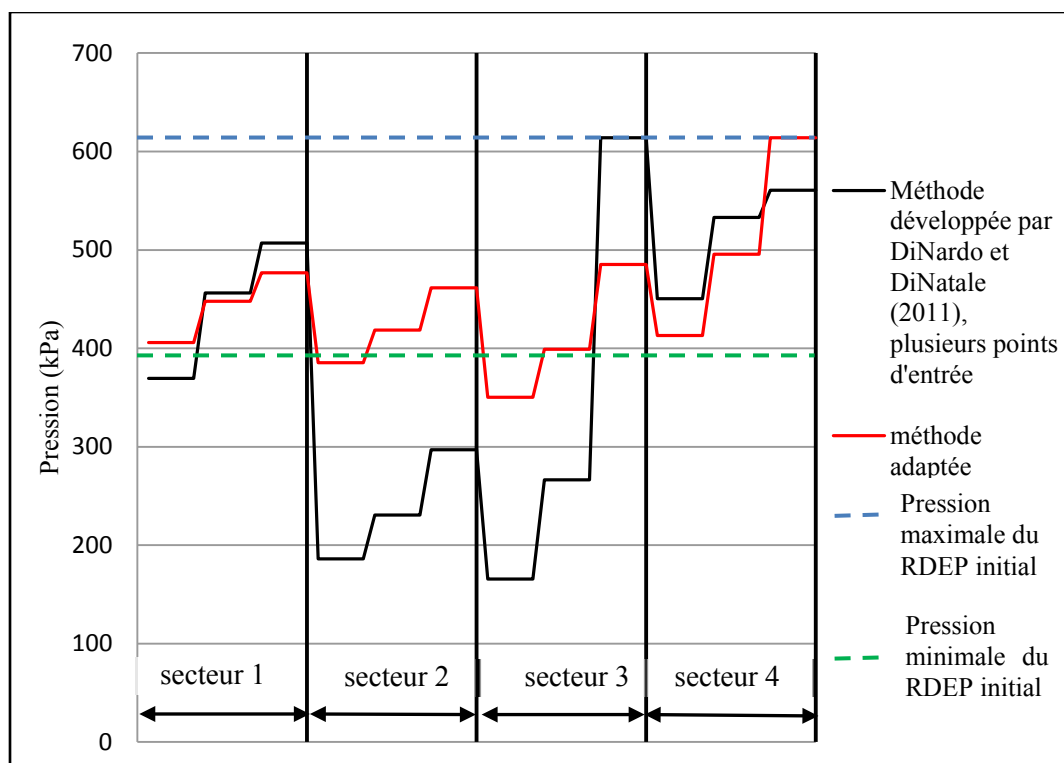


Figure 6.1 Comparaison des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suivant les méthodes de sectorisation initiale pour le RDEP de VMR

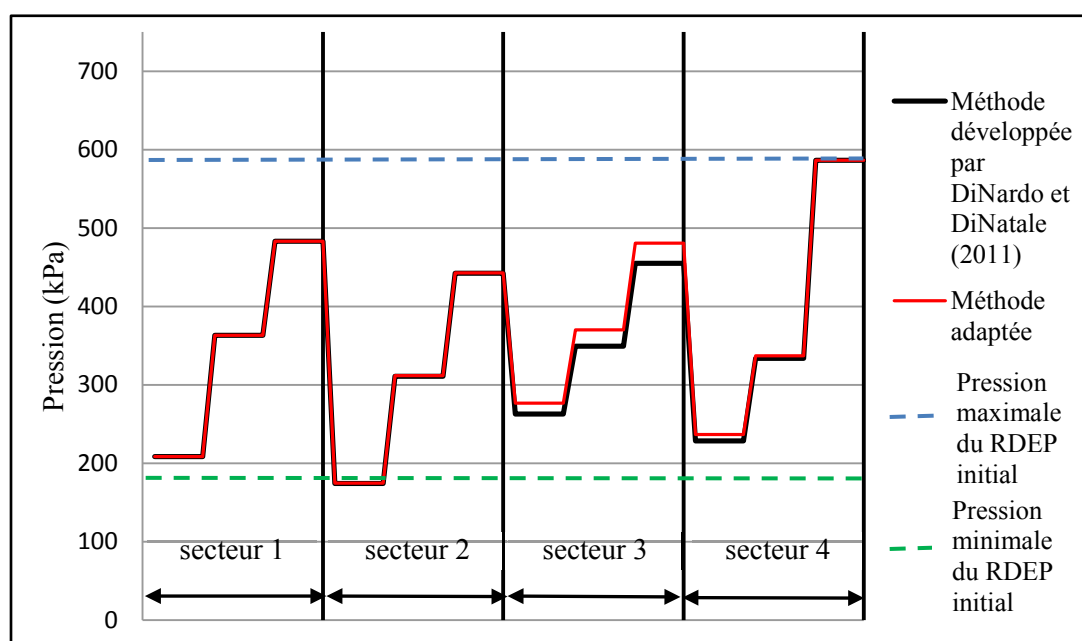


Figure 6.2 Comparaison des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suivant les méthodes de sectorisation initiale pour le RDEP d'Aylmer

Pour le RDEP de VMR, la méthode de sectorisation initiale adaptée tend à uniformiser les écarts de pression intra-secteurs par rapport à la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) (Figure 6.1). Par ailleurs, le RDEP de VMR sectorisé suivant la méthode adaptée présente de plus faibles écarts de pressions d'un secteur à l'autre comparativement au réseau sectorisé suivant la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) (Figure 6.1). Cette dernière méthode engendre de plus faibles pressions pour les secteurs 1, 2 et 3 du RDEP de VMR. Étant donné que le secteur 2 ne possède pas de source, les secteurs 1 et 3 alimentent ce dernier par deux conduites d'entrée (Figure 4.4, section 4.1.4). La conduite de 200 millimètres liant le secteur 1 au secteur 2 (il s'agit du premier point d'entrée déterminé par la méthode développée par DiNardo et DiNatale, 2011) entraîne une perte de charge élevée de 7,5 mètres (comparativement à une moyenne des pertes de charge pour l'ensemble des conduites de 0,44 mètre). Une baisse de pression est nécessairement observée dans ce secteur. Pour ce qui est du secteur 3, les plus faibles valeurs de pression moyenne et minimale obtenues suivant la méthode de DiNardo et DiNatale (2011) sont dues à (1) un nombre élevé de nœuds dispersés sur une grande superficie : les chemins d'écoulement entre les nœuds éloignés et la source qui les alimente engendrent une perte de charge importante (Figure 4.4) et (2) la présence d'un seul point d'entrée contrairement à la méthode adaptée qui considère deux points d'entrée. Le secteur 3 de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) (Figure 4.4) et le secteur 4 de la méthode adaptée (Figure 4.9), possédant un nombre important de nœuds et de conduites répartis sur une grande superficie, présentent les dispersions les plus importantes. Les nœuds à proximité d'une ou des sources possèdent des pressions importantes tandis que les nœuds aux frontières des secteurs ou à la limite du réseau possèdent de plus faibles pressions (perte de charge plus importante).

En ce qui concerne le RDEP sectorisé d'Aylmer, les pressions minimales, moyennes et maximales par secteur pour les deux méthodes de sectorisation initiale sont très semblables (Figure 6.2). Ce RDEP possède deux paliers de pression (Figure 3.4). Les dispersions sont plus élevées que celles obtenues pour le réseau de VMR. Ces valeurs sont dues à des variations d'élévation en raison de la présence de paliers de pression. Par exemple, une différence de 15 mètres d'élévation entre deux nœuds (la différence d'élévation des paliers

de pression se situe entre de 15 et 20 mètres) représente près de 150 kPa de différence ce qui augmente la dispersion des valeurs de pression dans les secteurs, sans toutefois compromettre la viabilité hydraulique des secteurs. Il est par ailleurs intéressant de noter que les frontières des secteurs des deux méthodes de sectorisation initiale sont semblables et qu'elles longent, en partie, les frontières des paliers de pression du RDEP. Ainsi, de façon générale, les deux méthodes de sectorisation identifient les deux paliers de pression lors de la définition des frontières pour ce RDEP mais, il est possible que certains nœuds possédant des écarts d'élévation importants se retrouvent dans un secteur voisin, ce qui n'empêche pas les résultats obtenus d'être viables. Par la suite, les deux méthodes de sectorisation subdivisent les paliers de pressions afin d'obtenir quatre secteurs tel qu'indiqué à la section 4.1.4. Dans le cas de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011), le poids de la matrice d'adjacence (équation (4.1)), le seul critère hydraulique considéré dans cette méthode, permet d'identifier les paliers de pression du RDEP de la municipalité d'Aylmer. Le poids de la matrice d'adjacence modifiée (section 4.2.1) et les zones d'influence (section 4.2.3) sont les principaux facteurs qui permettent de tenir compte des paliers de pression pour la méthode adaptée.

Le RDEP d'Aylmer est composé de surpresseurs et de réducteurs compte tenu de la présence de paliers de pression (section 3.2.3.1). Ces éléments ajustent la pression pour chaque palier de pression (Annexe I). Dans les présents travaux, ces éléments n'ont pas été considérés lors de la sectorisation finale de sorte que ceux-ci ont été fermés. Ces éléments ne pourront donc pas agir en tant que point d'entrée pour un secteur. Malgré cette simplification, les solutions obtenues pour chacune des deux méthodes de sectorisation présentent des pressions supérieures à la pression minimale requise. Il est à noter que, lorsque les frontières de secteurs longent celles des paliers de pression, les conduites qui possèdent des surpresseurs et des réducteurs agissent en tant que conduites aux frontières ; toutefois, celles-ci ne sont pas les conduites d'entrée des secteurs (elles sont des conduites fermées). Dans de futurs travaux, une amélioration de cette méthode peut être faite en considérant la présence de ces éléments dans la délimitation des secteurs.

6.1.2 Cas particulier du réseau d'Aylmer

Tel que mentionné à la section 4.4.2, la méthode adaptée considère, pour le RDEP d'Aylmer, un secteur dont le nombre d'équivalent-habitants (13 036) est supérieur à la valeur maximale indiquée par Butler (2000). La sectorisation de ce RDEP a été exécutée en considérant cinq secteurs (contrairement à quatre secteurs) afin de distribuer plus adéquatement le nombre d'habitants dans chaque secteur. La nouvelle configuration des secteurs (cinq secteurs) est semblable à la configuration qui comprend quatre secteurs c'est-à-dire que les paliers de pression sont identifiés et que les frontières des secteurs sont sensiblement les mêmes. La principale différence réside dans la subdivision du secteur 4 (qui comprenait 13 000 équivalent-habitants) en deux secteurs districts (qui comprennent respectivement près de 10 000 et de 3 000 équivalents habitants). Cette différence provient de la concentration des grands consommateurs qui sont regroupés tel que mentionné à la section 4.4.2. Le RDEP sectorisé selon cinq secteurs demeure opérable en considérant les pressions minimales et maximales permises (section 2.5.1). La performance du RDEP est quelque peu diminuée tandis que la performance contre les incendies est nécessairement faible puisque le RDEP initial présente une faible performance contre les incendies.

6.1.3 Analyse des vitesses

L'analyse des vitesses est un aspect hydraulique à considérer lors de l'implantation des secteurs initiaux. Une vitesse élevée engendre d'importantes pertes de charges et la qualité de l'eau pourrait être dégradée suite au détachement de particules présentes sur les parois des conduites, en présence de vitesses particulièrement élevées (Lau et Liu, 1993). Une vitesse maximale de 3,0 m/s est suggérée (Ministère de l'Environnement, 1984). Toutefois, les vitesses dans les conduites n'atteignent que très rarement cette vitesse maximale étant donné que les RDEP québécois sont généralement surdimensionnés pour assurer de fournir des débits importants associés à la protection contre les incendies (MAMOT, 2013a). Une faible vitesse entraîne, en contrepartie, une augmentation du temps de séjour de l'eau en réseau ce qui favorise la croissance bactérienne et l'accumulation de particules sur les parois des conduites (Desjardins, 1999). Une vitesse minimale de 0,3 m/s, en période de consommation

maximale horaire, est suggérée par Brière (2012). Le Tableau 6.2 identifie les pourcentages de conduites possédant une vitesse d'écoulement supérieure à 0,3 m/s et des conduites possédant une vitesse d'écoulement inférieure à 3,0 m/s. Malgré qu'elles donnent lieu à de faibles vitesses d'écoulement dans les conduites (inférieures à la vitesse minimale suggérée), les deux méthodes de sectorisation appliquées aux RDEP à l'étude n'affectent pas les vitesses d'écoulement par rapport aux réseaux initiaux (variation d'un ou deux pourcents).

Tableau 6.2 Analyse hydraulique de vitesses d'écoulement

		Vitesse supérieure à 0,3 m/s %	Vitesse inférieure à 3,0m/s %
RDEP de Ville-Mont- Royal	RDEP initial	27	100
	Sectorisation initiale adaptée	28	100
	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	29	100
RDEP d'Aylmer	RDEP initial	14	99
	Sectorisation initiale adaptée	14	99
	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	15	99

La sectorisation d'un RDEP entraîne par ailleurs la création de bouts morts supplémentaires dans lesquels le temps de séjour est généralement élevé (eau stagnante). Pour des fins d'analyse, le temps de séjour critique de l'eau en réseau est fixé à 72 heures (*Christine Ouimet* août 2014, communication personnelle). Une comparaison entre les temps de séjour des réseaux initiaux à l'étude et des réseaux sectorisés selon les deux méthodes de sectorisation initiale est présentée au Tableau 6.3. Les valeurs correspondent aux pourcentages de nœuds des réseaux par tranches de 12 heures du temps de séjour. Une faible perturbation du temps de séjour est observée pour les réseaux sectorisés, peu importe la méthode de sectorisation initiale. Toutefois, pour le RDEP de VMR sectorisé selon les deux méthodes, le temps de séjour maximal est trois fois plus élevé que le temps de séjour maximal du RDEP initial (contrairement au RDEP d'Aylmer où le temps de séjour reste stable). Malgré cette variation importante, le temps de séjour aux autres nœuds du RDEP est pratiquement inchangé. Par conséquent, la création de bouts morts et les changements des

chemins d'écoulement n'influencent pas, à toute fin pratique, les temps de séjour pour les deux RDEP à l'étude selon les résultats hydrauliques des modèles utilisés.

Tableau 6.3 Comparaison des temps de séjour des réseaux initiaux et sectorisés à l'aide des méthodes de sectorisation initiale

	Temps de séjour	RDEP initial	RDEP sectorisé (DiNardo et DiNatale, 2011)	RDEP sectorisé (méthode adaptée)
RDEP de VMR	0 h à 12 h	93%	92%	93%
	12 h à 24 h	2%	2%	2%
	24 h à 36 h	1%	1%	1%
	36 h à 48 h	1%	1%	1%
	48 h à 60 h	0%	0%	0%
	60 h à 72 h	0%	0%	0%
	72 h et +	3%	3%	3%
RDEP d'Aylmer	0 h à 12 h	87%	87%	86%
	12 h à 24 h	4%	4%	4%
	24 h à 36 h	2%	2%	3%
	36 h à 48 h	1%	1%	1%
	48 h à 60 h	1%	1%	1%
	60 h à 72 h	0%	1%	1%
	72 h et +	4%	5%	5%

Avant la mise en place des secteurs, une analyse plus rigoureuse de la qualité de l'eau par la considération de plusieurs autres éléments tels que la croissance bactérienne et la concentration en chlore pourrait être menée. L'analyse de la qualité de l'eau peut être incluse dans la méthode de sectorisation au même titre que l'évaluation des indices de performance du réseau et de la performance de la protection contre les incendies.

6.1.4 Analyse des indices de performance en fonction des modifications apportées à la méthode de sectorisation initiale développée par DiNardo et DiNatale (2011)

L'analyse des indices de performance s'avère essentielle afin de (1) distinguer les solutions obtenues, et (2) analyser les fondements des changements de performance. Les indices de performance des réseaux à l'étude et des réseaux sectorisés selon les deux méthodes de sectorisation initiale sont présentés au Tableau 6.4.

Tableau 6.4 Comparaison des indices de performance des RDEP initiaux et des RDEP sectorisés suivant les méthodes de sectorisation initiale

		Indice diamètre disponible total (mm)	Indice hauteur piézométrique totale excédentaire (m)	Indice maillage ---	Indice puissance dissipée (W)	Indice résilience Prasad ---	Indice résilience Todini ---
RDEP de Ville-Mont- Royal	RDEP initial	131 283	14 273	0,19	46 661	0,72	0,77
	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	126 383	9 921	0,18	95 525	0,65	0,67
	Sectorisation initiale adaptée	126 183	13 347	0,18	56 793	0,70	0,75
RDEP d'Aylmer	RDEP initial	188 412	13 964	0,13	71 827	0,59	0,70
	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	183 162	13 882	0,12	67 660	0,60	0,71
	Sectorisation initiale adaptée	183 512	14 241	0,12	65 058	0,60	0,72

Tel que vu au chapitre 4, la méthode adaptée repose sur des modifications et sur la représentation graphique d'éléments supplémentaires qui influencent la délimitation des secteurs et donc la performance des réseaux sectorisés. À titre de rappel, les éléments modifiés/ajoutés sont : la modification des poids de la matrice d'adjacence (section 4.2.1), la représentation des grands consommateurs pour mieux aider l'utilisateur à les répartir dans les secteurs (section 4.2.2), la prise en compte des zones d'influence des sources (section 4.2.3), la représentation des fréquences des conduites (section 4.2.4) et la prise en compte de la protection contre les incendies (section 4.2.6). L'impact de ces modifications sur les indices de performance est examiné ci-après. La méthode de sectorisation initiale adaptée vise à identifier principalement la fermeture des conduites de diamètre inférieur en laissant plus de conduites de grand diamètre ouvertes par rapport à la méthode de DiNardo et DiNatale (2011), tel qu'il avait été démontré au Tableau 4.2. La sectorisation d'un RDEP entraîne nécessairement une baisse de l'*indice du diamètre disponible total*, lequel quantifie la perturbation engendrée par la sectorisation en démontrant l'effet des fermetures de conduites. Selon le Tableau 6.5, les indices de diamètres disponibles sont semblables pour les deux méthodes de sectorisation initiale. Ces résultats montrent aussi que la méthode de sectorisation initiale adaptée considère la fermeture d'un plus grand « nombre de diamètres de conduites » pour le RDEP de VMR. Toutefois, il est pertinent de mettre cet indice en relation avec le nombre de conduites fermées afin de comparer le diamètre moyen des

conduites fermées (plus celui-ci est élevé, plus les conduites fermées ont des diamètres élevés). Pour les deux RDEP à l'étude, l'utilisation de la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) entraîne la fermeture des conduites de plus grands diamètres, tel que le montre le Tableau 6.5.

Tableau 6.5 Comparaison des diamètres moyens des conduites fermées pour les méthodes de sectorisation initiale

		Diamètres disponibles (mm)	Conduites fermées	Diamètre moyen fermé (mm)
RDEP de VMR	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	126383	21	235
	Sectorisation initiale adaptée	126183	24	215
RDEP d'Aylmer	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	183162	33	200
	Sectorisation initiale adaptée	183862	33	185

De plus, la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) considère des conduites d'entrée de diamètre inférieur à celui des conduites d'entrée identifiées par la méthode adaptée. Les diamètres des conduites d'entrée des deux méthodes de sectorisation sont présentés au Tableau 6.6.

Tableau 6.6 Diamètres des conduites d'entrée des secteurs pour les méthodes de sectorisation initiale

		Diamètre conduite d'entrée (mm)	Moyenne des diamètres des conduites d'entrée (mm)
RDEP de VMR	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	200	233
		200	
		300	
	Sectorisation initiale adaptée	300 300 300 250	288
RDEP d'Aylmer	Sectorisation initiale (DiNardo et DiNatale, 2011)	350	325
		300	
	Sectorisation initiale adaptée	400	350
		400 250	

Les modifications apportées à la méthode de sectorisation initiale développée par DiNardo et DiNatale (2011) (donc, la méthode adaptée) apportent des changements dans la représentation hiérarchique du réseau principal ce qui engendre nécessairement une délimitation des secteurs qui est différente. Toutefois, la délimitation des secteurs à partir de cette représentation graphique ne considère pas la fermeture des conduites secondaires (conduites non représentées puisque leurs fréquences sont nulles). La fermeture d'un nombre important de conduites secondaires influence l'*indice de maillage* (section 4.2.5) puisque certains bouts morts sont créés à partir de mailles existantes. Ces changements n'ont pas un impact important sur cet indice comme en témoigne sa faible variation après l'application des deux méthodes de sectorisation initiale aux deux réseaux à l'étude (Tableau 6.4).

L'ajout des fréquences des conduites (équation (4.4)) sur la représentation hiérarchique du réseau principal influence le choix de l'utilisateur qui détermine les conduites à fermer sur le réseau principal : il favorise les conduites qui possèdent les fréquences les plus faibles. Ainsi, les conduites principales (fréquences élevées) possédant des caractéristiques hydrauliques favorables (par exemple : un diamètre élevé ou un coefficient élevé d'Hazen-Williams) dissipent une plus faible énergie tel que démontré par la variation de cet indice au Tableau

6.4. Toutefois, d'autres éléments de la méthode adaptée (présentés ci-après) influencent les indices de performance des réseaux.

La répartition des grands consommateurs (exprimés en équivalent-habitants) par secteur engendre de plus faibles pertes de charges dans les conduites d'entrée des secteurs puisque les débits entrants sont, en principe, mieux équilibrés. Étant donné les plus faibles pertes de charges dans les conduites d'entrée des secteurs et l'identification des conduites possédant des caractéristiques hydrauliques favorables (grands diamètres), la puissance dissipée ou la perte d'énergie en réseau est elle aussi plus faible. C'est ce que reflètent les *indices de puissance dissipée* et de *charge piézométrique totale excédentaire* (section 4.2.5) au Tableau 6.4. Les valeurs obtenues pour ces indices à l'aide de la méthode adaptée sont plus avantageuses, et ce de façon plus marquée pour le réseau de VMR que pour celui d'Aylmer. Ces deux indices sont, par ailleurs, associés aux *indices de résilience* développés par Todini (2000) et par Prasad et Park (2003) (section 4.2.5). La sectorisation du RDEP d'Aylmer selon les deux méthodes améliore l'*indice de la puissance dissipée* et les *indices de résilience*, par rapport au réseau initial. Cette augmentation de la performance du réseau est attribuable à la fermeture de conduites possédant un faible diamètre (Tableau 6.5). L'écoulement se fait donc par des conduites de diamètre plus élevé ; la puissance dissipée dans les conduites de faible diamètre serait normalement élevée mais elle est nulle puisque ces conduites sont fermées. Cette variation de la performance des RDEP découle, en partie, des valeurs des pressions minimales et maximales présentées aux Tableau 4.7 et 4.8. Les pressions minimale et moyenne du RDEP initial de VMR sont supérieures aux pressions minimales et moyennes du RDEP sectorisé ce qui traduit une baisse de performance contrairement aux RDEP initial et sectorisé d'Aylmer où l'inverse est observé (une augmentation de la performance). Bien qu'il s'agisse d'une amélioration pour le RDEP d'Aylmer, elles sont moins marquées que les diminutions observées pour le RDEP de VMR. Une plus faible puissance dissipée et une hauteur piézométrique excédentaire plus élevées se traduisent concrètement par des coûts de pompage inférieurs et une capacité plus élevée à surmonter un bris pour alimenter un usager, ce que montre le Tableau 6.4. La méthode adaptée produit, pour les indices de résilience

également, des valeurs plus avantageuses que la méthode de DiNardo et DiNatale (2011), en particulier pour le réseau de VMR.

Enfin, les zones d'influence considèrent les aspects hydrauliques (la puissance dissipée et la hauteur piézométrique excédentaire), les aspects géographiques (topographie) et les aspects topologiques (proximité des nœuds à une source). Par conséquent, cet ajout à la représentation hiérarchique du réseau principal permet à l'utilisateur d'identifier une configuration où les pertes d'énergie augmentent légèrement comparativement aux RDEP initiaux ce qui se traduit, entre autres, par une légère diminution de la hauteur piézométrique excédentaire ou une légère augmentation de la puissance dissipée (Tableau 6.4) en ce qui concerne le RDEP de VMR. Une augmentation de la performance est observée pour le RDEP d'Aylmer sectorisé par les deux méthodes.

6.1.5 Analyse de la performance de la protection contre les incendies

Étant donné que l'un des rôles des réseaux québécois est de fournir un débit suffisant pour assurer la protection contre les incendies, la méthode de sectorisation adaptée en tient compte, contrairement à la méthode de sectorisation développée par DiNardo et DiNatale (2011). Pour assurer une telle protection, l'ouverture de conduites d'entrée supplémentaires est nécessaire pour les secteurs problématiques, malgré l'obtention d'indices de performance satisfaisants avant l'étape de vérification de la protection contre les incendies. La méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011), lorsqu'appliquée aux réseaux d'étude, nécessite elle aussi l'ouverture de points d'entrée supplémentaires pour l'obtention pressions satisfaisantes (section 4.1.4). Il s'avère intéressant d'examiner la performance de la méthode de DiNardo et DiNatale (2011) en matière de protection contre les incendies, après l'ajout de points d'entrée supplémentaires, et de la comparer à celle de la méthode adaptée. Les résultats sont montrés au Tableau 6.7.

Tableau 6.7 Comparaison de la performance de la sécurité contre les incendies selon les méthodes de sectorisation initiale

		% Capacité	RDEP initial	Méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011)	Méthode adaptée
RDEP de Ville-Mont-Royal	excellent	Plus de 100 %	87%	34%	67%
	bon	>80 % et 100 %	7%	12%	16%
	moyen	>70 % et 80 %	1%	6%	7%
	mauvais	≥50 % et 70 %	3%	36%	7%
	très mauvais	Moins de 50 %	1%	12%	3%
RDEP d'Aylmer	excellent	Plus de 100 %	57%	46%	47%
	bon	>80 % et 100 %	19%	14%	16%
	moyen	>70 % et 80 %	5%	7%	5%
	mauvais	≥50 % et 70 %	9%	19%	18%
	très mauvais	Moins de 50 %	11%	14%	14%

La performance de la protection contre les incendies du RDEP de VMR selon la méthode développée par DiNardo et DiNatale (2011) est faible; près de 50% des BI possèdent une cote qualifiée de « mauvaise » ou de « très mauvaise ». Cette faible performance peut être expliquée par les faits suivants : (1) la protection contre les incendies n'est pas considérée, et (2) la méthode ne favorise pas l'identification des conduites d'entrée de grand diamètre (section 4.2.1). Les résultats du Tableau 6.7 pour les deux méthodes de sectorisation initiale sont le reflet de ce qui est observé aux Figures 6.1 et 6.2. Pour le RDEP de VMR, les pressions les plus élevées et plus « stables » (écarts entre les pressions minimale et maximale) obtenues avec la méthode adaptée sont essentielles pour obtenir une meilleure protection contre les incendies. Pour le RDEP d'Aylmer, les résultats d'une méthode à l'autre varient peu (comme les pressions à la figure 6.2). Tel que présenté à la section 4.4.1, la méthode adaptée présente tout de même une détérioration de la protection contre les incendies par rapport au réseau initial : 10 % des BI possèdent une capacité inférieure à 70% (comparativement à 4% des conduites avant sectorisation), mais cette dégradation demeure somme toute convenable. Une dégradation de la classe qualifiée de « excellente » est constatée (diminution de 20% pour la méthode adaptée contre une diminution de 53% pour la méthode de DiNardo et DiNatale, 2011). Cette diminution a une répercussion sur les classes

inférieures où les pourcentages sont plus élevés comparativement au RDEP initial. Le RDEP d'Aylmer possède, au départ, une performance plutôt faible en matière de protection contre les incendies. L'ajout de points d'entrée pour un secteur problématique (faibles pressions ou faibles capacités incendies) n'améliore donc pas de façon considérable la performance de la protection contre les incendies. La variation maximale de la protection contre les incendies se situe à la classe qualifiée de « excellente » ; une diminution autour de 10% est observée pour les deux méthodes de sectorisation. Cette diminution est principalement distribuée à la côte « mauvaise » où une augmentation des pourcentages est donc constatée (diminution de la performance de la protection contre les incendies). Les deux méthodes de sectorisation tiennent compte des paliers de pression de sorte que les frontières longent, en partie, les paliers de pression (section 5.1.1) et, par conséquent, les performances de la protection contre les incendies sont semblables.

6.1.6 Comparaison des sectorisations initiales avec la sectorisation manuelle pour le réseau de Ville-Mont-Royal

La sectorisation des RDEP de VMR a été exécutée manuellement par un ingénieur de l'entreprise Aqua Data Inc. Les frontières des secteurs du réseau de VMR ainsi que les indices de performance sont présentés à la Figure-A VI-1 et au Tableau-A VI-1. Les indices de performance du réseau sectorisé manuellement sont supérieurs aux indices de performance obtenus à partir de la méthode adaptée. Toutefois, il existe un faible écart entre ces indices. La performance élevée du réseau sectorisé manuellement s'explique par les nombreux points d'entrée (7 points d'entrée sont considérés comparativement à 4 points d'entrée pour la méthode adaptée). De plus, la sectorisation manuelle présente une plus faible perturbation de la protection contre les incendies (Tableau-A VI-2). Encore une fois, ceci est en partie dû aux nombreux points d'entrée de chaque secteur. À titre de comparaison, en ajoutant 2 points d'entrée au réseau sectorisé selon la méthode adaptée (il y a donc 6 points d'entrée), les indices de performance et la protection contre les incendies (Tableau-A VI-2) sont similaires à ceux qui sont obtenus par la méthode manuelle. Dans la méthode adaptée, rien n'empêcherait un utilisateur d'augmenter le nombre de points d'entrée jusqu'à l'obtention de ces résultats, lors de la définition des secteurs initiaux (étapes 3 et 4 de la

Figure 3.1). L'ingénieur qui a exécuté la sectorisation manuelle a effectué un nombre élevé d'itérations (déterminer les conduites principales, la topographie du réseau, les points d'entrée, les vannes à fermer, notamment) pour obtenir la dégradation de la protection contre les incendies la plus faible possible. Ces opérations requièrent de nombreuses heures de travail (évaluées à deux ou trois jours) comparativement à la méthode adaptée qui requiert moins d'une journée de travail. Cette rapidité de sectorisation est l'une des principales contributions de l'informatisation d'une méthode de sectorisation adaptée aux réseaux québécois.

6.2 Comparaison des RDEP sectorisés selon la méthode de sectorisation finale

La méthode de sectorisation finale consiste à déformer les secteurs initiaux afin d'identifier un ensemble de vannes d'isolement à fermer pour créer les secteurs. Tel que vu précédemment, la méthode de sectorisation finale fournit une solution de bonne qualité (au sens de la théorie de l'optimisation) sans parcourir tout le domaine de solutions. C'est pourquoi, dans le cadre de ces travaux, 50 optimisations ont été exécutées afin d'examiner la variabilité de ces solutions (section 5.2). Les résultats obtenus sont analysés dans les sections qui suivent.

6.2.1 Point de vue hydraulique

La méthode de sectorisation finale perturbe les secteurs initiaux (identifiés par la méthode de sectorisation initiale adaptée) en déplaçant des nœuds de part et d'autre de la frontière entre deux secteurs voisins (secteurs initiaux). Les pressions minimales, moyennes et maximales par secteur pour chacune des 50 optimisations sont représentées par les paliers (ligne rouge) à la Figure 6.3 et les lignes verticales noires délimitent les secteurs 1, 2, 3 et 4 de chaque réseau (les numéros des secteurs sont inscrits dans le bas de la Figure 6.3). La ligne noire représente les pressions minimales, moyennes et maximales par secteur des RDEP sectorisés selon la méthode initiale adaptée. Les lignes pointillées oranges délimitent les réseaux et configurations à l'étude soient respectivement les RDEP de VMR en considérant les vannes

disponibles, de VMR en considérant les vannes opérables, d'Aylmer en considérant les vannes disponibles et d'Aylmer en considérant les vannes opérables.

En analysant la Figure 6.3, trois principales conclusions peuvent être tirées : (1) les pressions de chacune des optimisations se trouvent à l'intérieur des valeurs prescrites des 140 et 760 kPa (représentées par les pointillés rouges inférieur et supérieur, respectivement), et (2) les pressions minimales, moyennes et maximales selon les solutions obtenues par l'AG (50 optimisations) ne varient pas de façon importante par rapport aux résultats de la sectorisation initiale, toutefois l'amplitude de la variation tend à augmenter lorsque le cas des vannes opérables est considéré. Cette augmentation est due à une déformation plus importante des secteurs lorsque les vannes opérables sont considérées ce qui fait en sorte qu'une perturbation des pressions aux nœuds à proximité des frontières est généralement observée.

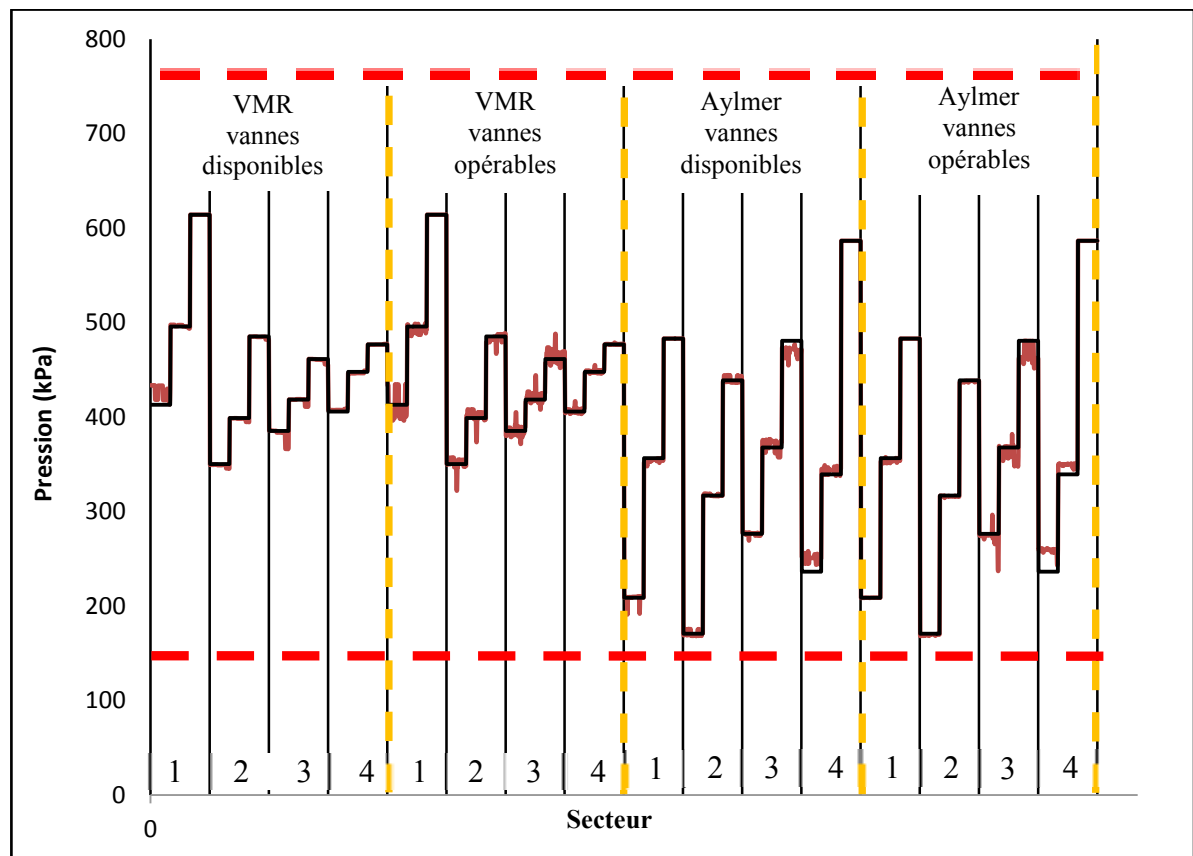


Figure 6.3 Variation des pressions minimales, moyennes et maximales par secteur suite à 50 essais de sectorisation finale pour les RDEP à l'étude

Les vitesses d'écoulement obtenues suite aux 50 optimisations pour chaque réseau sont également analysées. Les écarts des vitesses entre le réseau sectorisé selon la méthode de sectorisation initiale adaptée et le réseau sectorisé selon la méthode de sectorisation finale sont présentés au Tableau 6.8. Les valeurs sont présentées pour la solution qui génère l'écart maximal par rapport aux résultats de la sectorisation initiale. Il existe donc de faibles variations des écarts maximaux des vitesses d'écoulement. C'est pourquoi, il peut être affirmé que les conditions hydrauliques des différentes solutions obtenues suite à l'application de la méthode de sectorisation finale sont semblables. Dans le cas du réseau d'Aylmer, en particulier, les vitesses d'écoulement tendent à augmenter puisque les pourcentages de conduites respectant la vitesse minimale recommandée sont plus élevés qu'avant la sectorisation.

Tableau 6.8 Écarts maximaux (50 optimisations) des vitesses d'écoulement suite à l'application de la méthode de sectorisation finale

		Vannes disponibles		Vannes opérables	
		Vitesse supérieure à 0,3 m/s	Vitesse inférieure à 3,0m/s	Vitesse supérieure à 0,3 m/s	Vitesse inférieure à 3,0m/s
		%	%	%	%
RDEP de Ville-Mont-Royal	Sectorisation initiale adaptée	28	100	28	100
	Sectorisation finale	27	100	31	100
	Différence maximale	-1	0	3	0
RDEP d'Aylmer	Sectorisation initiale adaptée	14	99	14	99
	Sectorisation finale	18	99	18	99
	Différence maximale	4	0	4	0

6.2.2 Point de vue de la performance des RDEP

La méthode de sectorisation finale identifie l'ensemble des vannes d'isolement à fermer lorsqu'une conduite à la frontière de deux secteurs ne possède pas de vannes. Le nombre de conduites fermées est donc bien souvent supérieur puisque, les réseaux étant maillés, plus d'une vanne d'isolement doit être opérée pour compenser l'absence de vannes. Par conséquent, l'*indice de diamètre disponible* des solutions obtenues par la méthode de

sectorisation finale est inférieur à la valeur comptabilisée pour le réseau sectorisé selon les méthodes de sectorisation initiale.

Il importe d'analyser les différences des écarts pour l'ensemble des indices de performance des solutions obtenues suite à l'application de la méthode de sectorisation finale. Les indices de performance sont nécessairement modifiés puisque les frontières sont perturbées (certains nœuds ont changé de secteur). Le Tableau 6.9 montre la variation des indices de performance des différentes solutions obtenues par l'AG, pour la sectorisation finale. Les valeurs sont présentées pour la solution qui génère, par indice, l'écart maximal par rapport aux résultats de la sectorisation initiale.

Tableau 6.9 Écarts maximaux (50 optimisations) des indices de performance suite à l'application de la méthode de sectorisation finale

		VMR vannes disponibles	VMR vannes opérables	Aylmer vannes disponibles	Aylmer vannes opérables
Écarts maximaux	Indice diamètre disponible	-0,6%	-1,7%	0,6%	-0,7%
	Indice hauteur piézométrique excédentaire	-1,5%	-1,9%	1,3%	2,3%
	Indice maillage	-0,9%	-3,8%	-1,3%	-4,1%
	Indice puissance dissipée	1,7%	-9,3%	17,2%	5,8%
	Indice résilience développé par (Prasad et Park, 2003)	-0,4%	0,3%	1,4%	2,1%
	Indice résilience développé par (Todini, 2000)	-0,5%	-0,4%	-2,9%	-1,0%
	Protection contre les incendies (valeur absolue)	4%	5%	5%	7%

Un écart négatif signifie que la valeur obtenue à partir de la sectorisation finale est inférieure à la valeur correspondant à la sectorisation initiale adaptée (perte de performance), sauf dans le cas de l'*indice puissance dissipée* (où une augmentation indique une perte de performance). Les résultats montrent que la méthode de sectorisation finale, en perturbant les frontières, engendre généralement une dégradation des conditions hydrauliques, c'est pourquoi un écart défavorable est observé pour la majorité des valeurs présentées au Tableau

6.9. Ces écarts demeurent, en général, plutôt faibles. Toutefois, *l'indice de la puissance dissipée* montre des variations plus importantes. Cet indice est sensible aux perturbations des frontières comme en témoignent les écarts plus élevés, de -9,3% et 17,2% (vannes opérables VMR et vannes disponibles Aylmer, respectivement). Les écarts élevés de cet indice sont attribuables à la fermeture de plusieurs conduites (fermeture et/ou introduction des vannes d'isolement) par la méthode de sectorisation finale, laquelle est modélisée dans le logiciel aquaGEO par la fermeture complète des conduites (aucun écoulement n'est permis dans ces conduites). Par conséquent, la puissance dissipée dans ces conduites est nulle. En effectuant la sommation de la puissance dissipée de toutes les conduites du réseau, *l'indice de la puissance dissipée* est nécessairement moins élevé. Ceci explique l'écart négatif important de -9,3% présenté au Tableau 6.9. De plus, la modélisation de la puissance nulle dans une conduite fermée peut avoir pour effet de permettre des débits plus importants dans certaines conduites : la puissance dissipée est supérieure. Ceci explique l'écart positif important de 17,2% présenté au Tableau 6.9.

Étant donné la faible variation, globalement, des indices de performance obtenus selon la méthode de sectorisation finale, une faible variation de la protection contre les incendies est attendue. La simulation de la protection contre les incendies a été exécutée pour chacune des solutions obtenues pour chaque réseau (considérant les vannes disponibles et les vannes opérables). Les écarts maximaux (en valeur absolue) pour la classe qui a le plus varié sont présentés au Tableau 6.9. De plus, il existe une de faibles augmentation des pourcentages des classes possédant les cotes « mauvaise » ou « très mauvaise », soient des augmentations maximales de 2%, 3%, 3% et 4%, respectivement, pour le RDEP de VMR en considérant les vannes disponibles, le RDEP de VMR en considérant les vannes opérables, le RDEP d'Aylmer en considérant les vannes disponibles et le RDEP d'Aylmer en considérant les vannes opérables sont observées. Cette baisse de performance correspond physiquement à la dégradation de la performance de deux à trois BI sur l'ensemble du réseau. Suite à l'obtention d'une solution optimisée, une analyse de l'occupation du territoire à proximité des BI qui ont une cote « mauvaise » ou « très mauvaise » doit être envisagée. Dans le cas d'une dégradation jugée trop importante pour une BI, un point d'entrée peut être ajouté au

secteur où se situe cette même BI. Les plus grandes variations des pourcentages de la protection contre les incendies se retrouvent à la classe qualifiée d'«excellente». Ces variations correspondent à une dégradation de la performance de la protection contre les incendies (sauf pour le RDEP de VMR en considérant les vannes disponibles). Un tel résultat n'est, en pratique, pas surprenant puisque la pression résiduelle à chaque nœud s'approche de la pression minimale d'opération de 140 kPa. Ainsi, une faible variation des conditions hydrauliques modifie les pourcentages associés à la classe «excellente» contrairement à un écart permis de 20% pour la classe qualifiée de «bonne» (entre 100% exclusivement et 80% inclusivement).

Pour les deux RDEP à l'étude, la solution possédant la valeur minimale de la fonction objectif n'est pas nécessairement la solution la meilleure en ce qui a trait aux indices de performance. L'inverse est aussi vrai, c'est-à-dire que la solution présentant la valeur maximale de la fonction objectif n'est pas nécessairement celle qui donne lieu aux pires valeurs des indices de performance (sauf pour le RDEP de VMR en considérant les vannes disponibles). Toutefois, toutes les solutions obtenues présentent des performances semblables (indices de performance et performance contre les incendies).

6.2.3 Point de vue de l'optimisation

Tel que démontré aux Tableaux 5.1 et 5.2 à la section 5.4, les valeurs que prennent les critères de la fonction objectif varient considérablement d'un réseau à l'autre et selon la quantité de vannes d'isolement à proximité des frontières (le nombre de vannes d'isolement disponibles versus le nombre de vannes d'isolement opérables). Les densités de vannes d'isolement présentes au voisinage des frontières définies par la sectorisation initiale (conduites comprises entre les nœuds à une distance de trois des nœuds de part et d'autre de la conduite à la frontière sans vanne, section 5.1) sont répertoriées au Tableau 6.10. Ces densités constituent un facteur prépondérant dans l'identification de l'ensemble des vannes aux frontières.

Tableau 6.10 Densité des vannes d'isolement aux frontières des secteurs

		Densité des vannes (vanne/conduite)
RDEP de VMR	Vannes d'isolement existantes	0,74
	Vannes d'isolement opérables	0,52
RDEP d'Aylmer	Vannes d'isolement existantes	0,62
	Vannes d'isolement opérables	0,44

Une concentration importante de vannes d'isolement à proximité de la frontière engendre un nombre de solutions réduit tel que présenté aux Tableaux 5.1 et 5.2. Lors du processus d'optimisation, le domaine de solutions est élevé mais la déformation minimale par le changement de quelques nœuds d'un secteur à l'autre est plus facilement identifiable contrairement à une déformation des secteurs plus importante (considération des vannes opérables). Une faible densité des vannes d'isolement fait en sorte que le nombre de solutions différentes trouvées est augmenté puisque l'introduction de vannes d'isolement sur les conduites est considérée. Ainsi, une combinaison entre la variation de nœuds d'un secteur à l'autre et l'introduction de vannes d'isolement est considérée (pour les vannes opérables) comparativement à seule la variation de quelques nœuds d'un secteur à l'autre (vannes disponibles). La relation entre le nombre de conduites à la frontière sans vanne d'isolement et le nombre de solutions obtenues dans le processus d'optimisation est proportionnelle. Par exemple, pour le RDEP de VMR, lorsque les cas des vannes disponibles et des vannes opérables sont considérés, 7 et 25 solutions sont obtenues, et 5 et 17 conduites aux frontières ne possèdent pas de vanne d'isolement, respectivement.

La fonction objectif de la méthode de sectorisation finale présentée aux équations (5.1) et (5.2) est composée de trois critères multipliés par leur coefficient de pénalité respectif. La valeur de chaque coefficient indique l'ordre de priorité des critères; plus le coefficient de pénalité est élevé, plus le critère associé à ce coefficient est important. Ainsi, le critère $j(x)$

multiplié par son coefficient de pénalité (100 000) qui représente l'absence de vanne d'isolement est le plus important. De plus, l'utilisateur priorise la fermeture d'un moins grand nombre de conduites (coefficient de pénalité égal à 200) comparativement à la déformation des secteurs initiaux (coefficient de pénalité égal à 5). Ces coefficients de pénalité peuvent varier en fonction des priorités d'un autre utilisateur. Dans l'éventualité de l'optimisation d'un réseau de plus grande ampleur, il est possible d'ajuster ces coefficients tout en s'assurant que les critères multipliés par leur coefficient de pénalité ne génèrent pas de chevauchements dans l'espace des solutions (Annexe V).

Le critère auquel une plus grande importance doit être accordée est celui de $j(x)$ (section 5.1.5), lequel indique le nombre de vannes d'isolement à insérer pour former les secteurs. La valeur de ce critère fait référence à la formation de secteurs temporaires ou permanents : si cette valeur est nulle, les secteurs peuvent être implantés sans l'insertion de vannes d'isolement (sectorisation temporaire possible). D'après les RDEP à l'étude, seul le RDEP de VMR en considérant les vannes disponibles et les vannes opérables peut être sectorisé sans l'insertion de vannes d'isolement c'est-à-dire qu'il existe au moins une solution selon laquelle la valeur de la fonction objectif est inférieure à 100 000 (Tableaux 5.1 et 5.2). Pour ce RDEP, en considérant les vannes disponibles (Tableau 5.1), toutes les solutions sont liées aux critères sur le nombre de vannes à fermer et à la déformation des secteurs initiaux. En tenant compte des vannes opérables, seules les 16 premières solutions (les valeurs de la fonction objectif entre 5740 et 7335) se retrouvent dans la même situation. Le RDEP d'Aylmer requiert l'insertion d'une vanne d'isolement lorsque les vannes disponibles sont considérées pour la plupart des solutions obtenues (les valeurs de la fonction objectif entre 106520 et 108075 au Tableau 5.1) sauf dans le cas des deux dernières solutions (les valeurs de la fonction objectif égales à 206 880 et 207 895) où l'insertion de deux vannes d'isolement est nécessaire.

Afin de déterminer une solution où aucune vanne d'isolement n'est introduite, le domaine de recherche pourrait être agrandi par la considération d'un plus grand nombre de nœuds (donc, d'un plus grand nombre de conduites) de part et d'autre des frontières des secteurs initiaux.

Cette opération a été exécutée en considérant les nœuds se trouvant à une distance de 5 nœuds de part et d'autre des conduites aux frontières. L'augmentation de ce domaine montre que le nombre de solutions qui considèrent uniquement la fermeture de vannes d'isolement (au lieu d'introduire une ou des vanne(s) d'isolement) est quelque peu augmenté (une et deux solutions supplémentaires, respectivement, pour les RDEP de VMR et d'Aylmer en considérant les vannes d'isolement opérables). Ceci représente une amélioration pour le RDEP d'Aylmer où deux solutions ne considèrent pas l'introduction de vannes d'isolement. Toutefois, la plupart des solutions obtenues ne révèlent aucun changement significatif par rapport aux résultats des tableaux 5.1 et 5.2 mais cette démarche augmente le temps de calcul. Ceci est dû, en partie, à l'exploration d'un très grand domaine (plus de 10^7 solutions possibles par optimisation). Toutefois, en optimisation, un compromis quant à la qualité de la solution réside dans la proximité de la solution optimale et de la rapidité de l'obtention de la solution (Hillier et Lieberman, 2005).

CONCLUSION

La stratégie québécoise d'économie de l'eau potable a été élaborée dans le but de réduire, d'une part, la consommation des québécois et, d'autre part, le volume associé aux pertes. Les municipalités québécoises doivent donc développer un plan d'action qui regroupe des techniques de détection, localisation et réparation des fuites. La sectorisation des RDEP est l'un des moyens à la portée des municipalités. Elle permet : (1) de comptabiliser le volume des pertes d'eau dans chaque secteur, (2) de répertorier les nouvelles fuites et bris de conduites dans un secteur et (3) de gérer la pression par secteur afin d'opérer l'ensemble du réseau à un niveau de pression optimal.

Dans la littérature, il existe quelques méthodes de sectorisation informatisée. Toutefois, celles-ci sont majoritairement appliquées aux réseaux européens qui sont différents des RDEP québécois de par leur topologie (les RDEP européens sont plus ramifiés), leur fonction (les RDEP québécois assurent la protection contre les incendies) et leur conception (les RDEP européens sont conçus en tenant compte de la formation des secteurs dès la phase de conception). Les objectifs de la méthode de sectorisation développée dans ce mémoire sont : (1) d'adapter la méthodologie de sectorisation permanente initiale développée par DiNardo et DiNatale (2011) aux RDEP québécois, et (2) d'établir les frontières des secteurs finaux en considérant les vannes disponibles et opérables selon la déformation minimale des secteurs initiaux.

Le processus de sectorisation initiale élaboré dans ces travaux est heuristique et implique la participation de l'utilisateur dans l'obtention d'une solution. Cette méthode repose, en partie, sur l'expérience de l'utilisateur qui est influencé par la représentation graphique des grands consommateurs, des zones d'influence et des conduites qui possèdent des caractéristiques physiques favorables. Cette méthode peut s'appliquer aux RDEP québécois qui assurent la protection contre les incendies puisque cette méthode identifie les conduites aux frontières appropriées et les conduites d'entrée adéquates comme en témoigne l'application de cette méthode aux deux RDEP. De plus, ces travaux se démarquent par l'identification des vannes

d'isolement à fermer ou à insérer pour la formation des secteurs ce que les autres travaux présentés dans la littérature ne considèrent pas. L'un des principaux bénéfices de l'utilisation de la méthode adapté réside dans son informatisation ce qui accélère le temps requis pour la détermination des secteurs comparativement à la méthode manuelle présentement utilisée par les ingénieurs de l'entreprise Aqua Data Inc.

Le processus de sectorisation requiert l'intervention de l'utilisateur pour la définition des frontières. Il est donc possible d'obtenir une solution différente d'un utilisateur à un autre. Toutefois, les solutions sont semblables (sur les plans hydraulique et topologique) puisque les contraintes (règles décisionnelles) restreignent les possibilités de solutions. Par contre, l'utilisateur pourrait éprouver des difficultés à définir les frontières des secteurs lorsque les RDEP sont d'une grande ampleur (présence de beaucoup de nœuds). Afin de remédier à cette situation, l'utilisateur peut effectuer une première sectorisation à un niveau de détail réduit (par exemple, définir deux secteurs de grande taille) et, par la suite, déterminer de plus petits secteurs à l'intérieur de grands secteurs (diviser les deux premiers secteurs en deux pour obtenir quatre secteurs).

La méthode de sectorisation finale peut s'avérer un outil utile pour le choix des vannes à manipuler lors du nettoyage du réseau (par exemple, le rinçage unidirectionnel). Ainsi, lorsqu'une vanne ne peut pas être opérée dans le processus du rinçage unidirectionnel, cette méthode peut identifier rapidement un ensemble de vannes d'isolement à fermer. L'application terrain de la méthode de sectorisation développée dans ce mémoire peut s'avérer intéressante dans le sens où une comparaison du modèle hydraulique du réseau sectorisé peut s'effectuer avec les prises de mesure terrain pour confirmer les résultats théoriques avant l'implantation permanente des secteurs sur le RDEP. De plus, il serait intéressant d'appliquer cette méthode de sectorisation à plusieurs autres RDEP québécois afin de ressortir, de façon évidente, les principales forces et faiblesses de cette méthode. Avant l'implantation terrain des secteurs, il peut être pertinent d'étudier la possibilité d'introduire un débitmètre lorsque l'absence de vanne sur une conduite à la frontière implique la fermeture d'un nombre important de vannes. De plus, bien que ces travaux

n'abordent pas la sélection des débitmètres en tête de secteurs, cet élément est important lorsque (1) le régime dynamique est considéré puisqu'il peut avoir un inversement d'écoulement dépendamment de la période de la journée (lien bidirectionnel) et (2) les vitesses dans les conduites sont trop faibles (imprécision des débitmètres).

De futurs travaux pourraient considérer, de façon formelle, la présence des surpresseurs et des réducteurs dans la détermination des frontières des secteurs puisque la considération de ces éléments pourrait favoriser une performance hydraulique encore meilleure des RDEP. Au même titre que les indices de performance et de performance de la protection contre les incendies, l'intégration d'une analyse plus rigoureuse des temps de séjour et de la qualité de l'eau pourrait être effectuée avant l'implantation terrain des secteurs.

ANNEXE I

CONCEPTS DE LA MODÉLISATION D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Cette annexe traite des principaux éléments physiques et des configurations topologiques des RDEP. La modélisation des réseaux est exposée selon les concepts de la théorie des graphes et de la simulation hydraulique afin d'identifier les variables essentielles à l'analyse des réseaux. Les principaux éléments de base, pour une compréhension générale, sont présentés.

Composantes et disposition d'un réseau de distribution d'eau potable

Les RDEP sont constitués de deux principaux éléments soient les liens (conduites) et les intersections (nœuds) dont les positions et fonctions diffèrent tel qu'exposé dans les sections qui suivent.

Composantes physiques d'un réseau

Les intersections sont associées aux nœuds qui peuvent représenter la consommation d'eau d'un usager ou d'un groupe d'usagers, une source d'alimentation du réseau ou un réservoir de stockage, une BI ou simplement la jonction entre des conduites dont les caractéristiques physiques diffèrent (diamètre, coefficient de frottement interne, matériau, âge). Les conduites, qui sont les liens entre ces nœuds, sont généralement utilisées pour localiser les vannes (par exemple : vannes d'isolement permettant d'isoler une ou plusieurs conduites, vannes à clapet de non-retour imposant la direction de l'écoulement ou encore VRP modulant la pression en aval). La Figure-A I-1 schématise les principaux éléments d'un RDEP qui sont mentionnés tout au long du présent mémoire.

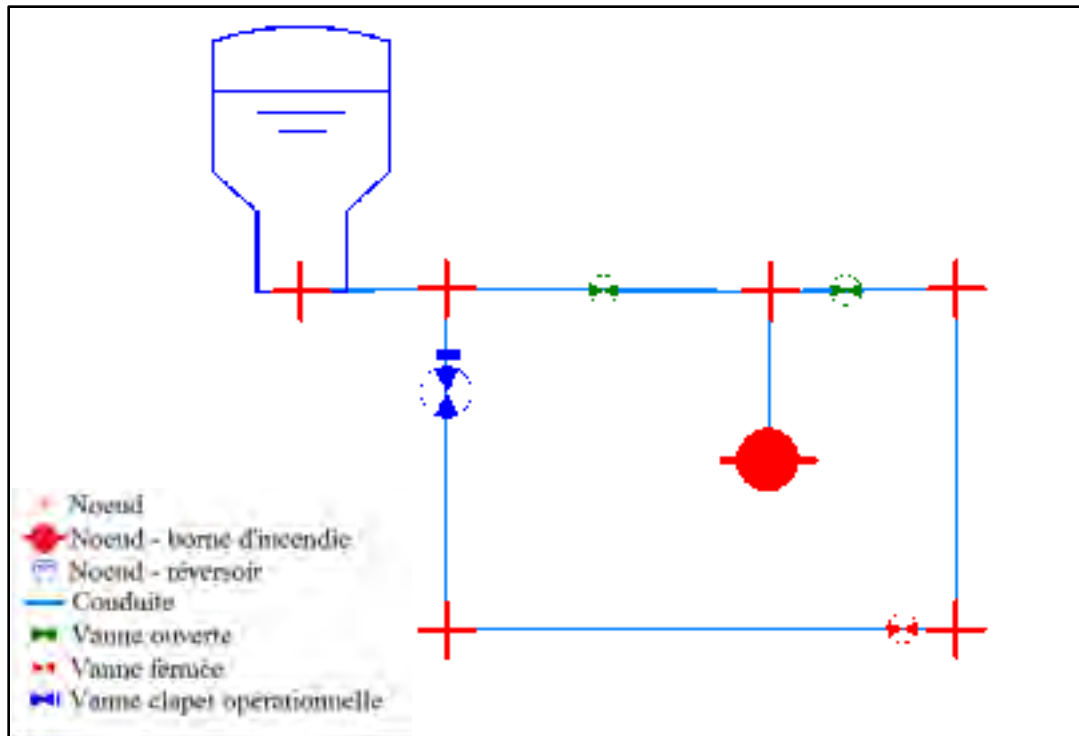


Figure-A I-1 Représentation des principales composantes physiques d'un RDEP

Disposition topologique d'un réseau

Un RDEP est conçu selon deux principales configurations topologiques, soient les réseaux arborescents ou maillés. Un réseau arborescent consiste en une succession de conduites en série permettant un seul chemin d'écoulement entre chaque paire de nœuds du réseau. Toutefois, lorsqu'une interruption de service se produit soit par un bris ou une intervention d'entretien, la totalité des usagers situés en aval sont privés d'eau : le réseau est vulnérable. Un réseau maillé est organisé de façon à obtenir plusieurs mailles. Par rapport au réseau arborescent, la vulnérabilité d'un réseau maillé est plus faible étant donné l'existence de plus d'un chemin entre chaque paire de nœuds. Les Figures-A I-2 et I-3 présentent les différentes configurations topologiques des RDEP. Le plus souvent, un réseau est en partie maillé et en partie ramifié (arborescent) : les centres des villes et les quartiers à forte densité de population sont ainsi desservis par les parties maillées, alors que les quartiers périphériques le sont par les parties ramifiées (Brière, 2012). En règle générale, la combinaison des deux types de configuration topologique permet de réduire la présence de bouts morts (extrémités

des arborescences) où la qualité de l'eau est souvent problématique en raison de temps de résidence en réseau élevés (Walski et al., 2003).

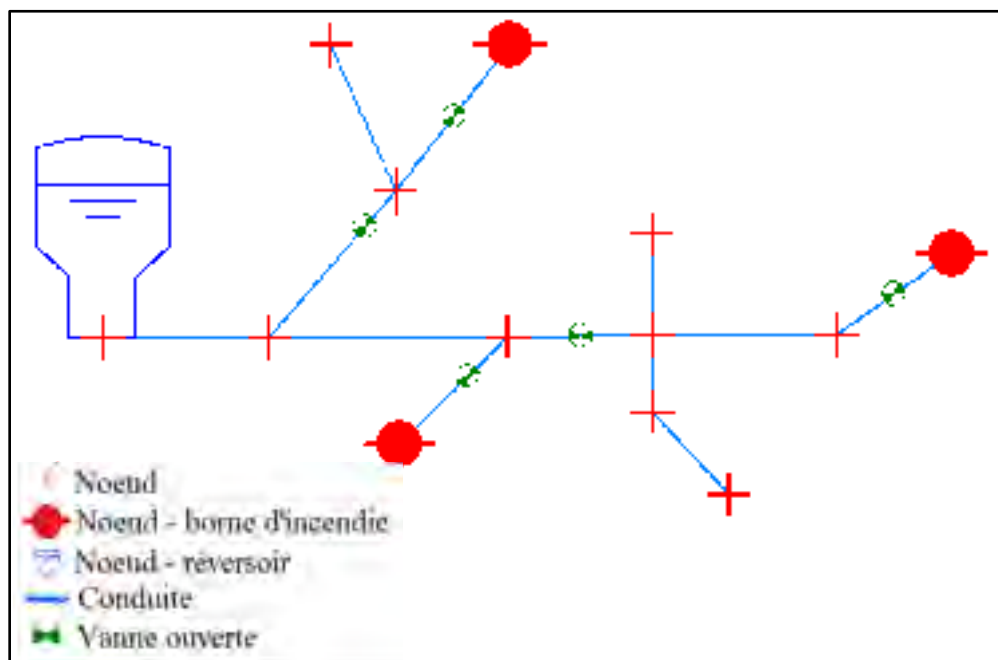


Figure-A I-2 Représentation schématisée d'un RDEP arborescent

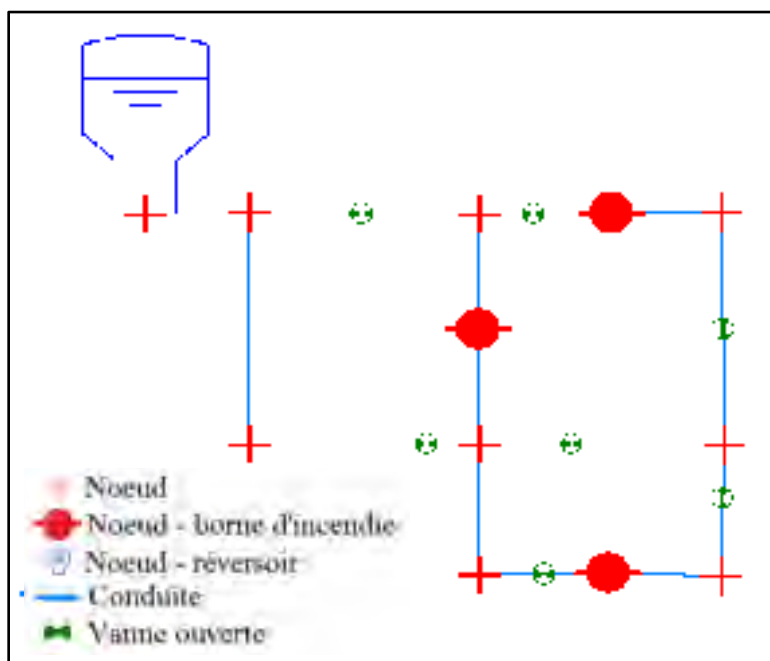


Figure-A I-3 Représentation schématisée d'un RDEP maillé

Analyse de l'écoulement dans un réseau de distribution d'eau potable

À chaque point d'un RDEP, une valeur d'énergie unique exprimée par unité de masse (J/kg ou m^2/s^2), de volume (J/ m^3 ou Pa) ou de poids (J/N ou m) est associée. Cette énergie est exprimée sous la forme de (1) l'énergie pression, (2) l'élévation (énergie potentielle) et (3) l'énergie cinétique (énergie de vitesse). Compte tenu des consommations imposées par les usagers, l'eau s'écoule dans les conduites d'un point de départ ayant une énergie supérieure à l'énergie associée au point d'arrivée. L'énergie dissipée entre ces points correspond aux pertes de charge. Les buts d'une simulation hydraulique sont de déterminer les sens d'écoulement dans les conduites, les débits et les pressions sur l'ensemble du réseau sous différentes conditions d'opération et suivant les patrons de consommation par les usagers. Une simulation hydraulique peut s'effectuer selon trois types de régimes : (1) permanent, (2) dynamique ou (3) transitoire. Le régime permanent, pris en compte dans les travaux du présent mémoire, considère des conditions hydrauliques invariables dans le temps c'est-à-dire, par exemple, que les consommations des usagers, les niveaux d'eau dans les réservoirs et les hauteurs manométriques des pompes demeurent constants. Ces conditions sont représentatives de l'opération du réseau, en moyenne dans le temps, pour un scénario particulier. Pour le lecteur intéressé, les autres régimes sont décrits dans AWWA (2009).

L'analyse de l'écoulement de l'eau en réseau est régie par deux équations soient : (1) l'équation de conservation de la masse et (2) l'équation de conservation de l'énergie.

$$\sum_{j=1}^P Q_j + C_i = 0 \quad (\text{A I-1})$$

où Q_j est le débit [m^3s^{-1}] dans de la conduite j liée au nœud i agissant comme volume de contrôle, C est la consommation [m^3s^{-1}] entrante ou sortante au nœud i et P est le nombre de conduites incidentes au nœud i . Cette équation exprime le fait qu'en tout nœud d'un réseau la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortants.

Équation de la conservation de l'énergie

L'équation de Bernoulli permet d'exprimer la conservation de l'énergie entre deux nœuds d'un réseau peu importe le chemin emprunté :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + \sum h_p = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f + \sum h_s \quad (\text{A I-2})$$

où Z est l'élévation (charge potentielle) [m], P est la pression [Pa], γ est le poids spécifique du fluide [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$], v est la vitesse [m s^{-1}], g est l'accélération gravitationnelle [m s^{-2}], h_p est la hauteur manométrique d'une pompe présente sur le parcours entre le point 1 et 2 [m], h_f est la perte de charge linéaire associée au frottement dans les conduites entre ces deux points [m], et h_s est la perte de charge associée aux singularités se trouvant entre ces deux points [m]. Cette dernière est habituellement négligée puisqu'elle est faible comparativement aux pertes linéaires qui sont générées par l'écoulement de l'eau dans plusieurs kilomètres de conduites (Walski et al., 2003). En Amérique du Nord, les pertes de charges par frottement (ou linéaires) sont calculées principalement selon l'équation de Hazen-Williams (Rossman, 2000):

$$h_f = \left(\frac{3,592}{C_{HW}} \right)^{1,852} \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,852} \quad (\text{A I-3})$$

où 3,592 est un facteur de conversion dans le système d'unités international (SI), C_{HW} est le coefficient de Hazen-Williams qui dépend du type de matériau et de l'âge de la conduite (un coefficient C_{HW} élevé signifie que le matériau de la conduite génère une faible perte de charge par frottement et/ou qu'elle est jeune, et inversement), D est le diamètre interne de la conduite [m], L est la longueur de la conduite [m] et Q est le débit [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$].

Dans plusieurs applications d'analyse des RDEP, l'énergie de vitesse est négligée, étant beaucoup plus faible que les énergies potentielles et de pression (Walski et al., 2003). C'est le cas notamment des simulations hydrauliques exécutées par le logiciel aquaGEO.

Paliers de pression

Les paliers de pression représentent des portions de réseau caractérisées par des conditions topographiques similaires. Au sein d'un réseau où la topographie varie sensiblement, il est possible de diviser le réseau en plusieurs zones indépendantes les unes des autres au point de vue de la pression (Brière, 2012). Les nœuds situés à une élévation élevée ont généralement une énergie de pression plus faible que les nœuds se trouvant à une plus faible élévation. L'insertion d'une VRP (si l'écoulement se fait d'une élévation élevée vers une faible élévation) ou d'un poste de surpression (si l'écoulement se fait d'une faible élévation vers une élévation élevée) est exécutée afin d'observer une faible variation de pression d'un palier de pression à un autre tel que montré à la Figure-A I-4.

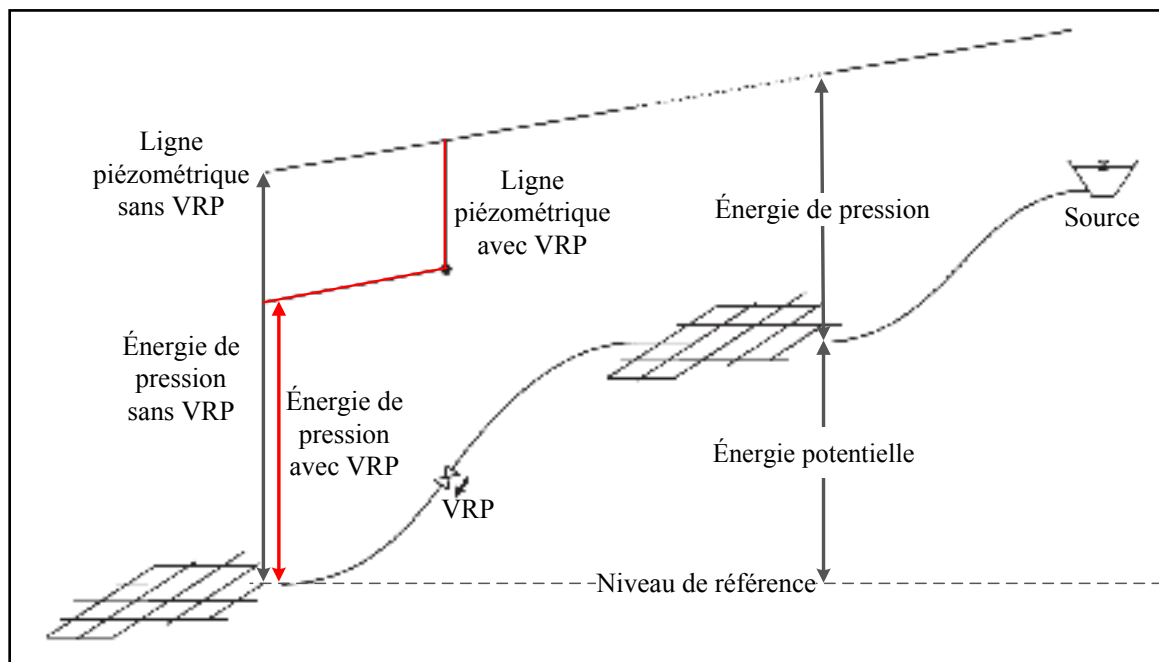


Figure-A I-4 Exemple de paliers hydrauliques
Adapté de Walski et al., (2003, p. 105)

Représentation d'un RDEP selon la théorie des graphes

La connectivité entre les composantes primaires (nœuds et conduites) des RDEP peut être exprimée à l'aide de principes provenant de la théorie des graphes. Cette section définit les

concepts et les définitions de base utiles pour la compréhension de la modélisation des réseaux.

Graphes et graphes dirigés

Un RDEP est représenté par un graphe simple $G = (V, E)$ où V est l'ensemble des sommets (ou nœuds), $V = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_N)$, et E est l'ensemble des arêtes (ou conduites), $E = (e_1, e_2, e_3, e_M)$ (Figure 3.5). La paire de sommets d'extrémités v_i et v_j de l'arête e_l est notée $e_l = (v_i, v_j)$. Selon la Figure 3.5, l'arête e_4 s'exprime $e_4 = (v_3, v_5)$ ou $e_4 = (v_5, v_3)$. Par convention, les lettres $N = |V|$ et $M = |E|$ sont respectivement le nombre de sommets et le nombre d'arêtes dans le graphe G .

Un graphe dirigé $J = (V, U)$ est composé de l'ensemble des sommets V et de l'ensemble des arcs U . Un arc u_l représente une paire de sommets $u_l = (v_i, v_j)$. Toutefois, les sommets v_i et v_j sont respectivement le sommet initial et le sommet terminal donc un sens de parcourt (ou un sens d'écoulement dans le cas d'un RDEP) est considéré du sommet v_i vers le sommet v_j . Le graphe dirigé J est obtenu suite à la simulation hydraulique (les sens d'écoulement sont déterminés). Par exemple, l'arc u_2 s'exprime uniquement par $u_2 = (v_2, v_3)$ tel qu'illustré à la Figure-A I-5.

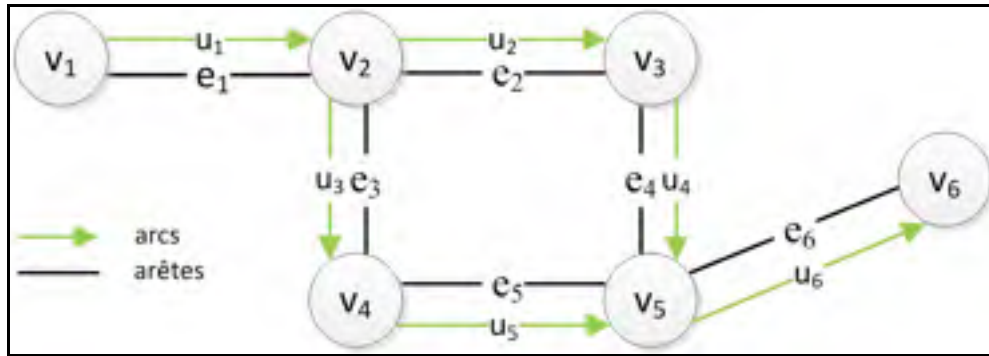


Figure-A I-5 Représentation du graphe simple G (arêtes en noir) et du graphe dirigé J (arcs en vert)

Matrice d'incidence, matrice d'adjacence, matrice d'adjacence valuée

Il est possible d'appliquer la théorie des graphes aux RDEP par la formation de la matrice d'adjacence. Cette matrice, de dimension $N \times N$, représente les interactions entre les sommets (nœuds) pour identifier, par exemple, les sommets atteignables à partir de chaque sommet (d'un réseau). Dans le cas d'un RDEP, cette matrice est pertinente afin d'évaluer si un nœud est déconnecté d'une source ou d'un réservoir de stockage. La méthode d'élaboration de la matrice d'adjacence $A = [a_{ij}]$ du graphe non valué et non orienté se fait selon les règles suivantes :

$$a_{ij} \begin{cases} 1, & \text{si le nœud}_i \text{ est adjacent au nœud}_j \\ 0, & \text{si le nœud}_i \text{ n'est pas adjacent au nœud}_j \end{cases} \quad (\text{A I-4})$$

La matrice d'adjacence A du graphe simple G (Figure-A I-5) est présentée au Tableau-A I-1. Celle-ci est symétrique puisque le sens d'écoulement n'est pas considéré. Lorsque la matrice A est symétrique, pour chaque élément a_{ij} , la valeur a_{ji} est égale ($a_{ij} = a_{ji}$).

La matrice d'adjacence valuée (pondérée) de coût C et orientée $A' = [a'_{ij}]$ représente les interactions entre les nœuds d'un RDEP en considérant les sens d'écoulement dans les conduites déterminés par une simulation hydraulique. Le coût C de la matrice A' est, par exemple, le temps de parcourt, la différence d'élévation ou la perte de charge entre les nœuds

i et les nœuds j . La matrice d'adjacence A' du réseau du graphe J est présentée au Tableau-A I-2 où les coûts de cette matrice sont les pertes de charge ($C_{u1}=5$, $C_{u2}=8$, $C_{u3}=5$, $C_{u4}=10$, $C_{u5}=20$, $C_{u6}=7$).

Tableau-A I-1 Matrice d'adjacence du graphe simple G de la Figure-A I-5

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	1	0	0	0	0
v_2	1	0	1	1	0	0
v_3	0	1	0	0	1	0
v_4	0	1	0	0	1	0
v_5	0	0	1	1	0	1
v_6	0	0	0	0	1	0

Tableau-A I-2 Matrice d'adjacence valuée du graphe orienté J de la Figure-A I-5

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	5	0	0	0	0
v_2	0	0	8	5	0	0
v_3	0	0	0	0	10	0
v_4	0	0	0	0	20	0
v_5	0	0	0	0	0	7
v_6	0	0	0	0	0	0

La représentation d'un RDEP peut aussi s'effectuer selon l'incidence des arcs (conduites en considérant le sens de l'écoulement) aux sommets (nœuds). Par exemple, l'arc u_2 est incident au sommet v_3 (Figure-A I-5). La matrice d'incidence $I = [i_{ij}]$ de dimensions $N \times M$ est formée selon les règles suivantes :

$$i_{ij} \begin{cases} 1, & \text{si la conduite}_j \text{ est incidente entrante au nœud}_i \\ -1, & \text{si la conduite}_j \text{ est incidente sortante au nœud}_i \\ 0, & \text{si la conduite}_j \text{ n'est pas incidente au nœud}_i \end{cases} \quad (\text{A I-5})$$

Le Tableau-A I-3 présente la matrice d'incidence du graphe orienté J de la Figure-A I-5. Il est possible de déterminer rapidement, par l'analyse de cette matrice, les sommets qui agissent comme des sources c'est-à-dire le nœud v_1 (absence de la valeur -1 sur la ligne correspondant au nœud analysé) ou les sommets terminaux des bouts morts c'est-à-dire le nœud v_6 (absence de la valeur 1 sur la ligne correspondant au nœud analysé).

Tableau-A I-3 Matrice d'incidence du graphe orienté J de la Figure-A I-5

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
v_1	1	0	0	0	0	0
v_2	-1	1	1	0	0	0
v_3	0	-1	0	1	0	0
v_4	0	0	-1	0	1	0
v_5	0	0	0	-1	-1	1
v_6	0	0	0	0	0	-1

Définition d'un chemin

Un chemin P est une succession de sommets d'un graphe orienté J qui permet de joindre un sommet v_i à un sommet v_j . Par exemple, selon la Figure-A I-5, l'atteinte du sommet v_5 à partir du sommet v_1 correspond au chemin $P_1 = (v_1, v_2, v_3, v_5)$ ou au chemin $P_2 = (v_1, v_2, v_4, v_5)$. De plus, un chemin peut s'exprimer selon une succession d'arcs $P_3 = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ ou $P_4 =$

(u_1, u_3, u_5) , à la Figure-A I-5. Un graphe est dit connexe si entre chaque paire de sommets v_i et v_j , il existe une chaîne S (chemin à partir d'un graphe non orienté).

ANNEXE II

REPRÉSENTATION HIÉRARCHIQUE DES MÉTHODES DE SECTORISATION INITIALE

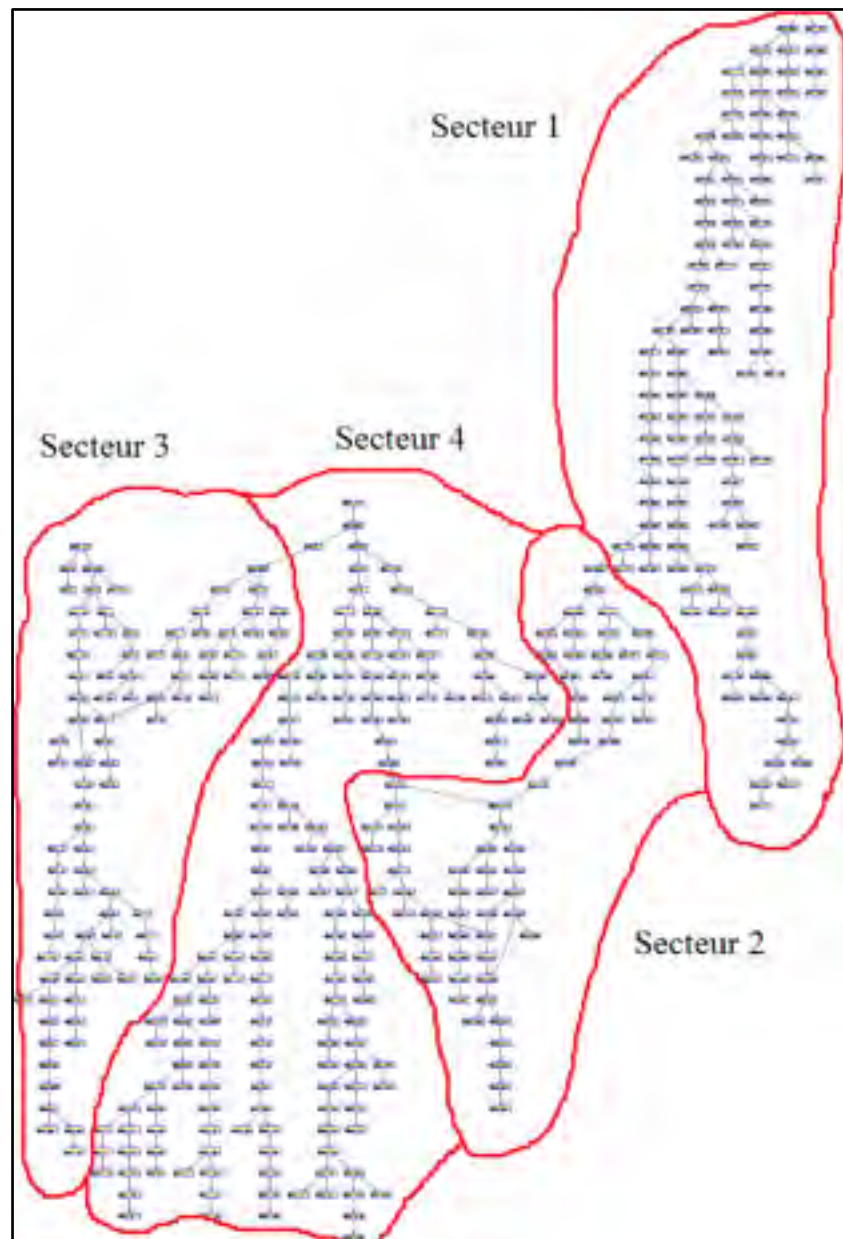


Figure-A II-1 Représentation hiérarchique du RDEP de Ville-Mont-Royal selon la méthode développée par (DiNardo et DiNatale, 2011)

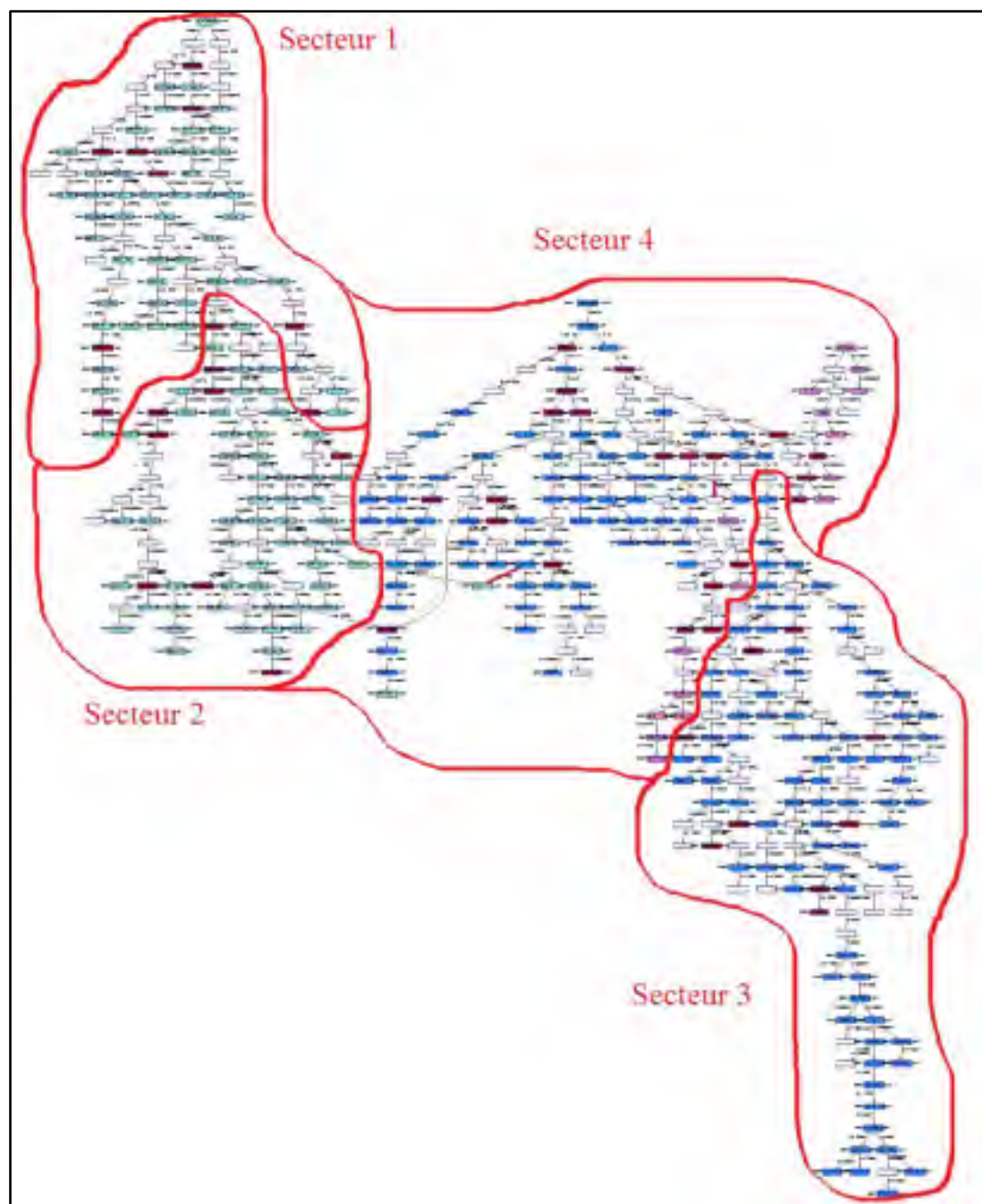


Figure-A II-2 Représentation hiérarchique du RDEP de Ville-Mont-Royal selon la méthode adaptée

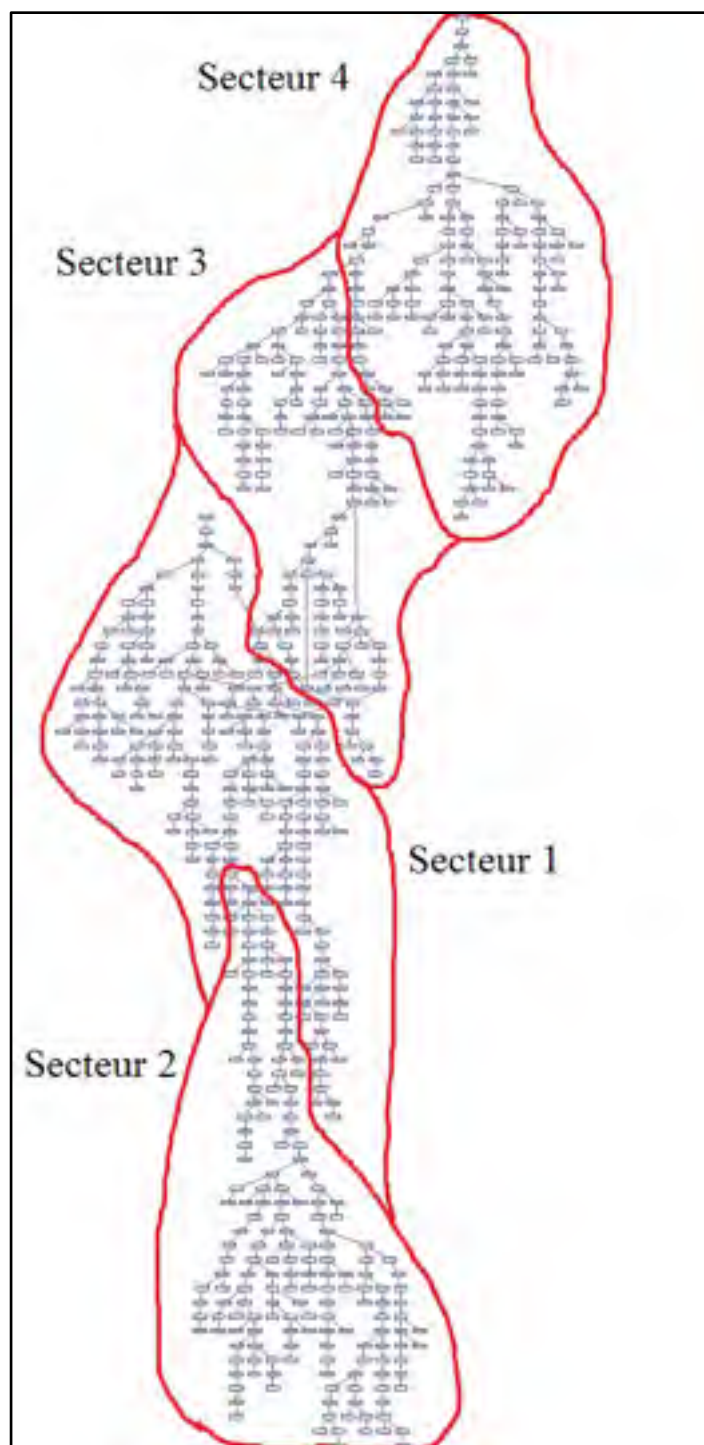


Figure-A II-3 Représentation hiérarchique du RDEP de la municipalité d'Aylmer selon la méthode développée par (DiNardo et DiNatale, 2011)

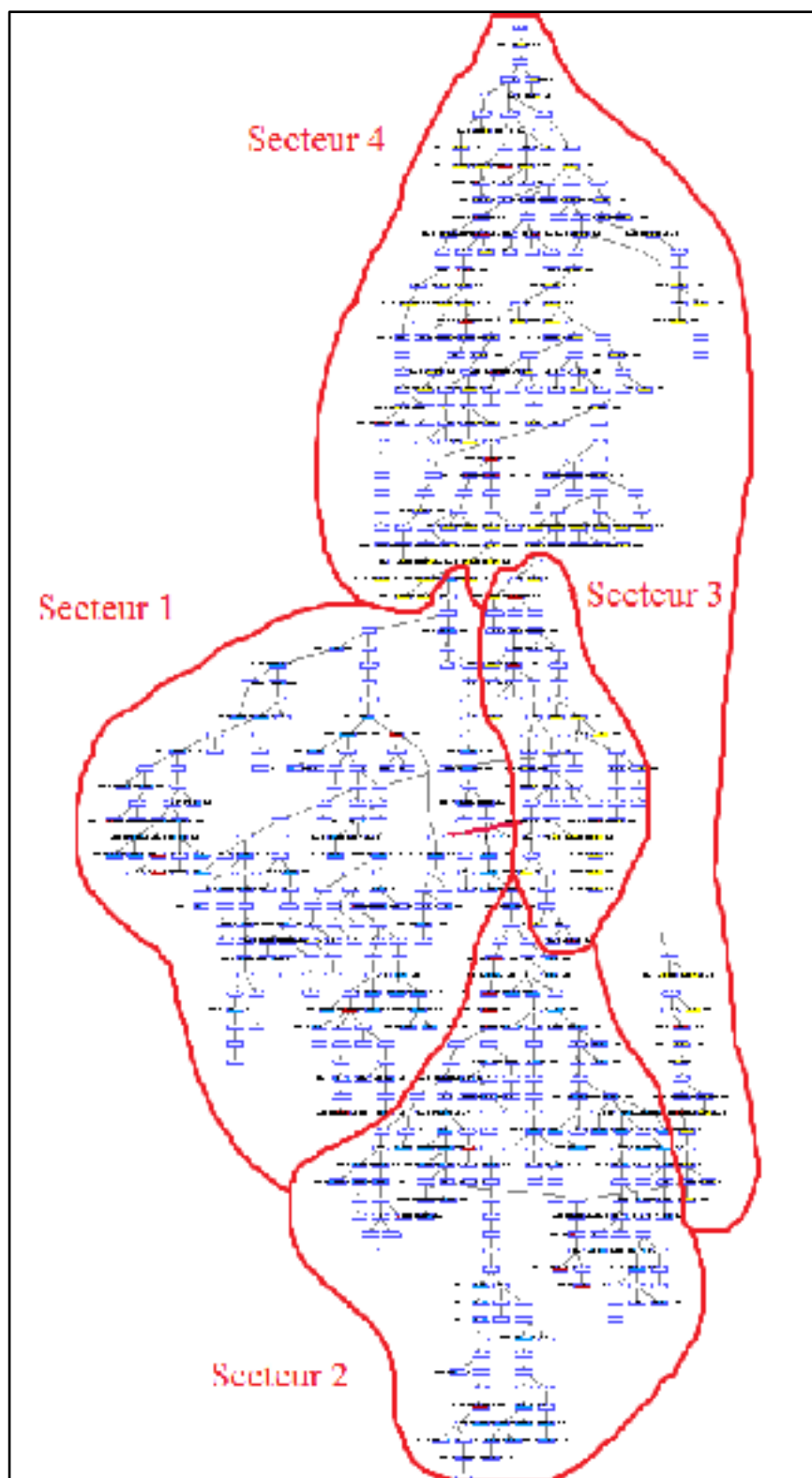


Figure-A II-4 Représentation hiérarchique du RDEP de la municipalité d'Aylmer selon la méthode adaptée

ANNEXE III

DIFFÉRENCES DES SECTEURS SELON LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR DiNardo et DiNatale (2011) ET LA MÉTHODE ADAPTÉE

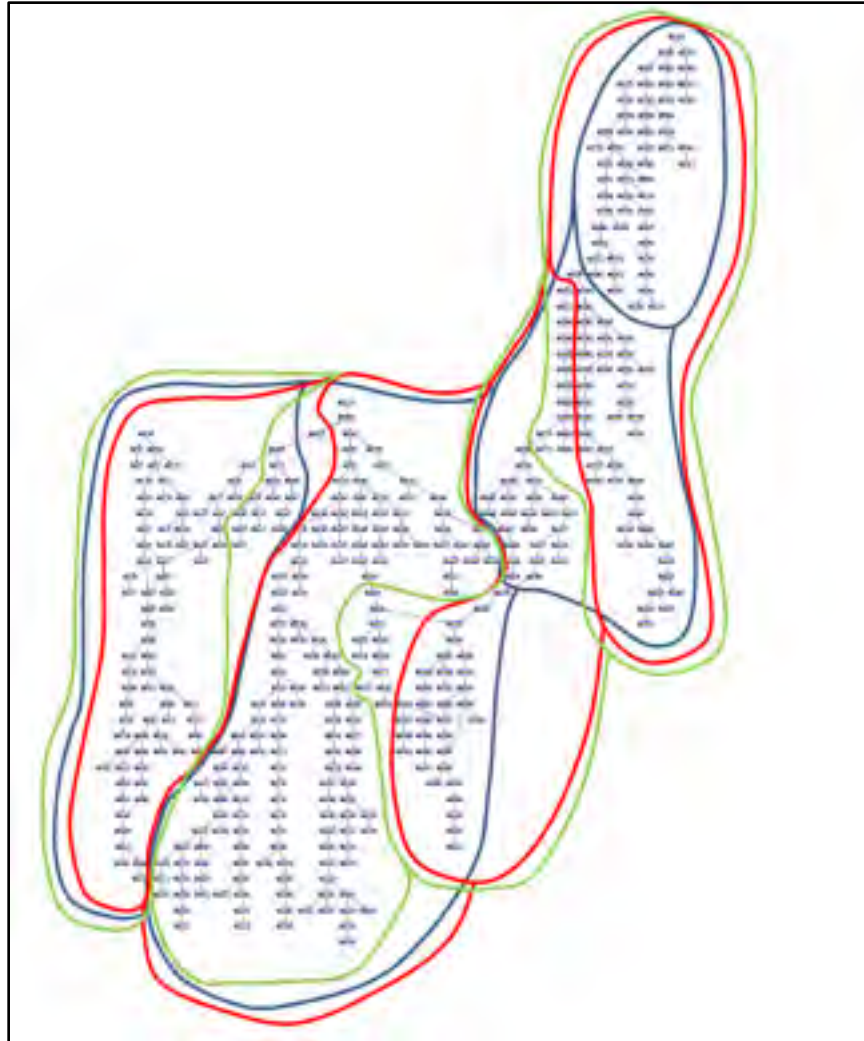


Figure-A III-1 Sectorisation de trois utilisateurs du RDEP de Ville-Mont-Royal d'après la représentation hiérarchique de la méthode de DiNardo et DiNatale (2011)



Figure-A III-2 Sectorisation de trois utilisateurs du RDEP de la municipalité d'Aylmer d'après la représentation hiérarchique de la méthode de DiNardo et DiNatale (2011)

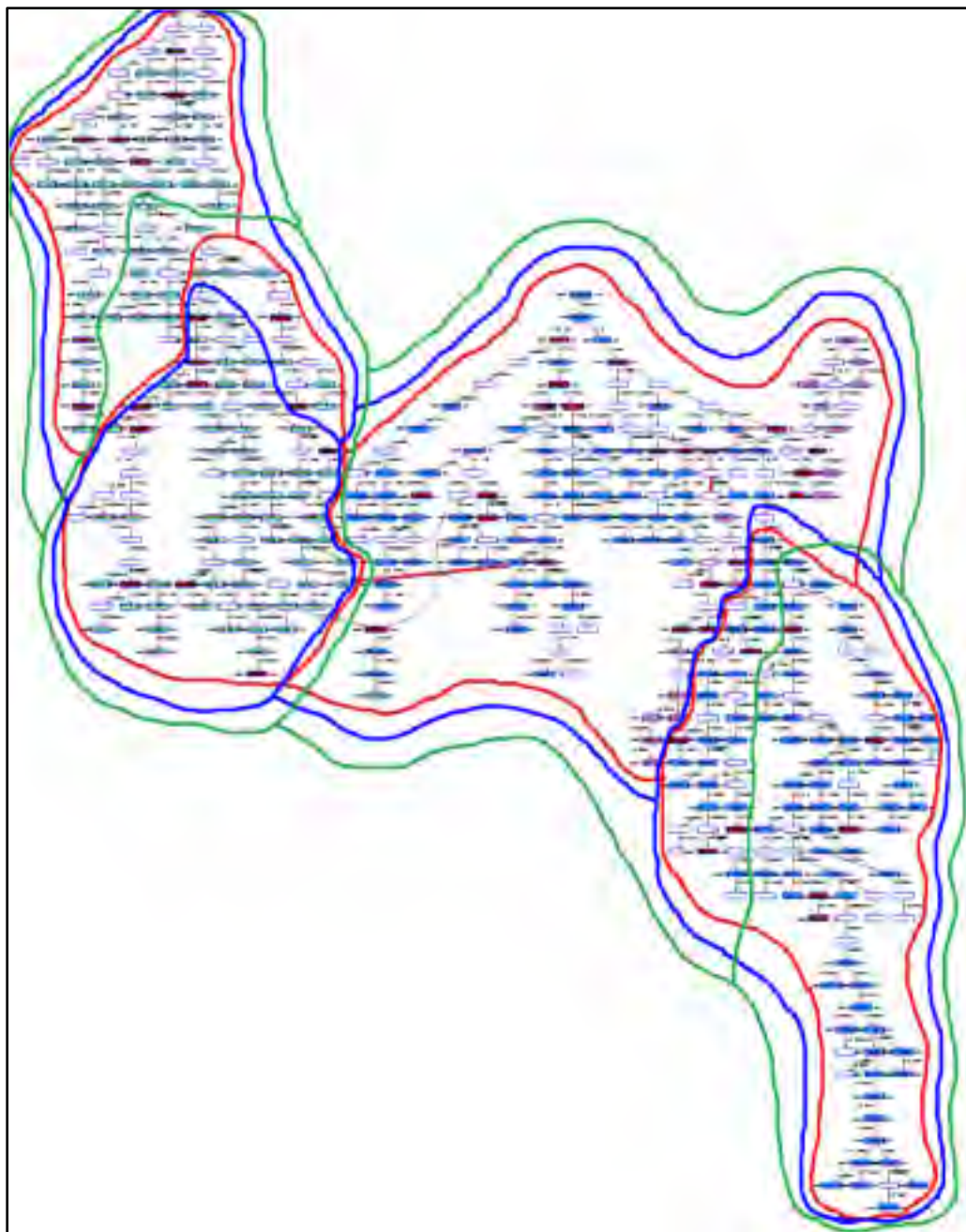


Figure-A III-3 Sectorisation de trois utilisateurs du RDEP de Ville-Mont-Royal d'après la représentation hiérarchique de la méthode adaptée



Figure-A III-4 Sectorisation de trois utilisateurs du RDEP d'Aylmer d'après la représentation hiérarchique de la méthode adaptée

ANNEXE IV

RÉPARTITION DES COTES DE LA PERFORMANCE DE LA PROTECTION CONTRE LES INCENDIES POUR LES RÉSEAUX QUÉBÉCOIS À L'ÉTUDE

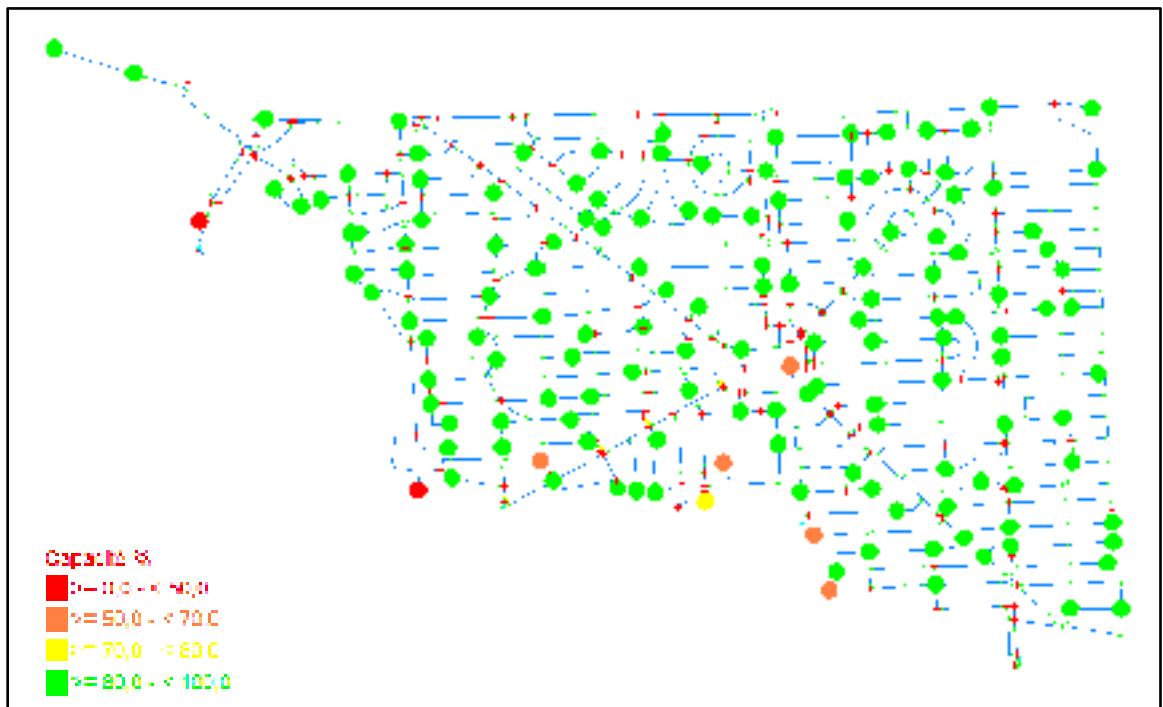


Figure-A IV-1 Répartition des cotes de la performance de la protection contre les incendies pour le RDEP initial de Ville-Mont-Royal

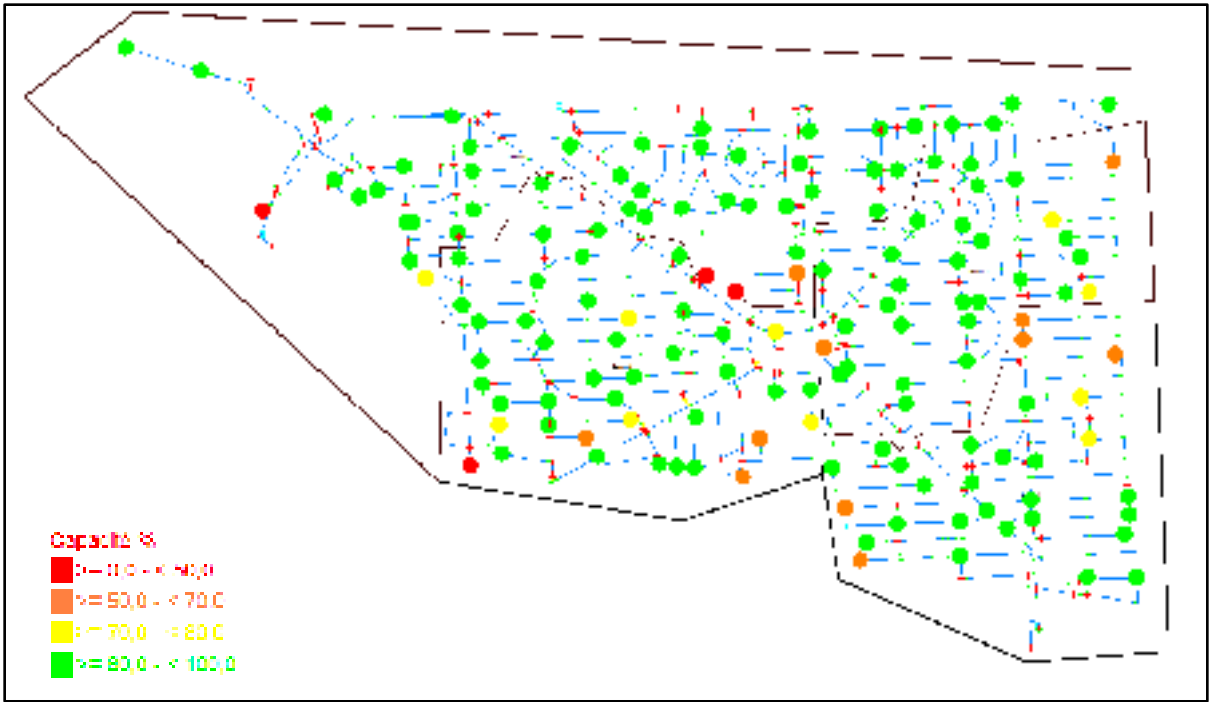


Figure-A IV-2 Répartition des cotes de la performance de la protection contre les incendies pour le RDEP sectorisé de Ville-Mont-Royal selon la méthode adaptée

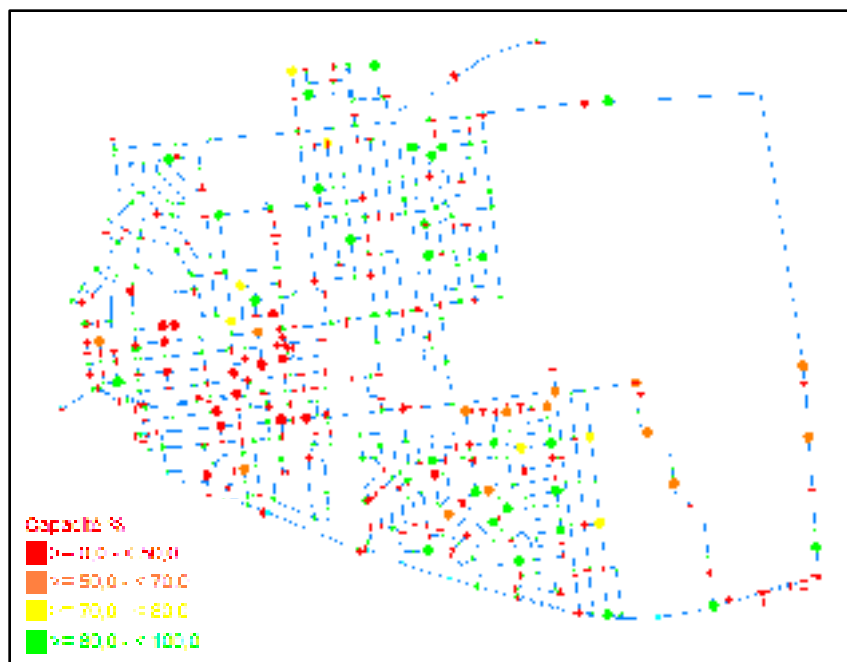


Figure-A IV-3 Répartition des cotes de la performance de la protection contre les incendies pour le RDEP initial de la municipalité d'Aylmer

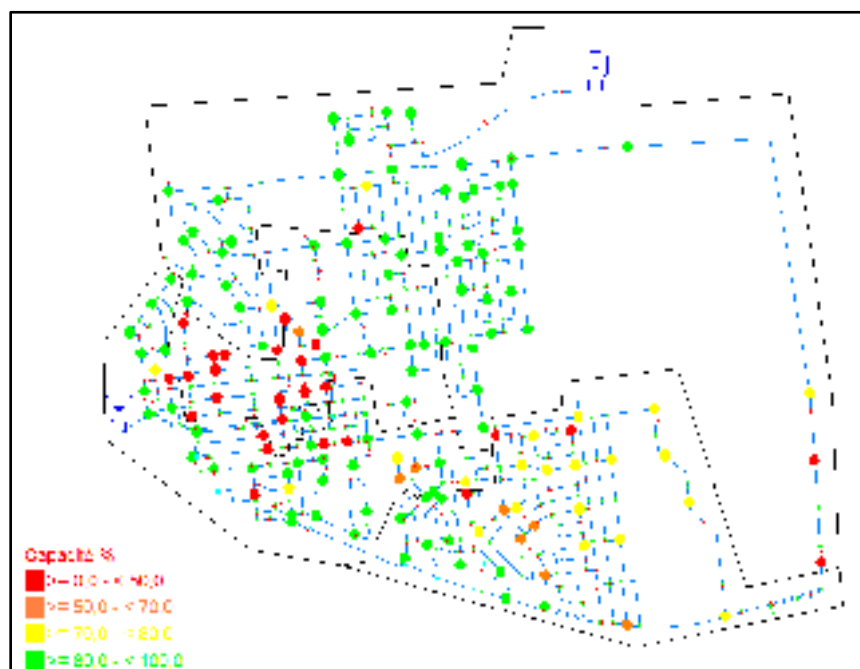


Figure-A IV-4 Répartition des cotes de la performance de la protection contre les incendies pour le RDEP sectorisé de la municipalité d'Aylmer selon la méthode adaptée

ANNEXE V

DÉTERMINATION DES PONDÉRATIONS (PÉNALITÉS) ASSOCIÉES AUX CRITÈRES DE LA FONCTION OBJECTIF À OPTIMISER

En utilisant une structure lexicographique par des poids différents pour chacun des coefficients P_1 , P_2 et P_3 , la minimisation des critères multipliés par un coefficient approprié est priorisée. La structure lexicographique présentée à l'équation-A V-1 favorise, en premier lieu, la présence des vannes d'isolement sur toutes les conduites aux frontières (critère associé à P_3). Un coefficient élevé (mais pas égal à l'infini) est justifié par le fait qu'il est permis d'insérer une vanne d'isolement en dernier recours c'est-à-dire lorsque qu'aucune déformation des secteurs initiaux (obtenue par l'AG) ne permet d'obtenir une configuration où les conduites aux frontières possèdent toutes des vannes d'isolement. Par conséquent, cette configuration est réalisable (contrairement aux solutions rejetées par le filtre, équation 5.1, section 5.1.1) et il est donc possible de différencier ces solutions. De plus, en assignant à P_2 une valeur supérieure à P_1 , le problème d'optimisation favorise la fermeture d'un plus petit nombre de conduites (vannes) au détriment d'une perturbation des secteurs initiaux (nombre de nœuds qui ont changé des secteurs initiaux).

$$P_1 \ll P_2 \ll P_3 \quad (\text{A V-1})$$

Ces coefficients peuvent influencer la résolution du problème d'optimisation si leurs valeurs sont trop rapprochées ou éloignées (Minoux, 2008). En effet, selon la structure lexicographique proposée à l'équation-A V-1, il est primordial que :

$$P_1 * g(x)^+ < P_2 * h(x)^- \quad (\text{A V-2})$$

et

$$P_2 * h(x)^+ < P_3 * j(x)^-$$

Où $P_1 * g(x)^+$ correspond à valeur maximale que peut prendre le critère $g(x)$ multiplié par son coefficient de pénalité et $P_2 * h(x)^-$ correspond à la valeur minimale (positive et non

nulle) que peut prendre le critère $h(x)$ multiplié par son coefficient de pénalité, $P_2 * h(x)^+$ correspond à valeur maximale que peut prendre le critère $h(x)$ multiplié par son coefficient de pénalité et $P_3 * j(x)^-$ correspond à la valeur minimale (positive et non nulle) que peut prendre le critère $h(x)$ multiplié par son coefficient de pénalité. Cette démarche fait en sorte que les valeurs de chacun des critères de la fonction objectif n'ont pas d'impact les uns sur les autres (les critères ne se chevauchent pas). Afin de s'assurer de la validité des valeurs des coefficients de pénalité, les valeurs de $g(x)$, $h(x)$ et $j(x)$ sont analysées pour un ensemble de 10 000 optimisations effectuées (chaque conduite à la frontière sans vanne d'isolement) pour les deux RDEP à l'étude (en considérant, dans un premier temps, les vannes d'isolement disponibles et, dans un second temps, les vannes d'isolement opérables; section 5.1). Le Tableau-A V-1 résume les différentes valeurs des critères obtenues (lorsque la valeur du filtre F est de zéro).

Tableau-A V-1 Valeurs minimales et maximales des critères de la fonction objectif lorsque le filtre (F) est de zéro

RDEP de Ville-Mont-Royal en considérant les vannes existantes		
	Valeur minimale	Valeur maximale
$P_1 * g(x)$	0	55
$P_2 * h(x)$	5600	7400
$P_3 * j(x)$	100000	700000
RDEP de Ville-Mont-Royal en considérant les vannes opérables		
	Valeur minimale	Valeur maximale
$P_1 * g(x)$	0	30
$P_2 * h(x)$	5600	7400
$P_3 * j(x)$	700000	1800000
RDEP de la municipalité d'Aylmer en considérant les vannes existantes		
	Valeur minimale	Valeur maximale
$P_1 * g(x)$	0	35
$P_2 * h(x)$	7000	8800
$P_3 * j(x)$	500000	1100000
RDEP de la municipalité d'Aylmer en considérant les vannes opérables		
	Valeur minimale	Valeur maximale
$P_1 * g(x)$	0	40
$P_2 * h(x)$	7000	8400
$P_3 * j(x)$	1300000	1900000

Par exemple, pour le RDEP de VMR en considérant les vannes disponibles, la valeur maximale que peut prendre $g(x)$ est de 4 tandis que la valeur minimale de $h(x)$ est de 29. En multipliant ces deux critères par leurs coefficients de pénalité (Tableau-A V-2), il est observé que les valeurs obtenues ne pourront pas se chevaucher. Cette situation est observée pour les deux réseaux d'étude et confirme que les choix des $P_1 = 5$, $P_2 = 200$ et $P_3 = 100\ 000$ sont adéquats.

Tableau-A V-2 Exemple de calcul de la validation des coefficients de pénalité

$P_1 * g(x)^+ < P_2 * h(x)^-$	=	$5 * 4 < 200 * 29$
$P_2 * h(x)^+ < P_3 * j(x)^-$	=	$200 * 34 < 1 * 100\ 000$

ANNEXE VI

RÉSULTATS DE LA SECTORISATION EXÉCUTÉE MANUELLEMENT

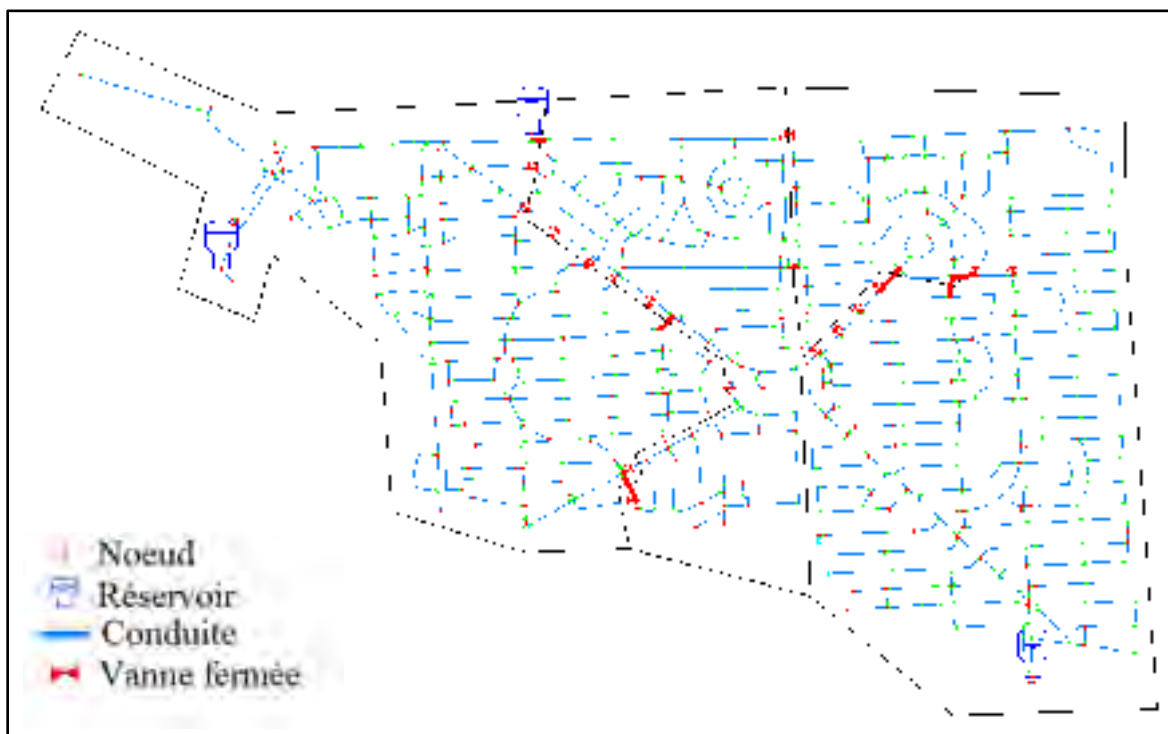


Figure-A VI-1 RDEP de VMR sectorisé selon la méthode manuelle

**Tableau-A VI-1 Indices de performance du RDEP sectorisé de VMR
selon la méthode manuelle**

Réseau sectorisé / Réseau initial					
Indice diamètre disponible	127783 / 131283 mm				
Indice hauteur piézométrique excédentaire	13825 / 14272 m				
Indice maillage	0,19 / 0,19				
Indice puissance dissipée	52801 / 46661 W				
Indice résilience développé par (Prasad et Park, 2003)	0,71 / 0,72				
Indice résilience développé par (Todini, 2000)	0,76 / 0,77				
Réseau sectorisé					Réseau initial
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	---
Charge hydraulique minimale (m)	90	90	87	90	91
Charge hydraulique maximale (m)	100	105	91	103	105
Charge hydraulique moyenne (m)	92	95	89	93	94
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	---
Pression minimale (kPa)	392	388	400	389	396
Pression maximale (kPa)	582	474	476	614	614
Pression moyenne (kPa)	460	430	445	478	465
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	---
Élévation moy (m)	45	51	44	44	46
nombre d'habitants par secteur	4172	8885	5966	11705	30728

**Tableau-A VI-2 Performance de la protection contre les incendies du RDEP de VMR
sectorisé selon la méthode manuelle**

	% Capacité	RDEP initial	RDEP sectorisé manuellement	RDEP sectorisé (méthode adaptée) 6 points d'entrée
excellent	Plus de 100 %	87%	82%	80%
bon	>80 % et 100 %	7%	12%	12%
moyen	>70 % et 80 %	1%	1%	2%
mauvais	≥50 % et 70 %	3%	4%	5%
très mauvais	Moins de 50 %	1%	1%	1%

BIBLIOGRAPHIE

- Alperovits, Elyahu, et Uri Shamir. 1977. « Design of optimal water distribution systems ». vol. 13, n° 6, p. 885-900.
- Aqua Data. 2015. « Logiciel Aqua Cad Suite ». < <http://www.aquadata.com/> >. Consulté le 30 octobre 2014.
- AWWA, American Water Works Association (Ed). 1986. *Introduction to Water Distribution Principles and Practices of Water Supply Operation*. Denver, Colorado.
- AWWA. 2009. « Water Audits and Loss Control Programs - Manual of Water Supply Practices, M36 (3rd Edition) ». American Water Works Association (AWWA). < <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWALCPMW4/water-audits-loss-control> >.
- Brière, Francois G. 2012. *Distribution et collecte des eaux*. Presses Polytechnique de Montréal.
- Buhl, Jerome, Jacques Gautrais, Nicholas J. Reeves, Ricard V. Solé, Sergi Valverde, Pascale Kuntz et Guy Theraulaz. 2006. « Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements ». *European Physical Journal B*, vol. 49, n° 4, p. 513-522.
- Butler, David. 2000. *Leakage detection and management*. UK: Palmer Environmental Ltd.
- Byoung Ho, Lee, et Rolf A. Deininger. 1992. « Optimal locations of monitoring stations in water distribution system ». *Journal of Environmental Engineering*, vol. 118, n° 1, p. 4-16.
- Coello, Carlos Coello, Gary B. Lamont et David Van Veldhuizen (576). 2007. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2e édition. Springer.
- Da Conceicao Cunha, Maria, et Joaquim Sousa. 1999. « Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 125, n° 4, p. 215-221.
- Dandy, Graeme C., Angus R. Simpson et Laurence J. Murphy. 1996. « An improved genetic algorithm for pipe network optimization ». *Water Resources Research*, vol. 32, n° 2, p. 449-458.
- Deb, Kalyanmoy. 2001. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley.

- Desjardins, Anouk. 1999. « Détermination des temps de séjour dans les réseau de distribution d'eau potable par traitement du signal ». Université de Montréal, École de Polytechnique de Montréal, 127 p.
- Deuerlein, Jochen W. 2008. « Decomposition model of a general water supply network graph ». *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, n° 6, p. 822-832.
- Dijkstra, Edsger. 1959. « A note on two problems in connexion with graphs ». *Numerische Mathematik*, vol. 1, n° 1, p. 269-271.
- DiNardo, Armando, Marco DiNatale, Giovanni Francesco Santonastaso, Velitchko G. Tzatchkov et Víctor H. Alcocer-Yamanaka. 2013a. « Water Network Sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths ». *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 13, n° 4, p. 951-957.
- DiNardo, Armando, Marco DiNatale, Giovanni Francesco Santonastaso et Salvatore Venticinque. 2013b. « An automated tool for smart water network partitioning ». vol. 27, n° 13, p. 4493-508.
- DiNardo, Armando, et Michele DiNatale. 2011. « A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks ». *Engineering Optimization*, vol. 43, n° 2, p. 193-211.
- Environnement Canada. 2006. « Utilisation de l'eau par les municipalités, Tableaux sommaires de 2006 ». 11p. < http://www.ec.gc.ca/eau-water/ED0E12D7-1C3B-4658-8833-347B527C688A/EEPEUM_2006_EauUsees_May2010.pdf >.
- Environnement Canada. 2011. « Rapport de 2011 sur l'utilisation de l'eau par les municipalités ». 19 p.
- Environnement Québec. 1999. « La gestion de l'eau au Québec ». Québec, 71 p.
- Environnement Québec. 2002. « Politique nationale de l'eau ». 94 p.
- Fanner, Paul V., Reinhard Sturm, Julian Thornton et Roland Liemberger. 2007. *Leakage Management Technologies*. Colorado, Denver: Awwa Research Foundation Denver.
- Fantozzi, Marco, Francesco Calza et Allan Lambert. 2009. « Experience and results achieved in introducing District Metered Areas (DMA) and Pressure Management Areas (PMA) at Enia utility (Italy) ». In *Water Loss Specialist Conference*. (Cape Town, South Africa), sous la dir. de Association, International Water, p. 17.
- Farley, Malcolm, et Stuart Trow. 2003. *Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*. IWA.

- Flokman, Steven. 2012. *Water Main Break Rates : In the USA and Canada*. Utah State University, 25 p.
- Giustolisi, Orazio, et Dragan Savic. 2010. « Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks ». *Urban Water Journal*, vol. 7, n° 1, p. 1-15.
- Goldberg, David E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Gomes, Ricardo Avelino, Alfeu Sá Marques et Joaquim Sousa. 2012a. « Identification of the optimal entry points at district metered areas and implementation of pressure management ». *Urban Water Journal*, vol. 9, n° 6, p. 365-84.
- Gomes, Ricardo, Alfeu Sa Marques et Joaquim Sousa. 2012b. « Decision support system to divide a large network into suitable District Metered Areas ». *Water Science and Technology*, vol. 65, n° 9, p. 1667-1675.
- Goulter, Ian. 1995. « Analytical and Simulation Models for Reliability Analysis in Water Distribution Systems ». In *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*, sous la dir. de Cabrera, Enrique, et AntonioF Vela. Vol. 14, p. 235-266. Coll. « Water Science and Technology Library »: Springer Netherlands. < http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-1841-7_10 >.
- Grayman, Walter M., Regan Murray et Dragan A. Savic. 2009. « Effects of redesign of water systems for security and water quality factors ». In *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers, May 17, 2009 - May 21, 2009*. (Kansas City, MO, United states) Vol. 342, p. 504-514. Coll. « Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 - World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers »: American Society of Civil Engineers. < [http://dx.doi.org/10.1061/41036\(342\)49](http://dx.doi.org/10.1061/41036(342)49) >.
- Halhal, Driss, Godfrey A. Walters, Driss Ouazar et Dragan Savic. 1997. « Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 123, n° 3, p. 137-146.
- Hasit, Yakir J., Alexander J. DeNadai et Robert S. Raucher. 2004. *Cost and benefit analysis of flushing*. 110 p.
- Herrera, Manuel, Stéphane Canu, Alexandros Karatzoglou, Rafael Pérez-García et Joaquín Izquierdo. 2010. « An approach to water supply clusters by semi-supervised learning ». In *5th Biennial Conference of the International Environmental Modelling and Software Society: Modelling for Environment's Sake, iEMSs 2010, July 5, 2010 - July 8, 2010*. (Ottawa, ON, Canada) Vol. 3, p. 1925-1932. Coll. « Modelling for Environment's Sake: Proceedings of the 5th Biennial Conference of the International

Environmental Modelling and Software Society, iEMSs 2010 »: iEMSs Secretariat c/- IDSIA.

- Herstein, Lesley, et Yves Fillion. 2012. « Life-cycle analysis of water main materials in the optimal design of the 'Anytown' water network ». In *12th Annual International Conference on Water Distribution Systems Analysis 2010, WDSA 2010, September 12, 2010 - September 15, 2010*. (Tucson, AZ, United states), p. 822-832. Coll. « Water Distribution Systems Analysis 2010 - Proceedings of the 12th International Conference, WDSA 2010 »: American Society of Civil Engineers (ASCE). < [http://dx.doi.org/10.1061/41203\(425\)76](http://dx.doi.org/10.1061/41203(425)76) >.
- Hillier, Frederick S., et Gerald J. Lieberman (1047). 2005. *Introduction to Operations Research*, ninth edition. McGraw-Hill.
- Hunaidi, Osama. 2010a. « Leakage Management for Water Distribution Infrastructure - Report 1:Results of DMA Experiments in Regina, SK ». 201 p.
- Hunaidi, Osama. 2010b. « Leakage Management for Water Distribution Infrastructure: Results of DMA Experiments in Regina/SK and Ottawa/ON ». Ottawa, 201 p.
- Izquierdo, Joaquin, Manuel Herrera, Idel Montalvo et Rafael Perez-Garcia. 2011. « Division of water supply systems into district metered areas using a multi-agent based approach ». *Communications in Computer and Information Science*, vol. 50, p. 167-180.
- Jacobs, Pierre A., et Ian C. Goulter. 1989. « Optimization of redundancy in water distribution networks using graph theoretic principles ». *Engineering Optimization*, vol. 15, n° 1, p. 71-82.
- Jun, Hwandon, et GV Loganathan. 2007. « Valve-controlled segments in water distribution systems ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, n° 2, p. 145-155.
- Kapelan, Zoran, Dragan Savic et Godfrey A. Walters. 2005. « Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty ». *Water Resources Research*, vol. 41, n° 11, p. 1-15.
- Lambert, Allan O. 2002. « International report: Water losses management and techniques ». In., 4 Vol. 2, p. 1-20. Coll. « Water Science and Technology: Water Supply »: IWA Publishing.
- Lau, Yu- Lung, et D. Liu. 1993. « Effect of flow rate on biofilm accumulation in open channels ». *Water Research*, vol. 27, n° 3, p. 355-360.

- MAMOT, Ministère des affaires municipales et de l'occupation du territoire. 2013a. « Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égoûts, et des chaussée ». Québec: CERIU, 87 p.
- MAMOT, Ministère des affaires municipales et de l'occupation du territoire. 2013b. « L'économie d'eau potable et les municipalités ». www.mamrot.gouv.qc.ca, 93 p.
- Ministère de l'Environnement. 1984. « Captage et distribution de l'eau, Directive 001 ». Québec, 71 p.
- MDDEP, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 2002. « L'eau au Québec : une ressource à protéger ». < <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/inter.htm> >. Consulté le 6 juin 2014.
- Minoux, Michel. 2008. *Programmation mathématique: théorie et algorithmes*. Éditions Tec & Doc.
- Morisson, John, Stephen Tooms et Dewi Rogers (Eds). 2007. *DMA management Guidance Notes*. IWA.
- Murphy, Laurence J., Graeme Dandy et Angus R. Simpson. 1994. « Optimum design and operation of pumped water distribution systems ». In *Proceedings of the 1994 International Conference on Hydraulics in Civil Engineering, February 15, 1994 - February 17, 1994*. (Brisbane, Aust), 94 pt 1, p. 149-155. Coll. « National Conference Publication - Institution of Engineers, Australia »: Publ by IE Aust.
- Ostfeld, Avi. 2005. « Water distribution systems connectivity analysis ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 131, n° 1, p. 58-66.
- Ostfeld, Avi, et Uri Shamir. 1996. « Design of optimal reliable multiquality water-supply systems ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 122, n° 5, p. 322-333.
- Ouimet, Christine, et André Lacombe. 2009. *Analyse hydraulique - Localisation de débitmètres pour sectorisation éventuelle du réseau d'acqueduc*. Ville de Gatineau: AquaData Inc., 70 p.
- Phillips, Jason. 2010. « Leak Detection ». In., sous la dir. de division, Department of public works and parks Environmental services, p. 53.
- Prasad, Devi T., et Nam-Sik Park. 2003. « Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130, n° 1, p. 73-82.

- Rosenthal, Arnie. 1977. « COMPUTING THE RELIABILITY OF COMPLEX NETWORKS ». *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 32, n° 2, p. 384-393.
- Rossman, Lewis A. 2000. « EPANET 2 Users Manual ». Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency.
- Satyanarayana, Bhavanari A., et Kevin R. Wood. 1982. *Polygon-to-Chain Reductions and Network Reliability*. Defense Technical Information Center.
- Savic, Dragan, et Godfrey A. Walters. 1997. « Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 123, n° 2, p. 67-77.
- Statistique Canada. 2011. « Recensement 2011, produits analytiques ». Ottawa, Ontario. < <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/as-sa/fogs-spg/Facts-csd-fra.cfm?LANG=Fra&GK=CSD&GC=2466072> >.
- Sugiyama, Kozo, Shojiro Tagawa et Mitsuhiro Toda. 1981. « Methods for visual understanding of hierarchical system structures ». *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 11, n° 2, p. 109-125.
- Tarjan, Robert. 1972. « Depth-first search and linear graph algorithms ». *SIAM Journal on Computing*, vol. 1, n° 2, p. 146-60.
- Todini, Ezio. 2000. « Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach ». *Urban Water*, vol. 2, n° 2, p. 115-122.
- Tzatchkov, Velitchko G., Victor H. Alcocer-Yamanaka et Victor Bourguett Ortiz. 2007. « Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects ». In *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006, August 27, 2006 - August 30, 2006*. (Cincinnati, OH, United states), p. 172. Coll. « 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006 »: American Society of Civil Engineers. < [http://dx.doi.org/10.1061/40941\(247\)172](http://dx.doi.org/10.1061/40941(247)172) >.
- Vairavamorthy, Kalanithy, et Mohammed Ali. 2000. « Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms ». In., 5 Vol. 15, p. 374-382. Coll. « Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering »: Blackwell Publishing Inc.
- VanDijk, Martin, Stephanus VanVuuren et Jakobus VanZyl. 2008. « Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm ». *Water SA*, vol. 34, n° 5, p. 537-548.
- Ville de Montréal. 2013. *Bilan de l'usage de l'eau potable 2012 - Rapport annuel déposé au conseil municipal*. Montréal: Service de l'eau, 17 p.

- Walski, Thomas M., Downey E. Brill, Johannes Gessler, Ian C. Goulter, Roland M. Jeppson, Kevin Lansey, Han-Lin Lee, Jon C. Liebman, Larry Mays, David R. Morgan et Lindell Ormsbee. 1987b. « Battle of the Network Models: Epilogue ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 113, n° 2, p. 191-203.
- Walski, Thomas M. 1993. « Water distribution valve topology for reliability analysis ». *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 42, n° 1, p. 21-27.
- Walski, Thomas M., et Johannes Gessler. 1999. « Discussion of 'Improved design of "Anytown" distribution network using structured messy genetic algorithms » ». *Urban Water*, vol. 1, p. 265-268.
- Walski, Thomas M., Donald V. Chase, Dragan Savic, Walter Grayman, Stephen Beckwith et Edmundo Koelle. 2003. *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Press.
- Walski, Thomas M., Justin Sterling Weiler et Teresa Culver. 2007. « Using criticality analysis to identify impact of valve location ». In *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006, August 27, 2006 - August 30, 2006*. (Cincinnati, OH, United states), p. 31. Coll. « 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006 »: American Society of Civil Engineers. < [http://dx.doi.org/10.1061/40941\(247\)31](http://dx.doi.org/10.1061/40941(247)31) >.
- Walters, Godfrey A., Driss Halhal, Dragan Savic et Driss Ouazar. 1999. « Improved design of "Anytown" distribution network using structured messy genetic algorithms ». *Urban Water*, vol. 1, n° 1, p. 23-28.
- Wagner, Janet M., Uri Shamir et David H. Marks. 1988. « Water Distribution reliability : analytical methods ». *Journal of Water Ressources Planning and Management*, vol. 114 n° 3, p. 253-274.
- WRC, UK Water Industry Research. 1999. *A Manual of DMA Practice*. UK Water Industry Research Limited.
- Wrc/WSA/WCA. 1994. « UK water industry managing leakage ». In. Water Research Center Engineering, Operations Committee and Water Research Center: Engineering and Operations Committee.
- Yates, Graham MacDonald and Carl D. 2005. « DMA Design and Implementation, a North American Context ». In *Conference Proceedings*.
- Ysusi, Mark. 1999. « Water Distribution System Handbook ». In *Water Distribution System Handbook*, sous la dir. de Education, McGraw-Hill.1