

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Impacts des situations d'urgence sur la détection de contaminations éventuelles dans les réseaux de distribution d'eau potable

Par
Aimane BARHOUMI

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Babacar Toumbou
Université de Thiès

Examineur externe

Ilias Kacimi
Université Mohammed V

Directeur de recherche

Mme Sophie Duchesne, professeure
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

M. Jean-Pierre Villeneuve, professeur
INRS-ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier du fond du cœur ma directrice de recherche Sophie Duchesne et mon codirecteur Jean-Pierre Villeneuve de la confiance qu'ils m'ont accordée durant ce projet. J'ai énormément appris à vos côtés. Vos commentaires, remarques et nos discussions m'ont aidé à dépasser mes limites et de chercher les informations jusqu'aux plus petits détails. Madame Sophie, merci du temps que vous m'avez accordé afin d'affiner mes recherches, vous m'avez enseigné la rigueur en sciences je vous serai toujours reconnaissant votre gentillesse est sans égale. M. Jean-Pierre, nos échanges et nos réunions ont été d'une grande aide, j'apprenais, petit à petit, à développer la précision des informations que j'employais.

Je remercie aussi les membres de l'ISHÉDD pour les efforts qu'ils ont fournis lors de mon cursus scolaire. J'ai beaucoup appris en votre compagnie.

J'aimerais aussi remercier toutes personnes qui m'ont soutenu dans ce travail. Je remercie Mouna Doghri qui n'a pas hésité à partager son expérience avec moi. Je remercie aussi Vincent Laderrière, Marianne Blanchette, Geneviève Rioux, Catherine Vaillancourt des bons moments et des discussions qu'on a eues durant cette année.

Enfin, un grand merci à mes parents et mes frères. Votre soutien moral a toujours été apprécié. J'ai toujours suivi vos conseils, hamdoullah (louanges à Dieu), ils étaient toujours pertinents.

Enfin, je vous remercie encore une nouvelle fois Mme Sophie et M. Jean-Pierre du soutien financier que vous m'avez accordé.

RÉSUMÉ

La contamination dans un réseau de distribution d'eau potable peut être soit accidentelle (mauvais entretien des infrastructures, déficit de pression, etc.) ou intentionnelle (intervention malveillante). Cette contamination peut avoir des effets néfastes sur la santé de l'Homme d'où la nécessité d'installer des détecteurs dans le réseau pour suivre, en temps réel, la qualité de l'eau dans les conduites. À travers les données recueillies par les détecteurs et suite à une première détection, la procédure d'intervention pour décontaminer l'eau est établie selon les conditions d'écoulement de l'eau étant donné que pour chaque détecteur d'où la première détection se produit, une zone d'où la contamination peut provenir est identifiée. Or, il arrive parfois que ces conditions d'écoulement changent suite, notamment, aux fermetures de vannes ou lors d'incendies. Ainsi, le présent travail s'intéresse premièrement à développer une méthode, en utilisant le logiciel S-Place, pour réduire le temps de simulation tout en optimisant le placement des détecteurs dans un réseau réel en utilisant un ordinateur de bureau. Puis, à démontrer les différents types d'impacts que peuvent avoir les situations d'urgence (incendies et bris de conduites) sur la détection de contaminants.

Les résultats obtenus pour le placement des détecteurs ont permis de réduire le temps de simulation dans un réseau réel de 7 jours à seulement 15 heures en utilisant un ordinateur de bureau. En ce qui concerne les situations d'urgence, leur simulation a démontré que leur impact varie selon le nœud/conduite où la situation a été simulée.

Mots clefs : Détecteurs, situation d'urgence, incendie, bris de conduite, matrice de détection.

ABSTRACT

The contamination of a drinking water distribution network can be either accidental (poor infrastructure maintenance, pressure deficit, etc.) or intentional (malicious interference). This contamination can cause adverse health effects on the population, hence the need to install sensors in the network to track, in real time, the quality of the water in the pipes. By using the data collected by sensors and following a first detection, intervention procedure to decontaminate the water is established according to the current condition of the flow of the water since, at each detector where the first detection occurs, an area where contamination may originate is identified. However, sometimes the conditions of the water flow may change following the closures of the valves or in case of fire. Thus, the present work focuses mainly in developing a method, using the Splace software, to reduce the simulation time while optimizing the placement of sensors in a real network using a computer. Then, to demonstrate the different types of impacts that can the emergency situations (fires and broken lines) have on detecting contaminants.

The results for the placement of detectors have reduced the simulation time in a real network from seven days to only 15 hours. Regarding the emergency situation, their simulations have shown that their impact varies depending on the node /pipe where the situation was simulated.

Keywords: Sensors; emergency situation; fires; pipe breakage; detection matrix.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	13
2	REVUE DE LITTÉRATURE	17
2.1	NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION	17
2.1.1	<i>Réseaux arborescents et maillés</i>	17
2.1.2	<i>Hydraulique des réseaux de distribution et principes de base</i>	19
2.1.3	<i>Résolution des équations</i>	20
2.1.4	<i>Modèles</i>	20
2.2	PROBLÉMATIQUE DE LA CONTAMINATION DES RÉSEAUX	21
2.3	DETECTION DES CONTAMINANTS	24
2.4	ÉTAPES DE RÉPONSE À UNE CONTAMINATION	28
2.5	STRATÉGIES D'ISOLEMENT D'UN SECTEUR CONTAMINÉ	30
2.6	STRATÉGIES DE RINÇAGE	30
2.6.1	<i>Rinçage traditionnel</i>	31
2.6.2	<i>Rinçage unidirectionnel</i>	31
2.7	SYNTHÈSE	31
3	MÉTHODOLOGIE	33
3.1	OUTILS	33
3.2	DONNÉES	35
3.3	ÉTAPES DE TRAVAIL	39
3.3.1	<i>Méthodologie pour le placement des détecteurs</i>	40
3.3.2	<i>Impacts des situations d'urgence</i>	43
4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	45
4.1	RÉSULTAT DE LA MÉTHODOLOGIE POUR LE PLACEMENT DES DÉTECTEURS	45
4.1.1	<i>Réseau fictif</i>	45
4.1.2	<i>Réseau réel</i>	48
4.1.3	<i>Discussion</i>	53
4.2	RÉSULTAT DES IMPACTS DES SITUATIONS D'URGENCE	53
4.2.1	<i>Réseau fictif</i>	53
4.2.2	<i>Réseau réel</i>	61
5	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	69
6	RÉFÉRENCES	71

7	ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DES NŒUDS ET CONDUITES DU RESEAU ANYTOWN MODIFIE (RESEAU FICTIF).....	73
8	ANNEXE 2 : RESULTATS COMPLETS DES TESTS DE POURCENTAGE SUR LE RESEAU FICTIF.....	76
9	ANNEXE 3 : RESULTATS DU TEST COMPLET ET DU TEST 30 % SUR LE RESEAU REEL..	79
10	ANNEXE 4 : PRESENTATION DES AUTRES EXEMPLES DU RESEAU FICTIF	80
11	ANNEXE 5 : COUVERTURE DE LA DETECTION DANS LE RESEAU REEL.....	82

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : OBJECTIFS A PRENDRE EN CONSIDERATION LORS DE L'ELABORATION D'UN CWS (AWWA, 2005)...	23
TABLEAU 2 : CLASSIFICATION DE CERTAINS CONTAMINANTS POUVANT AVOIR UN IMPACT GRAVE SUR LA SANTE HUMAINE (USEPA, AUGUST 2004)	24
TABLEAU 3 : PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LE PLACEMENT DES DETECTEURS RECENSES DANS LA LITTERATURE (ADAPTE DE RATHI, 2015)	26
TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DU RESEAU REEL	37
TABLEAU 5 : RESULTAT DU TEST DE POURCENTAGE DANS LE RESEAU FICTIF	47
TABLEAU 6 : MATRICE DE DETECTION LORS D'UNE SITUATION NORMALE	54
TABLEAU 7 : NOMBRE DE CHANGEMENTS DE DIRECTION D'ECOULEMENT DE L'EAU CONSTATES DANS LE RESEAU, POUR CHAQUE NŒUD OU L'INCENDIE A ETE SIMULE.....	56
TABLEAU 8 : MATRICE DE DETECTION EN CAS D'INCENDIE	57
TABLEAU 9 : NOMBRE DE CHANGEMENTS DE DIRECTION D'ECOULEMENT DE L'EAU CONSTATES DANS LE RESEAU POUR CHAQUE CONDUITE OU LE BRIS A ETE SIMULE	58
TABLEAU 10 : MATRICE DE DETECTION LORS DU BRIS DE LA CONDUITE 1	60
TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES DE CHAQUE NŒUD DU RESEAU.....	73
TABLEAU 12 : CARACTERISTIQUES DES CONDUITES DU RESEAU ANYTOWN MODIFIE (RESEAU FICTIF)	75
TABLEAU 13 : RESULTATS DU TEST 20 % DES SCENARIOS DE CONTAMINATION	76
TABLEAU 14 : RESULTATS DU TEST 30 % DES SCENARIOS DE CONTAMINATION	77
TABLEAU 15 : RESULTATS DU TEST 40 % DES SCENARIOS DE CONTAMINATION	78
TABLEAU 16 : RESULTAT DU TEST COMPLET ET DU TEST 30 %.....	79

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA D'UN RESEAU ARBORESCENT	18
FIGURE 2 : SCHEMA D'UN RESEAU MAILLE	18
FIGURE 3 : REPONSES SUITE A UNE CONTAMINATION (ADAPTE D'US EPA, 2003)	29
FIGURE 4 : STRATEGIE D'ISOLEMENT D'UN SECTEUR CONTAMINE	30
FIGURE 5 : SCHEMA DU RESEAU FICTIF D'ANYTOWN MODIFIE	36
FIGURE 6 : VARIATION DE LA CONSOMMATION EN FONCTION DU TEMPS SUR LE RESEAU FICTIF	37
FIGURE 7 : SCHEMA DU RESEAU REEL.....	38
FIGURE 8 : VARIATION DE LA CONSOMMATION DURANT 24 H SUR LE RESEAU REEL.....	39
FIGURE 9 : RESULTAT DU PLACEMENT DE DETECTEURS SUR LE RESEAU FICTIF	46
FIGURE 10 : EXEMPLE DE RESULTAT DU PLACEMENT DES DETECTEURS DANS LE RESEAU REEL LORS D'UN TEST COMPLET	49
FIGURE 11 : EXEMPLE DU RESULTAT DU PLACEMENT DES DETECTEURS LORS D'UN TEST DE 30 % DES SCENARIOS DE CONTAMINATION.....	50
FIGURE 12 : VALEUR DES DEUX FONCTIONS OBJECTIF POUR LES SOLUTIONS OBTENUES LORS DU PLACEMENT DES DETECTEURS DANS LE RESEAU REEL	51
FIGURE 13 : EMLACEMENT DES DETECTEURS DANS LE RESEAU REEL POUR UN TEST COMPLET ET UN TEST DE 30 % DES SCENARIOS DE CONTAMINATION.....	52
FIGURE 14 : MATRICE DE DETECTION LORS D'UNE SITUATION NORMALE A 17 H.....	55
FIGURE 15 : IMPACT DE L'INCENDIE DU NŒUD 14 SUR LA DETECTION A 17 H.....	57
FIGURE 16 : IMPACT DU BRIS DE LA CONDUITE 1 SUR LA DETECTION A 17 H.....	59
FIGURE 17 : MATRICE DE DETECTION LORS D'UNE SITUATION NORMALE A 10 H DANS LE RESEAU REEL.....	61
FIGURE 18 : IMPACT SUR LA DETECTION DE L'INCENDIE AU NŒUD 11009067 A 10 H.....	63
FIGURE 19 : IMPACT SUR LA DETECTION DE L'INCENDIE AU NŒUD 11009043 A 10 H.....	64
FIGURE 20 : IMPACT SUR LA DETECTION DU BRIS A LA CONDUITE 11127075 A 10 H.....	66
FIGURE 21 : IMPACT DU BRIS DE LA CONDUITE 11128401 SUR LA DETECTION A 10 H.....	67
FIGURE 22 : ÉTAT DE LA MATRICE DE DETECTION LORS D'UN INCENDIE SIMULE AU NŒUD 17 A 17 H.....	80
FIGURE 23 : ÉTAT DE LA MATRICE DE DETECTION LORS D'UN INCENDIE AU NŒUD 2 A 17 H.....	81
FIGURE 24 : COUVERTURE DE LA DETECTION POUR 10 DETECTEURS PLACES.....	82

1 INTRODUCTION

Les infrastructures d'approvisionnement en eau jouent un très grand rôle en ce qui a trait à l'alimentation des usagers en eau potable. Cet approvisionnement doit répondre à la demande tout en garantissant la qualité de l'eau potable. Malgré les divers traitements physicochimiques que subit l'eau, le maintien de la qualité de l'eau jusqu'au robinet demeure un grand défi. En effet, l'eau peut se dégrader en réseau pour diverses raisons, telles que, par exemple, des temps de parcours élevés (causant une dégradation du chlore résiduel) ou un entretien déficient des conduites (Tao *et al.*, 2012).

La contamination de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable (RDEP) peut être accidentelle (Poulin, 2008) ou intentionnelle. Dans le premier cas de figure, une pression trop faible ou une mauvaise gestion lors d'entretiens peuvent être la cause d'une intrusion de contaminants (pesticides, bactéries pathogènes, etc.). Dans le deuxième cas, des gens mal intentionnés peuvent introduire des contaminants dans le RDEP.

La présence accidentelle ou intentionnelle de contaminants dans les RDEP présente un risque pour la santé humaine, d'où la nécessité de surveiller la qualité de l'eau qui circule dans les conduites et de s'assurer que la contamination détectée ne parvienne pas au consommateur. Des détecteurs ont été mis au point au cours des dernières années, permettant de suivre les paramètres physicochimiques (pH, conductivité, potentiel redox, etc.) de l'eau dans les RDEP. L'installation de ces détecteurs en différents points stratégiques du réseau permet de détecter les modifications de la qualité de l'eau. Suite à cette détection, des mesures sont entreprises pour réduire l'impact de cette contamination sur les usagers (p. ex. : fermeture de vannes, évacuation de l'eau contaminée, rinçage, etc.). Ces opérations sont effectuées en se basant sur le point de première détection par un capteur. Car à chaque détecteur où se produit la première détection est associée une zone d'où la contamination peut provenir. Cette dernière est établie lors du placement des détecteurs en considérant une situation normale du fonctionnement du réseau.

Or, dans certaines conditions, il peut arriver que des évènements non prévus à l'origine induisent des profils d'écoulement qui n'ont pas été pris en compte lors de la mise en place des capteurs et de l'identification des zones sources de contamination. Dans ce cas, le lien entre la source de contamination et le lieu de première détection peut être différent que celui précédemment identifié. Le but de ce projet est de documenter dans quelles conditions ces modifications peuvent survenir, en vue d'adapter les interventions sur le réseau. Plus particulièrement, les objectifs de ce travail sont de développer, tout d'abord, une méthode pour le placement des détecteurs dans un réseau réel. Puis, de démontrer l'impact des changements de direction d'écoulement dans les RDEP sur les mesures à prendre suite à la détection d'un contaminant.

Pour atteindre ces objectifs, des objectifs spécifiques sont établis :

- Déterminer, à l'aide d'analyses sur un réseau fictif, le pourcentage du nombre total des scénarios possibles de contamination qui devraient être pris en compte pour le placement de détecteurs dans les RDEP ;
- Évaluer si le pourcentage déterminé permet d'obtenir un placement optimal des détecteurs sur un réseau réel ;
- Identifier les situations d'urgence qui ont le plus d'impacts sur les directions d'écoulement de l'eau ;
- Évaluer l'impact des changements de direction sur la consommation d'eau contaminée ;
- Évaluer l'impact des situations d'urgence sur la détection de contaminations éventuelles ;
- Évaluer le lien entre le nombre de détecteurs dans un réseau et l'étendue de la détection.

Ce mémoire de maîtrise est structuré de la façon suivante. Au chapitre 2, une revue de littérature est présentée. Dans le chapitre 3, on introduit la méthodologie, les cas qui seront analysés, les modèles utilisés et les outils. Le chapitre 4 porte sur la présentation, l'analyse et la discussion des résultats. En effet, dans un premier temps, la méthode

développée sera testée sur un réseau fictif, puis sur un réseau réel. Le chapitre 5 résume les conclusions obtenues et dégage quelques perspectives.

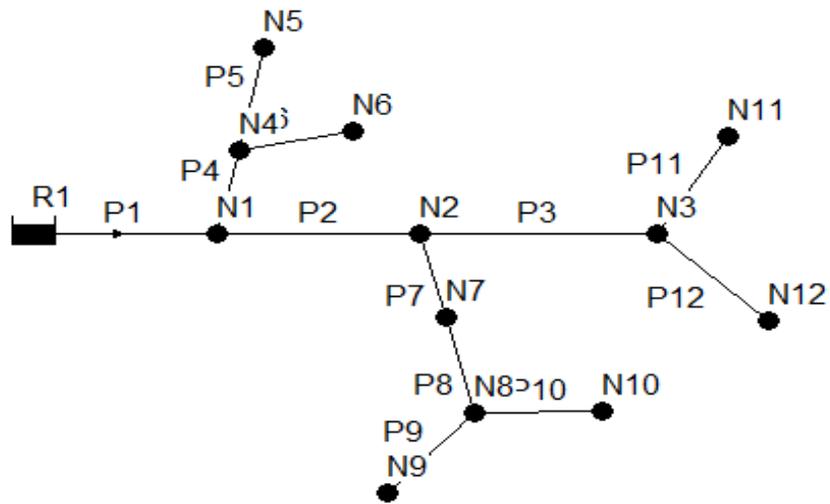
2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre s'intéresse aux travaux publiés dans le domaine de la contamination des RDEP. Dans un premier temps, des notions générales sur les réseaux de distribution sont introduites (section 2.1). Ensuite, la problématique de la détection des contaminants dans l'eau et les réseaux d'eau potable est traitée aux sections 2.2 et 2.3. Les trois sections suivantes, 2.4 à 2.6, traitent des étapes à mettre en œuvre suite à une contamination, de façon générale, puis plus spécifiquement des stratégies d'isolement et le rinçage.

2.1 Notions générales sur les réseaux de distribution

2.1.1 Réseaux arborescents et maillés

La conception des réseaux de distribution d'EP peut être faite selon deux types de configuration : arborescente ou maillée. Dans le cas des réseaux arborescents, l'eau est acheminée dans une conduite principale et permet l'alimentation d'autres régions à travers des ramifications. La Figure 1 représente un réseau arborescent. En ce qui concerne les réseaux maillés, l'eau circule dans une boucle permettant ainsi d'atteindre chaque point de consommation par divers chemins, comme le montre la Figure 2.



Légende :

-  : Réservoir
-  : Nœud
-  : Conduite

Figure 1 : Schéma d'un réseau arborescent

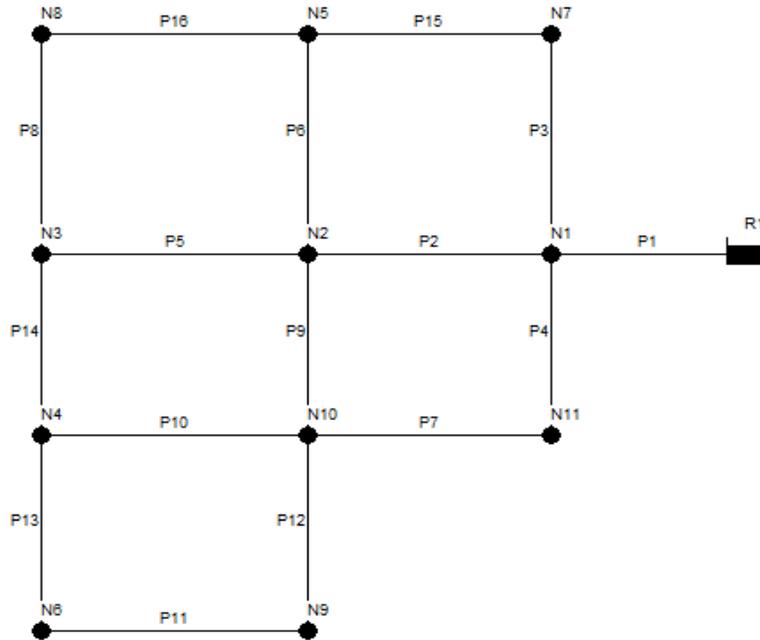


Figure 2 : Schéma d'un réseau maillé

La première configuration présente des désavantages, principalement si des travaux sont entrepris sur le réseau. Ainsi, si on procède à la mise hors service d'une conduite, toute la zone située à l'aval de celle-ci sera privée d'eau. Tandis que dans le cas des réseaux maillés, si une conduite est mise hors service, l'eau peut toujours être acheminée via une autre conduite. Or, dans le cas d'une contamination, la mise en place de stratégies de réponse sera plus complexe dans le cas de réseaux maillés.

2.1.2 Hydraulique des réseaux de distribution et principes de base

Dans un RDEP, l'eau possède trois formes d'énergie : énergie de pression, énergie d'élévation et énergie de vitesse. Chaque point du réseau a une valeur unique de charge (la charge correspondant à l'énergie exprimée en équivalent de hauteur d'eau). Lors de son écoulement et dû aux obstacles dans les conduites ainsi qu'au frottement sur les parois des conduites, l'eau perd de l'énergie.

La modélisation hydraulique est liée aux principes de conservation de la masse et de l'énergie (ou de la quantité de mouvement). En ce qui a trait au principe de la conservation de la masse, la somme des débits entrant dans une conduite du réseau est égale à la somme des débits sortants, puisque les conduites des RDEP coulent pleines (en charge) et donc contiennent en tout temps le même volume d'eau :

$$\sum_{i=1}^N Q_e + U = 0$$

où Q_e ($L^3 T^{-1}$) représente les débits entrants ou sortants à un nœud par unité de temps, U ($L^3 T^{-1}$) représente le volume d'eau introduit ou consommé au nœud par unité de temps et N est le nombre de conduites liées au nœud.

En ce qui concerne la conservation de l'énergie, la différence de charge entre deux nœuds correspond aux pertes de charge causées par l'écoulement entre ces deux nœuds. Pour un écoulement permanent et uniforme dans une conduite pleine, la conservation de l'énergie peut être exprimée par l'équation de Bernoulli :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_p = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_L$$

où Z représente l'élévation (m), P la pression (kPa), γ le poids volumique du fluide (l'eau dans notre cas; kN/m³), V la vitesse d'écoulement de l'eau (m/s), g est la constante d'accélération gravitationnelle (9,81 m/s²), h_p et h_L représentent, respectivement, la charge fournie par les pompes et les pertes de charge totale (somme des pertes de charge locale et perte de charge due au frottement de l'eau avec les parois des conduites). Les indices 1 et 2 font référence à deux points du réseau (par exemple, les nœuds amont et aval d'une conduite).

2.1.3 Résolution des équations

Le calcul des pertes de charge peut être réalisé à partir de plusieurs équations empiriques, dont une des plus utilisées est l'équation d'Hazen-Williams. Cette équation relie les pertes de charge à la longueur L de la conduite (m), à son diamètre D (m), au coefficient de frottement d'Hazen-Williams C et au débit Q dans la conduite :

$$h_L = \frac{10.7 L}{C^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852}$$

En combinant l'équation de conservation de la masse aux nœuds, l'équation de conservation de l'énergie entre deux points du réseau (Bernoulli) et la relation précédente reliant les pertes de charge au débit (vitesse) dans les conduites, on obtient un système de n équations contenant n inconnues, où n est égal au nombre de nœuds pour lesquels la charge n'est pas connue et où les inconnues sont les charges en chacun de ces nœuds. Plusieurs méthodes permettent de résoudre ce système d'équations, dont la méthode de Hardy Cross et la méthode de Todini (1987) (méthode du gradient).

2.1.4 Modèles

Plusieurs modèles hydrauliques informatisés ont été développés au cours des années pour résoudre les équations de conservation de la masse et de l'énergie dans les RDEP. La résolution se fait selon des données d'entrées : les caractéristiques de chaque élément du réseau (élévation, diamètre, rugosité pour les conduites; élévation, consommation pour les nœuds et élévation pour les réservoirs). À travers les données

d'entrées comme la demande en eau à chaque nœud, le diamètre des conduites, le niveau d'eau dans les réservoirs, etc., ces logiciels permettent de calculer la valeur de diverses variables telles que les pertes de charge, la vitesse dans les conduites, etc. Un des modèles les plus utilisés en Amérique du Nord est EPANET2 (Rossmann, 2000), décrit plus en détail à la section 3.1. Dans ce modèle, deux régimes sont proposés pour la simulation hydraulique : permanent et dynamique. En ce qui concerne le régime permanent, on estime que la consommation aux nœuds et les caractéristiques des éléments du réseau sont constantes. Le deuxième cas estime que les paramètres peuvent changer en fonction du temps.

2.2 Problématique de la contamination des réseaux

La détection des contaminants affectant les RDEP est un enjeu crucial. Ainsi, la sécurité de l'eau doit être garantie depuis la première détection jusqu'à l'enlèvement du contaminant.

Dans la littérature, plusieurs cas de contaminations de l'eau potable sont cités; parmi ceux-ci, on peut répertorier, à titre d'exemple, le cas de Gideon (Missouri) en 1993, où des oiseaux sont entrés en contact avec l'eau d'un réservoir de stockage dû à un mauvais entretien, libérant ainsi la *salmonella typhimurium*, ce qui a engendré 650 cas de maladie et sept morts (Clark et al., 1996, cité dans (Poulin, 2008). Ou encore, la contamination intentionnelle à travers l'introduction d'un poison, plus spécifiquement le *sarin* dans un RDEP au Japon (Arad et al. 2013).

Depuis les deux dernières décennies, et principalement après les attentats du 11 septembre 2001, on a pris conscience de la vulnérabilité des RDEP. Ces réseaux sont vulnérables à des attaques intentionnelles (Poulin et al., 2008, Rasekh et al., 2014), en plus de l'être aux intrusions accidentelles. Ainsi, la « sécurité de l'eau » est devenue un enjeu crucial partout dans le monde. Dans ce même cadre, et pour mieux garantir la sécurité de l'eau, des technologies ont été développées pour suivre, en temps réel, certains paramètres de qualité de l'eau dans les réseaux. Ces systèmes de monitoring s'inscrivent dans un programme de type *Early Warning System* (EWS) ou encore de *Contamination Warning System* (CWS) (AWWA, 2005). Ce dernier est décrit

selon l'AWWA (American Water Works Association, comme étant : « Le déploiement actif de technologies de suivi en temps réel et/ou de stratégies tout en garantissant la surveillance renforcée pour collecter, intégrer, analyser et communiquer les informations pour fournir un avertissement, en temps opportun, d'une contamination potentielle et entreprendre des actions pour réduire le risque sur la santé humaine » (adapté de AWWA, 2005)

Or, le terme « *Early* » reste néanmoins, selon l'AWWA, imprécis. L'objectif est de pouvoir « reconnaître » la menace et d'atténuer la vulnérabilité à certains nœuds du réseau. Ainsi, trois objectifs sont à prendre en considération lors de l'élaboration d'un CWS. Ces objectifs sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Objectifs à prendre en considération lors de l'élaboration d'un CWS (AWWA, 2005)

Objectif	Caractéristiques	Temps
Détecter pour protéger	<ul style="list-style-type: none"> • Évènement détecté et exposition de la population à la contamination évitée. • Permet le déploiement d'une équipe opérationnelle. 	Instantané
Détecter pour avertir	<ul style="list-style-type: none"> • Évènement détecté avant que des incidents majeurs ou des problèmes de santé publique ne surviennent. • Permet le déploiement des équipes médicales, l'émission d'avis public et la mise en place d'une équipe opérationnelle. 	Heures
Détecter pour traiter	<ul style="list-style-type: none"> • Évènement détecté après que des incidents majeurs ou des problèmes de santé publique soient survenus. • Permet le déploiement des équipes médicales, l'émission d'avis public et la mise en place d'une équipe opérationnelle. 	Heures/jours

Ainsi, dans le but de gérer les menaces liées aux contaminations, il est nécessaire de préparer une liste de contaminants prioritaires pouvant avoir un grave impact sur la santé humaine (US EPA, 2003). Le tableau ci-dessous présente, à titre d'exemple, certaines classes de contaminants pouvant avoir un impact grave sur la santé humaine.

Tableau 2 : Classification de certains contaminants pouvant avoir un impact grave sur la santé humaine (USEPA, August 2004)

Classes	Exemples
Contaminant microbiologique	
Bactéries	<i>Bacillus anthracis</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>E. coli</i>
Virus	<i>Caliciviruses</i> , <i>Hepatitis A/E</i>
Parasites	<i>Toxoplasma gondii</i> , <i>Cryptosporidium parvum</i>
Contaminant chimique — Inorganique	
Corrosifs	Acide hydrochlorique Hydroxyde de sodium Acide sulfurique
Sels de cyanures	Cyanure de sodium Cyanure de potassium
Métal	Mercure Complexes (fer, cuivre, etc.)
Contaminant chimique — Organique	
Hydrocarbures	Diesel Kérosène Alcool (méthanol)
Insecticides	Organophosphates Organochlorés

2.3 Détection des contaminants

La détection de la contamination se fait à l'aide de détecteurs de qualité de l'eau. Il en existe plusieurs catégories :

- Les conventionnels, qui permettent de mesurer les paramètres physicochimiques standards de l'eau, dont la température, la turbidité, le pH, le potentiel redox, le chlore résiduel, etc. (Jeffrey Yang *et al.*, 2009);

- Les spécifiques, qui sont capables de détecter de faibles concentrations d'un contaminant spécifique (exemple : détecteurs pour produits azotés).

L'utilisation des détecteurs spécifiques, malgré leur potentiel à détecter de faibles concentrations, reste néanmoins limitée étant donné que c'est la présence du contaminant plutôt que sa nature qui est prioritaire lors d'une détection précoce (Liu *et al.*, 2015).

Dans un réseau de distribution, sur le plan économique, il est impensable d'installer des détecteurs à tous les points potentiels de contamination. Le nombre de détecteurs est donc limité et leur emplacement doit être optimal pour maximiser la capacité d'une détection rapide et minimiser les risques de contamination des usagers. Les détecteurs installés de façon optimale permettent d'obtenir des informations sur les paramètres physicochimiques de l'eau et de détecter le plus rapidement possible la source potentielle d'une contamination (localisation, débit d'injection et temps initial de la contamination ; (Tao *et al.*, 2012). Cette détection rapide permet de réduire les risques pour la population (J. Berry *et al.*, 2006)).

Pour localiser sur un réseau les points d'installation d'un nombre déterminé de détecteurs, plusieurs algorithmes ont été développés. Ces algorithmes, qui sont souvent basés sur l'utilisation d'algorithmes génétiques comme le MIP (*Mixed Integer Programming*) ou le NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*), ou encore d'algorithmes d'optimisation développés à cette fin spécifique par les chercheurs, permettent, à partir des données fournies par l'utilisateur, de déterminer le placement optimal des détecteurs. Le tableau ci-dessous (basé sur le travail de Rathi, 2015) rassemble les travaux les plus pertinents.

Tableau 3 : Principaux travaux sur le placement des détecteurs recensés dans la littérature (adapté de Rathi, 2015)

Variable(s) prise(s) en compte dans la fonction objectif	Référence	Approche / Algorithme utilisé	Nombre de détecteurs	Remarque
Étendue de la zone contaminée (DL)	Barkdoll <i>et al.</i> (2007)	Heuristique	Variable	Un seul objectif
	Kansal <i>et al.</i> (2012)	Heuristique	Variable	
	S. Rathi <i>et al.</i> (2014b)	Heuristique	Variable	
Temps de détection (TD)	Chastain Jr (2006)	Heuristique	Variable	
	Kansal <i>et al.</i> (2012)	Heuristique	Variable	
	S. Rathi <i>et al.</i> (2014a)	Heuristique	Variable	
Volume d'eau contaminée consommé (VC)	Ostfeld <i>et al.</i> (2004)	Algorithme génétique (AG)	Fixe	
	Ostfeld <i>et al.</i> (2005)	AG	Fixe	
Population exposée (PI)	J. W. Berry <i>et al.</i> (2005)	MIP	Fixe	
	Schwartz <i>et al.</i> (2014)	AG	Variable	
TD, PI, VC	Propato (2006)	MIP et heuristique	Fixe	Multiobjectifs
	Propato <i>et al.</i> (2007)	MIP	Fixe	
	D. Eliades <i>et al.</i> (2007)	Heuristique	Variable	

Variable(s) prise(s) en compte dans la fonction objectif	Référence	Approche / Algorithme utilisé	Nombre de détecteurs	Remarque
	D. G. Eliades <i>et al.</i> (2014)	NSGA-II	Fixe et variable	
TD et DL	Austin <i>et al.</i> (2009)	NSGA-II	Fixe	
	Aral <i>et al.</i> (2010)	PGA	Fixe et variable	
	Weickgenannt <i>et al.</i> (2010)	NSGA-II	Variable	
	Shweta Rathi <i>et al.</i> (2015b)	AG	Fixe	
	S. Rathi <i>et al.</i> (2015a)	Méthode alternative d'AG	Fixe	
	Zhao <i>et al.</i> (2016)	Heuristique (algorithme de Greedy)	Fixe	
	Palleti <i>et al.</i> (2016)	Heuristique (algorithme de Greedy)	Fixe	

Notation : NSGA-II : Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II; MIP : Mixed Integer Programming; AG : Algorithme génétique; PGA : Parallel Genetic Algorithm.

Dans le tableau précédent, nous distinguons deux principaux types d'approches visant à optimiser le placement des détecteurs, soit les approches à un seul objectif, qui minimisent soit le volume d'eau contaminée consommé, la population affectée, ou le temps de détection; et les approches multiobjectives, qui optimisent plus d'un objectif à la fois (p.ex. le temps de détection et le volume d'eau contaminée consommé). Dans ce dernier cas, plusieurs solutions formant ce qu'on appelle le « front de Pareto » sont proposées à l'utilisateur.

Ainsi, comme on peut le constater dans la littérature, les travaux visant à placer les détecteurs ont tous des objectifs similaires : détecter le plus rapidement possible une

contamination pour réduire le risque sur la population. La différence dans les travaux réside dans les algorithmes employés et dans la représentation mathématique des objectifs considérés.

2.4 Étapes de réponse à une contamination

Suite à une première détection par un capteur, des mesures doivent être entreprises pour garantir un retour rapide et efficace de la distribution normale de l'eau aux usagers en passant par la limitation des impacts de cette contamination. À cette fin, l'US EPA (United States Environmental Protection Agency) a développé un guide détaillé pour lutter contre une contamination (US EPA, 2003). Ce guide propose deux actions parallèles et successives : premièrement, l'évaluation de la menace et deuxièmement, la réponse à la menace. La Figure 3 de la page suivante décrit ces deux étapes.

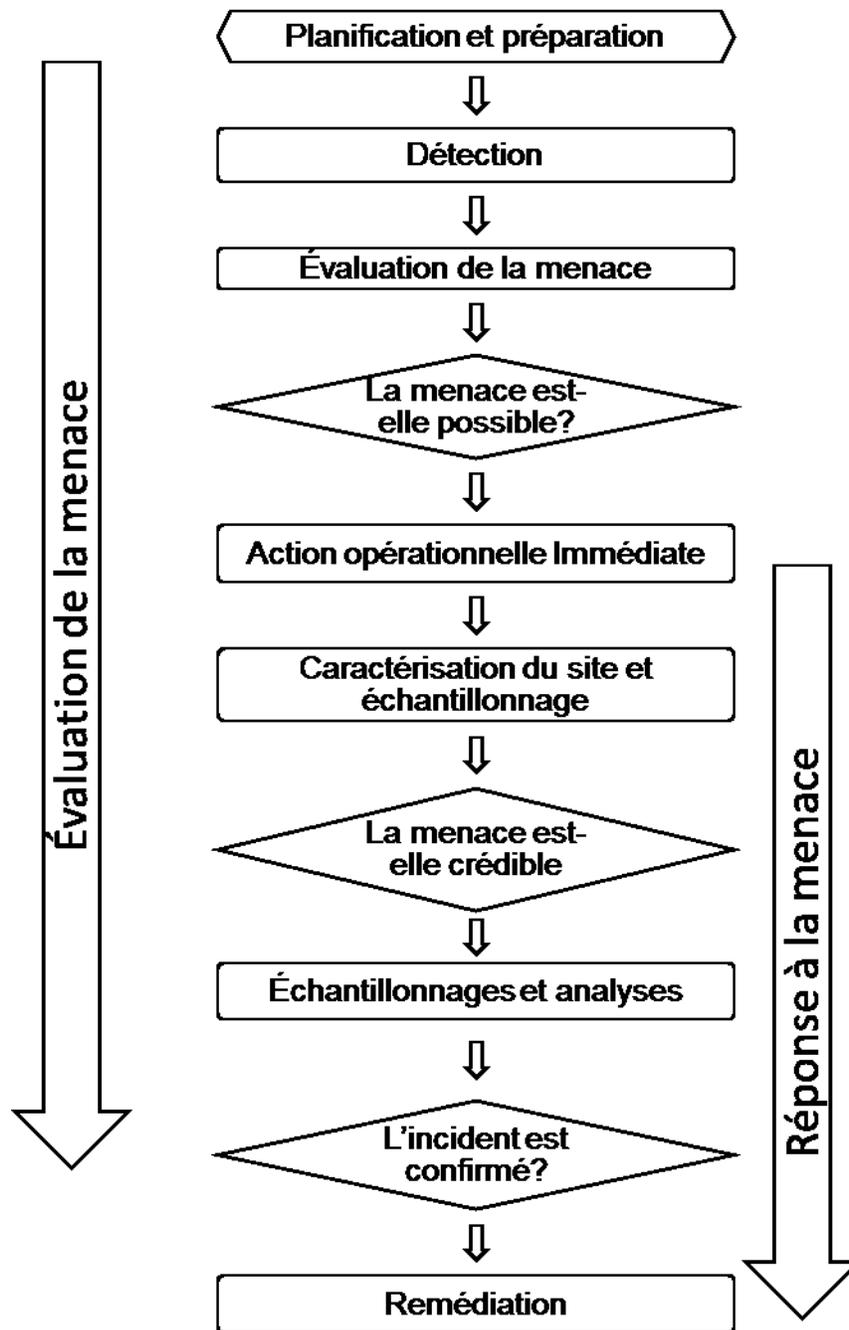


Figure 3 : Réponses suite à une contamination (adapté d'US EPA, 2003)

Comme indiqué ci-dessus, après la détection de la menace, il faut évaluer cette menace à travers la confirmation de sa potentialité puis la mise en place d'actions immédiates (déploiement d'une équipe pour l'isolement et le rinçage des conduites susceptibles d'être contaminées) dans le but d'un retour rapide à la normale du système de distribution d'eau potable.

2.5 Stratégies d'isolement d'un secteur contaminé

Une fois une contamination détectée ou suspectée, il faut la confirmer par le déploiement d'une équipe qui procèdera à l'échantillonnage du secteur susceptible d'être contaminé. Selon l'US EPA (2006), une fois cette contamination confirmée, des actions opérationnelles sont entreprises. Parmi celles-ci, on trouve la délimitation du secteur d'intervention, l'isolement du secteur contaminé ou l'augmentation de la concentration du désinfectant, selon le cas, et l'identification des usagers potentiellement affectés. D'autres actions sont engagées avant de revenir à la situation normale, comme l'émission d'avis sur la consommation de l'eau dans la région concernée (comme ce fut le cas récemment à la ville de Montréal dans le secteur Côte-des-Neiges (La Presse Canadienne, 2016) et le rinçage des conduites. La Figure 4 ci-dessous résume les étapes énoncées.

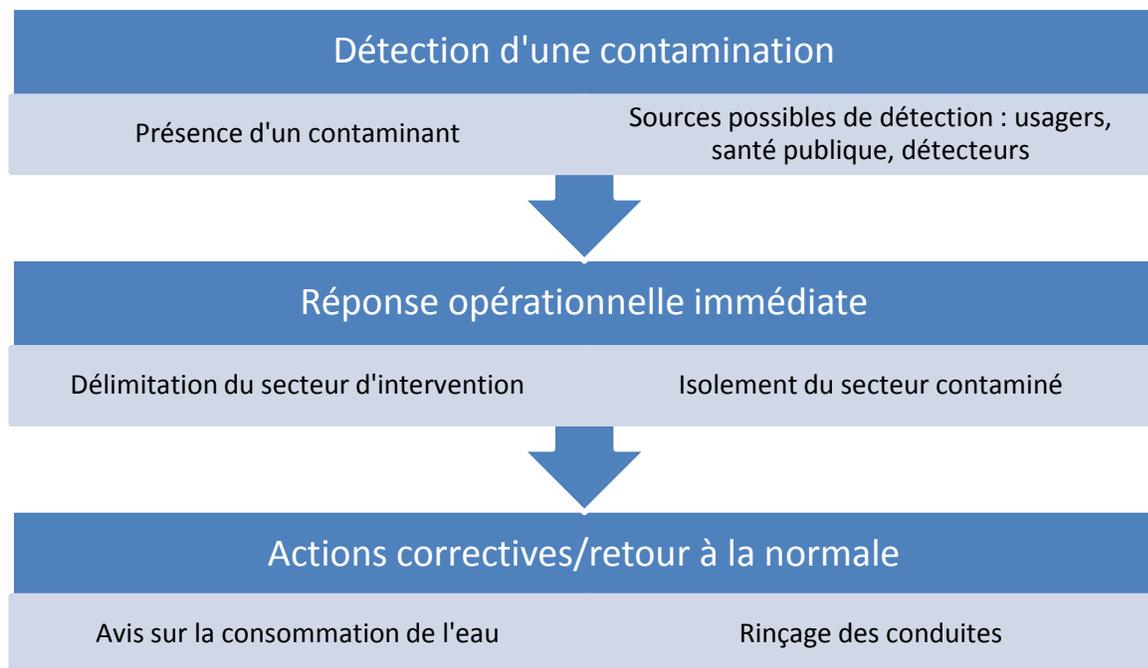


Figure 4 : Stratégie d'isolement d'un secteur contaminé

2.6 Stratégies de rinçage

Le rinçage est considéré parmi les meilleures méthodes d'entretien de la qualité des conduites des RDEP. Le rinçage permet d'évacuer les sédiments accumulés dans les

conduites, d'éliminer les mauvais goûts et odeurs, et, éventuellement, d'évacuer un contaminant ayant pu être introduit dans le réseau. Cette technique peut être utilisée en réponse à des problèmes de qualité de l'eau pour évacuer l'eau contaminée, ou comme mesure préventive (Poulin *et al.*, 2010). Deux principales approches de rinçage existent : le rinçage traditionnel et le rinçage unidirectionnel.

2.6.1 Rinçage traditionnel

Cette approche vise l'ouverture des bornes d'incendie de façon à créer une demande en eau assez élevée, ce qui implique l'augmentation de la vitesse dans les conduites, pour un certain temps [entre 15 à 20 min] ou jusqu'à l'obtention des critères de qualité souhaités.

2.6.2 Rinçage unidirectionnel

Cette approche consiste à isoler une partie du réseau dans le but de créer des conditions d'écoulement unidirectionnelles propices. L'eau est ensuite évacuée à travers les bornes d'incendie se trouvant dans la partie isolée. Cette méthode de rinçage se fait d'une manière successive et organisée, garantissant ainsi un non-retour de l'eau contaminée dans les régions déjà rincées. Les étapes de cette approche sont :

- Ouverture de vannes et bornes;
- Rinçage;
- Fermeture des vannes et bornes d'incendie du secteur rincé;
- Ouverture des vannes et des bornes d'incendie du secteur suivant;
- Rinçage;
- Et ainsi de suite jusqu'au rinçage complet de la zone contaminée.

2.7 Synthèse

Suite à une première détection de contamination dans un RDEP, des actions doivent être entreprises, dont une des premières est l'identification de la source de contamination et de la zone potentiellement contaminée. La première détection à un

détecteur donné est associée à une région précise du réseau comme source potentielle de contamination. La localisation et l'étendue de cette zone dépendent des conditions hydrauliques dans le réseau, et peuvent être déterminées à l'aide de la modélisation hydraulique. Or, lors de situations d'urgence [incendie, bris, etc.], des changements dans la direction des écoulements peuvent avoir lieu et modifier cette dynamique, rendant ainsi inappropriées les procédures d'isolement et de rinçage ayant été programmées en supposant des conditions hydrauliques normales.

3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente, en premier lieu, les outils [section 3.1] et les cas d'application [section 3.2] utilisés pour atteindre les objectifs du travail. Les étapes suivies pour atteindre ces objectifs sont par la suite présentées à la section 3.3.

3.1 Outils

Deux principaux outils ont été utilisés dans ce travail : le logiciel EPANET2 [Rossman, 2000] et le logiciel S-Place (D. G. Eliades *et al.*, 2014).

Les simulations hydrauliques des différents scénarios ont été réalisées sur EPANET2 [Rossman, 2000]. EPANET2 permet de reproduire les écoulements dans un réseau à partir d'un réseau schématique composé de nœuds, de conduites, de réservoirs, de pompes et de vannes. Une fois le réseau construit et après avoir choisi la formule des pertes de charge [Hazen-Williams dans notre cas], le logiciel permet de simuler l'hydraulique en réseau sur une période de temps donnée. Ainsi, en fonction des scénarios de consommation donnés en entrée, le modèle calcule en sortie les pertes de charge et le débit dans les conduites [sens et amplitude], les pressions aux nœuds et, si désirées, l'âge de l'eau et la qualité de l'eau à chaque nœud.

Dans ce document, le placement des détecteurs a été réalisé en utilisant le logiciel S-Place, dont l'algorithme a été développé par (D. G. Eliades *et al.*, 2014) et dont le code Matlab est disponible gratuitement sur <https://github.com/KIOS-Research/splace-toolkit>. Dans ce logiciel, la localisation des détecteurs est déterminée par la résolution d'un problème de minimisation des risques multiobjectifs. Ainsi, les solutions qui font partie du front de Pareto¹ sont identifiées par l'algorithme. Les trois objectifs considérés sont : 1) le nombre de détecteurs ou leur coût total (F_0); 2) le volume d'eau contaminée consommé moyen parmi tous les scénarios considérés (F_1); et 3) le volume d'eau

¹ Ensemble des solutions optimales dans un problème multiobjectif.

contaminée consommé maximal parmi tous les scénarios considérés ($F2$). Ainsi, le problème est formulé comme suit :

$$Y = \min\{F0(\chi), F1(\chi; \Omega), F2(\chi, \Omega)\},$$
$$\chi \in \{1,0\}Ns$$

avec $\chi \in X$

où χ identifie si un détecteur est présent ou non à chaque nœud (si $\chi = 1$, un senseur est installé à ce nœud, sinon $\chi = 0$), Ω représente la matrice globale d'impacts (volume d'eau contaminée consommée ou population infectée), X représente le nombre de détecteurs considérés dans l'optimisation, et Ns est le nombre possible de positionnements des détecteurs.

Après avoir choisi le réseau, on passe à la création des scénarios. Ceci consiste à entrer les données suivantes : la durée de la simulation, la concentration et la durée de la contamination, la variation du profil de consommation et la durée d'injection. Une fois le scénario créé, la simulation peut se faire en explorant tous les points potentiels de contamination sur le réseau (simulation complète) ou en choisissant des points de façon aléatoire. Dans le premier cas, chaque nœud sera une source potentielle de contamination pour chaque heure de simulation. Ainsi, pour un réseau de 10 nœuds et une simulation sur une période de 4 heures, on aura 40 scénarios de contamination possibles. Parmi les points d'injection, tel que mentionné précédemment, on peut aussi choisir aléatoirement les nœuds qui peuvent être la source d'une contamination (un certain pourcentage, établi par l'utilisateur, du total des scénarios). Une fois toutes ces données entrées, le logiciel est prêt à optimiser, c'est-à-dire à minimiser la fonction objectif présentée ci-haut. Pour ce faire, deux méthodes sont disponibles, soit 1) la méthode exhaustive, qui simule tous les scénarios possibles et identifie celui ou ceux qui minimisent la fonction objectif (cette méthode permet de considérer toutes les solutions possibles et de choisir la solution optimale); et 2) la méthode dite évolutionnaire, soit l'algorithme génétique NSGA-II (Deb *et al.*, 2002).

Toutes les simulations qui seront présentées dans ce document ont été réalisées sur un ordinateur possédant les caractéristiques suivantes : processeur : Intel® Core(TM) i7-4500U CPU @ 1.80 GHZ 2.40GHZ; 16.0 GB de RAM, système : 64 Bit.

3.2 Données

Pour démontrer l'impact des situations d'urgence sur le sens d'écoulement de l'eau, deux réseaux ont été choisis : un réseau fictif modifié (Anytown; Walski, 1987) et un réseau réel (le réseau d'une ville de la province de Québec). Le choix du réseau Anytown a été basé sur le fait que c'est un réseau simple (22 nœuds, 43 conduites, 2 réservoirs, 3 pompes et un réservoir). Des modifications ont été apportées au réseau proposé par Walski (1987) dans le but de faciliter la résolution du modèle hydraulique. Ces modifications sont les suivantes :

- Éliminations des trois pompes, des deux réservoirs à volume fini et des nœuds 5, 6 et 7;
- Abaissement de l'élévation du nœud 9 à 50 pieds;
- Ajout d'un réservoir au nœud 17 dont la charge (élévation) est de 360 pieds;
- Élévation du premier réservoir à une hauteur de 250 pieds.

Le réseau ainsi modifié est illustré à la Figure 5.

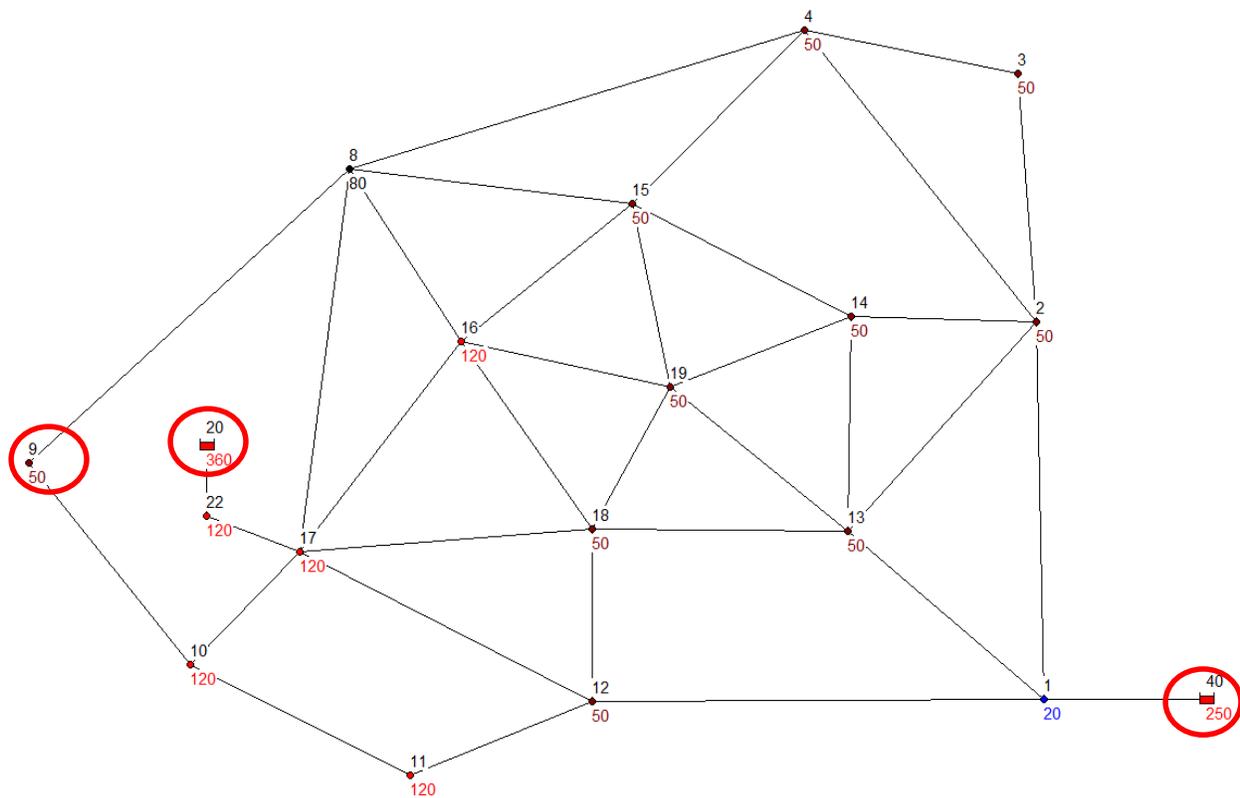


Figure 5 : Schéma du réseau fictif d'Anytown modifié

La variation de la consommation dans le réseau est présentée dans la Figure 6. Nous remarquons d'après la figure que la consommation la plus importante est entre 15 h et 17 h. En ce qui concerne la consommation moyenne dans le réseau, elle est de 470 GPM. Le fichier d'entrée EPANET2 du réseau Anytown a été téléchargé du lien suivant : <https://github.com/KIOS-Research/splace-toolkit>. Les caractéristiques de chaque nœud et conduite du réseau d'Anytown modifié sont données à l'Annexe 1.

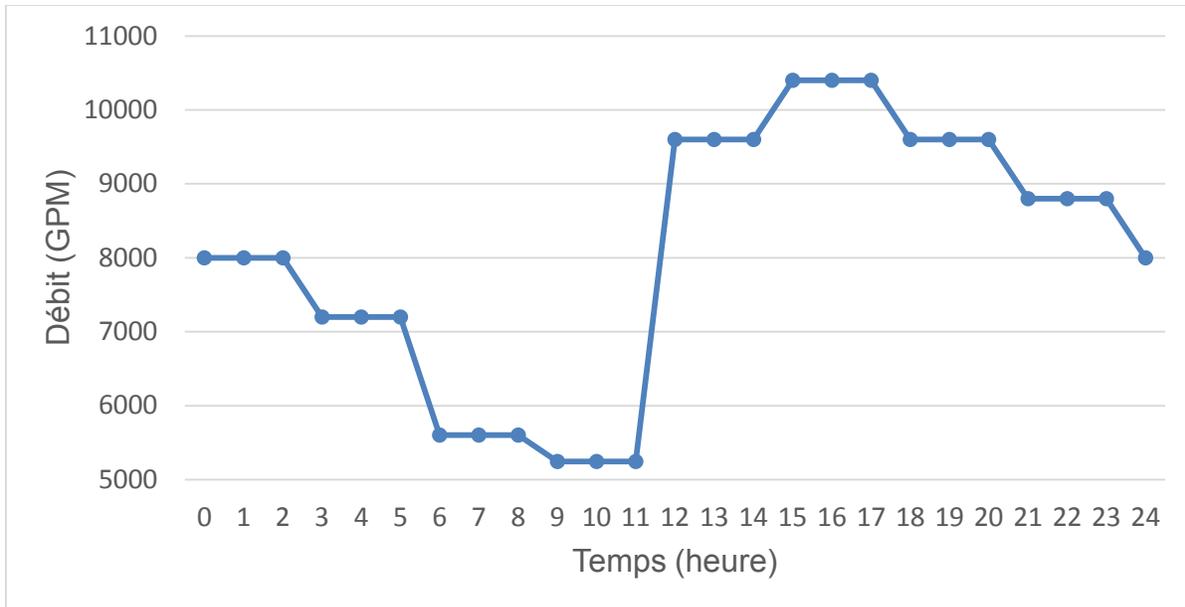


Figure 6 : Variation de la consommation en fonction du temps sur le réseau fictif

En ce qui a trait au réseau réel d'une ville de la province de Québec, il est constitué de 1 591 conduites, 1 460 nœuds (dont seulement 574 ont une consommation), deux vannes et deux réservoirs (voir Figure 7). La Figure 8, quant à elle, présente la variation de la consommation durant 24 h dans le réseau réel lors de la journée de consommation moyenne annuelle. Nous constatons sur cette figure que la plus grande consommation est à 10 h du matin. Le Tableau 4 présente les principales caractéristiques du réseau. Le modèle EPANET2 de ce réseau a été fourni par la municipalité du Québec où ce réseau est situé.

Tableau 4 : Caractéristiques du réseau réel

Consommation moyenne	Dénivelé	Longueur moyenne des conduites	Diamètre des conduites	Rugosité (coefficient de Hazen-Williams)
0,413 l/s	11 m	40,42 m	de 152,4 à 406,4 mm	de 40 à 140



Figure 7 : Schéma du réseau réel

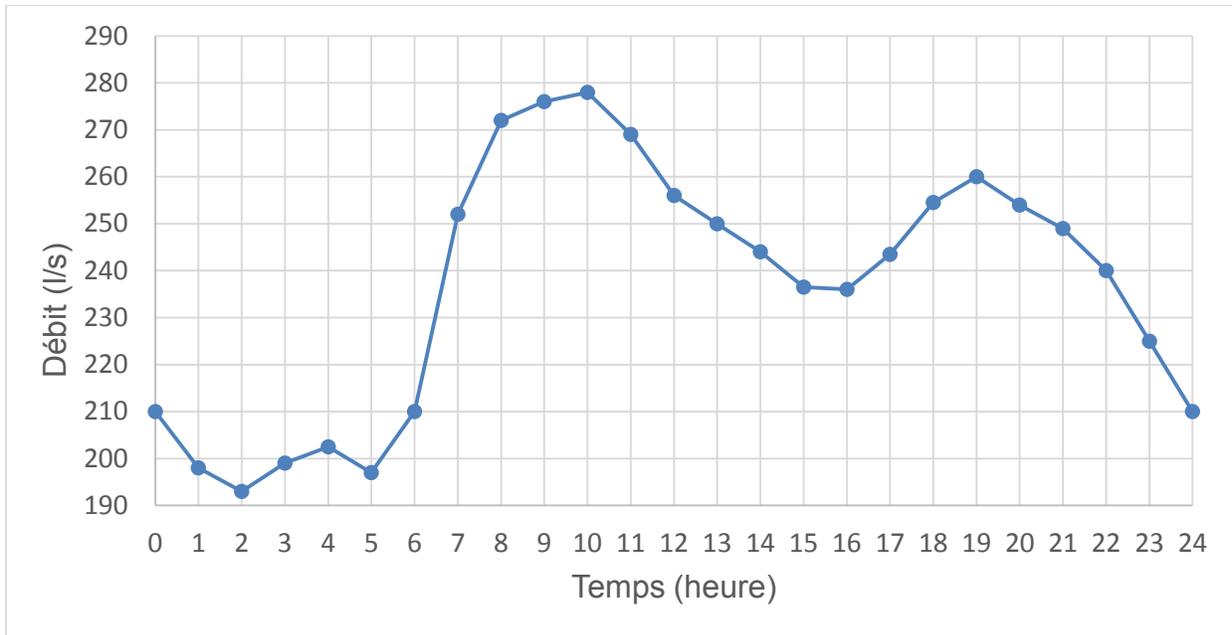


Figure 8 : Variation de la consommation durant 24 h sur le réseau réel

3.3 Étapes de travail

Le travail a été divisé en deux parties. La première partie consiste à développer une méthodologie pour placer les détecteurs dans un réseau réel (section 3.3.1). En effet, le placement de détecteurs sur un réseau réel (comportant souvent plusieurs centaines de nœuds et de conduites), peut prendre plusieurs jours de simulation. Cela est dû au très grand nombre de combinaisons de détecteurs possibles ainsi qu'au grand nombre de scénarios de contamination à considérer. On doit donc développer une méthodologie pour simplifier les calculs. Pour développer cette méthodologie, des analyses ont dans un premier temps été réalisées sur le réseau fictif, vu sa simplicité et donc la possibilité de tester toutes les combinaisons possibles de détecteurs et de scénarios de contamination. Les résultats obtenus sur le réseau fictif ont ensuite été transposés au réseau réel. Tandis que la deuxième partie du travail (section 3.3.2) s'intéresse à l'impact des situations d'urgence sur la détection de la contamination, dans les réseaux fictif et réel.

3.3.1 Méthodologie pour le placement des détecteurs

Le nombre de combinaisons possibles pour le placement des détecteurs dans un réseau peut être calculé avec cette formule :

$$C = \frac{N!}{(N-X)!X!}$$

avec C le nombre de combinaisons, N le nombre de nœuds et X le nombre de détecteurs qu'on souhaite placer. Or, sur un réseau réel, où le nombre de nœuds est souvent de plusieurs centaines voir milliers, le nombre de combinaisons possibles explose, ce qui peut conduire à des temps de simulation très longs, mais également à la saturation de la mémoire de l'ordinateur. Il est donc nécessaire de développer une façon de faire qui réduise les temps de calcul. C'est dans ce contexte que nous avons développé une méthode visant à réduire le temps de simulation sans autant impacter le placement optimal des détecteurs.

3.3.1.1 Réseau fictif

La première étape dans le travail consiste à placer les détecteurs dans le réseau selon la méthode exhaustive, en utilisant le logiciel S-Place, sachant que la méthode exhaustive permet à tout coup d'identifier la meilleure solution. Pour cette étape, nous avons choisi de placer trois détecteurs pour nous assurer que la majeure partie du réseau est couverte par la détection. Ainsi, après la création des scénarios de contamination (lieu d'injection du contaminant, durée de simulation, temps d'injection du contaminant, etc.), tous les scénarios de contamination possibles ont été simulés, pour un total de 456 scénarios. Ces 456 scénarios correspondent aux 456 possibilités de cas de contamination, soit une contamination survenant en chacun des nœuds (19) et à chaque heure de la journée (24). Pour chacun de ces 456 scénarios de contamination, nous avons choisi un temps d'injection de 0 h à 24 h et un temps de simulation de 24 h. Ces temps ont été choisis de façon à s'assurer que le contaminant ait pu rejoindre tous les nœuds du réseau pendant la durée de simulation. Par la suite, les volumes d'eau contaminée consommée à chaque nœud pour chaque scénario sont calculés. Enfin, le logiciel détermine la combinaison de détecteurs qui conduit à la minimisation des deux quantités suivantes : les volumes moyen et maximal d'eau contaminée consommée

parmi tous les scénarios de contamination considérés. Rappelons que, pour les travaux réalisés sur le réseau fictif, l'identification de ces solutions a été réalisée à l'aide de la méthode exhaustive, c'est-à-dire en simulant toutes les combinaisons possibles de détecteurs et en choisissant la meilleure (ou les meilleures).

Le temps de simulation pour optimiser la localisation de trois détecteurs dans le réseau fictif en considérant les 456 scénarios possibles et en ayant recours à la méthode exhaustive (c'est-à-dire en considérant toutes les combinaisons possibles de localisation d'un ensemble de trois détecteurs sur un réseau de 19 nœuds), selon les performances de l'ordinateur utilisé, est d'environ 12 à 15 min. Tel que mentionné précédemment, ce temps de calcul serait beaucoup plus élevé sur un réseau réel. Ainsi, la méthode développée pour localiser les détecteurs sur un réseau réel se base sur la simulation d'un certain pourcentage du nombre total de scénarios de contamination possibles, ces scénarios étant choisis de façon aléatoire, puis à l'utilisation de la méthode évolutionnaire (algorithme NSGA-II) pour la résolution du problème d'optimisation. Le choix du nombre de scénarios à considérer se base sur les résultats obtenus sur le réseau fictif, où il est possible de comparer les résultats obtenus i) avec tous les scénarios de contamination possibles et ii) avec un certain pourcentage de ces scénarios. Ainsi, nous avons procédé, sur le réseau fictif, à trois différents tests, pour lesquels respectivement 20 %, 30 % et 40 % des 456 scénarios possibles étaient considérés (soit respectivement 91, 136 et 182 scénarios) pour la localisation de trois détecteurs. Pour chacun de ces tests, puisque les scénarios sont choisis de façon aléatoire, nous avons réalisé 10 optimisations différentes, toujours en utilisant la méthode exhaustive. Pour chacun des nœuds du réseau, nous avons ensuite calculé le pourcentage de fois où il était identifié comme étant un nœud où un détecteur devrait être placé, puis nous avons comparé ces pourcentages à ceux obtenus lors d'un test complet (tous les 456 scénarios et la méthode exhaustive), qui permet d'obtenir des résultats optimaux. Le choix du pourcentage à adopter pour le réseau réel a finalement été réalisé sur la base de ces résultats.

3.3.1.2 Réseau réel

Comme pour le réseau fictif, la première étape consiste à placer les détecteurs en utilisant le logiciel S-Place selon la méthode évolutionnaire étant donné que la méthode exhaustive n'est pas réalisable sur ce réseau dû au nombre de simulations requis, qu'il est presque impossible à réaliser avec un ordinateur de bureau. En effet, le nombre de cas possible de combinaisons de détecteurs pour 1 462 nœuds et 5 détecteurs étant de 55 281 779 474 382.

Pour le réseau réel, le nombre de scénarios de contamination possibles est de 35 088 (1 462 nœuds * 24 h). Le temps de simulation pour optimiser la localisation de 5 détecteurs, avec la méthode évolutionnaire, dans le réseau réel en considérant les 35 088 scénarios de contamination possibles est estimé à plus de 7 jours selon les capacités de l'ordinateur utilisé. Dans un premier temps, la simulation de tous les scénarios possibles a été réalisée en utilisant la méthode évolutionnaire. Comme pour le réseau fictif, les deux quantités suivantes sont minimisées par le logiciel S-Place (voir section 3.1) : les volumes moyen et maximal d'eau contaminée consommée. Étant donné que le réseau réel contient plusieurs nœuds proches l'un de l'autre, les solutions ainsi obtenues peuvent souvent être similaires, ou presque, même si ce ne sont pas toujours exactement les mêmes nœuds qui sont identifiés à chaque fois. D'où la nécessité de répertorier les résultats obtenus sur une figure dans le but de voir les zones les plus susceptibles de contenir un détecteur. Dans un second temps, le pourcentage le plus approprié de scénarios (soit 20 %, 30 % ou 40 %) identifié à partir des résultats sur le réseau fictif a été simulé à son tour pour pouvoir comparer les résultats ainsi obtenus avec ceux obtenus en considérant tous les scénarios de contamination possibles. Les résultats de ces optimisations ont également été affichés sur une figure pour voir les similitudes entre les résultats obtenus en considérant tous les scénarios de contamination ou un certain pourcentage de ceux-ci. Et ainsi, valider ou non la méthodologie adoptée.

3.3.2 Impacts des situations d'urgence

La deuxième étape du travail consiste à étudier l'impact des situations d'urgence (bris ou incendie) sur la détection de contaminant dans le RDEP. Une partie a été effectuée sur le réseau fictif pour pouvoir tester toutes les possibilités (incendie à chaque nœud et bris sur chaque conduite). Tandis que l'autre partie a été réalisée sur le réseau réel, où nous nous sommes limités à deux exemples parmi les différentes possibilités pour chaque situation d'urgence.

3.3.2.1 Réseau fictif

La première étape dans ce travail consiste à placer trois détecteurs dans le réseau selon la méthode exhaustive, en utilisant le logiciel S-Place. Les résultats obtenus sont la base des étapes qui suivront.

Comme deuxième étape, nous avons tracé la matrice de détection, en temps normal de fonctionnement du réseau (journée de consommation moyenne et absence de situation particulière) à l'heure de la consommation la plus élevée (17 h). Cette matrice sera présentée sur deux supports différents : tableau et figure. La matrice de détection permet d'identifier, pour chaque nœud du réseau, le point où aurait lieu la première détection si une contamination survenait à ce nœud (il est donc déterminé selon le temps de parcours le plus court).

La troisième étape consiste à simuler des situations d'urgence (incendie ou bris de conduites) en chacun des endroits possibles du réseau, puis à comparer la matrice de détection de ces situations d'urgence avec celle précédemment identifiée pour la situation normale. En ce qui concerne les incendies, on a supposé qu'un débit de 1000 GPM (environ 63,1 L/s) était nécessaire pour combattre l'incendie. Ce choix est basé sur le branchement des citernes des pompiers à deux bornes d'incendie dans une zone d'habitation (Association des Pompiers Professionnels de Québec, 2001). Pour les bris, on a supposé que la conduite brisée devait être mise hors service temporairement (fermeture des vannes amont et aval) en vue d'être réparée. Dans les deux cas de situations d'urgence, la matrice de détection a été tracée à l'heure de la consommation la plus élevée, soit 17 h. Cette matrice a été comparée à la matrice de détection en situation normale (cas sans situations d'urgence), dans le but de pouvoir déterminer les

changements qu'apportent les incendies et les bris sur ce RDEP et ainsi évaluer si les réponses aux situations de contamination qui ont été élaborées en considérant un profil moyen de consommation (normal) demeuraient valides en situation d'urgence.

3.3.2.2 Réseau réel

De même que pour le réseau fictif, la première étape sur le réseau réel consiste à placer les détecteurs à l'aide du logiciel S-Place. Pour le réseau réel, cinq détecteurs ont été localisés, en utilisant la méthode évolutionnaire et en considérant le pourcentage de scénarios de contamination identifié dans la première partie du travail (soit 20 %, 30 % ou 40 % des tous les scénarios de contamination possibles). Chaque solution a été illustrée sur une figure dans le but de pouvoir établir là où les détecteurs sont le plus susceptibles d'être présents.

La deuxième étape a été d'établir la matrice de détection en situation normale à l'heure de la consommation la plus élevée (10 h pour le réseau réel).

Enfin, les deux situations d'urgences, soit un incendie requérant 1000 GPM et un bris de conduite, seront simulées de deux façons. La première consiste à placer l'une des situations dans des régions censées être importantes (ex. conduite principale reliant deux secteurs du réseau, incendie près d'un détecteur, etc.). Tandis que la deuxième façon consiste à placer les situations d'urgence dans des régions jugées moins stratégiques. Pour chaque simulation, une matrice de détection sera établie à l'heure de la consommation la plus élevée (10 h) puis comparée à la matrice en situation normale.

En plus de ces étapes, et dans le but de pouvoir démontrer l'importance du nombre de détecteurs dans le RDEP, une simulation visant à placer 10 détecteurs sera faite puis une matrice sera établie pour évaluer l'étendue de la couverture du réseau.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est divisé en deux grandes parties. La première consiste à présenter les résultats obtenus pour le développement de la méthodologie décrite à la section 3.3.1. Tandis que la deuxième partie traite de l'impact des situations d'urgence sur la détection de contaminants.

4.1 Résultat de la méthodologie pour le placement des détecteurs

La méthodologie sera développée en premier sur le réseau fictif. Le but est de pouvoir tester toutes les possibilités d'implantation de détecteurs afin de déterminer le pourcentage de scénarios de contaminations à considérer sur le réseau réel (20 %, 30 % ou 40 %) pour obtenir une précision suffisante.

4.1.1 Réseau fictif

Sur ce réseau, 456 scénarios de contamination (voir section 3.1) sont simulés. Ces scénarios seront à la base du calcul de notre fonction objectif, décrite à la section 3.1. À partir des résultats obtenus, et en utilisant la méthode exhaustive, nous obtenons la position des détecteurs aux nœuds 2, 8 et 19, comme indiqué à la Figure 9 ci-dessous :

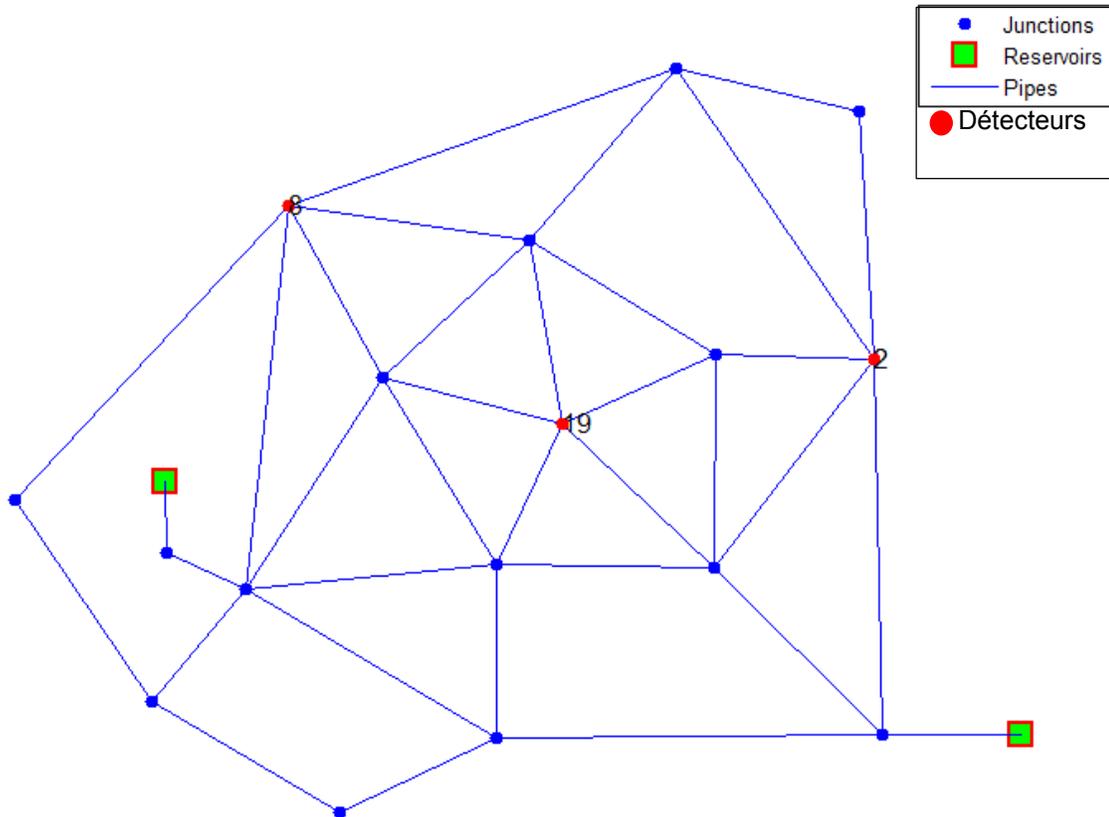


Figure 9 : Résultat du placement de détecteurs sur le réseau fictif

Pour cette solution, les consommations d'eau contaminée moyenne et maximale sont respectivement de 49 884 et 198 156 galons.

Comme décrit à la section 3.3.1, la méthodologie développée consiste à simuler un nombre de scénarios de contamination (20 %, 30 % et 40 % du nombre total de scénarios possibles) choisis aléatoirement parmi les 456 scénarios de contamination possibles. Pour chaque scénario aléatoire, 10 simulations seront effectuées dans le but de pouvoir choisir le scénario à adopter pour le réseau réel.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus suite à ces simulations (les détails de chaque test sont présentés à l'Annexe 2). Chaque pourcentage représente le nombre d'apparitions du nœud dans les solutions proposées sur le nombre total de solutions.

Tableau 5 : Résultat du test de pourcentage dans le réseau fictif

Nœuds sélectionnés	Test 20 %	Test 30 %	Test 40 %
1	10 %	23 %	7 %
2	75 %	69 %	60 %
3	5 %	8 %	7 %
8	55 %	100 %	73 %
9	20 %	0 %	0 %
10	15 %	0 %	0 %
14	10 %	0 %	27 %
15	10 %	0 %	27 %
18	10 %	0 %	27 %
19	90 %	100 %	73 %
Moyenne objectif F1 (galons)	51 666	48 017	48 626
Moyenne objectif F2 (galons)	191 564	209 952	200 542
Écart-type F1 (galons)	3 757	3 475	2 246
Écart-type F2 (galons)	44 474	36 478	16 918
Temps de simulation	2 min 5 s à 2 min 25 s	3 min 5 s à 3 min 20 s	4 min 40 s à 4 min 50 s

En comparant les trois tests aléatoires (voir Annexe 2 pour plus de détails sur les résultats obtenus pour chaque test), et en nous intéressant plus particulièrement aux résultats obtenus aux nœuds 2,8 et 19, nous constatons que ce sont les nœuds qui reviennent le plus souvent comme solutions, pour tous les pourcentages considérés. Or, en considérant la minimisation de notre fonction objectif par rapport au test complet,

nous remarquons que le test 30 % et le test 40 % s'approchent des résultats obtenus lors de la simulation de tous les scénarios de contamination (F1 = 49 884 galons et F2 = 198 156 galons). En prenant en compte, cette fois-ci, l'écart-type de la valeur des objectifs pour chaque test, on constate que le test 40 % présente une dispersion intéressante et inférieure au test 30 %. Or, les pourcentages d'apparition des nœuds 2, 8 et 19 dans les solutions du test 30 % (respectivement 69 %, 100 % et 100 %) sont beaucoup plus intéressants que ceux obtenus lors du test 40 % (60 %, 73 % et 73 %). De plus, le temps de calcul lorsque 30 % des scénarios sont considérés est évidemment inférieur à celui requis lors de la prise en compte de 40 % des scénarios. D'où notre choix de 30 % comme proportion des scénarios de contamination à prendre en compte pour le placement des détecteurs sur le réseau réel.

4.1.2 Réseau réel

Comme expliqué dans la section précédente, et dans le but de mieux optimiser le temps de calcul pour placer les détecteurs, un test sera effectué avec 30 % des scénarios possibles de contamination (soit 10 526 cas); les résultats de ce test seront comparés à ceux obtenus en considérant tous les scénarios de contamination possibles (35 088 cas).

Pour ces deux tests (30 % et 100 % des scénarios de contamination possibles), cinq détecteurs seront placés selon la méthode évolutionnaire. Ce choix de cinq détecteurs est basé sur un compromis entre la couverture spatiale du réseau et le coût d'installation et d'entretien des détecteurs.

Plusieurs solutions ont été obtenues, soit 9 pour le test complet et 14 pour le test de 30 % des scénarios de contamination. Les deux figures ci-dessous présentent, successivement, des exemples de résultats du test complet (Figure 10) et du test de 30 % (Figure 11). Tandis que le Tableau 16 (Annexe 3) et la Figure 12 résument les résultats obtenus pour chacun des tests.



Figure 10 : Exemple de résultat du placement des détecteurs dans le réseau réel lors d'un test complet



Figure 11 : Exemple du résultat du placement des détecteurs lors d'un test de 30 % des scénarios de contamination

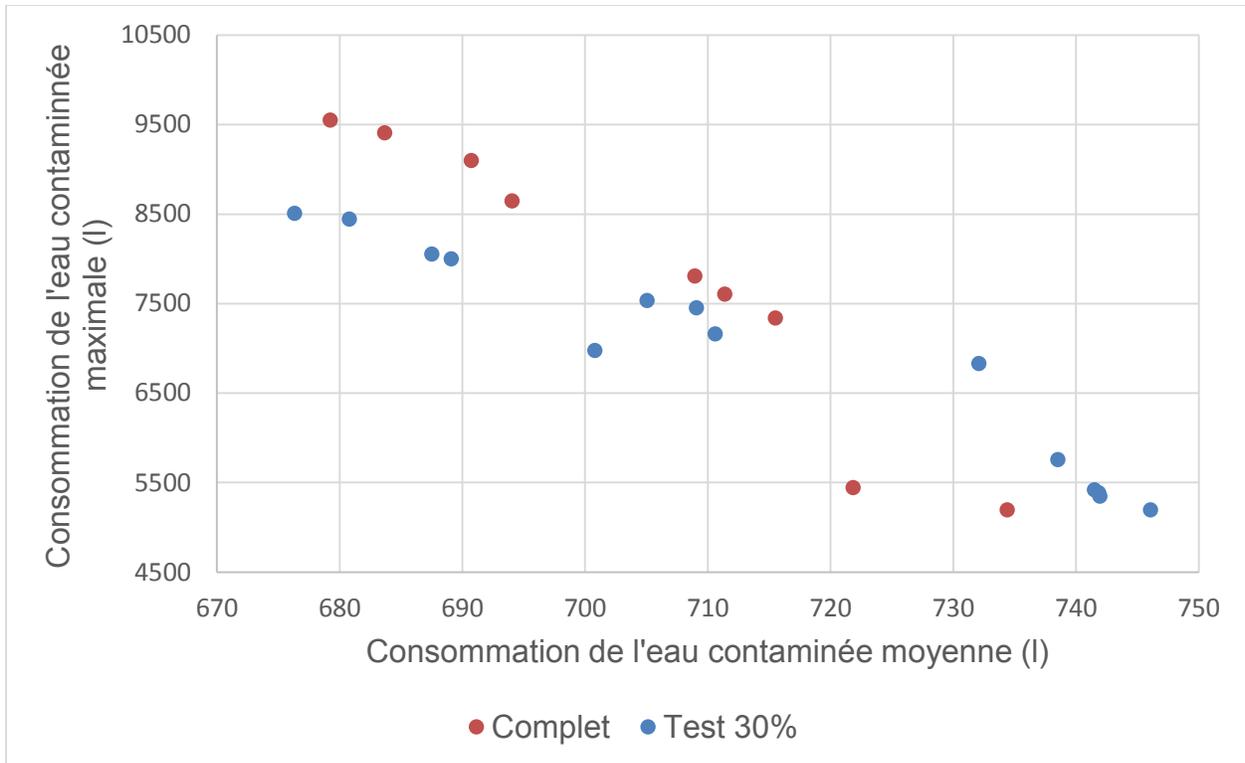


Figure 12 : Valeur des deux fonctions objectif pour les solutions obtenues lors du placement des détecteurs dans le réseau réel

La figure ci-dessus présente tous les résultats du test complet ainsi que ceux du test 30 %. Nous constatons que la consommation d'eau contaminée moyenne est presque la même pour les deux tests (entre 675 et 745 l). En ce qui concerne la consommation d'eau contaminée maximale, nous remarquons qu'il y a une différence; pour le test complet, les valeurs sont comprises entre 5 400 et 9 500 l, tandis que pour le test 30 %, les valeurs sont entre 5 400 et 8 500 l. Cette différence est due tout simplement au nombre de scénarios simulés, soit 35 088 cas de contaminations pour un test complet et 10 526 pour un test 30 %.

Bien que l'optimisation réalisée en considérant 30 % des scénarios conduise à 14 solutions différentes, on constate que toutes ces solutions sont équivalentes, puisque les nœuds identifiés dans chacune sont toujours situés dans les cinq mêmes régions. La Figure 13 illustre la compilation de toutes les solutions. Sur cette figure, les zones hachurées en orange correspondent aux zones où les détecteurs sont situés

pour les 14 solutions de l'optimisation réalisée avec 30 % des scénarios. Tandis que les zones hachurées en gris correspondent aux zones où les détecteurs sont situés pour les neuf solutions obtenues en optimisant la localisation des détecteurs en considérant tous les scénarios possibles.

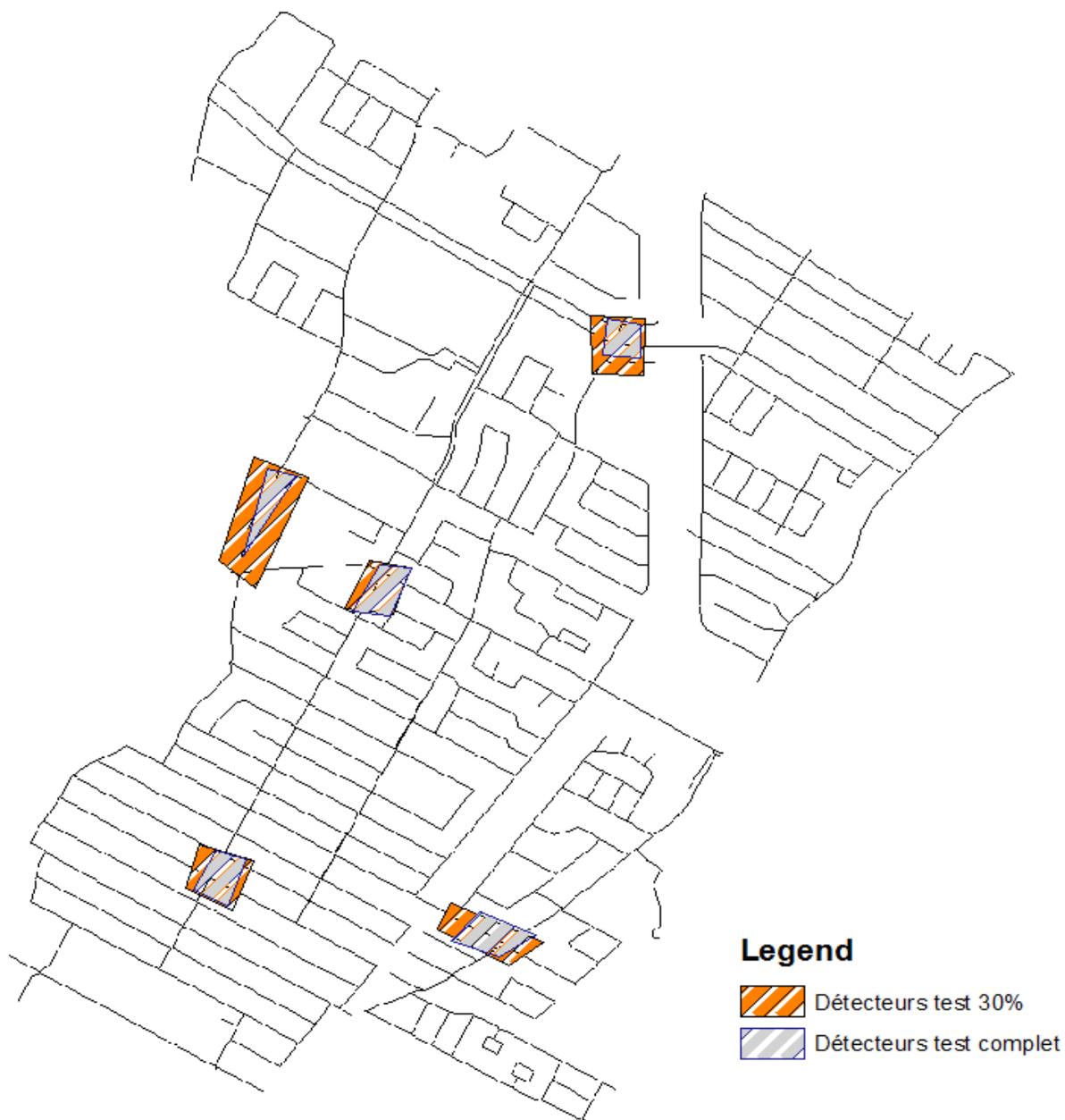


Figure 13 : Emplacement des détecteurs dans le réseau réel pour un test complet et un test de 30 % des scénarios de contamination

En comparant les deux résultats du placement des détecteurs, nous constatons que les deux zones se superposent, validant ainsi la méthode du 30 % développée.

4.1.3 Discussion

En nous basant sur les résultats de la section 4.1, nous pouvons déduire que la prise en compte de 30 % des scénarios de contamination, sur le réseau fictif, permet d'obtenir de bons résultats en ce qui concerne les nœuds sélectionnés pour placer les détecteurs par rapport à la prise en compte de tous les scénarios (test complet). De plus, ceci permet de réduire le temps de simulation de 70 % en comparaison avec le temps de simulation pour un test complet. Sur le réseau réel, le nombre de nœuds est important (plus d'une centaine), donc le choix des nœuds où placer les détecteurs peut varier d'une solution à l'autre. Par contre, en compilant sur une figure tous les résultats, nous constatons que les détecteurs se concentrent dans des régions bien définies pour toutes les solutions, que ce soit pour un test complet ou aléatoire (30 %). Ainsi, nous pouvons dire que la méthode développée pour le placement des détecteurs est valide.

4.2 Résultat des impacts des situations d'urgence

Cette section s'intéresse à l'impact des situations d'urgence sur la détection de la contamination par rapport à une situation normale. Dans un premier temps, les simulations vont être faites sur le réseau fictif étant donné que nous pourrions simuler tous les cas possibles. Tandis que sur le réseau réel, nous simulerons deux cas d'exemple pour chaque situation (incendie et bris de conduite).

4.2.1 Réseau fictif

4.2.1.1 Situation normale.

En se basant sur le résultat du placement des détecteurs pour un test complet (section 4.1.1), la matrice de détection qui relie chaque nœud à un détecteur a été établie et est présentée au Tableau 6. Dans ce tableau, les « 1 » indiquent à quel détecteur parmi les trois (2, 8 ou 19) surviendrait la première détection d'une contamination qui proviendrait du nœud identifié en haut de colonne. La Figure 14 représente cette même matrice

sous une autre forme. Dans cette figure, les lignes colorées correspondent aux zones pour lesquelles une contamination qui en proviendrait serait détectée par un des détecteurs; chaque couleur est associée au nœud où aurait lieu la première détection. On constate à la Figure 14 qu'avec trois détecteurs sur le réseau fictif, de nombreuses zones du réseau (7 conduites et 3 nœuds) ne sont pas couvertes, c'est-à-dire que, si une contamination y survenait, elle ne serait jamais détectée.

En général, les procédures d'intervention sur un réseau (pour isoler puis rincer un secteur contaminé) sont établies sur la base d'un profil moyen de consommation. Pour le réseau fictif, ces procédures seraient donc établies à partir des informations contenues au Tableau 6 et à la Figure 14. Or les situations d'urgence peuvent avoir un impact sur les sens d'écoulement, et donc sur la matrice de détection. Ceci pourrait, dans certains cas, rendre les procédures d'isolement préalablement définies inadaptées aux nouvelles conditions d'écoulement.

Tableau 6 : Matrice de détection lors d'une situation normale

	Id du nœud															
Détecteur	1	2	3	4	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nœud 2	1	1														
Nœud 8					1	1	1						1	1		
Nœud 19									1	1	1	1			1	1

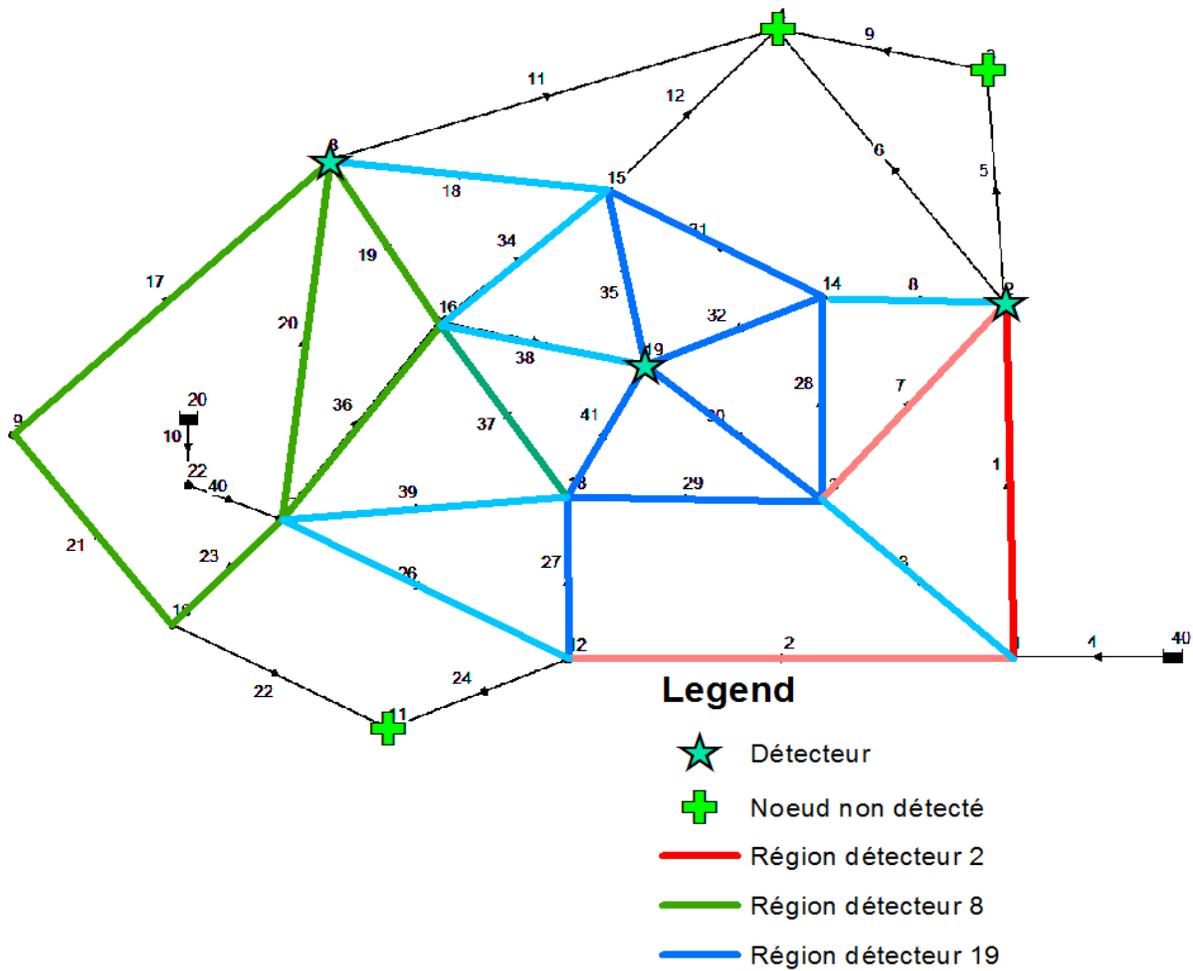


Figure 14 : Matrice de détection lors d'une situation normale à 17 h

4.2.1.2 Cas d'incendie.

En conservant les mêmes localisations des détecteurs (soit aux nœuds 2, 8 et 19), un incendie a été simulé à chaque nœud. Le tableau ci-dessous résume le nombre de changements constatés dans la direction de l'écoulement de l'eau dans le réseau à chaque nœud où l'incendie a été simulé.

Tableau 7 : Nombre de changements de direction d'écoulement de l'eau constatés dans le réseau, pour chaque nœud où l'incendie a été simulé

Nœud de l'incendie (1000GPM)	1	2	3	4	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nombre de changements constatés	0	1	2	1	2	1	3	2	1	2	3	2	3	0	3	2

On constate dans ce tableau que le nombre de changements de direction d'écoulement de l'eau dans les conduites varie selon le scénario d'incendie simulé dans les différents nœuds. Dans la section suivante travail, un exemple sera présenté en détail.

4.2.1.3 Exemple du nœud 14

La demande en eau au nœud 14 lorsqu'un incendie y survient cause trois changements de direction d'écoulement, soit le nombre maximal parmi tous ceux notés au Tableau 7. Ce cas d'incendie a donc été choisi comme premier exemple pour démontrer l'impact de l'incendie sur la matrice de détection. La Figure 15 et le Tableau 8 ci-dessous présentent la matrice de détection pour un incendie qui surviendrait à 17 h (l'heure de la consommation la plus importante).

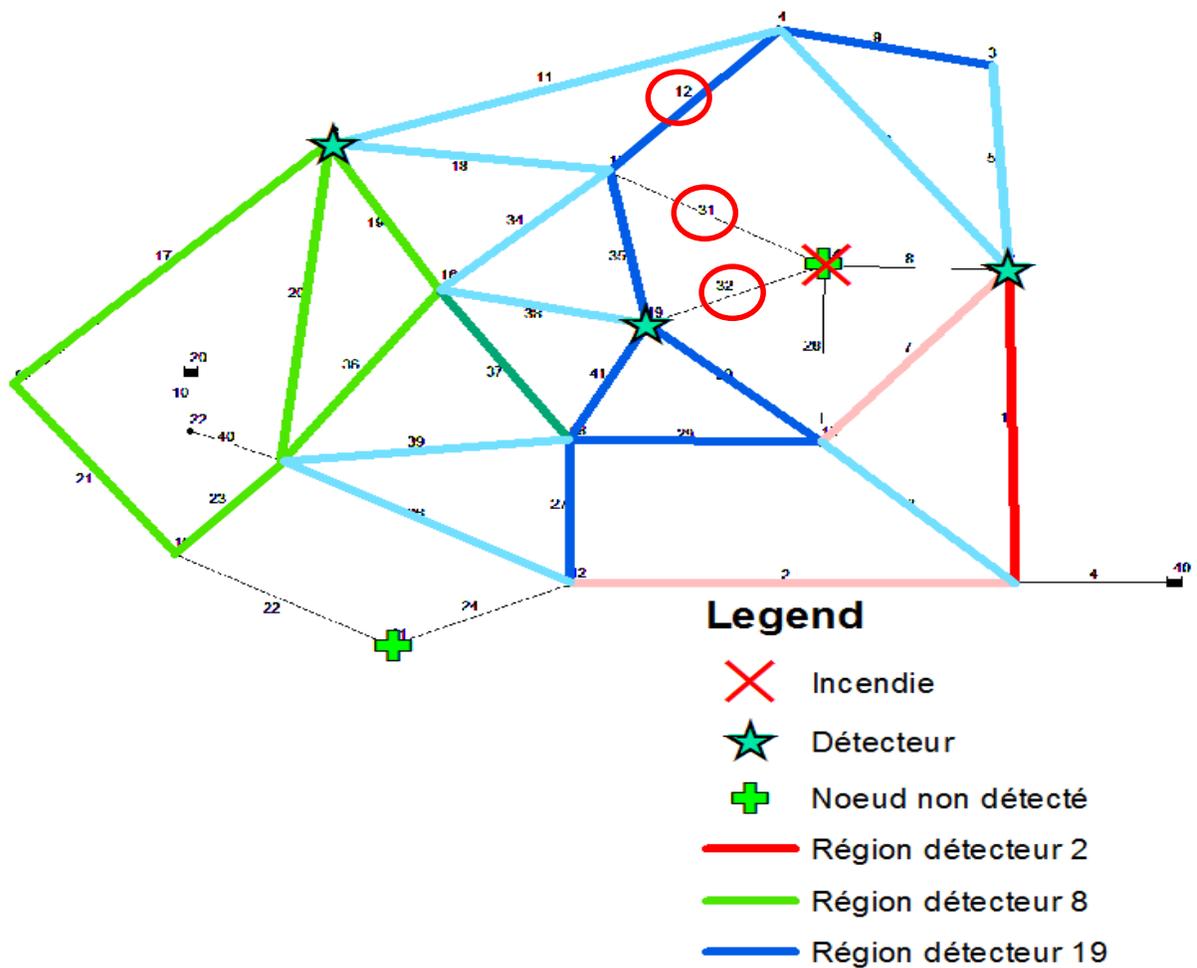


Figure 15 : Impact de l'incendie du nœud 14 sur la détection à 17 h

Tableau 8 : Matrice de détection en cas d'incendie

	Id du nœud															
Détecteur	1	2	3	4	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nœud 2	1	1														
Nœud 8					1	1	1						1	1		
Nœud 19			1	1					1	1		1			1	1

Les principaux changements observés par rapport à la situation normale (voir Figure 14 et Tableau 7) sont dans les conduites 12, 31 et 32 (cercle en rouge sur la Figure 15).

Ces changements ont eu comme impact la détection de certains nœuds non détectés (nœuds 3 et 4) et, en même temps, la non-détection du nœud 14.

Ces changements auront un impact sur la détection de contaminant. Dans une situation normale, si le détecteur 19 signale la présence d'un contaminant, la procédure d'intervention sera de fermer les vannes susceptibles d'être à la source de cette contamination (ex. vannes pour isoler les nœuds 12, 13, 14, 15, 18 et 19). Or, durant l'incendie, deux nouvelles sources de contamination deviennent possibles pour une détection au nœud 19 (nœuds 3 et 4). Ainsi, si une équipe est déployée pour l'intervention, négliger la situation d'urgence risque de rendre cette même intervention inutile et/ou encore propager la contamination vers d'autres régions.

4.2.1.4 Bris de conduite

Dans un deuxième temps, le cas des bris de conduites a été étudié. Durant cette étape, un bris a été simulé à chaque conduite du réseau fictif. Le tableau ci-dessous présente l'identifiant de la conduite brisée ainsi que le nombre de changements constatés dans le réseau pour chaque cas d'étude.

Tableau 9 : Nombre de changements de direction d'écoulement de l'eau constatés dans le réseau pour chaque conduite où le bris a été simulé

ID de la conduite brisée	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	17	18	19	20	21	22
nombre de changements	4	0	3	*	3	0	0	2	2	*	2	1	1	3	2	0	2	1
ID suite	23	24	26	27	28	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	40	41	
nombre de changements	3	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	2	1	1	3	*	0	
* = lié au réservoir																		

À partir de ce tableau, nous constatons qu'un nombre important de cas de bris causent des changements de direction d'écoulement. Ces derniers varient, d'aucun changement (10 cas) à quatre changements (exemple du bris de conduite ID 1). Présentant un nombre important de changements, l'exemple du bris de la conduite 1 sera traité dans les lignes qui suivent. D'autres exemples, soit un bris sans changement sur la détection et bris avec changements mineurs de direction d'écoulement, sont traités à l'Annexe 4.

4.2.1.5 Bris de la conduite 1

Comme décrit dans la section précédente, le bris de la conduite 1 provoque quatre changements à 17 heures, heure de la consommation la plus élevée. La Figure 16 ci-dessous présente l'état du réseau lors du bris de la conduite 1 ainsi que les changements liés aux régions de détections, tandis que le Tableau 10 présente la matrice de détection lors de ce bris.

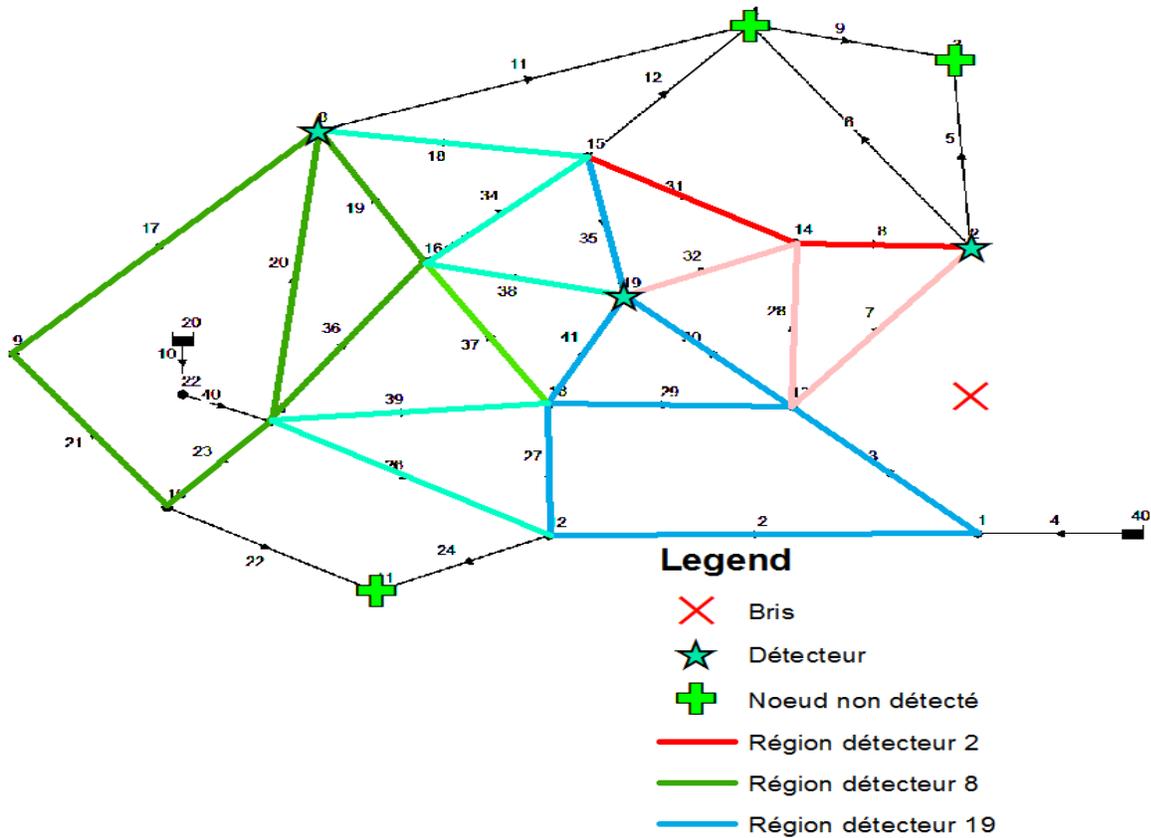


Figure 16 : Impact du bris de la conduite 1 sur la détection à 17 h

Tableau 10 : Matrice de détection lors du bris de la conduite 1

	Id du nœud																	
Détecteur	1	2	3	4	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Nœud 2	1	1									1	1						
Nœud 8					1	1	1							1	1			
Nœud 19									1	1						1	1	

Les principaux changements retenus sont constatés aux nœuds 14 et 15. En situation normale, les contaminations survenant à ce nœud sont détectées par le détecteur 19. Or, en cas de bris de la conduite 1, une contamination survenant à ces mêmes nœuds est détectée par le détecteur 2.

Comme dans le cas des incendies, la présence de bris engendre des changements dans la direction de l'écoulement de l'eau dans les conduites. Si ces changements ne sont pas pris en considération, l'intervention de l'équipe déployée risque d'être faussée et, ainsi, ne pas permettre un retour à la normale dans des temps raisonnables

4.2.1.6 Conclusion

En nous basant sur les résultats des sections 4.1.2.1 à 4.1.2.5, ainsi sur ceux présentés à l'Annexe 4, nous pouvons dire que les situations d'urgence peuvent affecter ou non, selon les situations, les conditions d'écoulement dans le réseau et, notamment, les directions d'écoulement. Quand la situation d'urgence n'affecte pas les directions d'écoulement, aucun changement n'est constaté sur la détection de contaminant. Tandis que, en cas de changements dans les directions d'écoulement, deux cas se présentent. Le premier cas est illustré dans les Figures Figure 15 et Figure 16, où nous constatons que la détection de contaminants a bel et bien changé par rapport à la situation normale, c'est-à-dire que la contamination survenant à certains nœuds n'est plus détectée, dans certains cas, par le même détecteur. Alors que dans le deuxième cas, illustré à la Figure 23 (Annexe 4), nous constatons que malgré des changements dans le sens d'écoulement de l'eau dans le RDEP, ces derniers n'affectent pas la matrice de détection.

4.2.2 Réseau réel

Comme pour le réseau fictif, la première étape consiste à placer les détecteurs dans le réseau réel, puis à déterminer la matrice d'impacts en situation normale à l'heure de la consommation la plus élevée. Ensuite, on simule les situations d'urgence et on établit leurs matrices de détection respective.

4.2.2.1 Placement des détecteurs

En se basant sur l'emplacement susceptible de contenir des détecteurs (voir section 4.1.2, Figure 13), la matrice de détection globale en situation normale, pour cinq détecteurs, est illustrée à la Figure 17 ci-dessous.

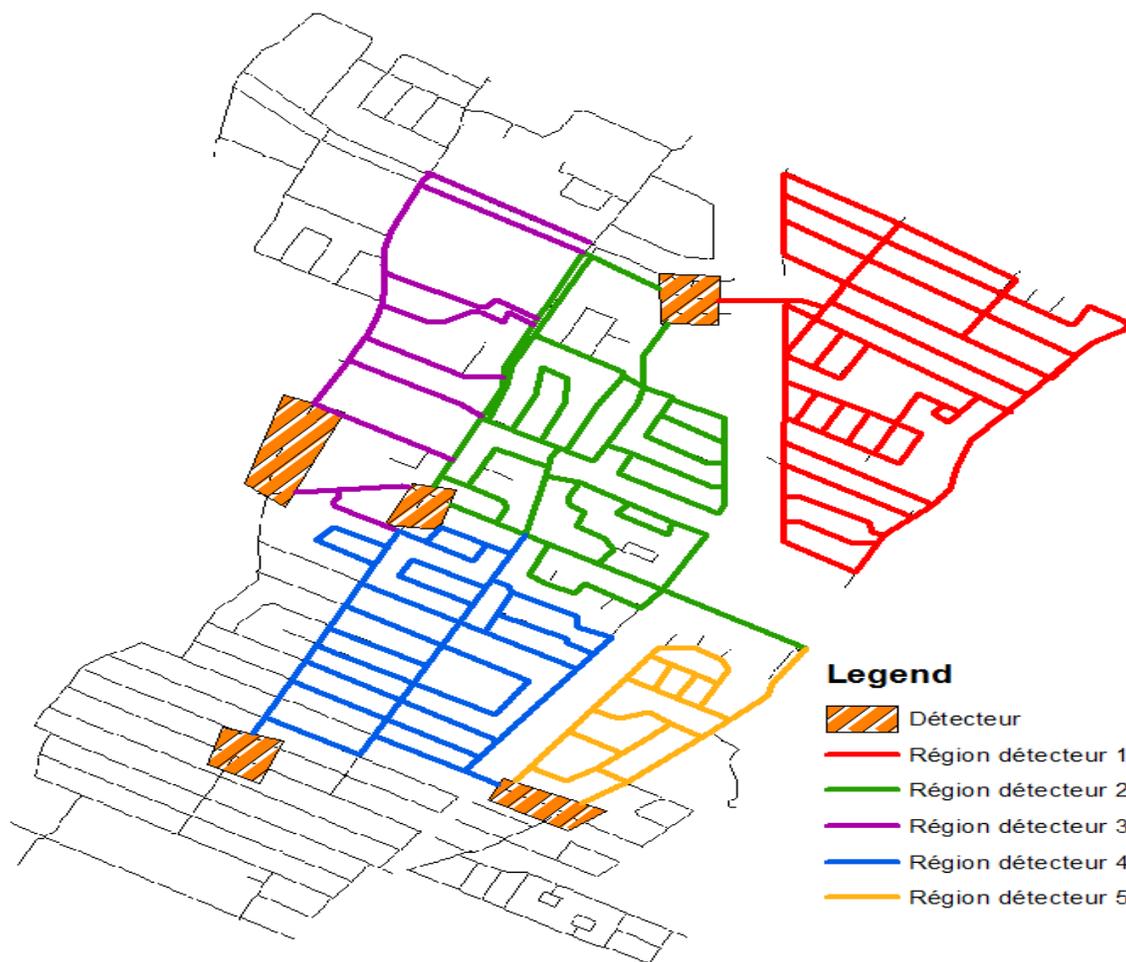


Figure 17 : Matrice de détection lors d'une situation normale à 10 h dans le réseau réel

En ce qui concerne le volume qui parcourt le réseau entre 10 h et 11 h, il est estimé à 999 072 L, dont seulement 528 372 L sont couverts par les détecteurs. Ce qui nous conduit à augmenter le nombre de détecteurs pour évaluer si la couverture de la détection sera plus importante. Cette évaluation est présentée à l'Annexe 5.

Tel que mentionné précédemment, les interventions en cas de contamination sont normalement prédéfinies en se basant sur les conditions normales d'écoulement. Ainsi, à titre d'exemple, si un contaminant est détecté par le détecteur 1, la procédure d'intervention est bien prévue (soit isoler puis rincer tout le secteur d'où peut provenir une contamination qui est détectée en premier lieu au détecteur 1) et permettra un retour à la situation normale. Or, en situation de bris ou d'incendie, des changements peuvent survenir dans les conditions d'écoulement, comme nous l'avons démontré dans la section portant sur le réseau fictif. Les paragraphes qui suivent traiteront en détail de ces situations pour le réseau réel.

4.2.2.2 Incendie

Dans un premier temps, le choix des nœuds où simuler un incendie a été étudié. Seuls les nœuds ayant une consommation ont été considérés (soit 574 sur 1 460). Deux cas de figure ont été choisis : le premier consiste à simuler un incendie près des détecteurs, tandis que le deuxième choix concerne la simulation d'un incendie dans une région non couverte par les détecteurs. Les figures ci-dessous présentent, successivement, l'état du réseau pendant un incendie simulé au nœud 11009067, près d'un détecteur (Figure 18), et au nœud 11009043, loin d'un détecteur (Figure 19).

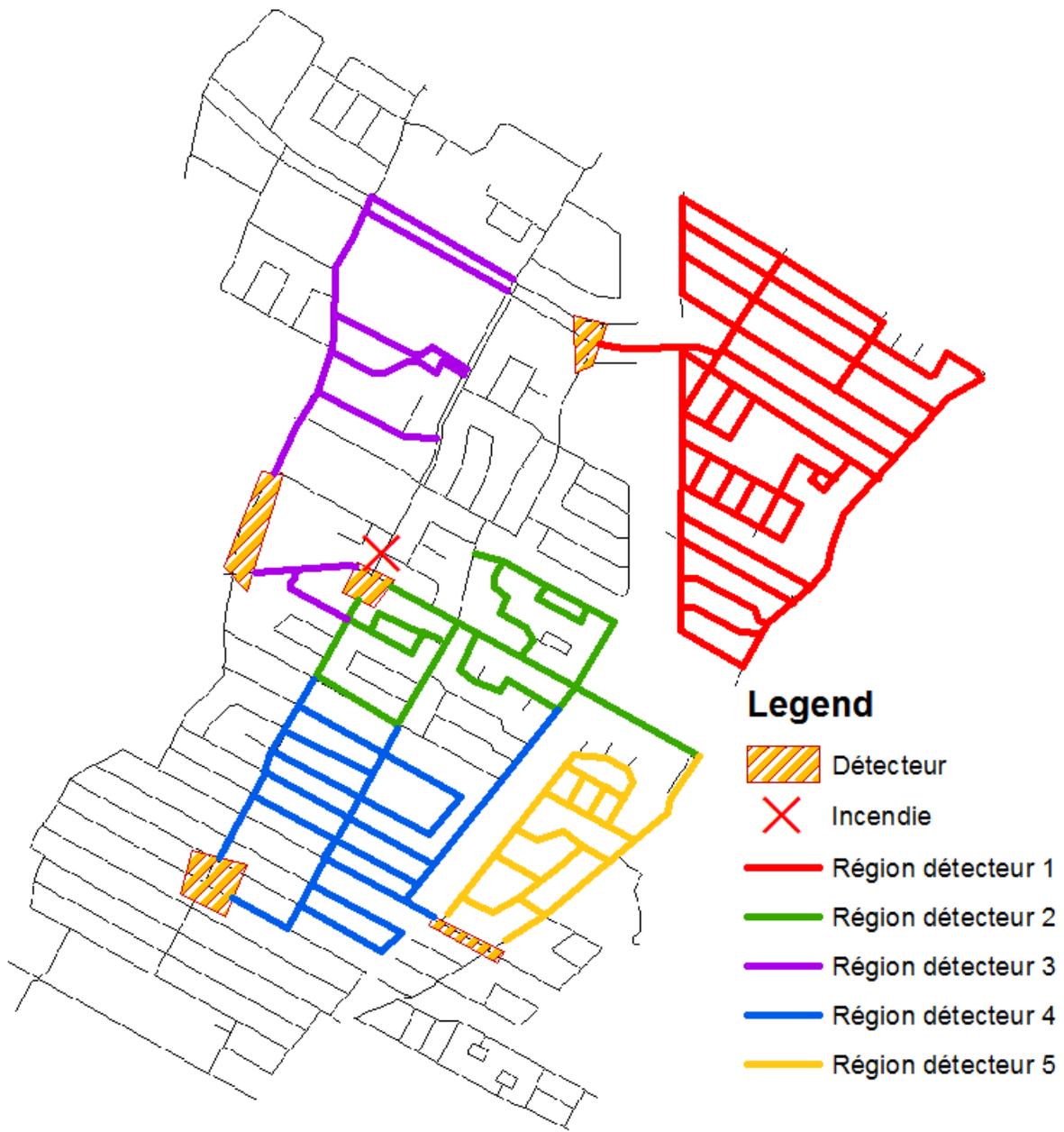


Figure 18 : Impact sur la détection de l'incendie au nœud 11009067 à 10 h



Figure 19 : Impact sur la détection de l'incendie au nœud 11009043 à 10 h

En comparant les Figures Figure 18 et Figure 19 à la Figure 17, on constate que deux types de situations distinctes peuvent survenir lors d'un incendie. Le premier présenté à la Figure 18 montre que si un incendie se trouve à proximité d'un détecteur, des changements peuvent affecter la détection de contamination. Ainsi, nous pouvons voir

qu'une partie de la région du détecteur 4 (en bleu) pour la situation normale est détectable par le détecteur 3 (en mauve) lors de l'incendie au nœud 11009067. En terme de quantification du volume d'eau consommé potable détectable, la valeur est estimée à 518 976 L entre 10 h et 11 h soit moins de 10 m³ qu'en situation normale. Tandis que, dans le deuxième cas de figure, la détection n'est pas affectée par l'incendie ayant lieu au nœud 11009043.

4.2.2.3 *Bris*

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux bris de conduite. Comme pour le cas des incendies, le choix de l'endroit des bris a une importance. Ainsi, nous nous limiterons dans ce qui suit, parmi les nombreuses possibilités, à deux cas : le premier consiste à placer le bris dans un lieu considéré stratégique (ex. une conduite reliant deux secteurs), tandis que le deuxième consiste à placer un bris dans une conduite non stratégique.

Comme premier cas d'étude, nous allons nous intéresser aux bris placés dans les conduites jugées non stratégiques. La Figure 20 ci-dessous présente l'état du réseau à 10 h avec un bris à la conduite ID 11127075.



Figure 20 : Impact sur la détection du bris à la conduite 11127075 à 10 h

En comparant la Figure 20 à la Figure 17, nous constatons que seule la conduite où se situe le bris n'est plus détectable. Or, l'état de la détection ailleurs dans le réseau reste presque le même sans aucun changement significatif, dû à la structure maillée du réseau. Or, en considérant cette fois-ci une conduite jugée importante (dans cet

exemple, la conduite 11128401), des changements très significatifs sont à considérer. La figure ci-dessous présente l'état du réseau réel à 10 h pendant le bris de la conduite 11128401.

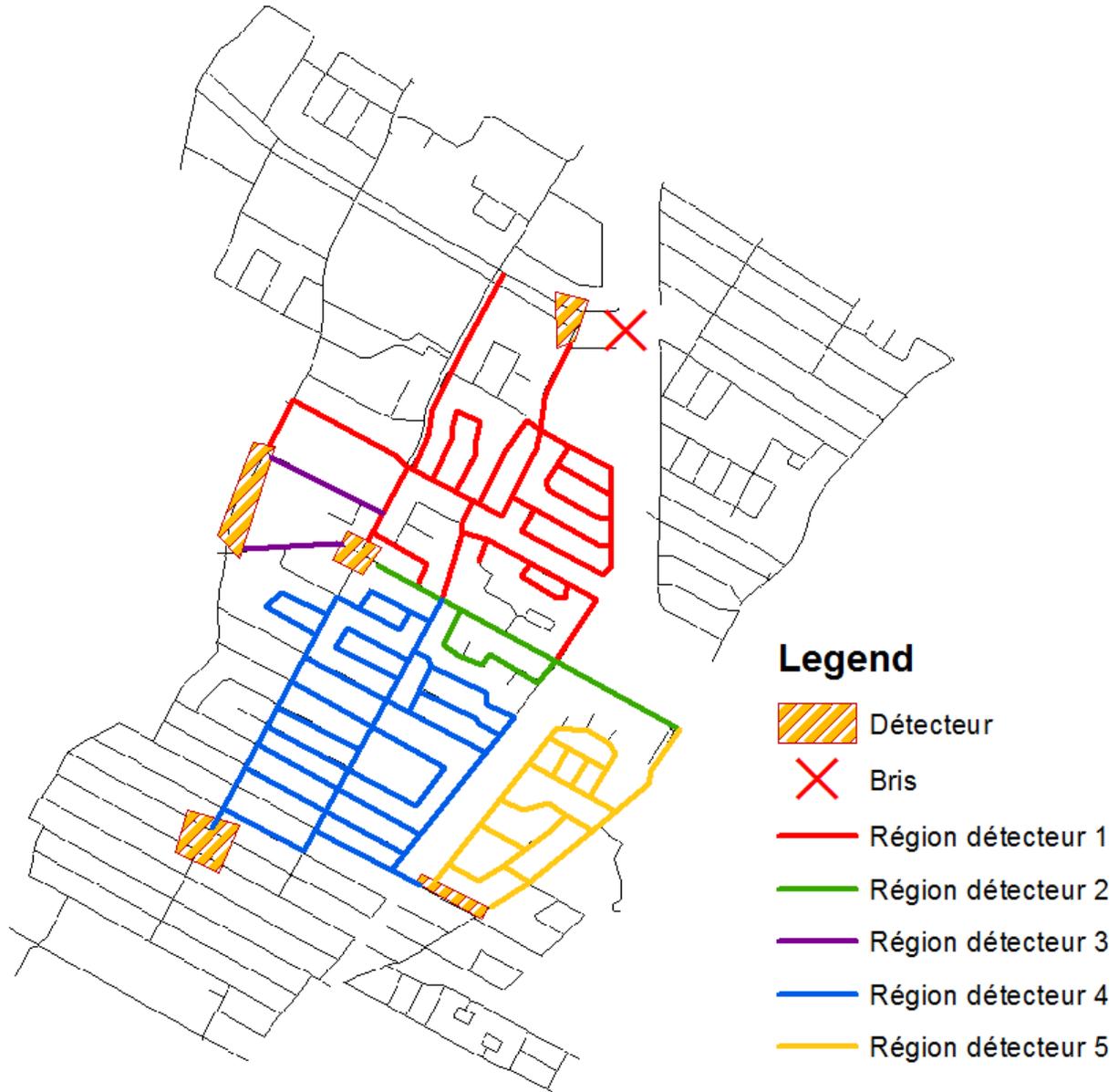


Figure 21 : Impact du bris de la conduite 11128401 sur la détection à 10 h

Sur cette figure, et en comparant avec la Figure 17, nous constatons :

- Une bonne partie de la région détectable par le détecteur 1 (en rouge) en situation normale n'est plus détectable en cas de bris de la conduite 11128401;

- Une partie de la région détectée, auparavant, par le détecteur 2 (en vert) est maintenant détectable par le détecteur 1 (en rouge).

Ainsi, nous pouvons déduire que, selon la conduite sur laquelle un bris aura lieu, il peut y avoir des changements majeurs ou mineurs dans les conditions de détection. Ces changements peuvent affecter de manière significative, ou non, la nature ou le choix de la procédure d'intervention des équipes déployées.

4.2.2.4 Conclusion

En se basant sur les résultats des sections 4.2.2 et 4.2.3 et de l'Annexe 4, nous pouvons dire que :

- Des changements dans les directions d'écoulement sont à prévoir lors d'un incendie situé près d'un détecteur ou lors d'un bris dans une région stratégique. Ces changements peuvent affecter de façon significative la détection de contamination.
- Aucun changement dans les directions d'écoulement n'a été constaté lors d'un incendie dans une région éloignée des détecteurs ou lors d'un bris dans une zone non stratégique. Ainsi, aucun changement ne sera enregistré sur la matrice de détection.
- Évidemment, plus le nombre de détecteurs est grand, plus la couverture de la détection est importante.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans la présente étude, nous avons élaboré une méthode visant à placer des détecteurs dans un réseau de distribution d'eau potable, en optimisant et le temps de simulation et le placement des détecteurs, tout en utilisant un ordinateur bureau. De plus, nous avons démontré l'impact des situations d'urgence sur la détection de contamination par rapport à une situation normale de fonctionnement du RDEP.

Nous avons utilisé le logiciel S-Place pour minimiser le volume moyen d'eau contaminée consommée et le volume maximal d'eau contaminée consommée. La méthode développée consiste à simuler un certain pourcentage de scénarios de contamination possibles puis à comparer les résultats du placement des détecteurs par rapport à une simulation complète, où tous les scénarios possibles sont pris en compte. Les résultats, obtenus en premier lieu sur un réseau fictif, démontrent que simuler 30 % des scénarios de contamination permet d'obtenir de bons résultats en comparaison avec la simulation de tous les scénarios de contamination possibles. Les nœuds sélectionnés pour placer les détecteurs avec la simulation complète sont ceux qui reviennent le plus souvent dans le test de 30 % des scénarios de contamination. En ce qui concerne le réseau réel, vu le nombre important de nœuds qu'il contient, nous nous sommes basés sur le test de 30 % et nous avons noté que le placement des détecteurs est souvent concentré dans des régions bien précises.

En ce qui concerne l'impact des situations d'urgence sur la détection de contaminants, dans un premier temps, sur le réseau fictif, nous avons constaté trois cas possibles, selon l'endroit où survient la situation d'urgence :

- La simulation des situations d'urgence génère des changements dans le sens d'écoulement de l'eau dans les conduites. Ces derniers affectent la détection de contaminant soit par l'ajout de nouvelles zones susceptibles d'être à la source de la contamination ou encore des changements au niveau des détecteurs, c.-à-d., un nœud initialement associé au détecteur X est désormais associé au détecteur Y ;

- La simulation de situations d'urgence génère des changements dans le sens d'écoulement de l'eau dans les conduites, mais ces derniers n'affectent en aucun cas la matrice de détection ;
- Les situations d'urgence ne génèrent aucun changement dans le sens d'écoulement de l'eau et donc n'affectent pas la matrice de détection.

En ce qui concerne le réseau réel, selon les simulations effectuées et les résultats obtenus, les situations d'urgence peuvent affecter de deux façons la détection. Si le bris/incendie est situé dans une région stratégique (ex. : conduite reliant deux secteurs du réseau, incendie près un détecteur) dans le réseau, des changements sont à prévoir sur la matrice de détection. Si la situation d'urgence est simulée dans une région non stratégique (ex. incendie loin des détecteurs, etc.) des changements mineurs, voir aucun changement n'affecte la matrice de détection.

Ainsi, lors des situations d'urgence ayant un impact sur la détection de contaminant, la nature de l'intervention de l'équipe déployée sur le terrain doit s'adapter aux nouvelles conditions d'écoulement de l'eau dans le réseau afin d'empêcher que la contamination se propage dans d'autres régions.

À la lumière des résultats obtenus, la méthode développée a permis d'avoir une première évaluation du placement des détecteurs dans un réseau en utilisant un ordinateur de bureau. Or, cette même méthode devrait faire l'objet d'applications supplémentaires sur différents types et tailles de réseau, dans le but de la valider davantage.

Enfin, en ce qui a trait aux situations d'urgence, les exemples présentés avec le réseau fictif permettent de démontrer comment ces situations peuvent affecter la détection de contaminants. Sur le réseau réel, d'autres cas devraient être étudiés afin d'avoir une meilleure évaluation de l'impact des situations d'urgence sur la matrice de détection. Une autre idée serait de voir l'impact de ces situations sur la matrice de détection sur une durée de temps plus étendue et non pas juste à une heure fixe comme ce fut le cas dans ce travail.

6 RÉFÉRENCES

Uncategorized References

- Aral MM, Guan J & Maslia ML (2010) Optimal design of sensor placement in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1):5-18.
- Association des Pompiers Professionnels de Québec (2001) *Orientation ministérielle.*, <http://www.pompierdequebec.org/index.php/service-des-incendies/orientation-ministerielle>
- Austin RG, Choi CY, Preis A, Ostfeld A & Lansey K (2009) Multi-objective sensor placements with improved water quality models in a network with multiple junctions. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 - World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*. p 451-459.
- AWWA (2005) *CONTAMINATION WARNING SYSTEMS FOR WATER : AN APPROACH FOR PROVIDING ACTIONABLE INFORMATION TO DECISION-MAKERS* American Water Works Association, USA), <http://www.awwa.org/Portals/0/files/legreg/security/ContaminationWarningSystems.pdf>
- Barkdoll BD & Ghimire SR (2007) Heuristic method for the battle of the water network sensors: Demand-based approach. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* 10.1061/40941(247)102:102.
- Berry J, Hart WE, Philips CA, Uber JG & Watson JP (2006) Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(4):218-224.
- Berry JW, Hart WE, Phillips CA, Uber JG & Walski TM (2005) Water quality sensor placement in water networks with budget constraints. *World Water Congress 2005: Impacts of Global Climate Change - Proceedings of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress*. p 60.
- Chastain Jr JR (2006) Methodology for locating monitoring stations to detect contamination in potable water distribution systems. *Journal of Infrastructure Systems* 12(4):252-259.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S & Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2):182-197.
- Eliades D & Polycarpou M (2007) Iterative deepening of pareto solutions in water sensor networks. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* 10.1061/40941(247)114:114.
- Eliades DG, Kyriakou M & Polycarpou MM (2014) Sensor Placement in Water Distribution Systems Using the S-PLACE Toolkit. *Procedia Engineering* 70:602-611.
- Jeffrey Yang Y, Haught RC & Goodrich JA (2009) Real-time contaminant detection and classification in a drinking water pipe using conventional water quality sensors:

- techniques and experimental results. *Journal of environmental management* 90(8):2494-2506.
- Kansal ML, Dorji T, Chandniha SK & Tyagi A (2012) Identifications of optimal monitoring locations to detect accidental contaminations. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries, Proceedings of the 2012 Congress*. p 758-776.
- La Presse Canadienne (2016) *Montréal émet un avis d'ébullition préventif dans certains arrondissements*. Huffington Post Québec, http://quebec.huffingtonpost.ca/2016/02/22/avis-ebullition-montreal_n_9292738.html (Consulté le 28 février)
- Liu S, Che H, Smith K & Chang T (2015) A real time method of contaminant classification using conventional water quality sensors. *Journal of environmental management* 154:13-21.
- Ostfeld A & Salomons E (2004) Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(5):377-385.
- Ostfeld A & Salomons E (2005) Optimal early warning monitoring system layout for water networks security: Inclusion of sensors sensitivities and response delays. *Civil Engineering and Environmental Science* 22(3):151-169.
- Palleti VR, Narasimhan S, Rengaswamy R, Teja R & Bhallamudi SM (2016) Sensor network design for contaminant detection and identification in water distribution networks. *Computers & Chemical Engineering* 87:246-256.
- Poulin A (2008) *Élaboration de procédures d'intervention en réponse aux contaminations se produisant en réseaux d'eau potable*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec). 348 p
- Poulin A, Mailhot A, Grondin P, Delorme L, Periche N & Villeneuve JP (2008) Heuristic approach for operational response to drinking water contamination. *J Water Res Pl-Asce* 134(5):457-465.
- Poulin A, Mailhot A, Periche N, Delorme L & Villeneuve JP (2010) Planning Unidirectional Flushing Operations as a Response to Drinking Water Distribution System Contamination. *J Water Res Pl-Asce* 136(6):647-657.
- Propato M (2006) Contamination warning in water networks: General mixed-integer linear models for sensor location design. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(4):225-233.
- Propato M & Piller O (2007) Battle of the water sensor networks. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* 10.1061/40941(247)112:112.
- Rasekh A & Brumbelow K (2014) Drinking water distribution systems contamination management to reduce public health impacts and system service interruptions. *Environmental Modelling & Software* 51:12-25.
- Rathi S & Gupta R (2014a) Locations of Sampling Stations for Water Quality Monitoring in Water Distribution Networks. *Journal of environmental science & engineering* 56(2):169-178.

- Rathi S & Gupta R (2014b) Monitoring stations in water distribution systems to detect contamination events. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 20(2):142-150.
- Rathi S & Gupta R (2015a) Optimal sensor locations for contamination detection in pressure-deficient water distribution networks using genetic algorithm. *Urban Water Journal* 10.1080/1573062x.2015.1080736:1-13.
- Rathi S & Gupta R (2015b) A simple sensor placement approach for regular monitoring and contamination detection in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20(2):597-608.
- Schwartz R, Lahav O & Ostfeld A (2014) Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems for Injection of Chlorpyrifos. *World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water Without Borders - Proceedings of the 2014 World Environmental and Water Resources Congress*. p 485-494.
- Tao T, Lu Y-j, Fu X & Xin K-l (2012) Identification of sources of pollution and contamination in water distribution networks based on pattern recognition. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 13(7):559-570.
- Todini EP, S (1987) A gradient method for the analysis of pipe networks. Édit Distribution ICOCaFWSA Leicester Polytechnic, UK).
- USEPA (August 2004) *Response Protocol Toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - Overview and application, Interim final*. US Environmental Protection Agency.), https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/drinking_water_response_protocol_toolbox.pdf (Consulté le 25 September)
- Zhao Y, Schwartz R, Salomons E, Ostfeld A & Poor HV (2016) New formulation and optimization methods for water sensor placement. *Environmental Modelling & Software* 76:128-136.

7 ANNEXE 1 : Caractéristiques des nœuds et conduites du réseau Anytown modifié (réseau fictif)

Tableau 11 : Caractéristiques de chaque nœud du réseau

	Élévation	Demande de base
ID nœud	(pi)	(GPM)
Junc 1	20	500
Junc 2	50	200
Junc 3	50	200
Junc 4	50	600
Junc 8	80	400

Junc 9	50	400
Junc 10	120	400
Junc 11	120	400
Junc 12	50	500
Junc 13	50	500
Junc 14	50	500
Junc 15	50	500
Junc 16	120	400
Junc 17	120	1000
Junc 18	50	500
Junc 19	50	1000
Junc 22	120	0
Resvr 40	250	#N/A
Resvr 20	360	#N/A

Tableau 12 : Caractéristiques des conduites du réseau Anytown modifié (réseau fictif)

	Longueur	Diamètre	Coefficient de Hazen-Williams
ID conduite	(pi)	(po)	
Pipe 1	12 000	12	120
Pipe 2	12 000	12	70
Pipe 3	12 000	16	70
Pipe 5	6 000	10	120
Pipe 6	9 000	10	120
Pipe 7	9 000	12	70
Pipe 8	6 000	10	120
Pipe 9	6 000	10	120
Pipe 11	12 000	8	120
Pipe 12	6 000	10	120
Pipe 17	12 000	8	120
Pipe 18	6 000	10	120
Pipe 19	6 000	8	120
Pipe 20	6 000	8	120
Pipe 21	6 000	8	120
Pipe 22	6 000	8	120
Pipe 23	6 000	10	120
Pipe 24	6 000	8	120
Pipe 26	6 000	10	120
Pipe 27	6 000	8	70
Pipe 28	6 000	12	70
Pipe 29	6 000	12	70
Pipe 30	6 000	10	70
Pipe 31	6 000	12	70
Pipe 32	6 000	10	70
Pipe 34	6 000	10	70
Pipe 35	6 000	10	70
Pipe 36	6 000	8	120
Pipe 37	6 000	12	70
Pipe 38	6 000	10	70
Pipe 39	6 000	8	120
Pipe 40	100	12	120
Pipe 41	6 000	10	70
Pipe 4	100	30	130
Pipe 10	1	12	120

8 ANNEXE 2 : Résultats complets des tests de pourcentage sur le réseau fictif

Tableau 13 : Résultats du test 20 % des scénarios de contamination

	Solutions			Objectifs à minimiser — consommation d'eau contaminée		Temps de simulation
	Nœuds sélectionnés			Moyenne	Maximale	
Test 1	1	10	19	48 571,86	238 560	2 min 19 s
	2	8	19	50 376,49	156 030	
	2	9	19	54 608,56	136 269	
	2	10	19	49 225,71	202 524	
	3	9	19	56 699,54	135 135	
Test 2	2	8	19	51 587,53	182 994	2 min 15 s
	2	9	19	61 423,17	151 503	
Test 3	2	8	19	49 838,71	145 782	2 min 10 s
Test 4	2	8	19	51 583,3	194 670	2 min 24 s
	2	9	19	55 434,06	150 801	
	2	10	19	50 551,11	273 745.5	
Test 5	2	8	19	49 987,76	198 156	2 min 10 s
Test 6	2	8	19	48 813,7	187 110	2 min 9 s
Test 7	2	8	19	45 122,27	182 994	2 min 10 s
Test 8	1	8	19	46 927,35	312 343	2 min 15 s
	2	8	19	49 237,24	187 110	
Test 9	2	8	19	53 190,49	187 110	2 min 15 s
	14	15	18	52 068,02	210 325.5	
Test 10	2	8	19	55 937,15	186 396	2 min 16 s
	14	15	18	52 128,62	211 722	

Tableau 14 : Résultats du test 30 % des scénarios de contamination

	Solutions			Objectifs à minimiser — consommation d'eau contaminée		Temps de simulation
	Nœuds sélectionnés			Moyenne	Maximale	
Test 1	2	8	19	45 103,52	182 944	3 min 10 s
Test 2	2	8	19	47 217,57	193 956	3 min 9 s
Test 3	1	8	19	53 601,8	248 356	3 min 15 s
	3	8	19	53 725,49	198 156	
Test 4	1	8	19	48 460,9	312 343	3 min 20 s
	2	8	19	48 589,52	198 156	
Test 5	2	8	19	44 140,38	193 956	3 min 8 s
Test 6	2	8	19	44 754,86	198 156	3 min 11 s
Test 7	2	8	19	47 353,61	194 670	3 min 11 s
Test 8	2	8	19	42 549,71	193 956	3 min 7 s
Test 9	2	8	19	47 242,77	194 670	3 min 5 s
Test 10	1	8	19	50 698,95	238 560	3 min 20 s
	2	8	19	50 786,6	181 503	

Tableau 15 : Résultats du test 40 % des scénarios de contamination

	Solutions			Objectifs à minimiser — consommation d'eau contaminée		Temps de simulation
	Nœuds sélectionnés			Moyenne	Maximale	
Test 1	2	8	19	50 585,69	182 994	4 min 45 s
	14	15	18	49 158,37	209 496	
Test 2	2	8	19	49 100,68	193 956	4 min 42 s
Test 3	2	8	19	47 916,41	186 396	4 min 45 s
	14	15	18	45 662,9	211 722	
Test 4	3	8	19	47 974,67	198 156	4 min 40 s
Test 5	2	8	19	46 493	182 910	4 min 40 s
Test 6	2	8	19	48 477,3	194 670	4 min 50 s
	14	15	18	47 713,14	219 282	
Test 7	1	8	19	45 854,87	243 201	4 min 49 s
	2	8	19	47 796,8	194 670	
Test 8	2	8	19	49 665,86	182 994	4 min 41 s
Test 9	2	8	19	54 182,91	194 670	4 min 47 s
	14	15	18	47 208,23	218 347.5	
Test 10	2	8	19	51 593,46	194 670	4 min 40 s

9 ANNEXE 3 : Résultats du test complet et du test 30 % sur le réseau réel

Tableau 16 : Résultat du test complet et du test 30 %

						Objectifs — consommation d'eau contaminée	
Nœuds sélectionnés pour placer 5 détecteurs						Moyenne	Maximale
Simulation des 35 088 scénarios (9 résultats)	11 168 733	11 008 526	11 008 641	11 008 697	11 009 184	694,04	8648,25
	11 008 526	11 008 538	11 008 641	11 009 184	11 030 648	708,95	7809,82
	11 008 526	11 008 539	11 008 641	11 009 184	11 030 648	715,5	7338,8
	11 008 536	11 008 641	11 008 836	11 008 895	11 009 184	690,72	9100,11
	11 008 536	11 008 641	11 009 111	11 009 184	11 030 648	679,24	9550,44
	11 008 536	11 008 641	11 009 112	11 009 184	11 030 648	683,66	9409,46
	11 008 536	11 008 641	11 009 184	11 030 581	11 030 648	721,83	5445,91
	11 008 536	11 008 641	11 009 184	11 030 581	11 030 734	734,38	5196,5
	11 008 538	11 008 641	11 009 112	11 009 184	11 030 648	711,38	7605,89
Simulation des 10 526 scénarios (14 résultats)	11 168 733	11 008 535	11 008 641	11 008 698	11 009 184	738,51	5759,35
	11 168 733	11 008 535	11 008 641	11 008 895	11 009 184	471,5	5419,51
	11 168 733	11 008 641	11 008 764	11 009 184	11 030 586	676,32	8508,4
	11 168 733	11 008 641	11 008 764	11 009 184	11 030 841	680,8	8444,32
	11 008 526	11 008 540	11 008 641	11 008 772	11 009 184	710,6	7160,27
	11 008 526	11 008 641	11 008 772	11 009 184	11 030 796	732,08	6830,12
	11 008 535	11 008 536	11 008 895	11 009 184	11 030 577	746,08	5196,5
	11 008 535	11 008 698	11 009 184	11 030 509	11 030 577	741,84	5386,73
	11 008 535	11 008 895	11 009 184	11 030 509	11 030 590	741,95	5349,13
	11 008 641	11 008 772	11 009 184	11 030 586	11 030 841	705,05	7534,1
	11 008 641	11 008 772	11 009 184	11 030 590	11 030 841	709,06	7453,64
	11 008 641	11 008 772	11 009 184	11 030 841	11 030 841	700,8	6978,52
	11 008 641	11 009 184	11 009 184	11 030 841	11 030 841	689,08	8001,6
	11 008 641	11 009 184	11 009 184	11 030 841	11 030 841	687,5	8053,63

10 ANNEXE 4 : Présentation des autres exemples du réseau fictif

Présentation des autres exemples du réseau fictif

Cette partie complète les exemples présentés dans la section 4.2 en donnant d'autres cas de figure de situations d'urgence. Tout d'abord, une situation sans aucun changement ni dans le sens d'écoulement de l'eau ni sur la matrice de détection, puis, deuxièmement, une situation d'urgence durant laquelle il y a des changements dans le sens d'écoulement de l'eau, mais pour laquelle ces changements n'ont aucun impact sur la matrice de détection .

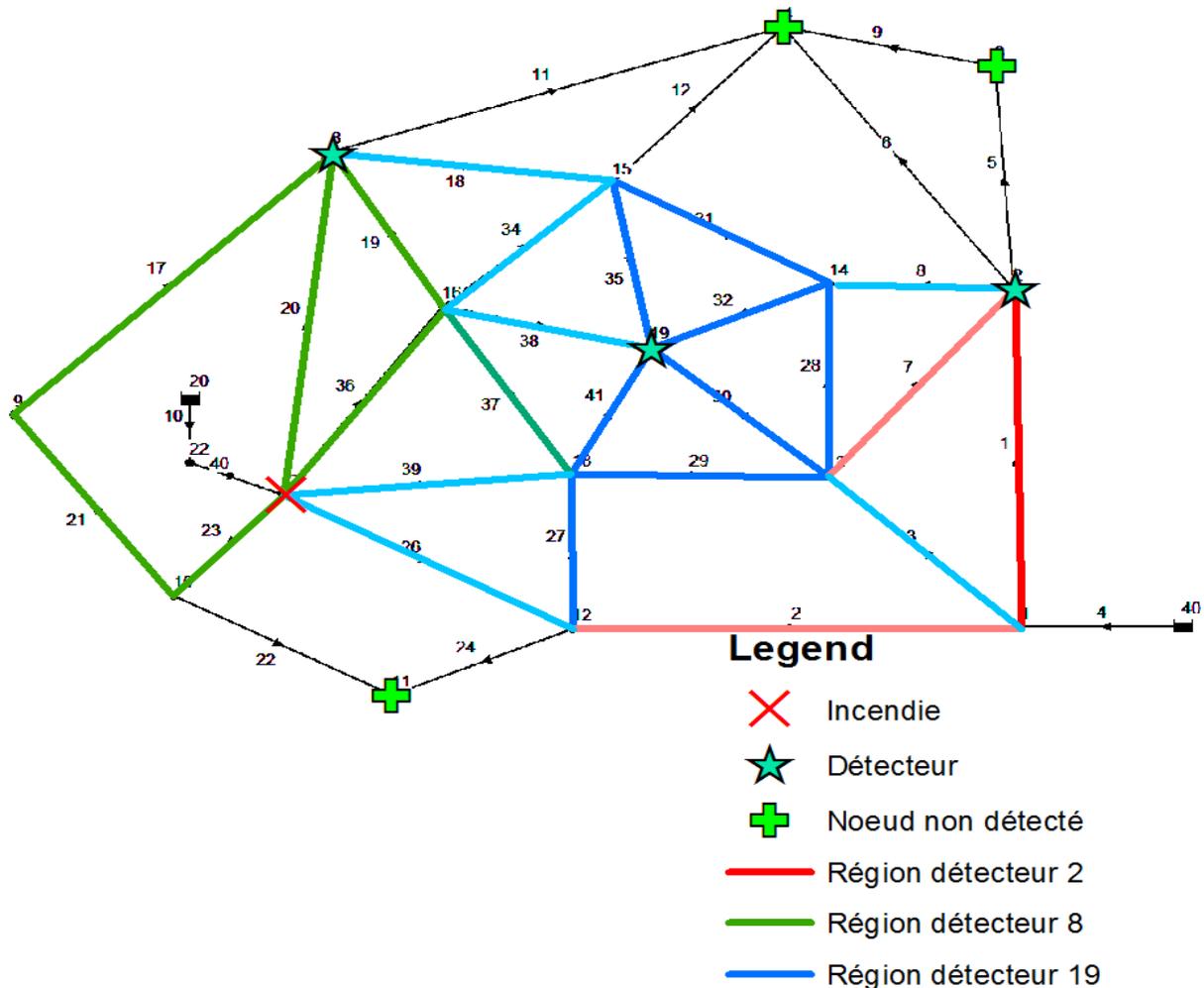


Figure 22 : État de la matrice de détection lors d'un incendie simulé au nœud 17 à 17 h

Malgré l'incendie simulé au nœud 17, aucun changement dans les directions d'écoulement n'a été constaté. D'où l'absence d'impact sur la matrice de détection.

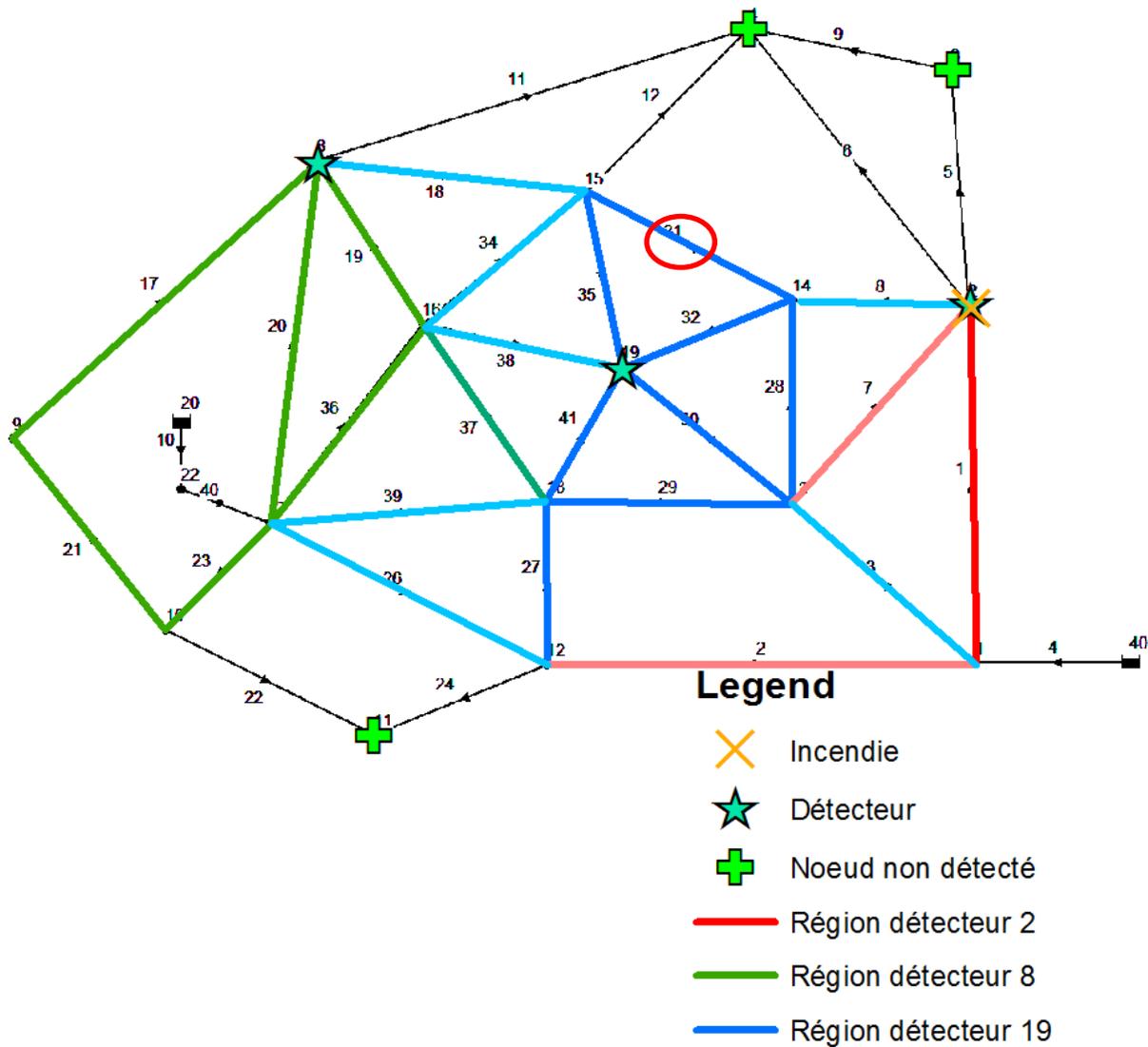


Figure 23 : État de la matrice de détection lors d'un incendie au nœud 2 à 17 h

Dans ce cas de figure, l'incendie simulé au nœud 2 a généré un changement dans la direction de l'écoulement de l'eau de la conduite 31 (cercle en rouge). Or, ce changement n'a eu aucun impact sur la matrice de détection.

11 ANNEXE 5 : Couverture de la détection dans le réseau réel

Dans le but de démontrer l'importance du nombre de détecteurs sur la couverture de la détection dans le réseau réel, 10 détecteurs ont été placés selon la méthode évolutionnaire. Le seul résultat obtenu est présenté dans la figure ci-dessous

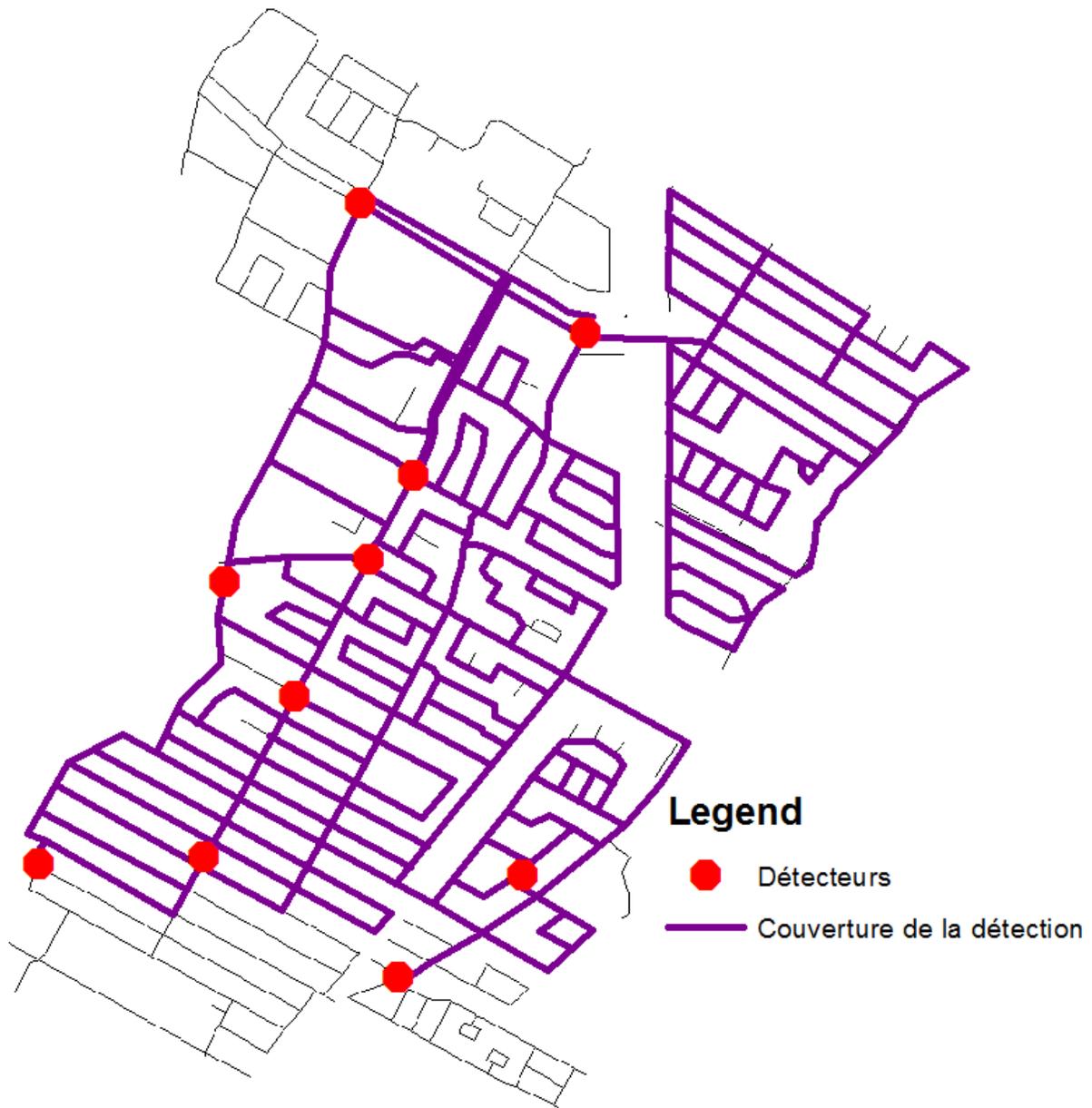


Figure 24 : Couverture de la détection pour 10 détecteurs placés

En comparaison avec les résultats obtenus dans la Figure 17, nous remarquons qu'une bonne partie du réseau est maintenant couverte par les détecteurs. En terme de volume d'eau consommée potable couvert par la détection, la valeur est passée de 528 372 L pendant une heure pour 5 détecteurs à 726 214 L pour 10 détecteurs, soit presque 20 m³ en plus.