Université du Québec
INRS-ETE

ÉLABORATION DE PROCÉDURES D'INTERVENTION EN RÉPONSE AUX CONTAMINATIONS SE PRODUISANT EN RÉSEAUX D'EAU POTABLE

Par

ANNIE POULIN

Thèse présentée
pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examinateur externe	M. Manuel J. Pinzón-Rodriguez, Ph.D. Centre de recherche en aménagement et en développement Université Laval
Examinateur externe	M. Olivier Piller, Ph.D. Ouvrages hydrauliques et génie civil Cemagref
Examinatrice interne	Mme Sophie Duchesne, professeure INRS-ETE
Directeur de recherche	M. Jean-Pierre Villeneuve, professeur INRS-ETE
Codirecteur de recherche	M. Alain Mailhot, professeur INRS-ETE
Codirecteur de recherche	M. Louis Delorme, chercheur Institut de recherche d'Hydro-Québec

Le 20 octobre, 2008

© Annie Poulin, 2008, tous droits réservés.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier spécialement mes directeur et codirecteur Jean-Pierre Villeneuve et Alain Mailhot. Au fil des années (depuis mon tout premier stage à l'INRS-Eau en 1999…), vous avez appris à connaître et avez accepté mon tempérament émotif, intense et « nerveux ». Vous avez su faire ressortir mes forces, m'avez appris à les reconnaître et m'avez poussée à me dépasser constamment. Je considère que c'est un bonus inestimable de votre part. Alain, merci de m'avoir enseigné la rigueur en sciences et merci pour ton excellent support et tes encouragements constants. Jean-Pierre, merci pour ta générosité, pour les discussions au cours desquelles tu as partagé ta riche expérience et pour les conseils judicieux qui en sont toujours ressortis.

Mes remerciements s'adressent également à Louis Delorme, codirecteur qui s'est joint à nous au début de 2006. Merci d'avoir accepté si rapidement et ouvertement de m'aider. Grâce à ta précieuse expertise dans la résolution de problèmes d'optimisation, j'ai pu progresser rapidement vers les objectifs spécifiques de ma thèse. Ta contribution a été d'un grand bénéfice.

Les présents travaux ont été effectués dans un esprit de recherche à incidence industrielle, impliquant l'entreprise Aqua Data Inc. Celle-ci se spécialise notamment dans le diagnostic et l'analyse de réseaux d'eau potable. Je remercie nos collaborateurs, plus particulièrement Patrice Grondin et Nathalie Periche, qui ont contribué à alimenter nos travaux en ce qui a trait aux considérations pratiques de l'opération et de la gestion de réseaux. Ils nous ont aussi gracieusement fourni les données des réseaux d'étude ils ainsi qu'une version de l'outil de simulation hydraulique AquaCad.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres de ma famille pour leur écoute et leur soutien inconditionnels. Yvon, Evelyne, Frédéric, Valérie, Louis-Félix, Jean-Robert et Geneviève, vous avez toujours été présents pour souligner mes succès et pour m'encourager dans les moments plus difficiles. Merci pour vos oreilles attentives à mes stress « récurrents », surtout Evelyne et Yvon, que je remercie également pour leurs conseils avisés en tant que parents et exemples de détermination. Jean-François, merci d'avoir été mon principal supporter en tout temps ! J'admire ta sagesse et je rends un hommage particulier à ta contribution attentionnée, apaisante et conciliante à mon cheminement. Un clin d'œil à tous mes amis de Québec et de Montréal, avec qui j'ai pu laisser de côté les préoccupations doctorales lors de soupers toujours agréablement partagés (Nathalie, Philippe, Florent, Édouard, Hélène, Denis, Victor, Florence, Samuel), de soirées de danse endiablées (Claudie, Ève) et de matchs d' « ultimate frisbee » amicalement disputés (les Brices de Québec, les Chats noirs, les Marmottes volantes). Dr Annie B., merci pour les conversations encourageantes et réconfortantes. Merci aussi à France Gosselin, qui m'a permis d'évoluer sainement dans les « traboulidons » de cette aventure.

Je remercie le personnel de support à la recherche (Diane, Sébastien, Béatrice, Jean-Daniel, Chantal et l'équipe du service informatique), dont l'aide, toujours accordée avec le sourire, s'est avérée indispensable à plusieurs reprises au cours de la réalisation des présents travaux.

Enfin, je tiens à souligner les contributions du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie (CRSNG), de Jean-Pierre Villeneuve et d'Aqua Data au soutien financier de mes études doctorales (merci aussi à papa, maman et Jeff qui, indirectement, y ont contribué !).

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs décennies, la gestion, l'analyse et l'opération des infrastructures de distribution d'eau potable continuent de susciter l'intérêt des ingénieurs et des scientifiques. Ces questions posent un défi en deux volets dont le premier, à caractère opérationnel, s'intéresse à l'élaboration de règles et de pratiques visant à assurer qu'une eau saine parvienne en quantité suffisante aux divers usagers des services d'eau potable. Le second volet, de nature technique, s'intéresse au développement d'outils analytiques permettant d'assurer et de vérifier la mise en œuvre adéquate des mesures opérationnelles (outils de modélisation, technologies pour le maintien et la vérification de la qualité de l'eau distribuée, etc.).

Récemment, des études ont révélé la vulnérabilité des réseaux de distribution d'eau potable face à divers incidents mettant en danger la santé des usagers, du fait que ces infrastructures sont facilement accessibles et peu sécurisées. Les communautés d'experts et de scientifiques se sont alors penchées sur l'élaboration de pratiques opérationnelles ainsi que de procédures et d'outils adaptés à ce nouveau contexte de sécurité. Notamment, on s'est intéressé au problème posé par les contaminations, tant accidentelles qu'intentionnelles, pouvant se produire au sein même de réseaux d'eau potable, où les barrières résiduelles de défense sont limitées. Parmi les travaux de recherche réalisés à ce jour, la plupart ont examiné la question de la détection précoce des contaminations. Des études se sont intéressées au développement d'unités de détection fonctionnant en temps réel et en continu. Des résultats prometteurs ont été obtenus, bien que des développements soient encore attendus afin d'améliorer la fiabilité des technologies et leur spécificité aux diverses classes de contaminants (chimiques, biologiques et radiologiques). En parallèle, d'autres études se sont penchées sur la localisation optimale d'unités de détection en réseaux afin de maximiser la protection des usagers, considérant des contraintes sur le nombre

d'unités à installer (en raison notamment des coûts élevés d'acquisition et d'installation). Mais cette protection de premier plan est sans utilité en l'absence d'outils permettant, en second plan, d'élaborer des stratégies de gestion des opérations de réponse, en vue d'assurer le retour à l'opération normale des réseaux de distribution. Suivant les directives opérationnelles émises à cet égard, une réponse efficace permettra, dans un premier temps, d'isoler une contamination suite à sa détection, et, dans un second temps, de l'évacuer de façon sécuritaire. Les quelques études qui ont abordé cette question ont mis l'accent sur les aspects théoriques, en cherchant à optimiser des combinaisons d'opérations à mettre en œuvre de façon simultanée sur des réseaux fictifs. Afin de tenir compte, de façon plus concrète, des considérations pratiques liées à une mise en œuvre structurée, efficace et sécuritaire des opérations de réponse, dans le cadre de la présente thèse, deux procédures heuristiques ont été développées à partir de l'analyse des réseaux réels de deux municipalités du Québec. Les procédures permettent de systématiser et de structurer la démarche visant :

(1) en guise de première réponse opérationnelle, à délimiter des secteurs de réseau potentiellement contaminés et à isoler rapidement ces derniers au moyen de la fermeture des vannes appropriées;

(2) à évacuer, par la suite, l'eau contaminée des secteurs préalablement isolés au moyen du rinçage unidirectionnel (RUD).

L'ensemble du processus de réponse est déclenché par la première détection d'une contamination, à partir de l'un des détecteurs supposés idéaux et localisés de façon optimale au sein des réseaux d'étude à l'aide d'une approche basée sur la modélisation des écoulements en régime stationnaire (en conditions de consommations moyennes journalières). À ce stade, en fonction de la localisation des détecteurs, un ensemble de sources possibles de contamination peut être identifié. Un secteur potentiellement contaminé, dont l'étendue tient compte, de façon

agrégée, de chacune de ces sources, est alors délimité (toujours sous l'hypothèse de conditions stationnaires). Ainsi, chaque détecteur détermine un scénario de détection, pour lequel le calendrier d'opérations peut être élaboré à l'aide des procédures d'isolement et de rinçage. Entre le moment où surviennent l'isolement d'un secteur contaminé et le rinçage de celui-ci, il est supposé que (1) l'incident de contamination est confirmé et caractérisé (identification de la source et de la nature du contaminant, élimination de la source) et (2) des avis définitifs sur la consommation d'eau sont émis à la population concernée. Les opérations de RUD sont donc élaborées et validées du point de vue hydraulique sous un scénario de consommations réduites.

Les deux procédures de réponse sont constituées d'un ensemble de règles élaborées à partir de critères topologiques, opérationnels et hydrauliques. Les règles ont été structurées sur la base de l'analyse même des scénarios de détection générés pour les deux réseaux d'étude. L'application détaillée des procédures est démontrée dans la présente thèse au moyen d'exemples spécifiques. Quant aux résultats généraux, ils révèlent l'utilité des procédures dans une perspective d'amélioration des caractéristiques de conception des réseaux d'étude, afin, justement, de favoriser la mise en œuvre des opérations de réponse.

De par leur structure, les procédures d'isolement et de rinçage se prêteraient à l'élaboration éventuelle d'un système expert, qui pourrait être ensuite intégré à des logiciels d'analyse et de gestion de réseaux. Pour ce faire, un important travail visant à automatiser complètement les procédures devrait d'abord être entrepris. L'automatisation pourrait également permettre d'appliquer les procédures à des réseaux diversifiés afin de valider et de raffiner celles-ci davantage. D'autres hypothèses, notamment en ce qui a trait à la détection des contaminants et à la modélisation des écoulements en réseau, pourraient également être testées. Enfin, dans une

perspective plus globale, des travaux tels que ceux qui sont exposés dans la présente thèse devraient être intégrés dans le cadre d'études et d'exercices visant à mieux organiser l'ensemble des opérations et des actions correctives en réponse à d'éventuels incidents de contamination. À terme, ces considérations tendent à s'inscrire dans le cadre de saines pratiques de gestion, d'entretien et d'opération des infrastructures de distribution d'eau potable. Ainsi, la vulnérabilité des réseaux de distribution face à divers incidents de contamination n'en sera que mieux connue et l'identification de mesures correctives simplifiée.

Cher lecteur,

Lors de l'impression de ma thèse de doctorat, certaines figures n'ont pas été correctement reproduites, bien qu'elles aient toute fait l'objet d'une vérification rigoureuse à partir de la version électronique finale de la thèse. Les erreurs n'ont été détectées qu'une fois l'impression terminée. Pour remédier à cet inconvénient, vous trouverez, dans les quelques pages qui suivent, les figures fautives telles qu'elles devraient apparaître.

L'auteure vous remercie de votre compréhension.

Annie Poulin, Ph.D.
Chercheure postdoctorale
ÉTS, Université du Québec
Département de génie de la construction

À diamètre égal, privilégier la proximité d'une source de réseau.

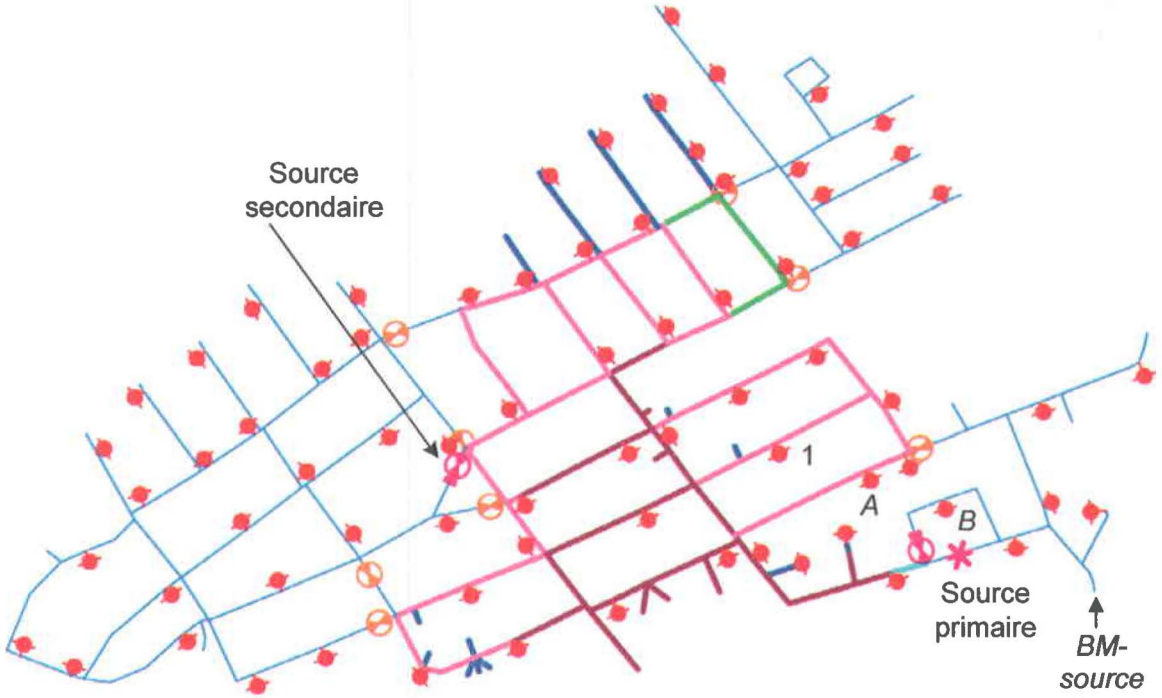


Figure A4.1 : Secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 201, réseau de Terrasse-Vaudreuil. La source primaire est indiquée par l'étoile rose. Cette figure provient de l'annexe 3.

Règle 1.2

- La première boucle qui sera sélectionnée pour le rinçage doit être adjacente à la source primaire retenue.

- SI deux boucles ou plus remplissent la condition précédente, retenir la boucle dont le linéaire partagé avec d'autres boucles du secteur à rincer est minimal. NOTE : Ce dernier critère favorise le choix d'une boucle se trouvant plutôt en « périphérie » du secteur à rincer, et par laquelle, logiquement, devraient débuter les opérations de RUD (par opposition à une boucle qui partage des conduites avec plusieurs voisines et qui se trouverait dans une position plus « intérieure », au sein du secteur à rincer).

  CAS PARTICULIER, illustré à la figure A4.1, où la source retenue est un tronçon-source. Ce dernier n'est pas, au sens strict, adjacent à la boucle 1, mais à sa voisine (en pourpre). Toutefois, dans l'esprit du point précédent, il est plus logique que le rinçage débute par la boucle 1 que par sa voisine. La règle spécifique, établie à cet égard, est la suivante : la première boucle retenue partage des conduites avec une boucle sur laquelle se trouve le tronçon-source.

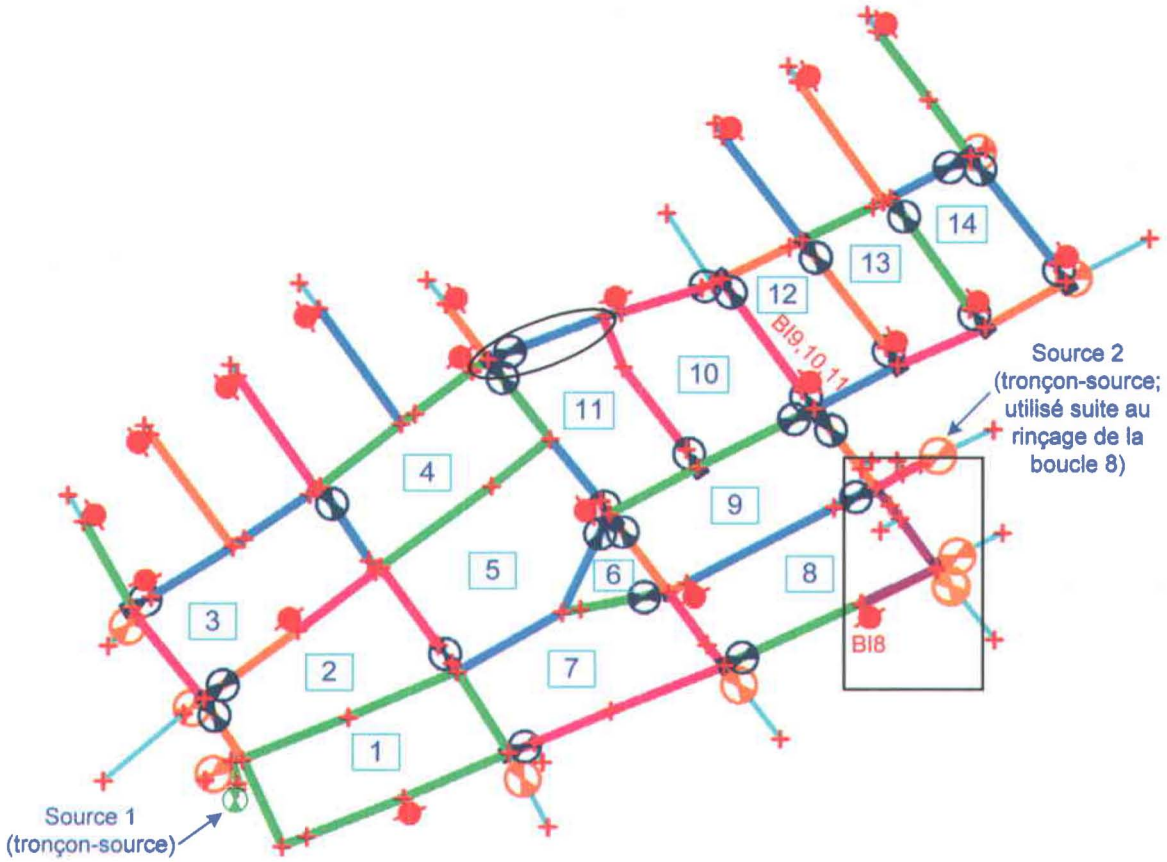


Figure A4.5 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 048, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose. Le tronçon de conduites en violet fait l'objet d'explications données dans le texte.

Étape 3c :

Lorsqu'une séquence de changement de source est nécessaire, l'utilisation de la borne qui permet déjà de rincer la boucle à laquelle elle est adjacente est favorisée, en s'assurant du respect des règles 3b.2 à 3b.7. Par exemple, à la figure A4.5, la séquence de changement de source, en rose et violet (dans l'encadré), utilise la même borne que les séquences de RUD sur la boucle 8 (identifiée BI8). Le tronçon-source, faisant l'objet de la séquence de changement de source, est adjacent à la boucle 8. La séquence de changement de source emprunte, en partie, des conduites de la séquence en bleu sur la boucle 8 (d'où la couleur violette).

Figure A4.8 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 030, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose. Pour le rinçage de la boucle 2, aucune vanne d'isolement adjacent n'existe sur la boucle 3. La vanne V1 est donc fermée et servira de vanne de transition pour le rinçage de la première séquence sur la boucle 3 (en vert, par BI3).

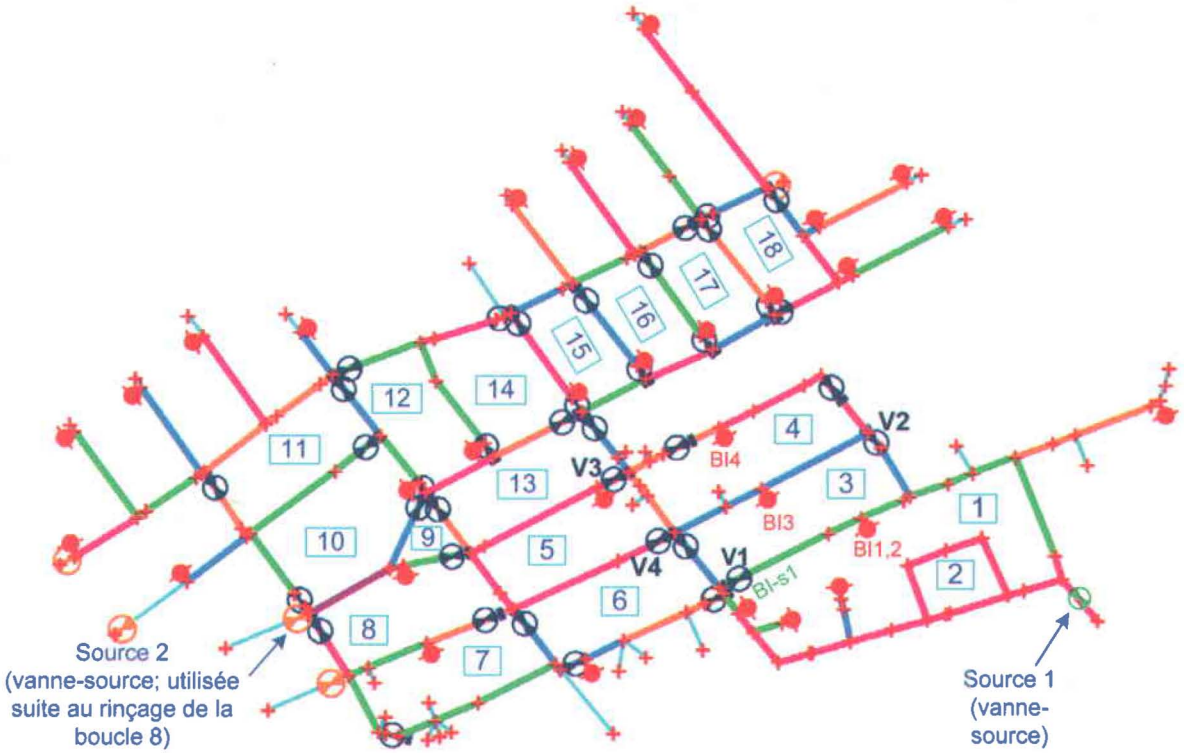


Figure A4.9 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 057, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose.

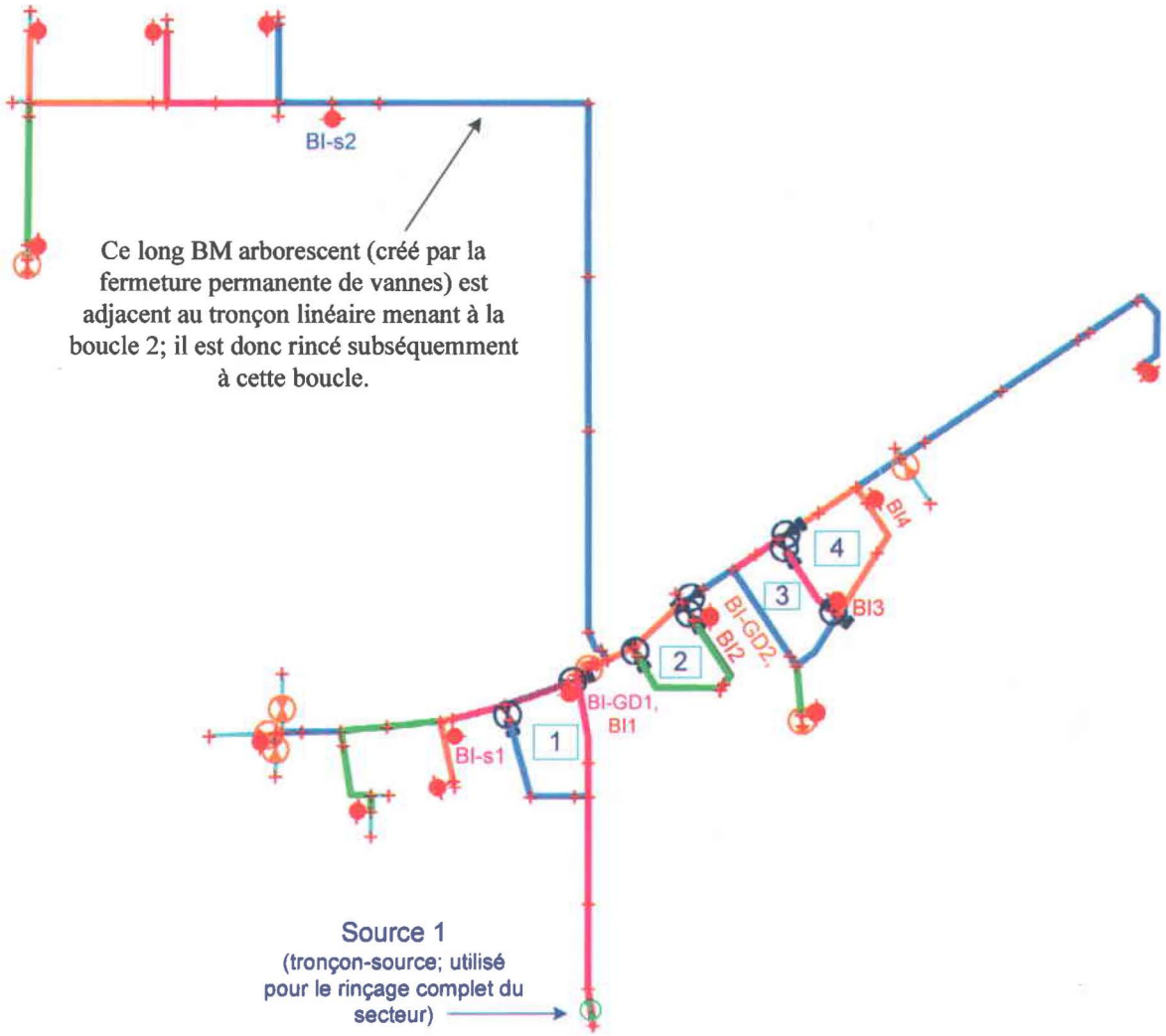
Étape 5b :

L'étape 5b détermine l'ordre des séquences de RUD associées au rinçage de chacune des boucles, en incluant (1) les tronçons de grand diamètre sur la boucle, (2) les BM adjacents à la boucle et/ou (3) les séquences de changement de source (lorsque celle-ci est adjacente à la boucle).

CAS PARTICULIER : Le rinçage de la boucle 1, pour le secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159 (réseau de Valcourt; figure A4.7), implique deux séquences de grand diamètre (en orangé et en bleu, utilisant respectivement les bornes BI-GD2 et BI-s2[4]

[4] La borne supplémentaire BI-s2 est nécessaire à l'atteinte du critère de vitesse pour la séquence en orange (voir l'étape 5c). Cette borne est identifiée lors d'une itération supplémentaire sur l'étape 5.

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 112



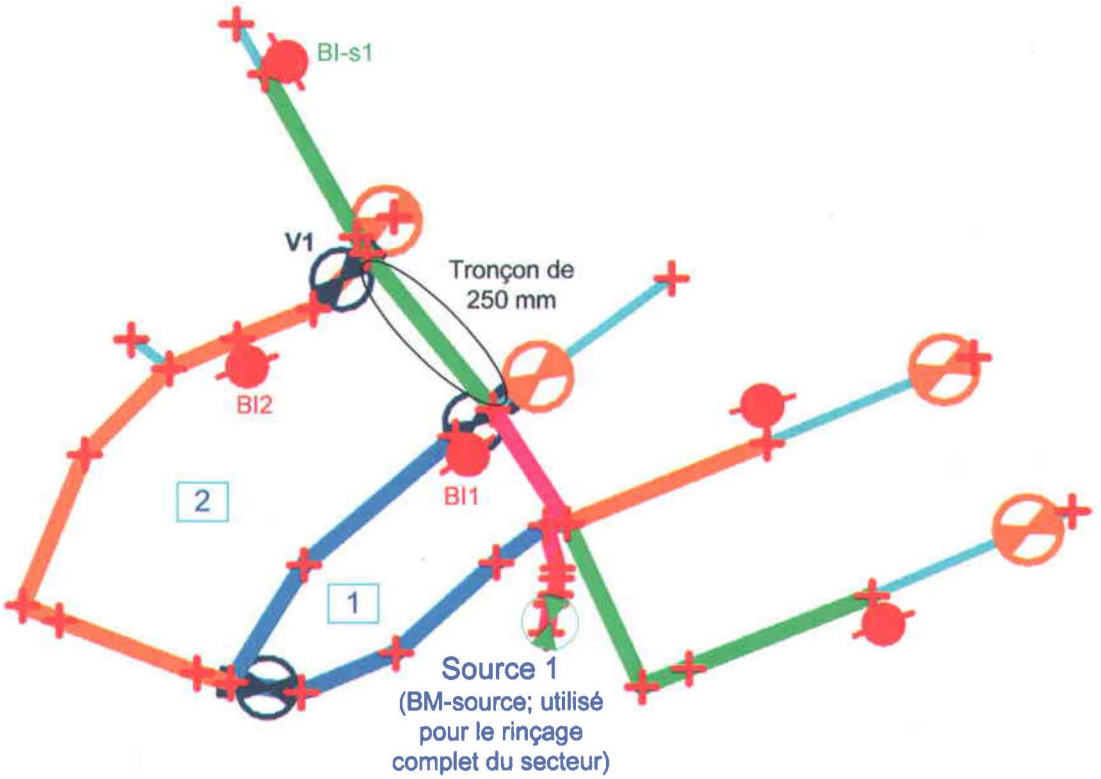
Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes:

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucles 2 et 3 : tronçon linéaire menant à une boucle en retrait non rincée (3a.2-ii)
Boucle 4 : partage des conduites avec la boucle 3 (dernière boucle à rincer, 3a.2-i)

BI-GD1 : séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI-GD2 : séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-i
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii CAS 2)

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 033



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la source 1(1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)

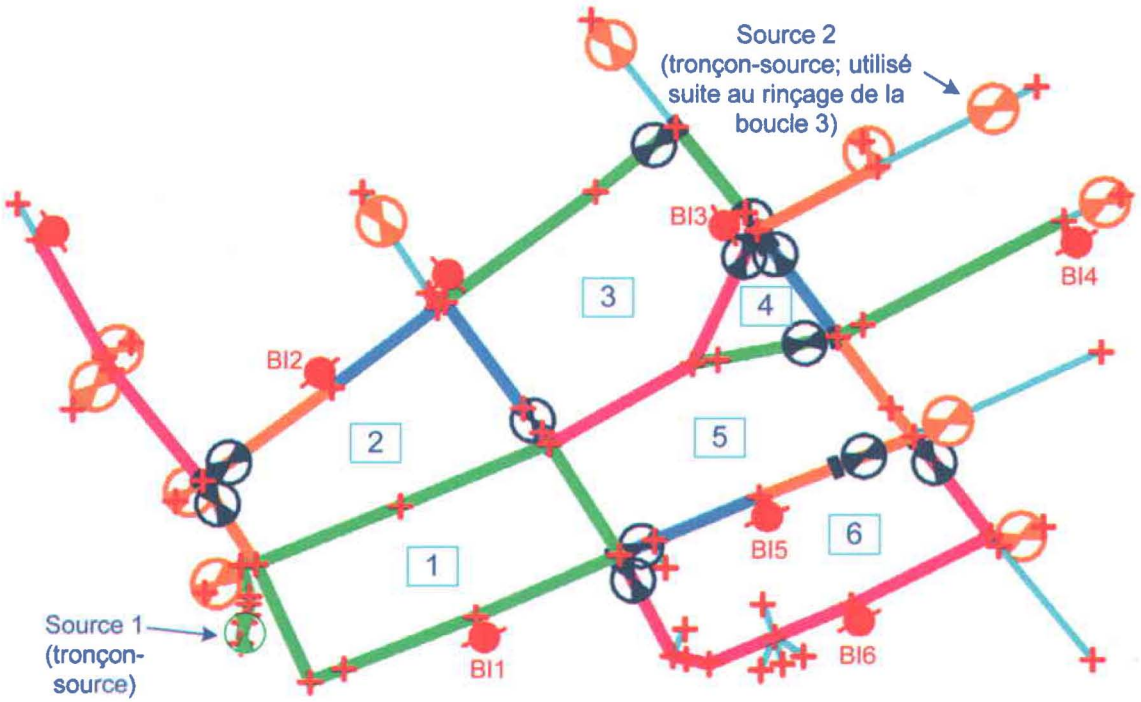
BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-iii (CAS 2)
BI2 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS2)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) La boucle 2 doit être rincée en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9-ii). Les vannes et bornes situées sur cette boucle ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2 à 3b.7.

2) La borne BI-s1 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse en raison de la présence d'un tronçon de 250 mm (10 po) sur la boucle 2. La séquence verte est rincée d'abord, en conservant la vanne V1 fermée (règle 5c.1-i-ESSAI 2; la vanne V1 devait être fermée pour le rinçage de la boucle 1 afin de respecter la règle 5a.2-ii). Par la suite, V1 est ouverte et le reste de la boucle est rincé en deux séquences simultanées par BI2, tel que prévu au départ.

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 046



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

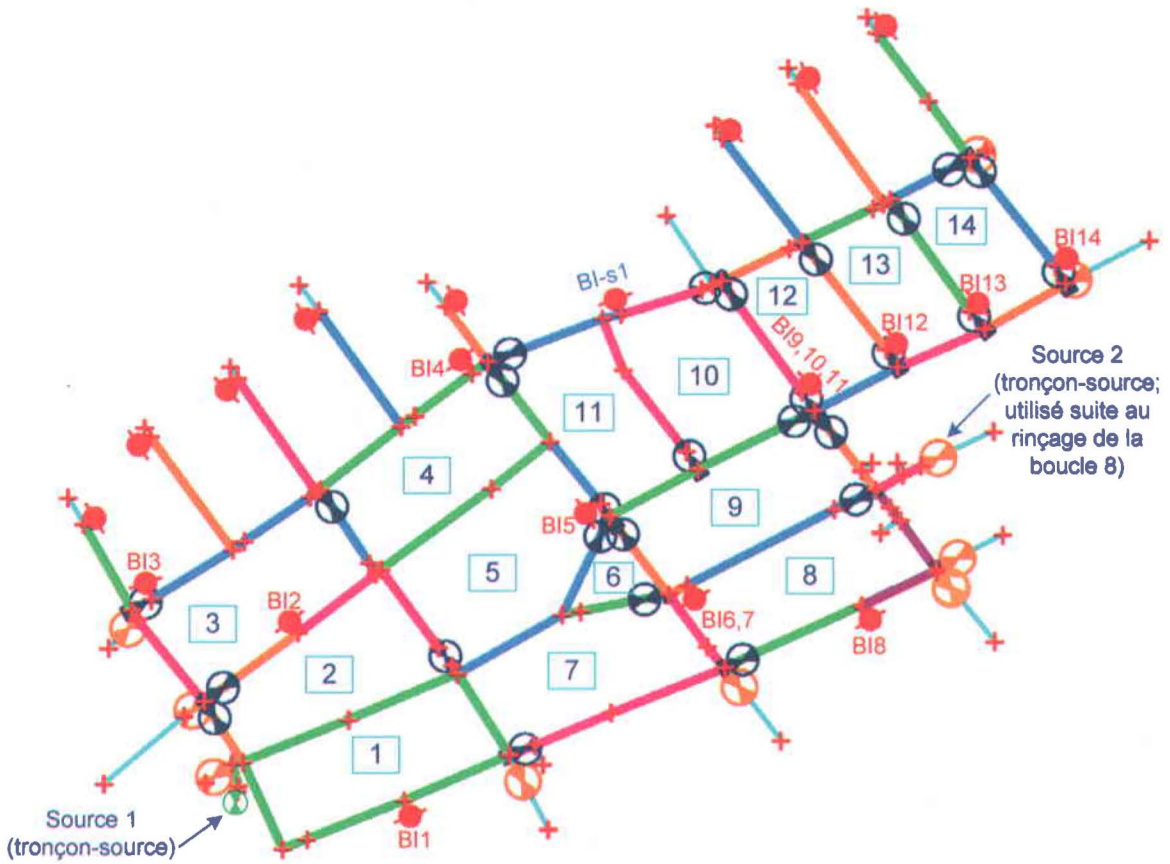
Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 (seule candidate, 3a.2-i)

BI1 : règle 2.9-ii (2.2, 2.5-2.7-i + 2.8-iii-CAS2)
BI2 : règles 3b.2à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI4 : règle 3b.9-i (3b.3 à 3b.7-i; seule candidate)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI6 : règle 3b.9-ii (3b.2, 2b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS 1)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Le tronçon-source 1 est adjacent aux boucles 1 et 2, étant situé à l'intersection de ces deux boucles. L'une ou l'autre pourrait être sélectionnée en tant que première candidate au rinçage. Cependant, conformément à la règle 1.2, la boucle 1 est celle dont le linéaire partagé avec des boucles voisines à rincer est minimal (i.e. celle qui se trouve le plus en « périphérie » du secteur à rincer).
2) Les boucles 1 et 6 doivent être rincées, chacune, en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règles 2.9-ii et 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur ces boucles ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 2.2-2.7 (respectivement 3b.2-3b.7).

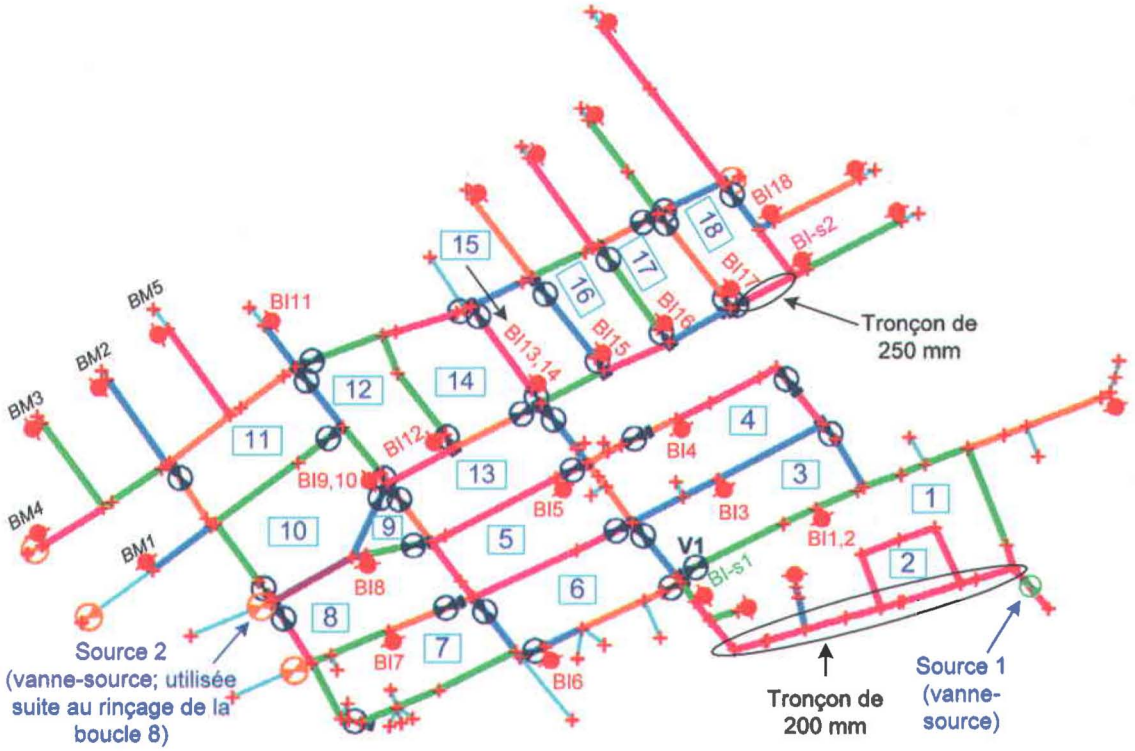
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 048



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 7 : rinçage par la même borne que la boucle 6 (3a.1)
Boucle 8 : conduites partagées avec la boucle 7 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 9 : conduites partagées avec la boucle 8 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 10 : rinçage par la même borne que la boucle 9 (3a.1)
Boucle 11 : conduites partagées avec la boucle 10 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 12 : % de linéaire partagé avec des boucles rincées précédemment (3a.2-ii)
Boucle 13 : conduites partagées avec la boucle 12 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 14 : conduites partagées avec la boucle 13 (seule candidate, 3a.2-i)

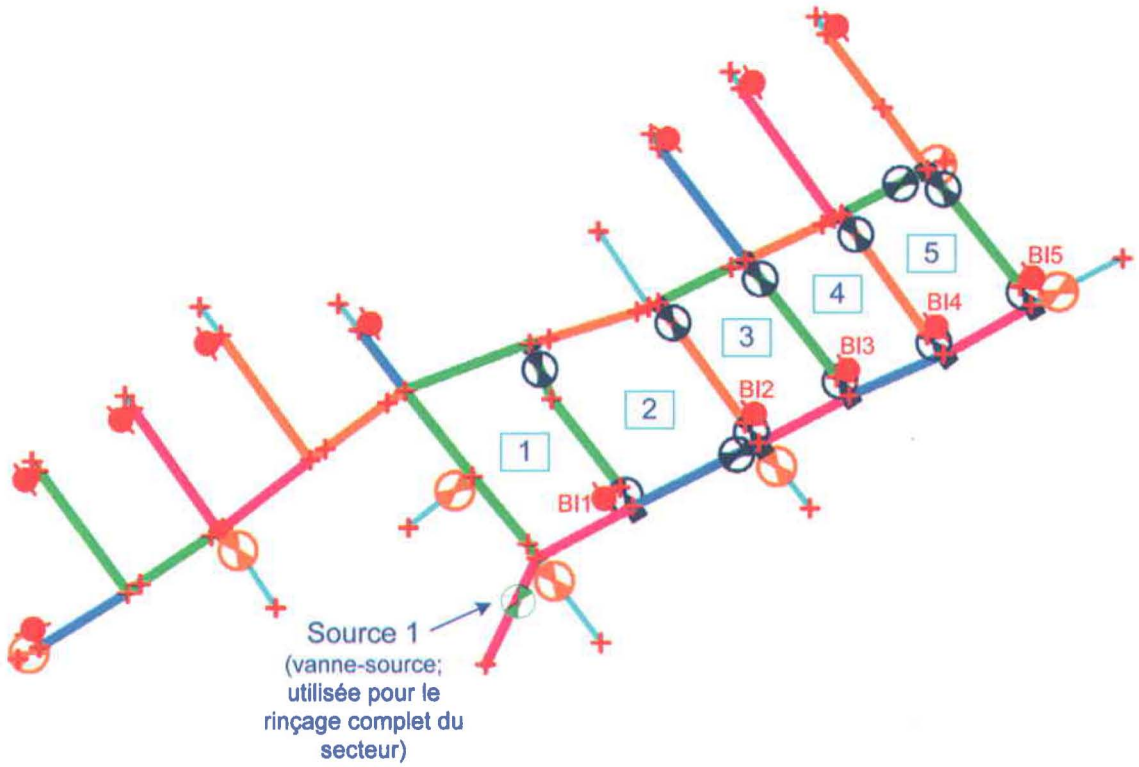
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 057



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 7 : conduites partagées avec la boucle 6 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 8 : conduites partagées avec la boucle 7 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 9 : conduites partagées avec la boucle 8 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 10 : rinçage par la même borne que la boucle 9 (3a.1)
Boucle 11 : conduites partagées avec la boucle 10 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 12 : conduites partagées avec la boucle 11 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 13 : conduites partagées avec la boucle 12 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 14 : rinçage par la même borne que la boucle 13 (3a.1)
Boucle 15 : conduites partagées avec la boucle 14 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 16 : conduites partagées avec la boucle 15 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 17 : conduites partagées avec la boucle 16 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 18 : conduites partagées avec la boucle 17 (seule candidate, 3a.2-i)

TERRASSE-VAUDREUIL, 1[RE] DÉTECTION AU DÉTECTEUR 060



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : partage des conduites avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : partage des conduites avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : partage des conduites avec la boucle 3 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 5 : partage des conduites avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-iii (CAS 2)
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **I**

RÉSUMÉ ..... **III**

LISTE DES FIGURES ..... **XI**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XIII**

INDEX DES ABRÉVIATIONS ..... **XV**

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION SUR LA SÉCURITÉ DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE **1**

1.1 INTRUSIONS DE CONTAMINANTS EN RÉSEAU 1
1.2 APPROCHE DE PROTECTION PAR BARRIÈRES MULTIPLES 5
1.3 APPROCHES OPÉRATIONNELLES DANS UN CONTEXTE DE SÉCURITÉ 6
1.4 OBJECTIFS DES TRAVAUX DE CETTE THÈSE 8

CHAPITRE 2 – TERMINOLOGIE ET CONCEPTS RELATIFS À LA MODÉLISATION DES RÉSEAUX D'EAU POTABLE **11**

2.1 MODÈLE DE RÉSEAU 11
2.1.1 Représentation à l'aide de la théorie des graphes *11*
2.1.2 Degré d'un nœud *13*
2.1.3 Adjacence, chemins et cycles *13*
2.1.4 Éléments de réseaux et configuration *15*
2.1.4.1 Modèles physiques de réseau 15
2.1.4.2 Niveau de détail 19
2.1.4.3 Séparation des éléments d'un réseau 20
2.2 MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS EN RÉSEAUX D'EAU POTABLE 21
2.2.1 Simulation hydraulique *22*
2.2.2 Simulation de la qualité de l'eau (transport de substances en réseau) *24*

CHAPITRE 3 – REVUE DE LITTÉRATURE **29**

3.1 RÉPONSE AUX INCIDENTS DE CONTAMINATION : ASPECTS OPÉRATIONNELS 29
3.1.1 Isolement de sous-secteurs de réseau *32*
3.1.2 Rinçage des conduites d'eau potable *35*
3.1.2.1 Rinçage traditionnel 36
3.1.2.2 Purge continue 37
3.1.2.3 Rinçage unidirectionnel 37
3.1.2.4 Mise en œuvre du rinçage unidirectionnel et aspects opérationnels 39
3.1.2.5 Précisions concernant les bornes d'incendie et les vannes 43
3.1.2.6 Prise en charge de l'eau de rinçage 44
3.1.3 Élimination des contaminants adhérents aux parois des conduites *45*
3.2 RÉPONSE AUX INCIDENTS DE CONTAMINATION : ASPECTS TECHNIQUES 46
3.2.1 Systèmes de monitoring de la qualité de l'eau en continu *47*
3.2.1.1 État actuel des connaissances 48
3.2.1.2 Défis de recherche et développement 50
3.2.2 Localisation optimale des détecteurs de contamination *53*
3.2.2.1 Principales études 54
3.2.2.2 Ajout d'éléments réalistes aux modèles de localisation de détecteurs 60
3.2.3 Localisation des sources de contamination *61*
3.2.3.1 Principales études 61
3.2.3.2 Développements récents et préliminaires 62

3.2.4 Outils disponibles pour la gestion des opératons de réponse aux incidents de contamination..... 66
3.2.4.1 *Baranowski* (2007) 67
3.2.4.2 *Preis et al.* (2007b) 69
3.2.4.3 H2OMAP Protector 70

CHAPITRE 4 – PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE 71

4.1 PROBLÉMATIQUE ET ENJEUX 71
4.2 OBJECTIFS ET CHOIX MÉTHODOLOGIQUES 74
4.2.1 Aperçu général des travaux réalisés dans la présente thèse 75
4.2.2 Éléments non pris en compte 78
4.2.3 Réseaux d'étude 79
4.2.3.1 Réseau de Valcourt 80
4.2.3.2 Réseau de Terrasse-Vaudreuil 82

CHAPITRE 5 – LOCALISATION OPTIMALE DES DÉTECTEURS DE CONTAMINATION 85

5.1 DESCRIPTION DU MODÈLE DE WATSON ET AL. (2004) 85
5.1.1 Hypothèses sous-jacentes 87
5.1.2 Description de l'approche 88
5.1.3 Validation du modèle 92
5.1.4 Délimitation de secteurs potentiellement contaminés 94
5.2 RÉSULTATS DE LA LOCALISATION DES DÉTECTEURS SUR LES RÉSEAUX DE VALCOURT ET TERRASSE-VAUDREUIL 95

CHAPITRE 6 – ISOLEMENT DES SECTEURS CONTAMINÉS 99

6.1 PRINCIPES SOUS-JACENTS 99
6.1.1 Vannes à manipuler 100
6.1.2 Structure topologique des secteurs à isoler 101
6.1.3 Sécurité et efficacité des interventions 102
6.1.4 Hypothèses 104
6.2 MÉTHODE POUR L'ISOLEMENT DE SECTEURS CONTAMINÉS 107
6.2.1 Organigramme général 107
6.2.2 Applications détaillées 108
6.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS 124
6.4 DISCUSSION 127
6.4.1 Hypothèses de modélisation 127
6.4.1.1 Simulation du transport de contaminants en réseau 128
6.4.1.2 Densités de détecteurs 129
6.4.1.3 Condition physique des éléments de réseau 130
6.4.1.4 Niveau de détail des modèles de réseau 130
6.4.2 Considérations sur les délais et la disponibilité du personnel d'intervention 131
6.4.3 Validité générale de la méthode 134

CHAPITRE 7 – CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA PROCÉDURE POUR LE RINÇAGE DES SECTEURS ISOLÉS 135

7.1 ÉTAPES PRÉALABLES 135
7.2 CONSIDÉRATIONS OPÉRATIONNELLES 138
7.2.1 Structure des opérations 138
7.2.1.1 Séquences pour le rinçage des boucles 139
7.2.1.2 Séquences pour le rinçage des bouts morts 142
7.2.1.3 Utilisation des sources primaire et secondaire 143
7.2.2 Critères hydrauliques 144

7.3 HYPOTHÈSES 146

CHAPITRE 8 – RINÇAGE DES SECTEURS ISOLÉS : PROCÉDURE, RÉSULTATS ET DISCUSSION 151

8.1 MÉTHODE POUR L'ÉLABORATION DES OPÉRATIONS DE RINÇAGE 151
8.2 APPLICATION DÉTAILLÉE 155
8.2.1 Étape 1 : Choix de la source primaire et de la première boucle à rincer 155
8.2.2 Étape 2 : Sélection de la borne pour le rinçage de la première boucle 156
8.2.3 Étape 3 de la procédure de rinçage 160
8.2.4 Étape 4 : Stratégie préliminaire 165
8.2.5 Étape 5 de la procédure de rinçage 165
8.2.6 Description des séquences individuelles de rinçage unidirectionnel 171
8.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS 197
8.3.1 Analyse des résultats d'un point de vue hydraulique 201
8.3.2 Analyse des résultats du point de vue opérationnel 202
8.4 DISCUSSION 206
8.4.1 Comparaison avec les approches existantes 206
8.4.1.1 Gestion des opérations de réponse et aspects opérationnels 206
8.4.1.2 Hypothèses sur les consommations et le transport de contaminants en réseau 210
8.4.2 Caractéristiques des contaminants 213
8.4.3 Conception des réseaux de distribution 214
8.4.4 Interventions d'urgence et protection contre les incendies 216

CHAPITRE 9 – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE 219

9.1 PERSPECTIVES DE RECHERCHE 220
9.2 UTILITÉ DES PRÉSENTS TRAVAUX DANS UN CADRE PLUS GÉNÉRAL DE GESTION, D'ENTRETIEN ET D'OPÉRATION DES RÉSEAUX D'EAU POTABLE 223

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 225

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Illustration d'un cas de contamination par raccordement croisé (tiré de USEPA, 2003a) 3
Figure 1.2 : Stratégie proposée par USEPA (2006) et USEPA (2003b) en réponse aux contaminations en réseaux d'eau potable. 8
Figure 2.1 : Représentation d'un graphe simple 12
Figure 2.2 : Représentation d'un graphe orienté 13
Figure 2.3 : Représentation schématisée d'un réseau arborescent 17
Figure 2.4 : Représentation schématisée d'un réseau maillé. 17
Figure 2.5 : Représentation schématisée d'un réseau d'apparence plus réelle.. 18
Figure 4.1 : Organigramme présentant l'ensemble des interventions concrètes à mettre en place suite à la détection de contamination en réseau d'eau potable 76
Figure 4.2 : Représentation du réseau de Valcourt.. 81
Figure 4.3 : Représentation du réseau de Terrasse-Vaudreuil.. 83
Figure 5.1 : Réseau simple ayant servi à la validation du modèle de localisation optimale de détecteurs (équations 5.1 – 5.7) 93
Figure 5.2 : Résultats de la localisation de 20 détecteurs de contamination sur le réseau de Valcourt. 97
Figure 5.3 : Résultats de la localisation de 15 détecteurs de contamination sur le réseau de Terrasse-Vaudreuil. 98
Figure 6.1 : Illustration de la topologie recherchée pour les secteurs à isoler. 102
Figure 6.2 : Organigramme présentant la méthodologie pour la définition des opérations d'isolement. 109
Figure 6.3 : Résultats de l'application de la procédure d'isolement au secteur potentiellement contaminé délimité suite à une première détection au détecteur 368 (D-368), réseau de Valcourt. 111
Figure 6.4 : Résultats de l'application de la procédure d'isolement au secteur potentiellement contaminé délimité suite à une première détection au détecteur 051 (D-051), réseau de Terrasse-Vaudreuil. 113
Figure 6.5 : Description de la seconde étape de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2. 114
Figure 6.6 : Description de la troisième étape de la procédure d'isolement, présentée à la figure 6.2. 115
Figure 6.7 : Description de la quatrième étape de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2. 119
Figure 6.8 : Description des sixième et septième étapes de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2. 120
Figure 6.9 : Exemple de cas où une portion importante de réseau est entièrement privée d'eau en raison de la fermeture d'une vanne servant à inclure un BM-source au secteur isolé.. 123
Figure 7.1 : Exemple de secteur de réseau à rincer et préalablement isolé.. 137
Figure 8.1 : Organigramme présentant la méthodologie pour la définition des opérations de RUD visant l'évacuation d'eau contaminée d'un secteur de réseau isolé. 154
Figure 8.2 : Description de la première étape de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 155
Figure 8.3 : Représentation du secteur isolé et à rincer, lors de l'occurrence d'une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 158
Figure 8.4 : Description des règles permettant la sélection des bornes d'incendie pour le rinçage des boucles, aux étapes 2 et 3.b de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 159

Figure 8.5 : Description des règles permettant de déterminer l'ordre de rinçage des boucles, à l'étape 3a de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 160
Figure 8.6 : Description des règles permettant de sélectionner les bornes pour le rinçage des BM, à l'étape 3d de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 165
Figure 8.7 : Description des règles permettant de sélectionner les vannes pour l'exécution du RUD, à l'étape 5a de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 167
Figure 8.8 : Description des règles permettant de déterminer l'ordre de rinçage des séquences de RUD associées à chaque boucle, à l'étape 5b de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 168
Figure 8.9 : Description des règles pour la validation hydraulique des séquences de RUD sur chaque boucle, à l'étape 5c de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1. 170
Figure 8.10 : Illustration de la séquence 1, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 172
Figure 8.11 : Illustration de la séquence 2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 175
Figure 8.12 : Illustration de la séquence BM1, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 176
Figure 8.13 : Illustration de la séquence 3, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 178
Figure 8.14 : Illustration de la séquence 4, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 180
Figure 8.15 : Illustration de la séquence BM2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 181
Figure 8.16 : Illustration de la séquence BM3, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 182
Figure 8.17 : Illustration de la séquence 5, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 183
Figure 8.18 : Illustration de la séquence 6, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 185
Figure 8.19 : Illustration de la séquence BM4, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 186
Figure 8.20 : Illustration de la séquence 7, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 187
Figure 8.21 : Illustration de la séquence 8, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 189
Figure 8.22 : Illustration des séquences BM5.1 et BM5.2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 190
Figure 8.23 : Illustration de la séquence 9, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 192
Figure 8.24 : Illustration des séquences 10.1 et 10.2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 194
Figure 8.25 : Illustration de la séquence 11, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. 195

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Représentation matricielle (matrice d'adjacence *A*) du graphe orienté valué de la figure 2.2. Les valeurs en bleu indiquent le chemin le plus court entre les nœuds 2 et 3 (empruntant deux arcs, u_1 et u_3). La valeur en rouge indique un chemin plus long, en matière de coût, même s'il n'emprunte qu'un seul arc (u_2)..... 14
Tableau 3.1 : Description des stades majeurs d'intervention lors de l'occurrence d'une contamination en réseau (*USEPA,* 2004b*; USEPA,* 2006)..... 30
Tableau 3.2 : Vitesses de RUD recommandées dans la littérature..... 41
Tableau 3.3 : Nombre théorique de prises de boyau devant être ouvertes pour l'atteinte d'une vitesse de rinçage de 1,8 m/s, en fonction du diamètre des conduites des séquences de RUD (à pression résiduelle de 207 kPa ou 21,1 m d'eau) (*Antoun et al.,* 1999) 44
Tableau 5.1 : Données associées à la résolution du problème MILP de la section 5.1.2, pour les réseaux d'étude..... 96
Tableau 6.1 : Synthèse des résultats pour l'isolement des 26 cas analysés, réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil (DIM : délai d'intervention maximal; DPM : délai de propagation de contaminants). 125
Tableau 8.1 : Justification des résultats présentés à la figure 8.3, suivant l'application des règles et critères des étapes 1 à 3b de la procédure de RUD. 163
Tableau 8.2 : Vitesses et pressions simulées pour les séquences de rinçage unidirectionnel lorsqu'une première détection survient au détecteur 279, réseau de Valcourt..... 196
Tableau 8.3 : Synthèse des résultats obtenus pour le RUD de chacun des secteurs examinés, réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil. 199

INDEX DES ABRÉVIATIONS

BI : Borne d'incendie.

BM : Bout mort (dans un réseau de distribution, portion arborescente).

CHW : Coefficient d'Hazen-Williams.

CMJ : Consommation moyenne journalière

CWS : *Contamination warning system* (ou système d'alerte à la contamination).

DIM : Délai d'intervention maximal.

DPM : Délai de propagation minimal.

ED : *Event detection* (en référence aux algorithmes pour l'identification d'anomalies de la qualité de l'eau qui seraient révélatrices de contamination en réseaux d'eau potable).

EPS : Extended period simulation (ou simulations de longue durée).

EWS : Early warning system (ou systems d'alerte rapide).

ICI : Industries, commerces et institutions (en référence aux divers usagers d'un système d'alimentation en eau potable).

MILP : Mixed-integer linear programming (ou programmation linéaire mixte en nombres entiers).

RUD : Rinçage unidirectionnel.

CHAPITRE 1 – Introduction sur la sécurité des réseaux de distribution d'eau potable

Les infrastructures d'approvisionnement en eau potable sont conçues en vue de fournir de l'eau de qualité, en quantité suffisante et à pression acceptable, à un ensemble d'usagers municipaux : résidences, institutions, commerces et industries. De plus, ces infrastructures servent à assurer la protection contre les incendies au sein d'une municipalité. Bien que l'eau destinée à la consommation subisse divers traitements physico-chimiques au départ, le maintien de sa qualité jusqu'au robinet pose un défi supplémentaire, notamment en raison des temps de parcours parfois élevés, d'opérations d'entretien pouvant engendrer des problèmes ponctuels de qualité et même en raison d'incidents de contamination, dont l'occurrence est de faible probabilité, mais dont les impacts sur la santé des usagers peuvent être importants. La gestion du risque pour l'ensemble d'une communauté découlant de ces incidents de contamination constitue l'élément premier ayant motivé les travaux de recherche rapportés dans la présente thèse.

1.1 Intrusions de contaminants en réseau

Au cours des dernières décennies, plusieurs contaminations accidentelles de l'eau potable se sont produites en raison de déficiences ayant provoqué l'intrusion de substances chimiques et biologiques au sein des réseaux de distribution. Au nombre des incidents marquants, citons celui s'étant produit à Gideon (Missouri), en 1993 (*Craun et Calderon,* 2001*; Clark et al.,* 1996). Le mauvais entretien d'un réservoir de stockage a permis à des oiseaux d'entrer en contact avec l'eau qui y était contenue, ce qui a entraîné la contamination de l'eau par la bactérie *salmonella typhimurium*. Six cent cinquante (650) cas de maladie et sept morts ont été liés à l'occurrence de cet événement de contamination.

Les principales déficiences pouvant entraîner, de façon accidentelle, une contamination de l'eau potable sont les suivantes : occurrence transitoire de pressions faibles, voire négatives, présence de raccordements croisés dépourvus de dispositifs antireflux conformes (*CMMTQ,* 2006*; USEPA,* 2003a), mauvais fonctionnement d'accessoires du réseau, entretien ou réparation dans des conditions inadéquates, présence de sources de contamination au voisinage des conduites d'eau potable et défaillances structurales (*Karim et al.,* 2003*; Lindley et Buchberger,* 2002*; Craun et Calderon,* 2001). Chacune de ces déficiences apparaît selon que l'une ou l'autre des conditions suivantes est rencontrée : 1) une force motrice, plus spécifiquement un gradient de pression antagoniste, 2) un chemin d'intrusion et 3) une source de contamination. En un point de réseau donné, le potentiel d'intrusion augmente avec le nombre de conditions défavorables simultanément présentes (occurrence aléatoire) (*Sadiq et al.,* 2005*; Lindley et Buchberger,* 2002).

De nombreux incidents reliés à des raccordements croisés ont été rapportés dans la littérature (*USEPA,* 2003a*; PNWS-AWWA,* 1995). Des pesticides, eaux usées, bactéries pathogènes et agents chimiques divers (détergents, hydrocarbures, etc.) ont ainsi contaminé des immeubles et secteurs de réseaux en raison de contrepressions ou de siphonnements (annexe 1). *Hrudey et Hrudey* (2007) ont effectué une revue de 73 incidents de contamination causés par des agents microbiologiques s'étant produits au Canada, aux États-Unis, en Europe et en Australie lors des trois dernières décennies. Au cours de chacune de ces décennies, des intrusions de contaminants ont été liées à des raccordements croisés (11 incidents sur 73 au total). À titre d'exemple, la figure 1.1 illustre un cas s'étant produit dans une petite ville du Maryland (É.-U.), suite à une baisse de pression temporaire dans le réseau d'eau potable, causée par une défaillance du système de pompage (*USEPA,* 2003a). Au même moment, par le biais d'une vanne laissée

ouverte, une grande quantité d'herbicide paraquat a été introduite en réseau. Heureusement, aucun cas de maladie ou de mortalité n'a résulté de l'incident. Des activités importantes d'échantillonnage et de nettoyage en réseau ont néanmoins dû être entreprises. L'exemple suivant illustre un cas où la situation a été aggravée en raison d'une gestion inefficace et désorganisée des conséquences d'un incident de contamination. En juin 1991 au Missouri (É.-U.), la présence de méthylchloroforme (1,1,1-trichloroéthane) a été détectée dans l'eau potable d'une municipalité en raison d'une forte odeur de solvant qui s'en dégageait (*PNWS-AWWA,* 1995). En réponse à l'appel téléphonique d'un usager, le personnel de gestion du réseau a rapidement procédé à l'ouverture de bornes d'incendie afin d'évacuer le contaminant. Cette action fut néanmoins prise de façon hâtive et sans aucune planification, ce qui a contribué à disséminer davantage le contaminant au sein du réseau de distribution. Après enquête, il a été déterminé que l'incident avait été causé par un raccordement croisé entre le réseau d'eau potable et un réservoir de solvant qui alimentait la presse d'un journal.

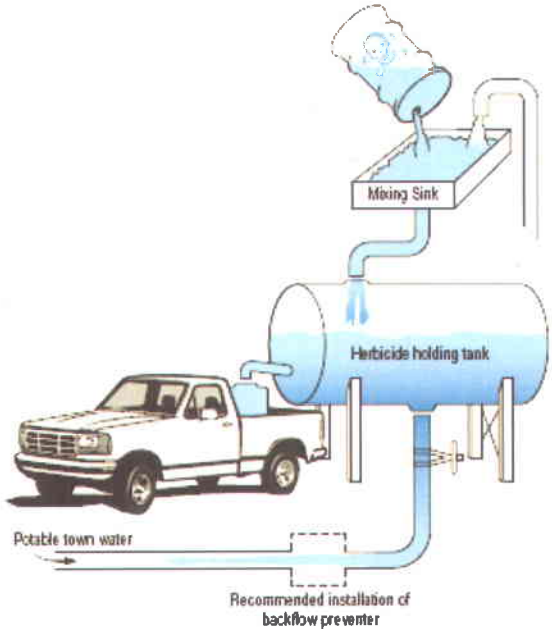


Figure 1.1 : Illustration d'un cas de contamination par raccordement croisé (tiré de *USEPA,* 2003a).

Par ailleurs, depuis les événements du 11 septembre 2001, les préoccupations quant à l'introduction intentionnelle de contaminants en réseau se sont intensifiées (bioterrorisme). Provenant d'abord des instances gouvernementales, surtout aux États-Unis, ces préoccupations ont eu des échos au sein de la communauté scientifique et des experts du milieu de la pratique en matière d'approvisionnements en eau potable (*Daneels et Finley,* 2004). À notre connaissance, depuis 2001, aucun cas de contamination délibérée au moyen de substances présentant un danger pour la santé publique n'a été rapporté. De tels événements se sont pourtant déjà produits dans le passé, tel qu'en témoigne l'exemple suivant. En décembre 1980, à Pittsburgh en Pennsylvanie (É.-U.), du chlordane a été intentionnellement introduit dans le réseau d'eau potable municipal par le biais d'une prise généralement utilisée pour mesurer la pression statique (en y raccordant l'instrument approprié) (*Silverman et al.,* 1981). C'est d'abord une forte odeur s'apparentant au kérosène qui a révélé la présence du pesticide. Après confirmation, des ingénieurs en charge de la gestion du réseau ont procédé à l'isolement d'un secteur par la fermeture de vannes appropriées et ont initié des opérations d'évacuation du contaminant par l'ouverture de bornes d'incendie (rinçage). Une campagne d'échantillonnage subséquente a cependant démontré que le secteur affecté s'étendait au-delà du secteur initialement isolé, touchant approximativement 10 500 usagers résidentiels ainsi que plusieurs entreprises. Un avis de non-consommation de l'eau a été émis à l'ensemble de la population concernée et a été levé provisoirement 10 à 14 jours plus tard (selon le secteur). Toutefois, des opérations visant à corriger la situation de façon permanente ont dû être entreprises. En raison de l'adhérence du chlordane aux infrastructures de distribution, des activités importantes de rinçage se sont poursuivies durant six mois, au terme desquels l'avis de non-consommation a pu être levé définitivement. Bien qu'une population importante ait été touchée par cet incident, les niveaux d'exposition au contaminant sont demeurés faibles. Aucun cas de maladie n'a pu être directement lié à l'incident.

Les exemples cités précédemment montrent dans quelle mesure les réseaux de distribution peuvent être vulnérables face à divers incidents pouvant affecter la qualité de l'eau véhiculée aux consommateurs. Ainsi, il s'avère essentiel d'améliorer les stratégies de protection et de gestion existantes, notamment en matière de surveillance et de prise de décision (*Rodriguez et al.,* 2006*; Sadiq et Rodriguez,* 2005).

1.2 Approche de protection par barrières multiples

Dans le but de pallier à la vulnérabilité des infrastructures d'approvisionnement en eau potable et afin d'acheminer une eau de qualité jusqu'au robinet des consommateurs, l'adoption d'une approche de protection dite par barrières multiples est l'une des pratiques aujourd'hui reconnues comme efficaces et sa mise en place est fortement encouragée, notamment au Canada (*CFPTEP et CCME,* 2004). Une telle approche est axée sur la protection des sources d'eaux brutes, sur la mise en place de filières de traitement adéquates et sur le maintien de la qualité de l'eau distribuée en réseau. C'est d'ailleurs dans cet esprit que le Règlement sur la qualité de l'eau potable a été promulgué par le ministère de l'Environnement du Québec en 2001 (*MDDEP,* 2005), en remplacement du précédent Règlement sur l'eau potable, en vigueur depuis 1984. Au niveau du réseau de distribution, l'approche par barrières multiples promeut l'implantation de mesures préventives telles que le suivi de l'eau acheminée au robinet en divers points et sur une base régulière, le contrôle des raccordements croisés, l'entretien et la réhabilitation des infrastructures de distribution ainsi que le maintien d'une concentration minimale de désinfectant résiduel. Cette dernière mesure est souvent considérée comme l'ultime barrière de protection contre les intrusions de contaminants en réseau d'eau potable. À cet égard, des travaux ont été réalisés en vue : (1) d'optimiser la localisation et/ou les règles d'opération de stations de désinfection de façon à maintenir les niveaux requis de désinfectant au sein des réseaux de

distribution; et (2) d'évaluer l'impact de diverses stratégies de désinfection sur le niveau d'exposition des usagers à des intrusions de contaminants microbiologiques simulées (*Ostfeld et Salomons,* 2006*; Propato et Uber,* 2004a*; Tryby et al.,* 2002). Mais encore faut-il que le désinfectant ait un pouvoir d'action efficace sur les contaminants (inactivation, concentration et temps de contact suffisants), ce qui risque souvent de ne pas être le cas (*Allman et Carlson,* 2005), surtout si une stratégie adéquate de désinfection secondaire n'est pas adoptée (*Propato et Uber,* 2004b). Notons également que les points d'accès en réseau non protégés sont nombreux (p. ex. : robinets, bornes d'incendie) et les temps de parcours entre les points d'injection des contaminants et les usagers peuvent être relativement courts (*Allman et Carlson,* 2005*; Walski et al.,* 2003).

1.3 Approches opérationnelles dans un contexte de sécurité

Au cours des cinq dernières années, c'est sous le thème de la sécurité des réseaux d'eau potable que de nouvelles recommandations ont été mises de l'avant, afin de bonifier les pratiques et approches dont il est question à la section précédente. Dans cet esprit, l'*American Water Works Association* (AWWA) a produit un guide visant à aider les gestionnaires à élaborer des stratégies globales de sécurité en fonction des besoins spécifiques de chaque réseau (*Bell et al.,* 2004). Il y est question, entre autres, de sécurité informatique, de l'établissement de périmètres de sécurité, de surveillance et du contrôle de l'accès aux installations (traitements, réservoirs, etc.). De façon plus spécifique, l'*American Society of Civil Engineers* (*ASCE,* 2004) aborde la question de la mise en place, en divers points d'un réseau, d'unités de monitoring de la qualité de l'eau en continu et en temps réel. Il existe, à l'heure actuelle, des technologies utilisables à cette fin, bien que l'état des connaissances en ce domaine soit en continuelle évolution (*USEPA,* 2005a). L'implantation de systèmes de monitoring en temps réel s'inscrit dans le cadre plus général de

mise en place de « contamination warning systems » – CWS (ou *early warning systems* – EWS[1]). Un CWS implique le déploiement de technologies et/ou stratégies ainsi que d'activités de surveillance accrue permettant la collecte, le regroupement, l'analyse et la communication d'informations relatives à des contaminations en réseau. Ce système a pour objectif d'émettre rapidement un avertissement suite à l'occurrence probable d'un incident de contamination et d'initier le processus de réaction subséquent. En plus du monitoring, les informations issues de la surveillance peuvent provenir de plaintes des consommateurs, des instances de santé publique, d'échantillonnage manuel, d'un témoin d'un acte malveillant, etc. (*USEPA,* 2005a).

Récemment, l'*AWWA Research Foundation* (AwwaRF) a fourni un « coffre à outils » permettant de mieux planifier la gestion des conséquences d'incidents naturels ou causés par l'homme pouvant toucher les approvisionnements en eau potable (*Herrick et al.,* 2006). Pour ce qui est des contaminations se produisant en réseaux (intrusions), l'élaboration de stratégies de réponse et de retour à l'état normal est abordée de façon plus spécifique dans le *Response Protocol Toolbox* (RPTB) (*USEPA,* 2006*; USEPA,* 2003b). Selon le RPTB, dès qu'une contamination est rapportée (par le biais d'un CWS par exemple), une série d'actions devrait être entreprise. Ces actions s'inscrivent à l'intérieur d'une stratégie (Figure 1.2) ayant pour buts de limiter les impacts potentiels des contaminants sur la santé des consommateurs et d'assurer, de façon efficace et rapide, le retour à l'opération normale du réseau d'eau potable. Le plan d'action de la figure 1.2 consiste en deux processus parallèles qui orientent, de façon progressive, l'évaluation du risque de contamination ainsi que les actions à mettre en œuvre. Au fur et à mesure que le niveau de certitude quant à l'occurrence de contamination augmente, les actions de réponse deviendront plus spécifiques et ciblées (*Allgeier et Magnuson,* 2004). Les interventions spécifiques au réseau

[1] Cette appellation est plus générale et a donné lieu à l'expression *contamination warning system*, laquelle identifie de façon plus spécifique le danger en cause (*USEPA,* 2005a). En français, on pourra dire : systèmes d'alerte rapide.

d'eau potable incluent notamment la délimitation et l'isolement de zones potentiellement contaminées, l'émission d'avis publics sur la consommation d'eau ainsi que l'expulsion des contaminants et/ou le nettoyage des structures affectées (*USEPA,* 2006*; USEPA,* 2004a*; USEPA,* 2004b).

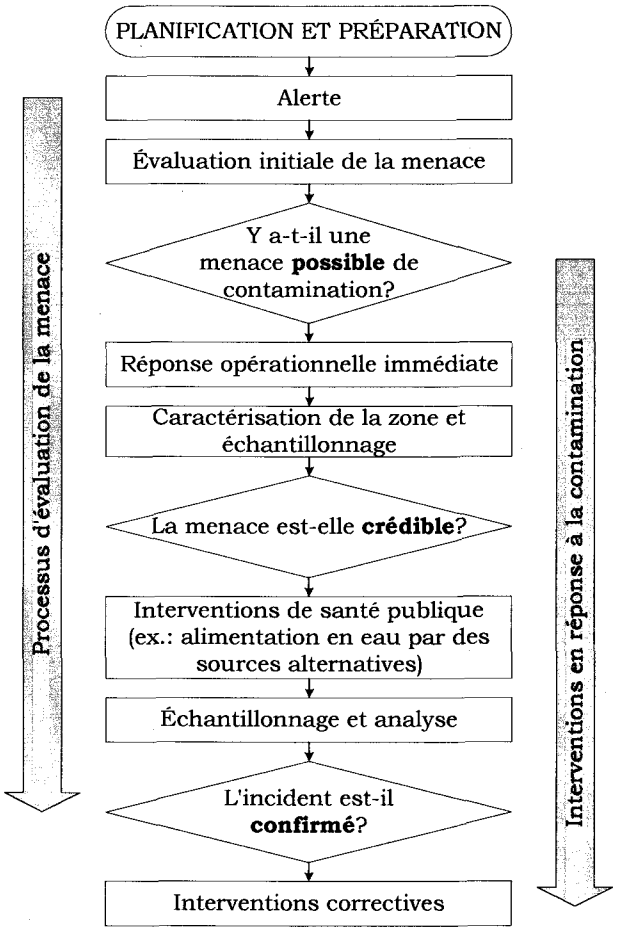


Figure 1.2 : Stratégie proposée par *USEPA* (2006) et *USEPA* (2003b) en réponse aux contaminations en réseaux d'eau potable.

1.4 Objectifs des travaux de cette thèse

Les sections précédentes l'indiquent clairement : l'intrusion de contaminants au sein des réseaux de distribution présente un risque pour l'ensemble d'une communauté. Une grande variété de

substances chimiques, microbiologiques et radiologiques peut être introduite en réseau et ainsi sérieusement affecter la santé des consommateurs, voire même avoir un effet létal. Il peut également en résulter des coûts importants liés au nettoyage, au remplacement ou à la réparation de l'infrastructure contaminée, par exemple. L'ampleur de ces impacts dépend dans une large mesure de la capacité du service d'eau potable à réagir diligemment et efficacement aux incidents de contamination. En complément aux directives indiquées précédemment, il apparaît nécessaire que des méthodes d'analyse adaptées soient développées afin de permettre une gestion efficace des situations de contamination en réseau.

Au cours des dernières décennies, les outils informatisés de modélisation ont fait l'objet de nombreux développements et font aujourd'hui partie des pratiques recommandées pour la conception, la gestion, l'analyse et l'opération d'infrastructures d'approvisionnement en eau potable (*Walski et al.,* 2003). Dans le but de favoriser la détection précoce ainsi qu'une meilleure gestion des risques pour la santé publique associés aux contaminations se produisant en réseaux d'eau potable, de nouveaux outils et procédures reposant sur la modélisation des écoulements doivent être développés et, ultimement, rendus disponibles aux gestionnaires de réseaux. Cette problématique actuelle a récemment conduit à l'émergence d'un nouveau domaine de recherche devenu rapidement très actif. Dans cet engouement, la grande majorité des travaux se sont d'abord intéressés au problème de la détection précoce de contaminants et peu nombreux sont ceux qui ont abordé la gestion des opérations en réponse aux contaminations. Dans le cadre de cette thèse, à partir de l'analyse des réseaux de municipalités du Québec, deux procédures heuristiques ont été élaborées dans le but de systématiser et structurer, de façon sécuritaire et efficace, l'ensemble des opérations visant à :

(1) empêcher la propagation de contaminations détectées en fermant les vannes appropriées, de façon à isoler ces contaminations à l'intérieur de sous-secteurs de réseau; et

(2) évacuer l'eau contaminée des secteurs isolés, au moyen du rinçage unidirectionnel (RUD).

Afin d'exposer clairement la pertinence de ces travaux, le contenu du présent document est organisé comme suit. Le chapitre 2 introduit des termes et concepts de modélisation de base, nécessaires à la compréhension du contenu des chapitres subséquents. Au chapitre 3, la littérature sur laquelle s'appuient les présents travaux est revue et commentée. À la lumière de ces informations, le chapitre 4 définit de façon formelle la problématique ayant motivé cette recherche, les objectifs visés et les choix méthodologiques quant au développement des deux procédures proposées pour la gestion des opérations de réponse. Une description des réseaux d'étude est ensuite proposée. La détection précoce de contaminants introduits en réseaux étant une condition de départ nécessaire à l'application des procédures de réponse, le chapitre 5 présente l'application d'un modèle à l'aide duquel des détecteurs de contamination ont été localisés de façon optimale au sein des réseaux d'étude. Le chapitre 6 est consacré à la présentation de la procédure d'isolement et de son application, des résultats obtenus et d'une discussion. Les chapitres 7 et 8 reprennent ces mêmes éléments, cette fois pour la procédure visant à évacuer les contaminations (l'information a été organisée en deux chapitres afin de favoriser la clarté de la présentation). Bien que les deux procédures de réponse soient complémentaires, elles ont fait l'objet de processus de développement distincts, et c'est pour cette raison qu'elles sont décrites dans le cadre de chapitres séparés. La discussion du chapitre 8, toutefois, inclut des considérations générales, relatives à l'ensemble de ces travaux. Enfin, le chapitre 9 présente les conclusions générales se dégageant de cette thèse et propose un ensemble de perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 – Terminologie et concepts relatifs à la modélisation des réseaux d'eau potable

Ce chapitre propose un ensemble de définitions et concepts relatifs à l'analyse des réseaux de distribution, plus spécifiquement associés à leur représentation conceptuelle et à la modélisation des écoulements. L'introduction de ces notions, d'entrée de jeu, pose les bases utiles à une meilleure compréhension des chapitres ultérieurs, où on y fera référence.

2.1 Modèle de réseau

Dans cette première section, il est question de la représentation physique des réseaux d'eau potable aux fins de modélisation et de leur conceptualisation à l'aide de la théorie des graphes. C'est plus particulièrement aux chapitres 5, 6, 7 et 8 que ces notions seront utilisées, notamment lors de la présentation des éléments méthodologiques (ainsi qu'aux annexes 2 et 4).

2.1.1 Représentation à l'aide de la théorie des graphes

Conformément à la théorie générale des graphes (*Lacomme et al.,* 2003), un réseau de distribution d'eau potable peut être représenté à l'aide d'un graphe simple défini par $G = (V,E)$, soit deux ensembles où $V = (v_1, v_2, \ldots, v_N)$ représente l'ensemble des sommets (ou nœuds) et $E = (e_1, e_2, \ldots e_M)$, la famille (ensemble avec répétitions autorisées) de couples de sommets appelés arêtes (Figure 2.1). Par convention, les lettres N et M sont respectivement utilisées pour le nombre de nœuds et d'arêtes de G, d'où $|V| = N$ et $|E| = M$, avec N et $M \in \mathbb{N}$ (la notation $|Z|$ représente le nombre d'éléments de l'ensemble Z). Une arête est notée $e = [v_i, v_j]$. Le sens d'écoulement de l'eau constitue une caractéristique supplémentaire à considérer lors de l'application de la théorie des graphes à l'étude des réseaux de distribution d'eau potable. Une

direction peut être imposée aux arêtes de G, il s'agit alors d'un graphe orienté noté $G = (V,U)$, avec $U = (u_1, u_2, \ldots u_N)$, le nombre d'arcs (ou « arêtes orientées ») (Figure 2.2). Un graphe peut être valué (ou pondéré). Un coût (ou poids) est alors attribué à chacun des arcs et le graphe est noté $G = (V,U,C)$, avec l'application $C : U \rightarrow \mathbb{R}$. Par exemple, dans le contexte de la distribution d'eau, le coût des arcs peut être assimilé à la longueur des conduites (i.e. les arcs), à la vitesse d'écoulement de l'eau ou encore au temps de parcours de l'eau. Par exemple, pour le graphe de la figure 2.2 on pourrait avoir $C_{u1} = 1$; $C_{u2} = 4$; $C_{u3} = 2$; $C_{u4} = 5$; $C_{u5} = 3$; $C_{u6} = 6$.

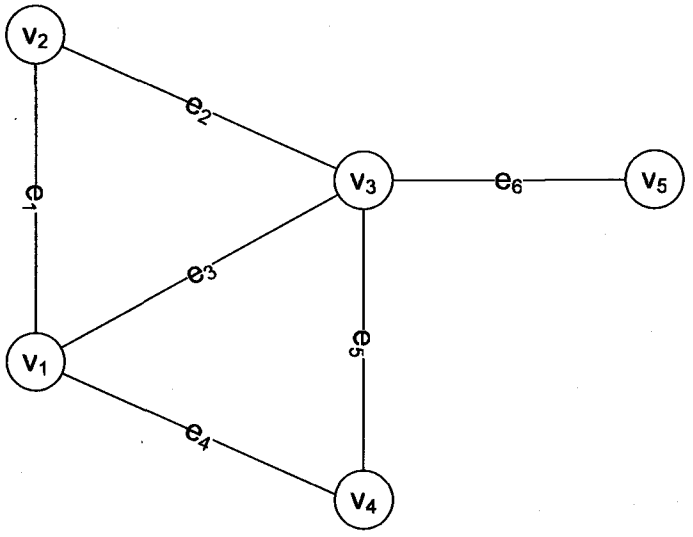


Figure 2.1 : Représentation d'un graphe simple

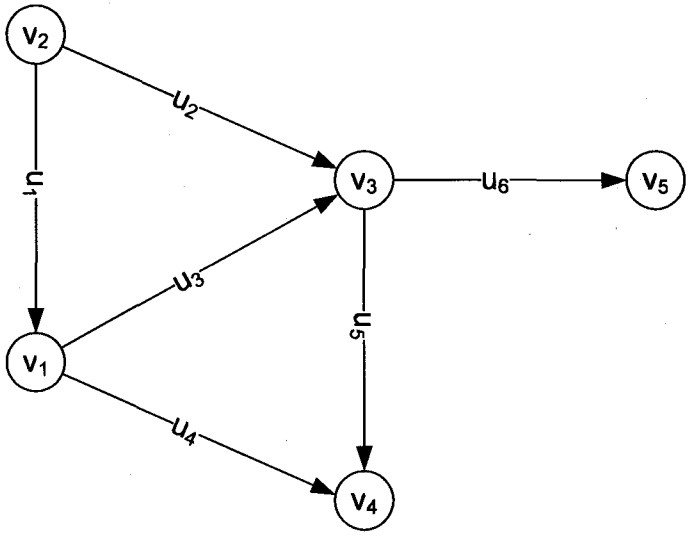


Figure 2.2 : Représentation d'un graphe orienté

2.1.2 Degré d'un nœud

Un arc u, noté $u = (v_i, v_j)$ possède deux extrémités : le nœud v_i est l'extrémité initiale et le nœud v_j, l'extrémité terminale. Le degré d'un nœud, noté $d_G(v) = |\omega(v)|$, correspond au nombre d'arcs incidents à ce nœud. Il comprend le semi-degré extérieur ($d^+_G = |\omega^+(v)|$) soit le nombre d'arcs incidents extérieurement à x, ainsi que le semi-degré intérieur, ($d^-_G = |\omega^-(v)|$) le nombre d'arcs incidents intérieurement à x. Par exemple, pour le nœud x_1 de la figure 2.2, on a $\omega(v_1) = \{u_1, u_3, u_4\}$, $d_G(v_1) = 3$, $d^+_G(v_1) = 2$ et $d^-_G(v_1) = 1$.

2.1.3 Adjacence, chemins et cycles

Deux arcs de G sont dits adjacents s'ils possèdent au moins une extrémité commune : par exemple, à la figure 2.2, u_1 et u_2 ou encore u_3 et u_6. Pour un arc (v_i, v_j), on dira que v_j est successeur de v_i. Pour un nœud donné, il est possible d'établir l'ensemble de ses successeurs, noté $\Gamma(v_i)$. Par exemple, à la figure 2.2, $\Gamma(v_1) = (v_3, v_4)$. C'est sur cette notation que repose une

représentation (ou façon de coder un graphe) appelée liste d'adjacence (ou liste de successeurs). À l'aide d'une telle liste, il est possible, notamment, d'identifier l'ensemble des nœuds accessibles à partir d'un nœud v_i donné. L'ensemble pourra être noté $R^V(i)$, par exemple (cette notion sera reprise au chapitre 5).

Un graphe peut aussi être codé à l'aide d'une matrice d'adjacence, notée A. Cette fois, c'est l'adjacence entre les nœuds qui est prise en compte. La matrice A est de taille $N \times N$ et les nœuds y sont représentés par des entiers $i, j = \{1, \ldots, N\}$. Dans le cas d'un graphe orienté non valué, les éléments A_{ij} prennent la valeur 1 s'il existe un arc entre les nœuds i et j ou 0 autrement. Un graphe simple (non orienté) est codé suivant le même principe, mais, dans ce cas, la matrice A est symétrique (signifiant que la circulation le long des arcs est possible dans les deux directions). Dans le cas d'un graphe orienté valué, chaque élément A_{ij} non nul représente un arc et prend la valeur du coût associé à cet arc (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Représentation matricielle (matrice d'adjacence A) du graphe orienté valué de la figure 2.2. Les valeurs en bleu indiquent le chemin le plus court entre les nœuds 2 et 3 (empruntant deux arcs, u_1 et u_3). La valeur en rouge indique un chemin plus long, en matière de coût, même s'il n'emprunte qu'un seul arc (u_2).

Indices *i, j*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0	0	*2*	5	0
2	*1*	0	*4*	0	0
3	0	0	0	3	6
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

Les représentations matricielles telles que celle du tableau 2.1 permettent d'établir l'ensemble des chemins existants au sein d'un graphe, par exemple le chemin (v_1, v_3, v_5) qui emprunte les

arcs u_3 et u_6 (empruntés l'un à la suite de l'autre, suivant le sens de chacun, figure 2.2). En particulier, en explorant les lignes et colonnes de la matrice, il est possible d'identifier les chemins les plus courts entre chaque paire de nœuds. Ainsi, à la figure 2.2, le chemin le plus court entre les nœuds x_2 et x_3 passe par les arcs u_1 et u_3 (voir les valeurs en italique bleu au tableau 2.1), et non par l'arc u_2 (valeur en italique rouge, tableau 2.1)[2]. La construction de listes d'adjacence et de matrices telles que celle du tableau 2.1 nécessitent que l'information établissant la connexité du graphe soit disponible (par exemple une matrice supplémentaire identifiant, pour chaque arc, les nœuds terminaux).

Enfin, notons qu'une chaîne est une séquence d'arêtes e_i ($i = 1, \ldots, q$), où chaque arête e_i possède une extrémité commune avec e_{i-1} (si $i > 1$) et une autre avec e_{i+1} (si $i < q$). Un cycle est une chaîne fermée (par exemple le cycle (v_2, v_1, v_3, v_2) à la figure 2.2, où le sens des arcs n'est pas pris en compte). Un graphe G est dit connexe s'il existe une chaîne entre toute paire de se nœuds (le graphe est donc constitué d'un seul bloc). Autrement, il est possible d'identifier des composantes ou sous-graphes connexes. Une telle situation pourrait être représentée par le cas d'un réseau alimenté par plus d'une source et divisé en secteurs d'approvisionnement distincts, associés à chaune des sources et isolés les uns des autres par la fermture permanente de vannes.

2.1.4 Éléments de réseaux et configuration

2.1.4.1 Modèles physiques de réseau

Utilisant la représentation suggérée à la section 2.1.1, les conduites et les vannes d'un réseau sont assimilées aux arcs, alors que les points de consommation (ponction d'eau), les bornes

[2] Comme nous le verrons au chapitre 5, une représentation matricielle distincte peut être générée pour les chemins les plus courts entre les paires de nœuds d'un graphe.

d'incendie et les réservoirs (stockage d'eau ou source de réseau) sont assimilés aux nœuds. Ces derniers représentent également les points de jonction entre des conduites adjacentes. Une intersection désigne tout nœud v où $d_G(v) \geq 3$. Les figures 2.3 à 2.5 donnent des exemples de représentations schématisées (ou modèles physiques) de réseaux.

Les réseaux de distribution d'eau potable sont conçus suivant deux types généraux de configuration, soit arborescente ou maillée (bouclée) (*Walski et al.,* 2003). Dans le premier cas (Figure 2.3), l'eau peut atteindre chaque nœud de réseau par un seul chemin d'écoulement possible, ce qui, on le comprend d'emblée, en réduit nettement la résilience. Dès qu'une conduite est hors d'usage, pour des raisons d'entretien ou de remplacement (par exemple la conduite en trait pointillé à la figure 2.3), tous les nœuds se trouvant en aval de celle-ci sont complètement privés d'eau.

Dans le cas des réseaux maillés, les conduites sont organisées sous forme de boucles, tel que le représentent les arêtes notées C1 à C4 à la figure 2.4. Ceci assure un certain niveau de redondance au réseau. En effet, dans ce type de configuration, il existe plus d'un chemin d'écoulement possible entre chaque paire de nœuds. Par exemple, à la figure 2.4, si la conduite C1 devait se trouver hors d'usage, l'alimentation en eau à tous les autres nœuds serait malgré tout assurée.

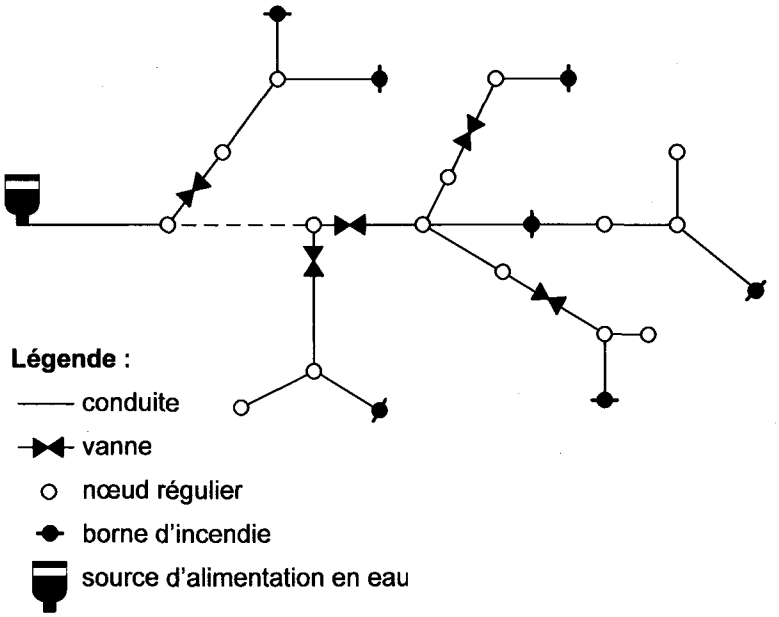


Figure 2.3 : Représentation schématisée d'un réseau arborescent.

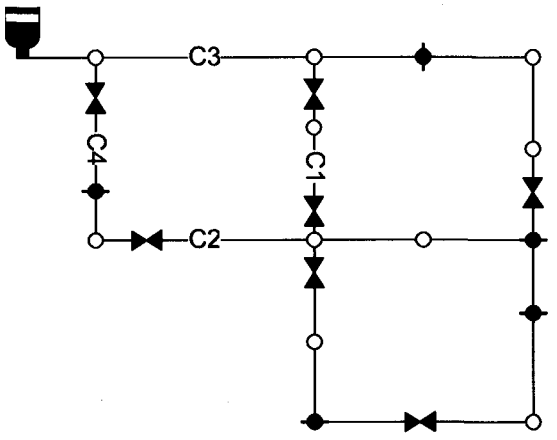


Figure 2.4 : Représentation schématisée d'un réseau maillé.

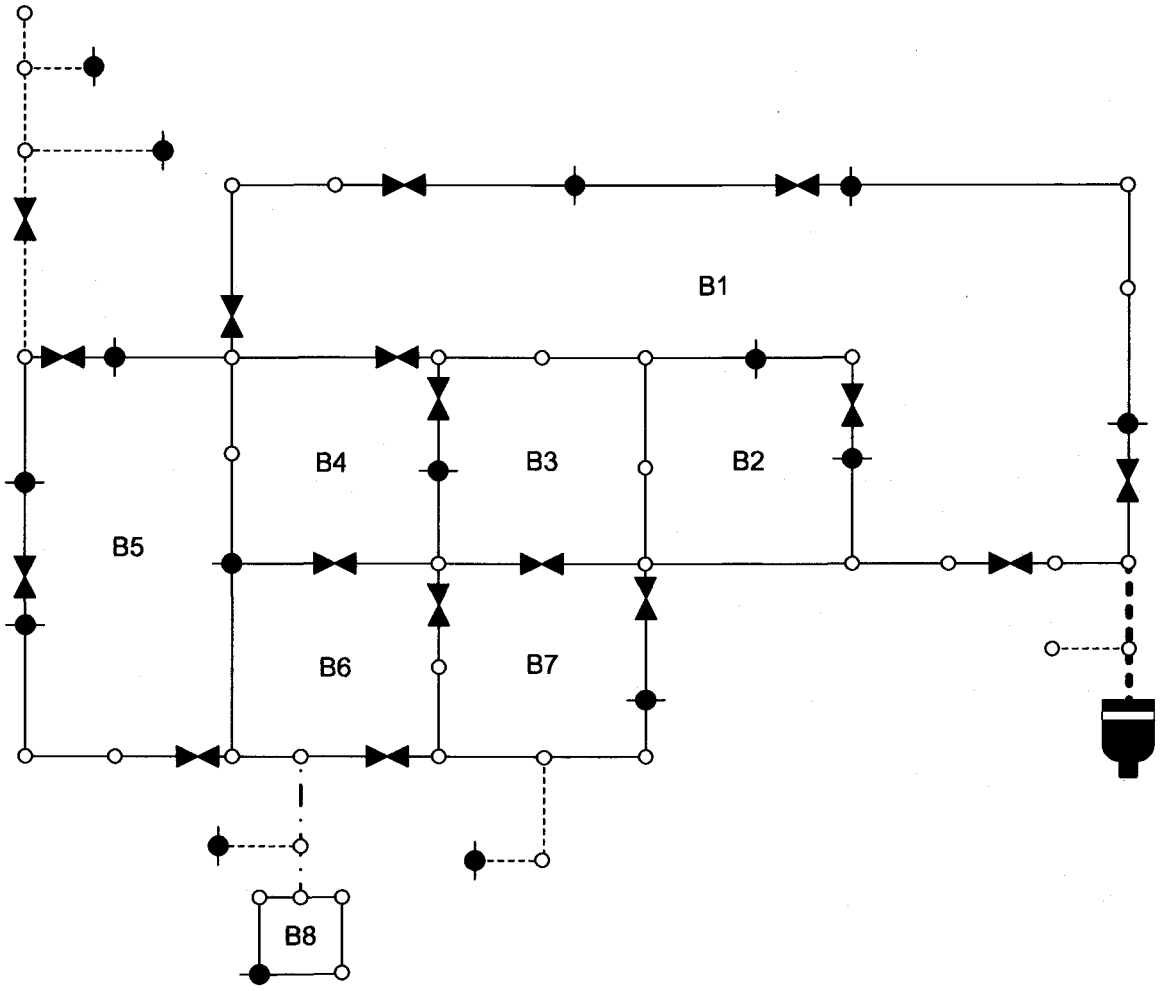


Figure 2.5 : Représentation schématisée d'un réseau d'apparence plus réelle. Les traits pointillés fins représentent les BM réels du réseau. En référence à la section 2.1.4.3, la notation B*x* identifie les boucles naturelles, le trait pointillé gras désigne un BM-source et le trait point-ligne, un tronçon linéaire menant à une boucle en retrait.

Le plus souvent, les réseaux réels combinent ces deux types de configuration, recherchant une espèce de compromis entre la redondance (boucles) et les économies monétaires (bouts morts arborescents ou simplement linéaires, ci-après désignés par l'acronyme BM; voir les traits pointillés fins à la figure 2.5) (*Walski et al.,* 2003). Idéalement, les réseaux ne contiendront que quelques BM puisque ces sections sont généralement associées à des problèmes de qualité de l'eau en raison de temps de séjour parfois élevés : concentrations résiduelles de désinfectant particulièrement faibles – voire nulles, formation de sous-produits de désinfection, croissance

microbienne, augmentation de la turbidité, plaintes quant aux goûts et odeurs, etc. (*Hanson et al.,* 2007*; Friedman et al.,* 2005).

2.1.4.2 Niveau de détail

Le schéma de la figure 2.5 donne un aperçu relativement détaillé du réseau qu'il représente, notamment parce qu'il inclut toutes les bornes d'incendie et les vannes existantes. Conséquemment, chaque conduite de réseau y est également représentée. Il s'agit donc, d'après la terminologie couramment utilisée, d'un « all-pipes model » (*Walski et al.,* 2003). Dans une telle représentation, bien que toute conduite servant au transport et à la distribution de l'eau soit incluse, chaque entrée de service (et donc chaque point de consommation d'eau individuel) n'est généralement pas représentée. Les nœuds sont surtout utiles à la localisation des bornes d'incendie et des intersections de conduites (tel qu'il est mentionné à la section 2.1.4.1) ainsi qu'à la séparation des conduites en tronçons dont les caractéristiques physiques peuvent être différentes (présence ou non d'une vanne, année d'installation, matériau constitutif, diamètre interne, coefficient de frottement interne). Connaissant la production d'eau à la source du réseau, ou encore à partir de volumes comptabilisés par des compteurs, les consommations sont généralement agrégées par sous-secteur de réseau. Une valeur est ensuite associée à un nœud central dans chaque sous-secteur (*Walski et al.,* 2003).

Les représentations physiques de réseaux, telles que celle de la figure 2.5, on l'aura compris, sont utiles dans un contexte où l'on s'intéresse non seulement à la simulation des écoulements, mais également à la gestion du patrimoine ainsi qu'à des activités opérationnelles spécifiques. En contrepartie, lorsque le seul intérêt est porté sur la simulation du comportement hydraulique global de réseaux de distribution, alors des modèles simplifiés peuvent être développés, lesquels

n'incluront que les principales conduites des réseaux. Afin de simplifier davantage ces modèles, certaines approches existent visant à regrouper des conduites adjacentes et à les remplacer par une seule conduite de comportement hydraulique équivalent. Ce processus de transformation est appelé « skeletonization » (*Walski et al.,* 2003) ou squelettisation en français.

2.1.4.3 Séparation des éléments d'un réseau

Les travaux présentés dans cette thèse nécessitent que les réseaux, ou encore des secteurs de réseaux, soient subdivisés en sous-groupes d'éléments spécifiques, à savoir (1) les boucles naturelles; (2) les BM; et (3) les tronçons linéaires menant à des boucles qu'on dira *en retrait* (Figure 2.5). Cette section présente diverses considérations quant à ces sous-groupes d'éléments et à la manière de les décrire au moyen de la théorie des graphes[3].

Selon *Wood et Rayes* (1981), une boucle naturelle réfère à tout cycle d'un réseau qui ne renferme aucun autre cycle (voir les boucles notées B1 à B8 à la figure 2.5). D'un point de vue tout à fait pratique, ces boucles peuvent être facilement identifiées par inspection visuelle et sont formées des conduites attenantes à un cycle (*Rahal,* 1995). Le nombre de boucles naturelles d'un réseau de distribution est donné par $\ell = p - n + cc$, où $p = M$ (le nombre de conduites du réseau, excluant les vannes fermées en permanence), $n = N$ (le nombre de nœuds) et cc est le nombre de composantes connexes[4]. L'ensemble des boucles naturelles d'un réseau est noté $\{C\}$, et on notera $\{S\}$, un sous-ensemble particulier de boucles naturelles, par exemple celles qui sont

[3] L'intérêt, dans cette sous-section, est d'introduire les éléments utiles aux présents travaux, sans décrire, de façon exhaustive, le traitement des réseaux de distribution du point de vue de la théorie des graphes. Plusieurs études ont abordé cette question et *Rahal* (1995) en font une bonne revue. Dans le cadre de travaux plus récents, *Kumar et al.* (2008) traitent également de ces considérations.

[4] Pour les réseaux d'étude considérés dans le cadre de cette thèse, $cc = 1$ (chapitre 4).

touchées par une contamination (chapitre 6). Ainsi, on aura $|\{C\}| = \ell$ et $\{S\} \subseteq \{C\}$[5]. Tel que le montre la figure 2.5, chacune des conduites d'une boucle naturelle (en trait continu) peut appartenir, au plus, à deux boucles à la fois.

Epp et Fowler (1970) ont développé un algorithme simple permettant d'identifier les boucles naturelles d'un réseau. L'application de cet algorithme permet également d'isoler les BM (terminés par des nœuds dont le degré $d_G(v) = 1$) ainsi que les tronçons linéaires menant à des boucles en retrait[6]. Deux types particuliers de BM ont été identifiés dans cette thèse. Le premier consiste en ce qu'on appellera un BM-source, dont l'extrémité terminale (nœud de degré $d_G(v) = 1$) est une source d'alimentation en eau ou *nœud-source* (trait pointillé en gras à la figure 2.5). Le second type est créé par la fermeture permanente d'une vanne sur une boucle, par exemple afin de délimiter des zones de pression (élévations différentes) au sein d'un réseau.

2.2 *Modélisation des écoulements en réseaux d'eau potable*

Dans cette section sont présentés les principes de base sous-jacents à la modélisation hydraulique et de la qualité de l'eau en réseau. Ce bref exposé se veut un rappel de certaines notions auxquelles il sera fait référence dans la revue de littérature, soit au chapitre 3, et à quelques reprises aux chapitres 5 à 8.

[5] En fait, pour un réseau donné, il existe divers ensembles de boucles (ou de cycles) dont chaque élément est unique. Par exemple, à la figure 2.2, on pourrait avoir $\{C1\} = \{(v_1, v_2, v_3, v_1), (v_1, v_3, v_4, v_1)\}$ et $\{C2\} = \{(v_1, v_2, v_3, v_1), (v_1, v_2, v_3, v_4, v_1)\}$. Mais peu importe l'ensemble qui est considéré, le nombre d'éléments qu'il contient est constant (i.e. ℓ = constante).

[6] Cet algorithme est introduit, à ce stade, à titre informatif. Bien qu'il n'ait pas été appliqué à des configurations aussi étendues et élaborées que celles des réseaux d'étude présentés dans cette thèse, il présente un potentiel d'application intéressant. Tel qu'il sera mentionné aux chapitres 6 et 7, la méthode privilégiée dans le cadre de cette thèse repose sur une identification visuelle. Notons enfin qu'il existe des méthodes d'identification des cycles autres que celle de *Epp et Fowler* (1970), à partir, entre autres, d'une liste de successeurs ou encore d'un arbre recouvrant et de son coarbre (voir par exemple *Lacomme et al.*, 2003 ainsi que *Rahal*, 1995).

2.2.1 Simulation hydraulique

L'eau dans les conduites de distribution possède de l'énergie (ou charge en termes hydrauliques) sous trois formes différentes, soit (1) la charge de pression, fournie par les pompes et têtes d'eau supplémentaires, (2) la charge d'élévation (ou énergie potentielle) et (3) la charge de vitesse (ou énergie cinétique). À chaque point (ou nœud) de réseau est associée une valeur unique de charge. Suivant la sollicitation imposée par les consommateurs, l'eau s'écoule dans les conduites. Lors de son cheminement, elle subit des pertes d'énergie induites par la friction aux parois internes des conduites et par la turbulence générée aux changements de diamètre ou encore dans les accessoires de réseau.

La réalisation de simulations hydrauliques permet de déterminer les débits dans les conduites ainsi que les pressions (ou charges) aux nœuds, sous divers patrons de consommation et d'alimentation (*Bouchart et Davidson,* 2004). Une telle modélisation est gouvernée par les principes généraux de conservation de la masse et de l'énergie. Selon le principe de conservation de la masse, en tout temps la somme des débits arrivant à un nœud doit être égale à la somme des débits qui quittent ce dernier :

$$\sum_{i=1}^{M} Q_i + U = 0 \qquad (2.1)$$

où Q_i est le débit arrivant au nœud ou quittant le nœud par la conduite i [L^3 T^{-1}], U est le volume d'eau consommé ou introduit au nœud par unité de temps [L^3 T^{-1}], M est le nombre de conduites rattachées au nœud. Généralement, les débits entrants sont considérés positifs et les débits sortants, négatifs.

Le principe de conservation de l'énergie, pour sa part, énonce que la différence d'énergie entre deux points d'un réseau doit être la même, peu importe le chemin emprunté par l'eau entre ces points. Par souci de commodité dans un contexte d'analyse hydraulique en réseau, l'équation est écrite en fonction de charges de pression, d'élévation et de vitesse[7] :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_P = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_L + \sum h_m \qquad (2.2)$$

où Z est l'élévation [L], P est la pression [M L^{-1} T^{-2}], γ est la masse spécifique du fluide (en l'occurrence l'eau) [M L^{-2} T^{-2}], V est la vitesse d,écoulement [L T^{-1}], g est la constante d,accélération gravitationnelle [L T^{-2}], h_P est la charge ajoutée par les pompes [L], h_L est la perte de charge par frottement dans les conduites (ou perte linéaire) [L] et h_m est la perte de charge engendrée par le passage de l'eau dans les différents raccords et accessoires [L] (ou perte singulière; ce type de perte de charge est généralement ignorée, étant souvent négligeable par rapport aux pertes linéaires). Les indices 1 et 2 désignent deux nœuds de réseau. Pour le calcul des pertes de charge linéaires, l'équation d'Hazen-Williams est la plus couramment utilisée en Amérique du Nord :

$$h_L = \frac{10{,}7\, L}{C^{1{,}852}\, D^{4{,}87}}\, Q^{1{,}852}. \qquad (2.3)$$

Une équation semblable est générée pour chaque conduite (lien entre deux nœuds adjacents), et dépend de la longueur L de la conduite [m], de son diamètre D [m], du coefficient de frottement d'Hazen-Williams C et du débit Q [m^3 s^{-1}] dans la conduite.

À partir des équations 2.1 à 2.3, un système d'équations est construit et résolu au moyen de méthodes numériques. Les données d'entrée nécessaires à la résolution sont les suivantes :

[7] À noter que la charge de vitesse est généralement ignorée dans la plupart des applications d'analyse de réseaux de distribution, étant négligeable par rapport aux charges d'élévation et de pression.

caractéristiques physiques des conduites, représentation conceptuelle du réseau, valeurs de consommation, données relatives aux sources d'eau, réservoirs et pompes (*Walski et al.,* 2003).

Les simulations hydrauliques peuvent être effectuées sous des régimes permanent ou dynamique. Dans le premier cas, on suppose que les consommations aux nœuds ainsi que les conditions opérationnelles (niveaux d'eau dans les réservoirs, vitesse d'opération des pompes) sont constantes. Ce genre de simulation donne un aperçu du comportement d'un réseau lorsqu'il a atteint l'équilibre hydraulique. Dans le second cas, les consommations aux nœuds et les conditions opérationnelles peuvent varier avec le temps. Il s'agit d'une séquence de simulations stationnaires sur de courtes périodes (p. ex. variant de 5 minutes à 1 heure), lesquelles subdivisent la période de simulation totale en intervalles égaux appelés pas de temps hydrauliques (simulations de longue durée ou EPS – *Extended Period Simulations*)[8]. Les consommations aux nœuds sont spécifiées pour chaque pas de temps. Les conditions finales de chaque sous-simulation deviennent les conditions initiales au pas de temps suivant. Les simulations EPS permettent de modéliser le remplissage et la vidange des réservoirs ainsi que la variation des débits et pressions en réseau sous des stratégies de contrôle définies (*Walski et al.,* 2003; *Clark et al.,* 2004).

2.2.2 Simulation de la qualité de l'eau (transport de substances en réseau)

La modélisation de la qualité de l'eau en réseau est une extension logique à la modélisation hydraulique des réseaux d'eau potable (*Walski et al.,* 2003). Les modèles de qualité de l'eau permettent de prédire les variations de concentrations de substances présentes dans l'eau et leur propagation sous des conditions hydrauliques connues, suivant un patron déterminé d'injection.

[8] En réalité, les simulations de longue durée sont plutôt pseudo-dynamiques, mais par abus de langage, on les désigne par le terme dynamique.

La majorité des modèles de qualité de l'eau existants simule les processus d'advection unidimensionnelle et de réactions locales le long des canalisations d'eau potable avec conditions initiales / aux frontières appropriées (nœuds et réservoirs de stockage). L'équation générale de transport d'une substance est basée sur le principe de conservation de la masse (*Walski et al.*, 2003) :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{Q_i}{A_i}\frac{\partial C_i}{\partial x} \pm R(C_i) , \qquad i = 1,...,M \tag{2.4}$$

où C_i est la concentration dans la conduite i [M L^{-3}], Q_i est le débit dans la conduite i [L^3 T^{-1}], A_i est la surface de la section de la conduite i [L^2], $R(C_i)$ est le terme de réaction [M L^{-3} T^{-1}] et M est le nombre de conduites.

L'équation 2.4 est fonction de la vitesse moyenne d'écoulement dans les conduites. En ce qui concerne le terme de réaction de cette équation, celui-ci peut être nul lorsque la substance impliquée est conservative, ou non nul dans le cas contraire. Trois processus chimiques sont généralement modélisés, à savoir les réactions avec le fluide en écoulement, les réactions se produisant à la surface interne des parois des canalisations et les réactions qui impliquent un réactif limitant. L'ensemble de ces réactions est fonction de la concentration des substances dans l'eau et décrit la croissance (terme de réaction positif) ou la dégradation de ces dernières (terme de réaction négatif), suivant des cinétiques d'ordres 0, 1 ou 2 (*Walski et al.*, 2003). Mentionnons qu'un modèle récemment développé permet également la simulation d'interactions entre diverses substances chimiques et biologiques dans l'eau, par exemple le chlore et les microorganismes (*Uber et al.*, 2007).

Les conditions aux frontières sont données par des bilans de masse calculés aux nœuds, qui constituent des points de mélange et/ou de dilution. Les réservoirs de stockage sont représentés par des nœuds où le débit peut varier avec le temps (remplissage ou vidange). Lors du remplissage des réservoirs, le bilan tient également compte des réactions de dégradation ou de croissance des substances non conservatives au sein de ces réservoirs. Ce type de modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau en réseau implique les hypothèses de base suivantes :

- la dispersion longitudinale des substances dans l'eau est négligée;
- les substances sont complètement mélangées à l'eau, dans les canalisations et aux points d'entrée en réseau (cette hypothèse étant valide en conditions d'écoulement turbulent[9]);
- le mélange est complet et instantané aux nœuds (turbulence aux nœuds);
- le mélange est complet et instantané dans les réservoirs.

Jusqu'à maintenant, de nombreux algorithmes basés sur ces principes ont été élaborés afin de modéliser le transport et le devenir de diverses substances au sein des réseaux d'eau potable (*Clark et Buchberger,* 2004*; Walski et al.,* 2003*; Rossman et Boulos,* 1996). La modélisation repose sur la réalisation de simulations hydrauliques, le plus souvent EPS, lesquelles permettent de déterminer la direction et la vitesse d'écoulement dans chaque conduite d'un réseau au cours de chaque pas de temps hydraulique pour une période de simulation déterminée. Le transport des composés dans l'eau et les réactions de croissance/dégradation sont ensuite simulés sur des intervalles de temps plus courts, appelés pas de temps de simulation de la qualité de l'eau. Les conditions qui prévalent à la fin de chaque pas de temps sont introduites comme conditions initiales au pas de temps suivant (*Rossman et Boulos,* 1996). D'autres approches, qui considèrent

[9] La majorité des outils de simulation hydraulique et de qualité de l'eau en réseaux d'eau potable sont basés sur une hypothèse d'écoulement turbulent. Celle-ci demeure valide pour la majeure partie des réseaux, sauf dans certaines conduites où les consommations sont faibles et intermittentes, et donc où l'écoulement sera plutôt laminaire.

des conditions hydrauliques stationnaires, utilisent la loi de conservation de la masse afin de déterminer la concentration ultime de substances lorsque le système atteint l'équilibre hydraulique. Dans ce dernier cas, toute dépendance temporelle dans le processus de transport est ignorée.

CHAPITRE 3 – Revue de littérature

La détection précoce des contaminations se produisant en réseaux d'eau potable, ainsi que la gestion des interventions de réponse, posent de nombreux défis, tant d'un point de vue opérationnel qu'en ce qui concerne les aspects techniques (modélisation, développement d'outils informatisés et de nouvelles technologies). Le présent chapitre se consacre à la revue des ouvrages les plus pertinents ayant abordé ces questions.

3.1 Réponse aux incidents de contamination : aspects opérationnels

À la figure 1.2 (section 1.3) a été introduit le processus global de réponse aux incidents de contamination que suggère l'agence environnementale américaine (*USEPA,* 2006*; USEPA,* 2003b). Le tableau 3.1 reprend et décrit, de façon spécifique et d'un point de vue opérationnel, les éléments de la figure 1.2 qui sont d'intérêt dans le cadre de cette thèse, soit la détection d'une contamination potentielle, la réponse opérationnelle immédiate et les actions correctives visant à assurer le retour à l'opération normale.

L'étape A du tableau 3.1 constitue l'élément déclencheur. Suite à une première indication de contamination, un état d'alerte est déclaré et l'ensemble du processus de réponse et de retour à l'opération normale est mis en branle. Dans le cadre d'un CWS (*contamination warning system*), comme il a été mentionné à la section 1.3, différents types d'information peuvent alimenter une première alerte. Idéalement, et tel qu'il est envisagé dans cette thèse, il s'agira du déclenchement d'un détecteur appartenant à un système de monitoring en temps réel. En cette matière, la section 3.2.1 abordera les aspects technologiques plus en détail. Notons tout de même, à ce stade, que bien qu'ils soient prometteurs, les technologies et outils existants ou en cours de développement

devront faire l'objet de recherche et/ou validation supplémentaires. À terme, il est envisagé que des systèmes permettant la détection de contaminants de façon fiable et rapide seront disponibles (*USEPA,* 2005a). Pour le moment, il s'agit de l'élément « science-fiction » sur lequel s'appuie la vaste majorité des travaux de recherche appliquée tels que ceux-ci.

Tableau 3.1 : Description des stades majeurs d'intervention lors de l'occurrence d'une contamination en réseau (*USEPA,* 2004b*; USEPA,* 2006).

Étape	**Temps (heures)**	**Information sur la contamination**	**Événements / Actions / Interventions en réseau**
A. Détection d'une contamination potentielle	0	Première alerte	Événement permettant de soupçonner la présence de contamination en réseau (ex. : déclenchement d'un détecteur, révélations d'un témoin oculaire, plaintes d'usagers, etc.)
B. Réponse opérationnelle immédiate	2-8	Contamination vraisemblable	- Délimitation d'un secteur d'intervention - Isolement du secteur ou augmentation des concentrations de désinfectant - Identification des usagers possiblement affectés
C. Actions correctives spécifiques / Retour à l'opération normale	> 24	Contamination confirmée, contaminant identifié, source de contamination identifiée et éliminée	*1. Émission d'avis sur la consommation aux usagers concernés* (ébullition, non-utilisation, non-consommation de l'eau) *2. Actions correctives variant selon le type de contaminant* <u>i. Non adhérent aux parois internes de conduites</u> rinçage des conduites, combinaison de rinçage et désinfection <u>ii. Adhérent aux parois internes de conduites</u> (tubercules, biofilm, corrosion) COURT TERME : nettoyage mécanique des conduites (voir p. ex. *Ellison et al.,* 2003), rinçage et agent nettoyant; LONG TERME : chemisage des conduites, remplacement *3. Monitoring et opérations requises visant à assurer l'élimination du contaminant*

Entre les étapes A et B du tableau 3.1, soit 2 à 8 heures suivant une première détection de contaminants[10], des informations supplémentaires doivent être recueillies afin de confirmer qu'il y a contamination et afin d'éviter toute fausse alerte basée sur de l'information encore limitée (*USEPA,* 2006). Les informations peuvent provenir d'échantillonnage en réseau effectué par le personnel de réponse ou encore d'autres détecteurs déclenchés au passage du contaminant, alors qu'il continue de se propager durant cet intervalle de temps. C'est également au cours de cette période que se préparent, en parallèle, les premières opérations de réponse visant à protéger la santé publique. Il peut s'agir d'augmenter les concentrations de désinfectant en réseau (dont le pouvoir d'action risque d'être limité) ou, idéalement, de procéder à l'isolement de la contamination. À cette fin, un secteur d'intervention doit être délimité, ce qui permet, par le fait même, d'identifier les usagers potentiellement affectés auxquels des avis sur la consommation devront être émis. En pratique, l'isolement du secteur contaminé sera réalisé par la fermeture des vannes appropriées (voir la section 3.1.1 pour plus d'information).

Au terme du premier délai de réponse, si effectivement la vraisemblance d'une contamination se précise, les opérations d'isolement seront mises de l'avant (étape B du tableau 3.1). Bien entendu, plus la durée de cette période est courte, plus les torts et dommages encourus seront limités. La réponse opérationnelle immédiate vise justement à délimiter rapidement le secteur affecté par une contamination en empêchant toute propagation ultérieure. Une fois ces premières opérations complétées, le service d'eau potable et le personnel de réponse pourront entreprendre des activités d'investigation plus poussées dans le but de confirmer l'occurrence de contamination, d'en identifier la source et la nature et d'éliminer la source de contaminant

[10] D'après *USEPA* (2006), ce délai de 2-8 heures constitue une règle de base générale. Il s'agit du temps nécessaire à la cueillette et le regroulement d'informations permettant de croire qu'un incident de contamination est vraisemblable (informations recueillies sur le site de contamination, circonstances de l'incident, etc.).

(*USEPA,* 2006). Ces activités pourront impliquer des délais relativement importants, durant lesquels il serait inconcevable de laisser un contaminant se propager en « toute liberté ».

L'étape C du tableau 3.1 concerne la mise en œuvre d'actions correctives, dans l'éventualité où l'occurrence d'une contamination est bel et bien confirmée. Ces actions visent à éliminer le contaminant et à assurer le retour à l'opération normale (*USEPA,* 2006). C'est à ce stade, également, que des avis définitifs sur la consommation d'eau sont émis à la population concernée, se trouvant au sein du secteur d'intervention précédemment délimité et isolé.

Comme l'indique le tableau 3.1, divers types d'actions correctives peuvent être entrepris selon la nature du contaminant en cause. Une caractéristique particulièrement déterminante à cet égard est à savoir si le contaminant adhère ou non aux conduites de distribution d'eau potable. Les sections 3.1.3 et 3.1.2 proposent des informations spécifiques aux opérations suggérées pour chacune de ces situations.

Avant le retour définitif à l'opération normale, des opérations additionnelles et plus localisées, visant notamment les plomberies des usagers (*Nathalie Periche* juin 2007, communication personnelle), devront être entreprises. Une fois l'ensemble des opérations complété, des activités supplémentaires de monitoring devront être menées au sein du secteur d'intervention afin de confirmer l'élimination complète du contaminant (p. ex. manuellement ou même par le biais de détecteurs) (*USEPA,* 2006).

3.1.1 Isolement de sous-secteurs de réseau

En guise de première réponse opérationnelle à la détection de contaminations (étape B du tableau 3.1), il a été question précédemment de l'isolement de sous-secteurs de réseau au moyen

de la fermeture de vannes. S'appuyant sur la littérature récente portant sur ce sujet, la présente section apporte un complément d'information.

Suivant les règles de l'art en matière de conception des réseaux de distribution, la majorité des vannes d'isolement devrait être localisée à proximité des intersections de conduites (ou nœuds de degré ≥ 3). Deux règles de base prévalent généralement : la première recommande l'installation de vannes sur n-1 conduites (n étant le degré du nœud), tandis que la seconde indique que chacune des n conduites devrait être munie d'une vanne (*Walski et al.,* 2006).

En ce qui a trait à la première des deux règles de conception, une question se pose, à savoir lesquelles, parmi les n-1 conduites d'une intersection, devraient effectivement être munies de vannes. *Ozger et Mays* (2004) ont proposé une approche pour la localisation optimale de n-1 vannes, en toute intersection, de façon à minimiser l'impact sur les consommations en réseau lorsque le bris de chacune des conduites est alternativement considéré (suivant une distribution de probabilités). L'approche relève de l'analyse de fiabilité[11]. Les auteurs mentionnent également la complexité du problème relativement au nombre de permutations à considérer. Ils suggèrent le recours à des méthodes de résolution heuristiques[12] telles que le recuit simulé (*Kirkpatrick et al.,* 1983) ou les algorithmes génétiques (p. ex. voir *Deb et al.,* 2000). En ce qui concerne la seconde règle de conception, la question de la localisation optimale des vannes ne se

[11] Ce sujet spécifique a fait l'objet de nombreuses études dont la revue n'est pas jugée pertinente dans le cadre de la présente thèse.

[12] Méthode de recherche empirique, fondée sur l'approche progressive d'un problème donné, en vue d'en trouver la solution. Appliquée à la résolution d'un problème complexe, une méthode heuristique ne garantit pas l'obtention d'une solution optimale, mais fournit, dans un laps de temps raisonnable et à un coût acceptable, à l'aide de l'expérience ou de l'intuition, une solution qui, en général, est assez efficace (http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 25 février 2008).

pose évidemment pas. L'application de cette règle, en pratique, favorise l'isolement de sous-secteurs de réseau. En contrepartie, les coûts de conception augmentent.

Jun et Loganathan (2007) ont abordé plus spécifiquement la question de l'isolement de sous-secteurs de réseau, mais toujours dans le contexte des bris de conduites. Ils ont développé des algorithmes basés sur la théorie des graphes permettant d'identifier : (1) les « segments » d'un réseau, formés de chacune des plus petites portions de réseau devant être isolées par la fermeture de vannes suite à l'occurrence d'un bris de conduite (et contenant ladite conduite); (2) les secteurs de réseau qui sont complètement privés d'eau lorsqu'un segment doit être isolé.

Dans le cadre de travaux complémentaires, *Jun et al.* (2007) ont développé trois méthodes permettant d'estimer l'impact du mauvais fonctionnement des vannes d'isolement lorsque survient un bris de conduite. En pratique, la probabilité du fonctionnement adéquat de toutes les vannes d'un réseau n'est pas systématiquement égale à 1. Certaines vannes peuvent s'avérer difficiles, voire impossibles à manipuler en raison d'un manque d'entretien, ou encore n'être pas parfaitement étanches. Lorsque des vannes ne peuvent être fermées correctement, nécessairement, l'étendue des sous-secteurs à isoler tend à s'agrandir. Dans une telle situation, la taille des segments (voir la définition donnée au paragraphe précédent) augmente puisque les segments d'origine qui sont adjacents doivent alors être joints. Il s'ensuit également une augmentation du nombre d'usagers affectés.

À ce jour, aucune étude n'a abordé de façon spécifique l'isolement de sous-secteurs de réseau suite à l'occurrence de contaminations. De tels secteurs sont constitués de nombreuses conduites adjacentes et leurs étendue/configuration dépendent, à première vue : (1) du point d'introduction

du contaminant, (2) des conditions d'écoulement en réseau, (3) des délais d'opération et (4) de la configuration du réseau de distribution. Il est concevable de penser que ces secteurs incluront des boucles complètes de réseau, des portions de boucles adjacentes à celles-ci et des BM.

3.1.2 Rinçage des conduites d'eau potable

D'après *Friedman et al.* (2002) et *Antoun et al.* (1999), le rinçage des canalisations d'eau potable compte parmi les meilleures pratiques de gestion et d'entretien pour le contrôle et le maintien de la qualité de l'eau en réseau. Il s'agit de l'une des techniques de nettoyage les plus anciennes et les moins coûteuses (*Ellison et al.,* 2003), pratiquée dans la plupart des réseaux d'eau potable (pour ne pas dire tous). Plus spécifiquement, le rinçage contribue à l'enlèvement de silt et/ou sédiments accumulés à l'intérieur des conduites, à l'évacuation d'eau contaminée, à l'élimination des goûts et odeurs de l'eau, à la réduction de la turbidité (particules en suspension) et de la couleur de l'eau, à la restauration des résiduels de désinfectant et, dans certains cas, au contrôle de la croissance des micro-organismes en réseau (*Friedman et al.,* 2005*; Friedman et al.,* 2002*; Hasit et al.,* 2004).

Le rinçage des canalisations d'eau potable peut être utilisé localement, en tant que mesure corrective dans des secteurs isolés de réseaux connaissant des problèmes ponctuels de qualité de l'eau, ou encore dans des secteurs connaissant des problèmes chroniques engendrant des plaintes répétées des usagers. Dans de telles situations, le principal objectif visé par le rinçage est le remplacement de l'eau souillée par de l'eau propre. Le rinçage peut également être effectué périodiquement, à grande échelle (plusieurs secteurs ou totalité des réseaux), en tant que mesure préventive en vue d'éviter les problèmes de qualité de l'eau avant qu'ils ne surviennent. Dans ce cas, les exploitants de réseaux d'eau potable mettent sur pied un plan de rinçage exécuté suivant

une certaine fréquence, lequel est sujet à des modifications ou améliorations d'une exécution à l'autre. Enfin, pour certains réseaux, les pratiques de rinçage se trouvent à mi-chemin entre les deux façons de faire ci-haut mentionnées (*Hasit et al.,* 2004*; Friedman et al.,* 2002*; Antoun et al.,* 1999*; Antoun et al.,* 1997).

Il semble donc tout à fait approprié d'inclure le rinçage parmi les mesures correctives à mettre en place suite à l'occurrence de contaminations en réseaux d'eau potable (étape C du tableau 3.1). Trois techniques de rinçage sont généralement utilisées, à savoir le rinçage traditionnel, la purge continue et le rinçage unidirectionnel (RUD). Les sous-sections qui suivent présentent une brève description des trois approches de rinçage ainsi que les principaux avantages du RUD par rapport au rinçage traditionnel et à la purge continue. Par la suite, une description de la mise en œuvre et des paramètres opérationnels du RUD est donnée.

3.1.2.1 Rinçage traditionnel

Le rinçage traditionnel consiste en l'ouverture des bornes d'incendie d'un secteur de réseau durant 15 à 20 minutes, ou jusqu'à ce que l'eau qui s'en écoule atteigne un critère de qualité prédéterminé, comme, par exemple, la réduction de la turbidité à un niveau spécifié, la détection d'un résiduel de désinfectant, ou encore la réduction ou l'élimination de la couleur de l'eau. L'ouverture des bornes (à pression atmosphérique) crée une demande importante en eau, ce qui engendre une augmentation de la vitesse d'écoulement dans les conduites visées. Ceci favorise l'évacuation des dépôts tout en permettant l'évacuation des eaux contaminées ou de qualité esthétique douteuse. Les activités de rinçage doivent progresser depuis les secteurs attenants aux sources d'eau d'un réseau vers ses extrémités (*Friedman et al.,* 2003*; Friedman et al.,* 2002*; Antoun et al.,* 1997*; Oberoi,* 1994).

3.1.2.2 Purge continue

Cette technique de rinçage s'applique aux bouts morts des réseaux d'eau potable où la consommation est faible et les temps de séjour de l'eau sont élevés. Elle vise surtout à en évacuer les eaux stagnantes par l'ouverture de vannes de décharge (*blowoff valves*). Les vitesses d'écoulement atteintes sont faibles et ne sont pas appropriées à l'enlèvement des dépôts dans les conduites. Toutefois, ce type de rinçage permet le maintien de résiduels de désinfectant acceptables (*Friedman et al.,* 2002) et il est aussi utilisé pour éviter le gel des conduites (p. ex. dans les petites localités de la Côte-Nord, au Québec).

3.1.2.3 Rinçage unidirectionnel

Le RUD a connu un essor important au cours des années 1990 (*Antoun et al.,* 1999). Il s'agit, par la fermeture des vannes appropriées, d'isoler un à un des tronçons de réseau à rincer afin de créer des conditions d'écoulement unidirectionnel propices. L'eau est évacuée à partir d'une ou de quelques bornes d'incendie situées le long des tronçons isolés. La manipulation des bornes et vannes est effectuée de façon séquentielle et organisée, jusqu'à ce qu'un secteur de réseau déterminé ou le réseau complet ait été rincé. La mise en œuvre du RUD permet d'éviter que l'eau de tronçons non rincés transite par des tronçons nettoyés (*Hasit et al.,* 2004; *Friedman et al.,* 2002; *Antoun et al.,* 1999; *Oberoi,* 1994). Les tronçons isolés lors du RUD sont également appelés routes ou séquences de rinçage.

Les principaux avantages du RUD par rapport au rinçage traditionnel et à la purge continue des bouts morts sont les suivants (*Vreeburg,* 2007; *Ellison et al.,* 2003; *Friedman et al.,* 2002; *Antoun et al.,* 1999; *Antoun et al.,* 1997; *Oberoi,* 1994) :

- L'écoulement dans une seule direction permet l'atteinte de vitesses plus élevées, pour un délogement plus efficace des dépôts de toutes natures.
- Les volumes d'eau utilisés sont généralement plus faibles. À titre indicatif, à Edmonton en Alberta, le RUD du réseau municipal a engendré des économies d'eau de 43 % par rapport au rinçage traditionnel (*Oberoi,* 1994).
- En procédant de façon séquentielle et unidirectionnelle, le RUD permet un enlèvement mieux contrôlé et donc plus complet des dépôts et sédiments présents dans les conduites. Les bienfaits qui en résultent sur la qualité de l'eau sont généralement de plus longue durée, ce qui permet de réduire la fréquence des campagnes de rinçage.
- Étant donné que les tronçons à nettoyer sont isolés lors du RUD, ceci (1) évite la perturbation des conduites voisines engendrant des plaintes d'usagers et divers problèmes de qualité de l'eau pendant et après le rinçage, (2) évite le mélange d'eau provenant de conduites non nettoyées avec l'eau de rinçage.
- Les paramètres opérationnels du RUD sont mieux définis (organisation, séquence des opérations, vitesses à atteindre), ce qui rend les directives plus complètes et plus claires quant à la mise en œuvre sur le terrain. Notons, en contrepartie, que la planification des opérations de RUD exige une meilleure préparation.
- L'exécution de campagnes de RUD peut être combinée à des tâches d'entretien des vannes.

Hasit et al. (2004) ont développé un outil d'aide à la décision permettant aux services d'eau potable de mettre sur pied des stratégies de rinçage adaptées, à partir de l'estimation des coûts et bénéfices rattachés aux pratiques qu'ils adoptent. L'objectif est de permettre d'évaluer, de façon globale, la performance des pratiques de rinçage dans une optique de maintien de la qualité de l'eau en réseau (sans aborder les questions techniques liées à l'élaboration des opérations de

rinçage en tant que telles). À partir d'un ensemble de fiches techniques contenant les données et objectifs de rinçage propres à un réseau donné, l'outil effectue des analyses comparatives pour divers changements de procédure envisagés. Ce cadre décisionnel a été développé dans un esprit de flexibilité, sachant que tous les services d'eau potable n'ont pas nécessairement accès à des ressources permettant une évaluation monétaire extensive des coûts et bénéfices du rinçage.

3.1.2.4 Mise en œuvre du rinçage unidirectionnel et aspects opérationnels

Tout comme le rinçage traditionnel, le rinçage unidirectionnel doit être effectué depuis les sources d'eau d'un réseau (ou secteur de réseau) vers ses extrémités. Tel qu'il a été mentionné précédemment, afin d'assurer que l'eau s'écoule dans une seule direction, les tronçons de conduites à rincer doivent être isolés de façon séquentielle, et ce, en manipulant un nombre minimal de vannes. La détermination des séquences de rinçage doit faire en sorte que l'eau s'écoule depuis des conduites propres vers des conduites à nettoyer, et, autant que faire se peut, depuis les conduites de grand diamètre vers les conduites de petit diamètre. À cet égard, le contraire n'est pas souhaitable puisque les volumes d'eau disponibles sont alors insuffisants et l'efficacité de rinçage s'en trouve réduite. Par ailleurs, une limite sur le diamètre des conduites à nettoyer est généralement imposée en raison des débits élevés requis pour une même efficacité de rinçage. En outre, le nettoyage des conduites de grand diamètre est souvent jugé non nécessaire, étant des lieux moins propices à l'accumulation de sédiments ou à la formation de dépôts. En conditions normales d'opération, les vitesses dans ces conduites tendent à être plus élevées puisqu'elles alimentent souvent de grands secteurs de réseau. De plus, les niveaux résiduels de désinfectant y sont généralement plus importants en raison de leur proximité des usines de traitement. La limite sur le diamètre varie d'un réseau à l'autre et selon les vitesses d'écoulement recherchées. À titre indicatif, les sources d'information consultées recommandent

les valeurs suivantes : 610 mm (24 po) (*Friedman et al.,* 2002), 410 mm (16 po) (*Antoun et al.,* 1999), 300 mm (12 po) (*Ellison et al.,* 2003*; Friedman et al.,* 2003*; Joseph et Pimblett,* 2000) et 250 mm (10 po) (*Harmant et al.,* 2002). Un exploitant de réseau peut également choisir de ne pas rincer les conduites excédant un certain âge afin d'éviter des bris qui engendreraient des réparations coûteuses.

Le tableau 3.2 présente un résumé des valeurs indiquées dans la littérature, en ce qui concerne les vitesses qu'il est souhaitable d'atteindre dans les conduites lors de la mise en œuvre du RUD. Tel que le montre le tableau, les valeurs de vitesse sont fonction de la nature des particules et/ou dépôts à évacuer du réseau. C'est le cisaillement imposé à la frontière de la paroi interne des conduites qui est responsable de l'enlèvement des matériaux qui y sont attachés ou déposés. Pour un diamètre de conduite constant, le cisaillement augmente avec la vitesse d'écoulement, laquelle détermine en grande partie l'efficacité du rinçage (*Ellison et al.,* 2003).

Essentiellement, la vitesse pouvant être atteinte dans une conduite dépend de son diamètre, du débit d'eau disponible à la source, de la pression statique (pression disponible) et de la pression résiduelle à maintenir en réseau (pression réduite en raison des activités de RUD). Notamment, à pression disponible équivalente, dans les conduites de plus grand diamètre, le débit (et donc la vitesse) est presque entièrement dépendant des pertes de charge dans la borne, alors que pour les conduites de plus petit diamètre, ce sont les pertes de charge en réseau qui contrôlent le débit (*Walski et al.,* 2003). En général, on recommande que la pression résiduelle soit maintenue à une valeur de 140 kPa (14,3 m d'eau ou 20 psi) afin de réduire les perturbations de l'alimentation en eau des usagers (*Friedman et al.,* 2005*; Ellison et al.,* 2003*; Oberoi,* 1994). À cet égard, il est donc préférable de minimiser les longueurs de tronçons à rincer (500 – 1 500 m), surtout en ce

qui concerne les conduites de petit diamètre, de sorte que les pertes de charge n'engendrent pas de baisses de pression démesurées. Au cours d'un entretien, *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007) a indiqué que les critères de pression résiduelle de 70 kPa (7,1 m d'eau ou 10 psi) et de 20 kPa (2 m d'eau) pouvaient être retenus respectivement pour les réseaux d'élévation relativement constante et les réseaux affichant des écarts d'élévation. En ce qui concerne le second critère, il s'agit de la pression nécessaire à l'empêchement d'un reflux d'eau souterraine dans les conduites au point d'élévation maximale d'un réseau ou secteur de réseau, supposant l'enfouissement des conduites à 1,8 m (*MEQ,* 2002) et la hauteur de la nappe phréatique égale au niveau du sol.

Tableau 3.2 : Vitesses de RUD recommandées dans la littérature.

Source	Vitesses recommandées	Explications
Harmant et al. (2002)	1 m/s	Enlèvement de 80 % des dépôts mobiles
Friedman et al. (2002)	≥ 0,9 m/s	Enlèvement de silt et sédiments; réduction de la demande en désinfectant
	≥ 1,6 m/s	Récurage, enlèvement de dépôts mobiles; réduction de la demande en désinfectant
Friedman et al. (2003), *Friedman et al.* (2005)	0,6 – 1,2 m/s	Enlèvement de la plupart des dépôts mobiles des conduites lisses (p. ex. chlorure polyvinyle ou fonte ductile neuve) et partiellement tuberculées
	≥ 1,6 m/s	Enlèvement des dépôts adhérents (récurage); l'efficacité du rinçage à de telles fins demeure limitée et pour des résultats satisfaisants, l'utilisation de méthodes de nettoyage mécanique devrait être aussi envisagée
Vreeburg (2007)	1,5 – 1,8 m/s	Basé sur l'expérience pratique (Hollande); enlèvement complet des sédiments causant la coloration de l'eau; vitesse significativement supérieure aux vitesses journalières observées
Nathalie Periche (communication personnelle, juin 2007)	1 m/s	Vitesse visée lors du rinçage de réseaux d'eau potable au Québec; compromis entre efficacité de nettoyage, vitesse d'exécution des opérations de RUD sur le terrain et vitesses de rinçage accessibles en réseau.

En ce qui concerne la progression des opérations de RUD sur le terrain, *Antoun et al.* (1999) suggèrent de subdiviser le réseau (ou secteur de réseau) à rincer en sous-secteurs individuels (*loop divisions*), devant être rincés de façon séquentielle, à partir d'une source d'eau non contaminée. Le rinçage de chaque secteur implique un certain nombre de séquences de RUD et doit pouvoir être complété à l'intérieur d'un quart de travail. La taille des secteurs dépend notamment de la main-d'œuvre disponible, des équipements disponibles et du temps de rinçage envisagé pour les séquences. *Friedman et al.* (2005) suggèrent que, pour un secteur donné, les séquences de RUD progressent d'une boucle de réseau à l'autre, depuis une source d'eau propre, en favorisant l'utilisation des bornes pour plus d'une séquence. *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007), *Friedman et al.* (2005), *Friedman et al.* (2003) ainsi que *Antoun et al.* (1999) suggèrent que les opérations liées au rinçage de chaque séquence individuelle soient effectuées dans l'ordre suivant : (1) fermeture des vannes servant à isoler la séquence et, par le fait même, à la rendre unidirectionnelle, (2) ouverture des vannes utiles au rinçage d'une séquence précédente mais devant être ouvertes pour la séquence courante, (3) ouverture de la borne, (4) fermeture de la borne. Afin d'éviter les coups de bélier, chaque borne et vanne doit être manipulée de façon graduelle. Le rinçage se poursuit généralement jusqu'à ce que l'équivalent de 2 ou, préférablement, 3 fois le volume d'eau contenu dans les conduites de cette séquence ait été évacué (*Nathalie Periche* juin 2007, communication personnelle*; Vreeburg,* 2007*; Ellison et al.,* 2003*; Friedman et al.,* 2003).

Oberoi (1994) indique que chaque équipe de rinçage devrait être constituée de deux opérateurs expérimentés, se déplaçant dans un véhicule adéquatement équipé aux fins de l'exécution du RUD et de l'entretien des bornes et vannes. *Hasit et al.* (2004) , pour leur part, rapportent qu'en général un à quatre véhicules et une à trois équipes de travail sont nécessaires à la réalisation

d'une campagne de RUD. Le nombre de personnes constituant chaque équipe varie de un à quatre. Le linéaire (ou longueur) de conduites rincé en un quart de travail par une équipe de deux personnes varie entre 3 et 5 km (*Hasit et al.,* 2004*; Ellison et al.,* 2003). Afin de faciliter l'exécution sur le terrain, chaque équipe de rinçage devrait disposer de feuilles de route indiquant clairement l'ordre des opérations ainsi que la localisation des bornes et vannes à manipuler sur un plan du réseau (*Hasit et al.,* 2004).

Il est normalement recommandé que les campagnes de rinçage se déroulent durant la nuit ou tôt le matin (23 heures – 5 heures) afin de profiter des pressions élevées et de limiter, une fois de plus, les inconvénients auprès des usagers. Malgré cette prescription, tel que le mentionnent *Hasit et al.* (2004), les activités de RUD sont généralement effectuées durant les heures régulières de travail, soit entre 8 heures et 16 heures. En outre, une attention particulière devrait être portée aux usagers critiques afin de minimiser les dérangements au niveau de leur alimentation en eau (par exemple, les hôpitaux, les industries de haute technologie requérant des traitements spécifiques de l'eau sur place, etc.) (*Friedman et al.,* 2005).

3.1.2.5 Précisions concernant les bornes d'incendie et les vannes

En Amérique du Nord, en général, le diamètre interne des bornes d'incendie est de 140 mm (5,5 po), et elles sont munies de prises de boyau de 64 mm (2,5 po; une ou deux prises) et/ou de 100 mm (4 po; une prise) (*Walski et al.,* 2003). Pour une séquence de RUD donnée, le nombre de bornes à ouvrir pour atteindre une vitesse cible peut être supérieur à un. *Antoun et al.* (1999) donnent à cet effet des indications considérant une vitesse de 1,8 m/s et une pression résiduelle de 207 kPa (21,1 m d'eau ou 30 psi) (Tableau 3.3). Toutefois, ces valeurs demeurent théoriques puisque, suivant la capacité hydraulique du réseau ainsi que sa configuration, rien ne garantit que

des pressions résiduelles de 207 kPa soient maintenues et donc que le débit requis pour une vitesse de 1,8 m/s soit atteint.

Enfin, à titre indicatif, *Hasit et al.* (2004) donnent des fourchettes de valeurs pour les nombres de bornes d'incendie et de vannes par kilomètre de conduite recensés parmi 26 services d'eau potable ayant répondu à un sondage (23 localisés aux États-Unis, 2 au Royaume-Uni et 1 en Australie) : 2,7 – 12,0 bornes au kilomètre; 5,4 – 17,4 vannes au kilomètre. Ces valeurs seront ultérieurement utilisées à titre comparatif.

Tableau 3.3 : Nombre théorique de prises de boyau devant être ouvertes pour l'atteinte d'une vitesse de rinçage de 1,8 m/s, en fonction du diamètre des conduites des séquences de RUD (à pression résiduelle de 207 kPa ou 21,1 m d'eau) (*Antoun et al.,* 1999)

Diamètre des conduites [mm (po)]	Débit requis pour une vitesse de 1,8 m/s [m^3/h]	Nombre de prises de boyau de 64 mm (2,5 po)	Nombre de prises de boyau de 100 mm (4 po)
100 (4)	50	1	
150 (6)	120	1	
200 (8)	210	1 ou 2	
250 (10)	330	2	1
300 (12)	460	3	1
410 (16)	850		2
460 (18)	1080		2
610 (24)	1920		3

3.1.2.6 Prise en charge de l'eau de rinçage

En général, l'eau de rinçage est déversée à l'égout sanitaire et/ou pluvial. Dans certains cas, selon la réglementation locale en vigueur, il peut même être obligatoire que l'eau de rinçage soit débarrassée du chlore qu'elle contient ou encore filtrée avant d'être acheminée aux réseaux d'égout (*Hasit et al.,* 2004). En cas d'incident de contamination, l'eau de rinçage devra

inévitablement faire l'objet d'une attention particulière. À cet égard, *USEPA* (2004b) donne les directives suivantes : (1) si l'eau n'est pas considérée comme dangereuse pour l'environnement, et/ou que les concentrations en contaminants se trouvent en-deçà d'un seuil établi, elle pourra être déversée à un système d'égout ou au milieu récepteur; (2) dans le cas contraire, l'eau de rinçage devra d'abord être traitée (*in situ* ou non). Pour le traitement *in situ*, il existe notamment des filières portatives et plus d'information à ce sujet est donnée dans *USEPA* (2004b).

En somme, d'après les informations rapportées dans les sections précédentes, les critères opérationnels, qui sous-tendent la mise en œuvre du RUD, en font un moyen d'intervention efficace et sécuritaire à envisager dans un contexte de contamination de l'eau potable. Toutefois, cette mesure corrective est surtout adaptée aux situations impliquant des substances non adhérentes aux conduites (stade C, point 2i, à la quatrième colonne du tableau 3.1). Dans le cas contraire, la section qui suit propose des méthodes plus appropriées.

3.1.3 Élimination des contaminants adhérents aux parois des conduites

En ce qui a trait à la mise en œuvre d'actions correctives lorsque le contaminant adhère aux conduites (stade C, point 2ii, à la quatrième colonne du tableau 3.1), un rapport de l'AwwaRF, dont une version préliminaire a été publiée en 2006, suggère l'utilisation d'agents nettoyants (*Welter,* 2005). Il nous a cependant été impossible d'obtenir une copie de ce rapport, en raison du caractère hautement confidentiel de l'information qu'il contient. D'après les informations présentées par *Welter* (2005) dans le cadre d'une communication orale, on y recommande le

rinçage des conduites contaminées, combiné à l'utilisation de produits tels que des détergents[13], du chlore et des agents chélateurs[14]. Par ailleurs, dans le cadre d'une étude préliminaire, *DeFrank* (2006) et *DeFrank et al.* (2007) suggèrent l'utilisation d'enzymes. Les contaminants visés dans ce cas incluent notamment les pesticides, les agents biologiques (bactéries, rickettsies[15], protozoaires, virus), le cyanure ainsi que les toxines. Les premiers résultats sur banc d'essai ont démontré un potentiel intéressant pour la décontamination de l'eau à l'aide de filtres enzymatiques. Pour ce qui est de la décontamination des conduites, des travaux de recherche supplémentaires devront être réalisés.

3.2 Réponse aux incidents de contamination : aspects techniques

En complément aux directives et aspects à caractère opérationnel, une réponse efficace et appropriée aux contaminations se produisant en réseaux d'eau potable nécessite un appui technique adéquat. À cet égard, les considérations relatives aux technologies et outils d'analyse sont abordées dans les sections qui suivent.

[13] La détergence est un processus selon lequel des salissures (souillures) sont enlevées et mises en solution ou en dispersion. Au sens ordinaire, la détergence a pour effet le nettoyage des surfaces. Elle est la résultante de la mise en œuvre de plusieurs phénomènes physico-chimiques.
(http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 21 février 2008)

[14] En chimie, la chélation est un processus physicochimique qui conduit à la formation d'un complexe entre un ion métallique positif et une substance organique.
(http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 21 février 2008)

[15] Genre bactérien constitué de bacilles immobiles, d'environ 1 µm, colorables par le Giemsa et le Gimenez, ne pouvant être cultivés que sur culture de cellules ou *in ovo*. Ce sont des parasites intracellulaires obligatoires, pathogènes chez l'homme, les vertébrés, les arthropodes, sensibles aux tétracyclines qui ont une bonne diffusion intracellulaire. Terme créé par H.T. Ricketts, en 1909.
(http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 21 février 2008)

3.2.1 Systèmes de monitoring de la qualité de l'eau en continu

Le thème des CWS (*contamination warning systems*), pour la surveillance de contaminations éventuelles en réseaux, a été abordé brièvement à la section 1.3. La mise en place de CWS vise à limiter le risque de consommation d'eau contaminée, tout en augmentant le niveau de protection des usagers. À ces fins, un CWS prévoit notamment l'installation d'unités pour la détection de contaminants, en temps réel et en continu. À titre informatif et afin de permettre au lecteur de mieux saisir les enjeux actuels ainsi que les objectifs et hypothèses de recherche posés, les paragraphes qui suivent dressent un portrait général mais non exhaustif de l'état de l'art sur ce sujet.

Les systèmes pour la détection de contaminations en réseau doivent comporter trois composantes principales, à savoir (1) des instruments permettant d'effectuer le monitoring de la qualité de l'eau en continu, (2) des systèmes pour la transmission à distance des données colligées et (3) une unité automatisée de traitement et d'analyse en continu de ces données afin qu'une « alarme » soit déclenchée dès qu'une situation anormale se présente (*USEPA,* 2005a*; Roberson et Morley,* 2005*; ASCE,* 2004). Bien entendu, toute alarme est assujettie à une évaluation plus approfondie visant à confirmer la contamination, et ce, avant la mise en branle d'interventions correctives spécifiques.

Selon *USEPA* (2005a), *Roberson et Morley* (2005) et *ASCE* (2004), un équipement de monitoring idéal devrait présenter les caractéristiques suivantes :

- être en mesure d'identifier et détecter rapidement toute substance préoccupante de natures microbiologique, chimique ou radiologique;

- mesurer les concentrations avec précision, de façon fiable et à des niveaux réputés nocifs pour la santé (lesquels sont parfois très faibles, notamment en ce qui concerne les contaminants microbiologiques);
- fonctionner de façon autonome, en continu et en temps réel;
- requérir un entretien simple et de courte durée, de façon à minimiser le temps où chaque unité de monitoring se trouve hors fonction;
- générer des données numériques rapidement transmissibles par communication à distance.

Un tel équipement n'existe pas pour le moment et son développement ne peut être envisagé avant un certain nombre d'années (*USEPA,* 2005a). Par contre, des technologies déjà disponibles possèdent certaines des caractéristiques souhaitées (*Roberson et Morley,* 2005), tel qu'exposé aux sous-sections qui suivent.

3.2.1.1 État actuel des connaissances

À l'heure actuelle, le principe dominant la conception de technologies de monitoring repose sur l'inférence quant à la présence de substances étrangères à partir de l'analyse conjointe de paramètres physico-chimiques standards de qualité de l'eau tels que le chlorure, la conductance spécifique, la turbidité, le chlore libre, le pH, le carbone organique total et le potentiel d'oxydo-réduction (*Umberg et al.,* 2006; *USEPA,* 2005a). Un inventaire de technologies permettant le monitoring « en ligne » (communication à distance) et en continu de ces paramètres est donné dans *USEPA* (2005a). En ce qui a trait à la transmission des données, essentiellement deux types de support peuvent être envisagés, soit par liaison câblée ou sans fil. Le cas échéant, on pourra opter pour l'établissement de liens avec un système de télémétrie existant (ou système SCADA – *supervisory control and data acquisition*), bien que l'alternative d'un système indépendant

puisse également être envisagée, selon les besoins de chaque service de distribution d'eau potable (*Roberson et Morley,* 2005*; ASCE,* 2004).

Les données transmises doivent être analysées en temps réel et, à cette fin, des algorithmes ont été développés et testés (*event detection* – ED *algorithms*; voir par exemple *McKenna et al.,* 2007*; Klise et McKenna,* 2006*; McKenna et al.,* 2006). Comme les paramètres mesurés sont des « indicateurs » de contamination potentielle, un défi important propre à l'analyse de ce type de données consiste à distinguer les anomalies réelles du bruit considéré comme étant « normal », de façon à minimiser les faux positifs (fausses alertes) tout en évitant les faux négatifs (événements réels non détectés) (*USEPA,* 2005b). Chaque réseau de distribution étant différent, les algorithmes effectuent l'analyse des données par rapport à la variabilité normale des paramètres de qualité de l'eau. Cette variabilité est le reflet des fluctuations intersaisonnières et dues aux opérations routinières sur le réseau (drainage des réservoirs, fermeture de vannes, variation des consommations au cours d'une journée, etc.). De façon générale, pour l'établissement de ce niveau de référence, on recommande que des données soient recueillies au cours d'une période d'une année au moins (*Roberson et Morley,* 2005*; USEPA,* 2005a*; USEPA,* 2005b). Des travaux récents ont donné lieu au développement de CANARY (*Hart et al.,* 2007a*; Morley et al.,* 2007). Cet outil permet d'analyser des séries temporelles de données mesurées en divers points de réseau, pour des ensembles variables de paramètres de qualité de l'eau, et ce, de façon simultanée par plusieurs algorithmes. CANARY a été conçu dans un esprit ouvert de recherche et développement, et permet que des algorithmes ED nouvellement développés puissent y être intégrés facilement.

À ce jour, à l'aide d'instruments de monitoring en continu, des études ont examiné la variation des paramètres de qualité de l'eau en réponse à l'introduction de contaminants divers dans des réseaux pilotes de petite taille. Les contaminants considérés incluent l'arsenic, le cyanure, la bactérie *Escherichia Coli* ains que divers pesticides/herbicies (p. ex. malathion, glyphosate) (*Hall et al.,* 2007*; Byer et Carlson,* 2005). Les algorithmes ED, pour leur part, ont fait l'objet d'évaluations diverses à partir de séries de données recueillies en divers points au sein de réseaux réels (*McKenna et al.,* 2007*; McKenna et al.,* 2006). Cependant, aucun déploiement de systèmes de monitoring à grande échelle, au sein d'un réseau de distribution réel, n'a été documenté. Par le biais du programme *WaterSentinel*, l'agence environnementale américaine (USEPA) envisageait de le faire au cours de l'été 2007, à Cincinnati en Ohio (*AWWA,* 2007). À notre connaissance, toutefois, aucune information supplémentaire n'a encore été communiquée concernant ce projet.

3.2.1.2 Défis de recherche et développement

Comme le conclut le rapport de *USEPA* (2005a), la conception des systèmes de monitoring en continu est encore, à ce stade, en bonne partie théorique. La majorité des composantes de ces systèmes devra faire l'objet de développements, de tests et de validations supplémentaires. À ce titre, les besoins ainsi que certaines pistes de développement identifiés dans la littérature sont ici présentés.

En ce qui concerne les instruments de monitoring basés sur l'analyse de paramètres multiples, leur capacité à détecter des substances microbiologiques et chimiques jugées dangereuses devra être l'objet d'études plus approfondies. Des signatures spécifiques à certains contaminants ont déjà été développées, mais des travaux importants doivent encore être accomplis afin d'examiner

la possibilité de détecter un champ plus vaste de substances. De plus, en raison de leur coût élevé, les technologies disponibles ne sont pas encore accessibles à la majorité des services d'eau potable. Pour faire l'acquisition d'une unité multiparamétrique, il en coûte actuellement au moins 10 000 $. Et encore, si l'acquéreur souhaite inclure le carbone organique total parmi les paramètres monitorés, il faut compter de 18 000 $ à 29 000 $ de plus. Il est cependant vraisemblable que les avancées technologiques et le développement de plusieurs produits entraîneront une diminution des prix (*USEPA,* 2005a).

Des tests plus exhaustifs devront aussi être réalisés à l'aide des algorithmes ED, considérant le manque de données sur des événements réels de contamination. Pour ce faire, *Uber et al.* (2007) ont développé une méthodologie permettant, à partir d'outils de simulation, de générer des séries de données synthétiques de concentration en chlore où apparaissent des variations liées à des événements de contamination. Le principal défi de ces travaux, qui en sont encore à un stade préliminaire, réside dans la génération de données représentatives de la réalité : fréquence annuelle des événements de contamination (sachant qu'ils sont rares), ampleurs des contaminations, types de contaminants, inclusion de fluctuations liées à des opérations de routine en réseau. *Linville et Thompson* (2006) ainsi que *Umberg et al.* (2006), pour leur part, font remarquer que la mise en place de systèmes de monitoring en continu posera des défis en ce qui concerne notamment la transmission des données et les temps UC[16]. Dans le contexte plus général des CWS, ils notent que la capacité de sonder simultanément des bases de données multiples (plaintes des usagers, données provenant des laboratoires, rapports pharmaceutiques, rapports des hôpitaux, information opérationnelle et de terrain, etc.) devra également faire l'objet d'études approfondies.

[16] En informatique, il s'agit du temps d'utilisation d'un processeur pour le traitement de données (http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 22 février 2008).

À plus long terme, le développement de détecteurs spécifiques à certains contaminants, ou à tout le moins à certains types de contaminants, est envisagé (*USEPA,* 2005a). Pour ce qui est des substances chimiques, des détecteurs à puce actuellement utilisés pour l'échantillonnage ponctuel (*grab sampling*) de l'arsenic et du cyanure en réseau présentent un potentiel d'adaptation prometteur, tout comme certains biomoniteurs (poissons, moules) portatifs. D'autres technologies propres à la détection de substances dans l'air et les gaz présentent un potentiel d'application à l'eau potable intéressant; par exemple : la spectroscopie infrarouge portative, la spectroscopie à mobilité ionique, les ondes acoustiques.

En ce qui a trait aux substances biologiques, le développement de technologies pour la détection en temps réel n'apparaît pas possible avant plusieurs années encore. Actuellement, aucune méthode ne permet la détection dans des délais suffisamment courts. Des méthodes d'analyse existantes, utilisées dans le cadre d'échantillonnages ponctuels, pourraient éventuellement être adaptées, entre autres le dosage par la méthode immunosérologique, l'ATP (adénosine triphosphate) et la PCR (réaction de polymérisation en chaîne). Pour la plupart de ces méthodes, cependant, un important défi provient de la nécessité de procéder à la concentration des échantillons. Les méthodes ne sont pas suffisamment sensibles pour être en mesure, sans le recours à la concentration, de détecter les très faibles concentrations microbiennes présentant un danger pour l'être humain. À cet égard, des techniques efficaces devront être mises au point.

Quant aux substances radiologiques, certaines technologies fonctionnant en continu et applicables à l'eau potable ont récemment été développées (ou sont en cours de développement). Cependant, le risque de contamination radiologique ne semble pas, à l'heure actuelle, justifier le coût d'acquisition particulièrement élevé d'une unité (jusqu'à 150 000 $), d'autant plus que ces

instruments requièrent souvent un niveau élevé d'expertise pour leurs installation, calibration et entretien. La plupart des technologies disponibles sont en mesure de détecter les radiations gamma, alpha et bêta, mais ne peuvent identifier, de façon spécifique, la substance en cause. Selon *USEPA* (2005a), la faible demande, actuellement, pour ce genre de technologie, inciterait peu aux développements ultérieurs.

En terminant, dans une perspective plus générale de sécurité publique, les besoins de recherche suivants sont également identifiés (*USEPA,* 2005a) : (1) l'identification, de façon claire, des contaminants ainsi que des niveaux d'exposition à prendre en compte lors de la sélection des technologies de détection; (2) le développement d'outils et d'instruments supplémentaires pour l'établissement de liens entre les données de contamination et la déclaration d'états d'alerte ainsi que la prise de décision.

3.2.2 Localisation optimale des détecteurs de contamination

D'autres études se sont intéressées aux systèmes de détection de contaminants dans l'optique, cette fois, de la configuration des détecteurs (nombre, localisation). En supposant que ces derniers soient en mesure de détecter les contaminants introduits en réseau de façon fiable et quasi instantanée, il importe par la suite de les mettre en place de façon à assurer la meilleure protection possible de la population. *A priori*, la solution à ce problème paraît triviale : un niveau de protection maximal est bien sûr atteint lorsque chaque nœud de réseau (raccordements d'usagers, bornes d'incendie, etc.) est pourvu d'un détecteur. Cependant, pour des raisons surtout d'ordre financier et parce que tous les nœuds d'un réseau ne se prêtent pas nécessairement à l'installation de ce genre d'instruments, en pratique le nombre de sites à pourvoir de détecteurs devra être limité. Considérant ces restrictions, la question est donc de localiser de façon optimale

un nombre donné de détecteurs au sein des réseaux de distribution. Tel que le suggère la littérature disponible sur le sujet, ce problème a été largement examiné et plusieurs méthodes pour la localisation optimale de détecteurs ont été développées. Tous les modèles de localisation optimale nécessitent au préalable la réalisation de simulations hydrauliques et de qualité de l'eau en réseau. Dans un premier temps, cette section propose une revue des plus importants travaux, en les regroupant d'abord en fonction des buts et objectifs visés par les modèles de localisation, ensuite selon les principes de simulation sous-jacents, et enfin selon le type de méthode utilisé pour la résolution du problème d'optimisation. Considérant que les modèles de localisation de détecteurs reposent sur un certain nombre d'hypothèses, dans un second temps seront présentés des travaux ayant contribué à améliorer ces modèles, afin qu'ils représentent un peu mieux la réalité.

3.2.2.1 Principales études

Des travaux précurseurs se sont d'abord intéressés à la localisation optimale de points d'échantillonnage en réseau, de façon à assurer une surveillance adéquate de la dégradation interne (ou graduelle) de la qualité de l'eau distribuée, en aval des stations de traitement. La prémisse de ces travaux est que l'échantillonnage en un point donné de réseau fournit de l'information quant à la qualité de l'eau aux nœuds se trouvant en amont de ce point. Dans ce contexte, les points d'échantillonnage sont localisés en cherchant à maximiser le volume d'eau en réseau qui transite par ces points (*Al-Zahrani et Moied,* 2001*; Al-Zahrani et Moied,* 2003*; Kumar et al.,* 1997*; Lee et Deininger,* 1992). Ces premiers travaux ainsi que les efforts récemment déployés afin d'améliorer la sécurité des infrastructures de distribution ont ensuite conduit les chercheurs à examiner le problème de la localisation optimale de détecteurs dans le but de protéger les usagers contre les intrusions de contaminants. Les modèles développés à ce

jour ont soit cherché à : (1) minimiser le nombre de détecteurs permettant de respecter un niveau de protection à la détection[17] pour un ensemble de scénarios de contamination simulés[18] (*Ostfeld et al.,* 2004*; Uber et al.,* 2004*; Ostfeld et al.,* 2003*; Kessler et al.,* 1998); (2) maximiser le nombre de scénarios de contamination couverts par un nombre fixé de détecteurs, tout en respectant un niveau de protection à la détection (*Ostfeld et Salomons,* 2004*; Uber et al.,* 2004*; Kumar et al.,* 1999); ou encore (3) minimiser l'impact moyen d'un ensemble d'événements de contamination simulés, considérant un nombre fixé de détecteurs et utilisant des indicateurs d'impact tels que le temps à la détection, la population atteinte par la contamination à la détection, le volume d'eau contaminée consommé à la détection, l'étendue de la contamination en réseau à la détection ou encore le nombre d'événements non détectés (*Berry et al.,* 2006a*; Propato,* 2006*; Berry et al.,* 2005a*; Berry et al.,* 2005b*; Watson et al.,* 2005*; Uber et al.,* 2004*; Watson et al.,* 2004). Tous ces modèles, on l'aura compris, s'intéressent à la première détection de contaminants introduits en réseaux d'eau potable.

L'ensemble des travaux cités précédemment reposent sur des hypothèses en ce qui a trait aux capacités de détection ainsi qu'à la quantification de l'impact des contaminations. D'abord, des détecteurs parfaits et idéaux sont supposés, c'est-à-dire 100 % fiables (aucun bris) et en mesure de détecter tout contaminant introduit en réseau (peu importe sa nature), à des seuils de concentration infiniment petits. De plus, suite à la première détection d'un contaminant, on suppose qu'une alarme est émise instantanément et que toute consommation ultérieure d'eau

[17] Par exemple, le volume maximal d'eau contaminée pouvant être consommé sur l'ensemble du réseau suite à l'intrusion d'un contaminant, en tenant compte ou non d'un seuil de concentration du contaminant dans l'eau; ou encore le délai maximal permis entre le moment d'intrusion et le moment de détection.

[18] Chaque scénario de contamination correspond à l'intrusion d'un contaminant en un point donné de réseau et à un moment donné au cours d'une période de simulation déterminée. Les caractéristiques quant à la durée et au profil de concentration d'une intrusion doivent être spécifiées. Plus de détails quant aux modes de simulation sont donnés aux paragraphes suivants.

contaminée par la population est immédiatement empêchée[19]. Notons, au passage, que les études dont il est ici question illustrent bien le propos de la section 3.1, à l'effet qu'il existe une disparité entre les caractéristiques des technologies de détection existantes et les hypothèses à la base des travaux de recherche rapportés dans la littérature.

En ce qui concerne la simulation des scénarios de contamination, la majorité des travaux cités ci-haut font l'hypothèse que l'intrusion d'une substance a lieu en un seul point de réseau. *Ostfeld et Salomons* (2004) ont toutefois considéré des intrusions doubles et triples pouvant survenir en des nœuds différents et à des intervalles de 15 minutes. Les points d'intrusion considérés correspondent toujours à des nœuds du réseau. La localisation des détecteurs, pour sa part, est généralement limitée aux nœuds, les travaux de *Berry et al.* (2005a), *Berry et al.* (2005b) et de *Watson et al.* (2004) faisant toutefois exception. Les premiers ont cherché à localiser les détecteurs sur les conduites alors que les autres ont considéré simultanément les nœuds et les conduites en tant que sites potentiels de localisation des détecteurs. Dans les études citées dans cette thèse, les densités de détecteurs (pourcentage du nombre total de nœuds ou conduites des réseaux à munir de détecteurs) varient de près de 0 à 100 %. Au total, parmi 90 combinaisons de réseau et nombre de détecteurs[20], 60 % ont considéré des densités de détecteurs se trouvant entre 0,04 % et 7,38 %.

Certains modèles de localisation de détecteurs reposent sur des approches stationnaires de modélisation des scénarios de contamination (*Berry et al.,* 2005a*; Berry et al.,* 2005b*; Watson et*

[19] Puisqu'on s'intéresse à la première détection d'une contamination, la quantification des mesures d'impact s'arrête au moment où la détection survient. Ce qui se produit par la suite n'est pas pris en compte dans les problèmes d'optimisation.

[20] Les tailles de réseaux à l'étude, en ce qui a trait au nombre de nœuds, varient de 11 à 14 000.

al., 2004; *Kumar et al.*, 1999; *Kessler et al.*, 1998) [21], alors que d'autres reposent sur des approches dynamiques (*Berry et al.*, 2006a; *Propato*, 2006; *Berry et al.*, 2005c; *Watson et al.*, 2005; *Uber et al.*, 2004; *Ostfeld et Salomons*, 2004; *Ostfeld et al.*, 2004; *Ostfeld et al.*, 2003).

Berry et al. (2005c) ainsi que *Watson et al.* (2005) ont effectué une comparaison entre les deux types de modèles. Pour ce qui est des modèles stationnaires, ceux-ci considèrent un ensemble consécutif de patrons d'écoulement de l'eau en régime permanent, mais de façon séparée (p. ex. quatre patrons de six heures au cours d'une journée, chacun étant estimé à partir d'un profil moyen de demande aux nœuds pour la période en question). Les transitions temporelles entre ces patrons ne sont pas prises en compte. Ainsi, un comportement moyen des écoulements en réseau est obtenu en agrégeant les résultats de simulation obtenus pour chaque patron. L'approche de simulation des scénarios de contamination est fort simple puisque ces modèles reposent sur la réalisation de simulations hydrauliques uniquement. Le transport de substances dans l'eau est entièrement basé sur les temps de parcours entre les nœuds, qui sont estimés connaissant les longueurs des conduites ainsi que les vitesses et sens d'écoulement dans chacune de celles-ci. Dans un tel contexte, les concentrations des substances dans l'eau ne sont pas prises en compte et les phénomènes de mélange et de dilution aux nœuds sont ignorés. Seules la présence ou l'absence de substances en divers points de réseau sont simulées. Incidemment, les caractéristiques des intrusions de contaminants ne sont pas simulées (temps auquel débute l'intrusion, mode d'intrusion, taux d'intrusion, concentration, durée, contaminant). La durée de chaque intrusion s'étend sur l'horizon temporel du patron d'écoulement au cours duquel elle est simulée.

[21] Souvent, dans la littéraure, l'appellation « modèles statiques » est utilisée. Dans la cadre du présent document, les termes « stationnaire » et « régime permanent » sont plutôt employés (section 2.2.2).

En ce qui concerne les modèles en régime dynamique, par opposition aux modèles précédents, ils tiennent compte des effets liés aux variations temporelles des écoulements en réseau au cours d'une période déterminée (une journée par exemple). Ils sont basés sur la simulation du transport de substances en réseau (hydraulique et qualité de l'eau) à chaque pas de temps (sections 2.2.1 et 2.2.2) et permettent de considérer un vaste éventail de scénarios d'intrusion. Des séries temporelles de concentration sont obtenues pour chaque nœud et conséquemment, l'impact de contaminations, exprimé en fonction des concentrations, peut être quantifié (il ne faut pas oublier cependant que la précision de l'évaluation de l'impact est limitée par la précision du modèle de transport et par la connaissance des variations temporelles des demandes aux nœuds). Alors que les modèles de nature stationnaire ne requièrent qu'une simulation hydraulique par patron d'écoulement, les modèles reposant sur des approches dynamiques requièrent qu'un nombre beaucoup plus important de simulations de qualité de l'eau soit réalisé, considérant tous les points d'intrusion possibles, tous les temps auxquels peuvent se produire les intrusions et tous les profils d'intrusion probables (concentration en fonction du temps). D'après *Berry et al.* (2005c), il s'agit même d'un obstacle de taille dans certaines applications à grande échelle, en raison des coûts associés aux temps de calcul et au stockage des données simulées. En guise de solution possible, *Propato* (2006) propose un modèle linéaire *input-output* (I/O) qui permet de réduire le nombre de simulations requis sous l'hypothèse de contaminants dont la cinétique de réaction est au plus du premier ordre. En supposant des intrusions de contaminants de durée unitaire (un pas de temps) et de concentration constante, à l'aide du modèle I/O, il est possible de réduire le nombre de simulations de qualité de l'eau en ne simulant qu'un scénario par point d'intrusion et par pas de temps. En linéarisant le problème de la sorte, on évite de répéter les calculs pour les cas où seules les concentrations des intrusions varient. Toutefois, précisions que la taille de la matrice de transfert peut devenir très importante, pour des applications à des réseaux de moyenne

et grande envergures. Il s'agirait alors de rechercher le meilleur compromis entre la rapidité d'exécution des calculs et l'encombrement de la mémoire de l'ordinateur utilisé à cette fin. Récemment, *Berry et al.* (2007), *Perelman et Ostfeld* (2007) ainsi que *Preis et Ostfeld* (2007) ont proposé des solutions supplémentaires, reposant respectivement sur (1) l'utilisation d'une méthode heuristique afin de sélectionner, parmi un nombre déterminé de scénarios de contamination, les plus représentatifs de l'ensemble (lieu et moment d'occurrence, masse totale de contaminant introduite, durée); (2) l'utilisation de méthodes d'agrégation (*witness aggregation* et *scenario aggregation*); et (3) la méthode de l'entropie croisée, afin de favoriser la simulation d'événements de faible probabilité d'occurrence mais dont l'impact est important.

La majorité des problèmes de localisation optimale de détecteurs de contamination ont été posés sous forme de programmation linéaire mixte en nombres entiers[22] (*mixed integer linear programming* – MILP). Pour la résolution de ces problèmes, des méthodes « exactes »[23] ont été utilisées (*Berry et al.*, 2006a; *Propato*, 2006; *Berry et al.*, 2005a; *Berry et al.*, 2005c; *Watson et al.*, 2004) ainsi que des méthodes heuristiques (*Watson et al.*, 2005; *Ostfeld et al.*, 2004; *Uber et al.*, 2004; *Ostfeld et al.*, 2003; *Kessler et al.*, 1998). D'autres auteurs, sans recourir à la MILP, ont utilisé des méthodes heuristiques pour la recherche de solutions directement au sein de matrices d'adjacence contenant les valeurs simulées d'impact à tous les nœuds d'un réseau de distribution, pour l'ensemble des scénarios de contamination envisagés (*Kumar et al.*, 1999). *Ostfeld et Salomons* (2004), de façon plus spécifique, ont eu recours à des algorithmes génétiques (p. ex. voir *Deb et al.*, 2000).

[22] Problème de programmation linéaire dans lequel certaines variables du programme sont entières et d'autres, réelles.

[23] Les méthodes « branch and bound » sont généralement utilisées, où des bornes sont appliquées afin de limiter la recherche de solution. Bien qu'elles n'examinent pas l'espace des solutions dans son entier, ces méthodes sont dites exactes puisqu'on peut démontrer qu'elles convergent vers la solution, contrairement aux méthodes heuristiques (pour plus de détails, voir p. ex. *Berry et al.*, 2005b).

3.2.2.2 Ajout d'éléments réalistes aux modèles de localisation de détecteurs

Les précédents modèles comportent un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, que d'autres études ont visé à améliorer. *Ostfeld et Salomons* (2005), *Janke et al.* (2006) ainsi que *Berry et al.* (2006b), ont modifié les caractéristiques des détecteurs afin d'inclure des délais de traitement, des sensibilités variables aux contaminants (seuils de détection) et des probabilités de non-détection (faux négatifs). *Watson et al.* (2006) ont développé un modèle de localisation de détecteurs visant à minimiser l'impact d'événements de contamination dits extrêmes (pires scénarios, par opposition à l'impact moyen). Ces événements sont définis comme ceux dont la probabilité d'occurrence est inférieure à un seuil donné et qui affecteront un grand nombre d'usagers. *Murray et al.* (2006) ont élaboré un cadre de modélisation permettant de mieux reproduire l'impact de contaminations sur la santé publique, en liant un modèle épidémiologique à un outil de simulation du transport des contaminants en réseaux d'eau potable. Enfin, *RicoRamirez et al.* (2007) ainsi que *Carr et al.* (2006) ont repris le modèle stationnaire proposé par *Berry et al.* (2005a) afin d'y inclure des incertitudes en ce qui a trait au risque d'introduction de contaminants en chaque nœud et à la population affectée. Les premiers ont eu recours à la programmation stochastique, où l'incertitude est considérée comme aléatoire. Les seconds ont utilisé des techniques d'optimisation robustes, adaptées au traitement d'incertitude épistémique[24].

[24] L'incertitude épistémique, dans ce cas, est due à un manque d'information dans la description des variables et paramètres du modèle. Par exemple, si un paramètre ne peut prendre qu'une valeur fixe parmi un intervalle fini mais que cette valeur est inconnue, l'incertitude est épistémique et diffère de l'incertitude aléatoire, qui décrit la variabilité inhérente à un système ou un environnement donné. L'incertitude épistémique constitue une façon somme toute intuitive de tenir compte de paramètres dont la quantification demeure subjective.

3.2.3 Localisation des sources de contamination

Les travaux présentés à la section précédente se concentrent sur la configuration de systèmes de monitoring en temps réel dans une optique de détection précoce des contaminations. Or, ils n'abordent pas de façon spécifique la question complémentaire de la localisation des sources de contamination, suite à la détection.

La localisation de sources de contamination constitue l'inverse du problème standard de simulation de qualité de l'eau. Ce dernier, rappelons-le, consiste à obtenir des valeurs de concentration calculées en réseau, connaissant les données d'entrée : lieu et moment d'introduction d'une substance donnée, profil de concentration et durée d'introduction. Le problème inverse, pour sa part, s'intéresse à estimer les valeurs d'entrée inconnues donnant lieu à un état observé pour lequel on ne dispose que de données partielles (*Laird et al.,* 2005). Cet état observé provient de valeurs de concentration mesurées en divers points de réseau où des détecteurs de contamination auraient été installés, et qui seraient déclenchés à différents moments, au fur et à mesure que le contaminant se propage. La difficulté de ce genre de problèmes dits inverses, on le comprend, provient du fait qu'ils sont généralement mal définis (plus d'inconnues que de données). Ainsi, le principal défi consiste en l'obtention d'une solution unique, idéalement, ou à tout le moins d'un nombre restreint de solutions, considérant un nombre très important de possibilités quant aux caractéristiques possibles des sources de contamination (lieu, moment d'occurrence, durée, profil de concentration).

3.2.3.1 Principales études

Les principaux travaux ayant abordé ce problème de façon extensive se sont d'abord concentrés sur l'identification des caractéristiques des sources de contamination en laissant de côté la

question de la localisation des détecteurs (*Guan et al.*, 2006; *Laird et al.*, 2006; *Preis et Ostfeld*, 2006a; *Laird et al.*, 2005). Généralement, ces travaux supposent que les détecteurs sont aléatoirement ou arbitrairement localisés sur le réseau. De plus, à l'instar des travaux présentés à la section 3.2.2.1, ils supposent des détecteurs parfaits et idéaux. Considérant un ensemble de scénarios simples d'injections de contaminants (i.e. se produisant en un seul nœud), *Laird et al.* (2005) ont utilisé la programmation non linéaire afin de minimiser la somme des écarts au carré entre les séries temporelles de concentrations observées et simulées (pour divers scénarios de contamination hypothétiques). Afin de limiter la mémoire et les temps de calcul requis pour les réseaux de grande taille, ils ont élaboré un algorithme de simulation à rebours (*origin tracking algorithm*) efficace. Dans le but de raffiner la formulation précédente et de résoudre les cas d'injections multiples, *Laird et al.* (2006) ont utilisé la programmation quadratique en nombres entiers. *Preis et Ostfeld* (2006a) ont proposé une approche basée sur l'utilisation d'un métamodèle en remplacement des modèles de simulation hydraulique et de qualité de l'eau traditionnels, permettant ainsi de résoudre le problème inverse au moyen de la programmation linéaire lorsque des injections simples sont considérées. Ceci rend la méthode robuste et simple. *Guan et al.* (2006), pour leur part, ont élaboré une méthodologie combinant un outil de simulation (hydraulique et qualité de l'eau) et un algorithme optimal de prédiction-correction afin de minimiser la somme des écarts au carré entre concentrations observées et simulées, tout en favorisant une convergence rapide vers la solution. Des cas d'injections simples et multiples ont été traités par ces auteurs.

3.2.3.2 Développements récents et préliminaires

Tel que le font remarquer *Propato et al.* (2007), tous les travaux précédemment cités permettent d'obtenir une réponse à savoir si, oui ou non, en un site donné (nœud de réseau), se trouve une

source de contamination. En revanche, ils reconnaissent que l'obtention de solutions uniques n'est pas nécessairement garantie (par exemple plusieurs sites peuvent être identifiés comme sources de contamination possibles). L'utilisation d'un modèle statistique semblerait donc plus appropriée pour la résolution de ce genre de problème, où une distribution de probabilités serait associée à chaque source possible, en tant que cause de l'état observé. Dans cet esprit, les mêmes auteurs ont proposé les développements préliminaires d'une approche basée sur l'entropie relative minimale (*minimum relative entropy*), appliquée au cas où le contaminant en cause est conservatif ou possède une cinétique de réaction d'ordre 1 (système linéaire suivant le modèle I/O, section 3.2.2.1).

Une autre des conclusions principales tirées de l'ensemble des travaux présentés à la section précédente est à l'effet que la performance des approches d'identification de sources de contamination dépend de la localisation des détecteurs. Ainsi, en tant qu'objectif complémentaire au problème de localisation optimale de détecteurs (section 3.2.1), *Preis et Ostfeld* (2006b), *Propato et al.* (2006) ainsi que *Tryby et al.* (2007) ont proposé les premières approches permettant de localiser les détecteurs de façon à maximiser les probabilités d'identifier les sources de contamination avec succès. Les premiers ont utilisé un cadre de résolution utilisant un algorithme génétique. Les réseaux sont d'abord partitionnés en zones d'influence au sein desquelles les détecteurs peuvent être placés suivant diverses combinaisons. Les second et troisième ont posé le problème à l'aide de la théorie linéaire discrète. Pour la résolution, ils proposent l'utilisation de méthodes heuristiques (p. ex. le recuit simulé, *Kirkpatrick et al.,* 1983; à noter que leurs travaux ne font pas l'objet d'applications, seul le cadre théorique du problème a été défini).

Connaissant les limites des technologies de détection de contaminants actuellement disponibles, et afin d'ajouter un élément de réalisme aux travaux de *Laird et al.* (2005), *Hill et al.* (2006) ont abordé le problème d'identification de sources de contamination en supposant des détecteurs booléens. Ces derniers n'indiquent que la présence ou l'absence de contamination selon le seuil de détection retenu. De façon similaire, *Preis et al.* (2007a) ont repris le modèle de *Preis et Ostfeld* (2006b) afin d'évaluer et de comparer la capacité d'identifier des sources de contamination lorsque des détecteurs parfaits, flous[25] ou encore booléens sont considérés. Dans le cadre de ces travaux, la procédure de résolution originale (utilisant un algorithme génétique) a également fait l'objet de modifications permettant d'en améliorer la convergence. *Shang et al.* (2007), pour leur part, ont abordé le problème d'identification de sources de contamination en considérant l'incertitude sur les consommations en réseau ainsi que l'existence de fausses observations négatives de la part des détecteurs (non-détection de la contamination alors qu'elle a réellement eu lieu).

Tel que le mentionnent *Propato et al.* (2006), l'un des aspects les plus critiques du problème d'identification de sources de contamination réside dans le paradoxe suivant : à mesure que les données mesurées sont colligées aux détecteurs, le problème inverse devient mieux défini (meilleure connaissance de l'état observé), cependant, l'exposition des usagers à la contamination augmente. À cet égard, *Lansey et Boulos* (2005) proposent une approche de simulation « backtracking-forward » afin d'identifier, dès une première détection de contamination (par des détecteurs s'approchant de la technologie idéale), un ensemble de sources possibles, à partir desquelles un secteur qui inclut toutes les conduites potentiellement contaminées est alors délimité. Une telle analyse est justifiée par une réaction rapide, s'appuyant

[25] L'information fournie par ces détecteurs indique seulement si le niveau de contamination est faible, moyen ou élevé.

sur une stratégie opérationnelle adéquate, afin de mieux protéger la santé publique. L'approche de *Lansey et Boulos* (2005) a aussi fait l'objet d'une discussion récente, où *Lansey et al.* (2007) suggèrent son intégration à la méthode développée par *Laird et al.* (2006). À supposer que l'on souhaite effectivement identifier la source d'une contamination avant d'intervenir, cette méthode modifiée permettrait d'améliorer les temps de calcul en tenant compte de l'information de non-détection (détecteurs non atteints par la contamination), et donc en réduisant la taille de l'espace des solutions possibles. En outre, elle favoriserait l'identification d'un secteur d'intervention dont l'étendue évolue au fur et à mesure que les détections ultérieures se produisent. Ce à quoi *Laird et al.* (2007) répliquent que dans les problèmes qu'ils ont considérés, les temps requis entre le moment d'introduction d'un contaminant en réseau et l'identification de la source de contamination demeuraient relativement courts, soit entre 0,5 heure et 2 heures, même lorsque le nombre de détecteurs supposé était relativement faible (25 détecteurs pour un réseau de 469 nœuds) (*Laird et al.,* 2005). Effectivement, le temps requis pour cumuler l'information nécessaire à la résolution du problème inverse dépend en premier lieu de la densité des détecteurs mais également des caractéristiques du réseau considéré et des technologies de détection employées. *Laird et al.* (2007) mentionnent en outre que l'utilisation de l'approche de *Lansey et al.* (2007) permettrait certainement de réduire la taille de l'espace des solutions possibles mais requerrait une discrétisation temporelle plus fine que celle qu'utilisent *Laird et al.* (2006), par le biais de leur « origin tracking algorithm ». Le bénéfice sur le plan des temps de calcul n'est donc pas si évident. À la lumière de cette discussion, il appert que l'utilité des algorithmes d'identification des sources de contamination devra être mesurée à l'efficacité d'une démarche globale de réponse, dans le cadre d'études futures.

En terminant, n'oublions pas que, à l'instar des travaux sur la localisation optimale de détecteurs, les travaux présentés aux sections 3.2.3.1 et 3.2.3.2 reposent sur l'élaboration de scénarios de contamination et sur l'hypothèse d'une connaissance *a priori* complète des conditions hydrauliques en réseau (au moment de l'occurrence de contaminations et même par la suite). Suite à la détection de contaminations, des avis sur la consommation seront émis à la population et des opérations de réponse seront entreprises. Les conditions d'écoulement en réseau risquent fort d'être complètement modifiées et, au mieux, ne seront que partiellement connues. En lien avec cette dernière question, les travaux de *Koltrun et al.* (2007) et de *O'Halloran et al.* (2006) offrent une piste de solution intéressante. Ceux-ci ont observé que les données colligées par des outils de monitoring en continu de paramètres physico-chimiques de qualité de l'eau (p. ex. température, oxygène dissous, potentiel d'oxydoréduction, pH, conductivité électrique) permettaient d'attribuer des signatures spécifiques à des « parcelles d'eau », suggérant qu'il soit possible de retracer ces parcelles lors de leur transit en réseau. Le potentiel d'application de ces travaux est intéressant notamment pour la calibration de modèles hydrauliques ainsi que pour le suivi et le monitoring en temps réel de la propagation des contaminants en réseau.

3.2.4 Outils disponibles pour la gestion des opérations de réponse aux incidents de contamination

Des outils informatisés ont récemment été développés dans le but d'analyser et de mieux comprendre la vulnérabilité des réseaux d'eau potable face à divers scénarios de contamination. TEVA-SPOT – « Threat Ensemble Vulnerability Assessment-Sensor Placement Optimization Tool » (*Hart et al.,* 2007b*; Murray et al.,* 2004) et PipelineNet (*Bahadur et al.,* 2003) en font partie. Ils permettent d'évaluer, de façon spécifique, les conséquences d'incidents de contamination simulés (i.e. dont la source est connue) sur les usagers de réseaux de distribution

(exposition, transport de contaminants) ainsi que les bénéfices découlant de stratégies diverses de protection telles que la mise en place de CWS. En complément à ces travaux, il importe toutefois de pouvoir définir des stratégies adéquates de réponse afin d'isoler et d'évacuer l'eau des secteurs de réseau contaminés. Les quelques approches développées à ce jour sont décrites dans la présente section.

3.2.4.1 *Baranowski* (2007)

Les travaux de *Baranowski* (2007) représentent la contribution la plus pertinente à ce jour. Dans le cadre de sa thèse de doctorat, T.M. Baranowski a élaboré différentes approches visant à minimiser la concentration d'un contaminant en réseau après qu'il ait été détecté, considérant un horizon temporel de 24 heures. Ces travaux s'appuient sur la modélisation du transport de substances (qualité de l'eau) en réseau et supposent l'existence de détecteurs localisés de façon optimale. Deux réseaux fictifs et simples, présentant des configurations entièrement bouclées, ont fait l'objet de cette étude : une version modifiée de *Epanet example 1*, contenant 11 nœuds et 13 conduites; et *Anytown USA* (*Walski et al.,* 1987), qui contient 19 nœuds et 34 conduites. La localisation des détecteurs de contamination est tirée des résultats de *Ostfeld et Salomons* (2004), qui avaient déjà considéré ces réseaux.

Le rinçage a été examiné dans un premier temps. Mentionnons d'ores et déjà que, dans ces travaux, la notion de rinçage (*flushing* est le terme employé) est définie comme étant la modification des consommations aux nœuds des réseaux. Bien que l'exposé le laisse entendre, l'utilisation de bornes d'incendie n'est jamais explicitement mentionnée. Deux méthodes de solution, soit Newton-Raphson et PEST (*Parameter ESTimation*), ont été utilisées afin d'obtenir des combinaisons de nœuds (ou bornes) auxquels la demande en eau devait être modifiée, tout en

indiquant le débit à imposer à ces nœuds. Au départ, les débits imposés aux nœuds pouvaient varier à chaque pas de temps de l'analyse et des scénarios impliquant des paires de nœuds ainsi que tous les nœuds de réseau ont été examinés. D'autres scénarios, où la demande aux nœuds était modifiée une fois et de façon invariable jusqu'à la fin de la période de simulation, ont également été analysés. Diverses solutions quasi optimales ont été comparées en établissant un compromis entre le débit de rinçage requis et la réduction de la concentration du contaminant en réseau.

Afin d'améliorer la convergence, un algorithme génétique a par la suite été utilisé. Des combinaisons optimales (1) de vannes à fermer, (2) de demandes aux nœuds à modifier et (3) de ces deux types d'opérations ont été générées. Par rapport à ces travaux, notons les points suivants :

- Il est supposé que chaque conduite est munie d'une vanne puisque les réseaux d'étude ne contiennent aucune information à cet égard.
- Chaque fois que la fermeture de vannes est considérée, on ne cherche pas nécessairement à isoler le contaminant mais bien à empêcher son écoulement vers certains secteurs, tout en misant sur la consommation afin d'évacuer l'eau contaminée.
- Lorsque la fermeture de vannes et la modification des consommations sont envisagées, l'objectif n'est pas de chercher d'abord à isoler le contaminant et ensuite de l'évacuer, mais bien d'obtenir une combinaison d'opérations à mettre en place suite à la détection d'un contaminant, sans qu'un ordre d'exécution ne soit indiqué (ce qui suppose que toutes les opérations sont simultanées).
- Diverses contraintes ont été imposées sur les nombres de vannes à manipuler et valeurs de consommation à modifier.

- Ici encore, une comparaison des solutions a été établie en examinant le débit d'évacuation requis *versus* la réduction de la concentration du contaminant en réseau.

Dans le but de bonifier les précédents travaux, les éléments suivants ont également été examinés :

- Prise en compte de délais supplémentaires, entre le moment de détection et la mise en œuvre des opérations de réponse : 2, 4, 8 et 12 heures. Bien entendu, ces délais ont un impact sur l'efficacité d'élimination de contaminants, et les résultats dépendent des temps de parcours en réseau.
- Intégration d'un système d'information géographique afin de tenir compte des usagers critiques (ajout de poids dans la fonction objectif) et de prioriser la réduction des concentrations de contaminant en ces nœuds.
- Ajout de contraintes sur les débits d'évacuation d'eau, dans l'optique où un gestionnaire de réseau chercherait à réduire les coûts associés aux interventions.

Enfin, mentionnons que pour l'ensemble de ces travaux, il est supposé que les consommations aux nœuds sont stationnaires, à moins qu'elles ne fassent l'objet de modifications aux fins d'évacuation du contaminant. Aucune hypothèse quant à l'émission d'avis à la population n'est formulée.

3.2.4.2 *Preis et al.* (2007b)

Dans un esprit similaire, mais dans le cadre d'une étude préliminaire, *Preis et al.* (2007b) ont examiné le problème en considérant deux objectifs conflictuels, soit minimiser le nombre de manipulations de bornes et vannes, et minimiser la masse de contaminant consommée, une heure suivant une première détection. L'approche est basée sur la modélisation dynamique des écoulements et du transport de contaminants conservatifs en réseau. Celle-ci a été validée à

l'aide d'un réseau fictif et squelettisé (section 2.1.4.2), d'envergure toutefois supérieure aux cas considérés par *Baranowski* (2007) (130 nœuds dont un réservoir de stockage et 170 conduites). Ces travaux proposent, encore une fois, des combinaisons de bornes et vannes à manipuler, mais ne donnent aucune indication quant à une progression envisagée de mise en œuvre. En ce qui concerne l'ouverture de bornes d'incendie, un débit fixé au départ est imposé. Cette conception du rinçage est donc équivalente à celle de *Baranowski* (2007). Les détecteurs ont été localisés de façon optimale en utilisant une approche vraisemblablement développée par les mêmes auteurs mais non citée. Au moment où les interventions de réponse sont mises en place, on suppose que les consommations d'eau en réseau sont réduites, suite à l'émission d'avis à la population.

3.2.4.3 H2OMAP Protector

En terminant, mentionnons également l'existence d'un outil informatisé commercial, *H2OMAP Protector* (*MWH Soft* 2007), qui se présente comme une extension d'un outil de simulation hydraulique et de la qualité de l'eau existant. Peu d'informations sont disponibles à son sujet, son développement n'ayant notamment pas fait l'objet de publications scientifiques (et l'outil ne faisant l'objet d'aucune citation). Sur la page web de MWH Soft, on précise toutefois que cet outil permet « d'identifier le nombre minimal de vannes permettant d'isoler un incident de contamination et de minimiser l'impact sur les usagers, de calculer les volumes d'eau à évacuer, de développer des stratégies de rinçage efficientes et d'en évaluer l'impact sur les capacités à combattre les incendies ».

CHAPITRE 4 – Problématique et objectifs de recherche

Les questions émergentes relatives à la sécurité des approvisionnements en eau potable posent de nouveaux défis de recherche et développement en ce qui a trait à la gestion et à l'opération de ces infrastructures. Des stratégies de surveillance et de protection adéquates doivent être élaborées afin de permettre une réponse efficace et rapide face à diverses situations mettant en danger la santé publique, notamment lors de l'occurrence de contaminations accidentelles ou intentionnelles en réseaux de distribution. À cet égard, les chapitres précédents ont exposé les enjeux impliqués de même que les travaux et éléments pertinents retracés dans la littérature scientifique existante. À la lumière de ces considérations, le présent chapitre décrit de façon exhaustive la problématique ayant motivé les présents travaux de recherche ainsi que les objectifs et choix méthodologiques conséquemment établis.

4.1 Problématique et enjeux

D'un point de vue opérationnel, la littérature fournit des directives claires quant aux moyens de réduire la vulnérabilité des réseaux de distribution face aux intrusions de contaminants, en favorisant, d'une part, la mise en place de systèmes de détection en temps réel, et, d'autre part, l'élaboration de stratégies d'intervention à mettre en place suite à la détection. Pour mieux appliquer ces directives et planifier les opérations et ressources nécessaires, des outils analytiques adaptés ont fait l'objet de travaux de recherche récents. La grande majorité des travaux réalisés à ce jour a porté sur l'assemblage d'outils de modélisation des écoulements en réseau et de méthodes de programmation mathématique afin de permettre (1) la localisation optimale de détecteurs de contamination en réseau en minimisant le risque à la détection et/ou (2) l'identification de sources potentielles de contamination (résolution de problèmes inverses).

Ces deux problèmes sont complémentaires mais ils diffèrent dans leur manière de traiter de la question de la détection de contaminants. Dans le premier cas, tout est axé sur la première détection, ce qui sous-entend le déclenchement rapide des premières opérations de réponse suite à cet événement. Dans le second cas, toute intervention est retardée et soumise au délai requis pour colliger les informations ultérieures permettant de résoudre le problème de localisation de la source de contamination. Au cours de ce délai, inévitablement, l'exposition des usagers au contaminant augmente. D'un point de vue de sécurité publique, laisser un contaminant se propager sans intervenir est contraire au principe de précaution. À ce titre, la première option paraît plus appropriée, bien qu'idéalement, les deux approches devraient être combinées.

D'autres travaux, très peu nombreux cette fois, se sont consacrés au développement d'approches permettant de systématiser la démarche à mettre en place en réponse à des situations de contamination en réseau, afin d'assurer un retour à la normale. Un tel processus inclut des opérations visant à empêcher la propagation de contaminants en réseau et celles destinées à évacuer les eaux contaminées. Les quelques études ayant abordé cette question (*Baranowski,* 2007*; Preis et al.,* 2007b) ont cherché à définir des combinaisons optimales de demandes à imposer aux bornes d'incendie et de vannes à fermer, pour des réseaux fictifs (sous l'hypothèse implicite de contaminants non adhérents aux parois des conduites). Ces travaux démontrent entre autres l'utilité potentielle des algorithmes génétiques pour la définition de stratégies opérationnelles d'intervention, mais les applications demeurent limitées à des réseaux simples et les problèmes sont posés d'un point de vue très théorique, en cherchant à généraliser la démarche, au détriment des aspects opérationnels. Or d'après *Morley et al.* (2007), les effets de contaminations sont uniques pour chaque réseau étudié, et c'est pourquoi des solutions uniques sont requises afin de limiter les impacts négatifs de ces incidents. En outre, il est déplorable

qu'aucune hypothèse ne le mentionne clairement, mais visiblement les travaux de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b) supposent que l'ensemble des opérations est effectué de façon simultanée, considérant un délai de réponse d'une durée variable depuis la première détection de contaminants. Une démarche opérationnelle progressive, où l'on procède d'abord à l'isolement d'un contaminant et ensuite à son évacuation, est pourtant recommandée dans la littérature et paraît d'autant plus adéquate. Avant même d'envisager les opérations d'évacuation, des délais supplémentaires seront fort probablement requis, notamment afin de confirmer l'occurrence de contamination et de mettre en place tout équipement nécessaire à la sécurité des ces opérations (environnement, personnel d'urgence). Entre temps, à tout le moins, la progression de la contamination en réseau peut être limitée au secteur préalablement isolé.

Les opérations visant à évacuer une contamination, à elles seules, comportent un ensemble de considérations opérationnelles liées à la sécurité et à l'efficacité de la mise en place. Ces considérations n'ont pas été prises en compte dans le cadre des études de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b) et, à ce titre, la littérature indique que l'emploi du rinçage unidirectionnel (RUD) serait plus approprié.

Enfin, rappelons que la plupart des études réalisées à ce jour (et dont il est question aux paragraphes précédents) reposent sur l'hypothèse de technologies de détection idéales dont les caractéristiques demeurent théoriques. Bien que des développements soient encore attendus en ce domaine, il paraît raisonnable de penser que des technologies s'approchant de cet idéal seront éventuellement disponibles, afin de mieux protéger la santé publique.

4.2 *Objectifs et choix méthodologiques*

À la lumière des considérations exposées à la section précédente, les présents travaux se concentrent sur l'élaboration d'une approche visant à systématiser et à structurer la démarche à mettre en place en réponse aux intrusions de contaminants en réseaux d'eau potable, afin d'assurer le retour à l'opération normale. Plus spécifiquement, les deux objectifs suivants ont été définis :

(1) développer une procédure permettant de délimiter des secteurs de réseau potentiellement contaminés et isoler ces derniers au moyen de la fermeture des vannes appropriées;

(2) développer une seconde procédure permettant de définir les séquences d'opérations visant évacuer l'eau contaminée des secteurs préalablement isolés, au moyen du RUD.

Une planification adéquate des opérations de réponse doit impérativement tenir compte d'un ensemble de considérations pratiques qui relèvent de l'opération des réseaux réels. Conçus au fil des années, leurs configurations, composantes et caractéristiques hydrauliques particulières les distinguent du réseau théorique et idéalement conçu ainsi que des réseaux fictifs souvent considérés dans la littérature. De plus, l'élaboration de stratégies de réponse requiert que les représentations physiques des réseaux soient fidèles à la réalité (en incluant notamment la localisation de l'ensemble des vannes et bornes d'incendie). Ainsi, chaque réseau étant unique, une approche pragmatique a été favorisée aux fins de l'élaboration des procédures de gestion des opérations de réponse. Les procédures reposent chacune sur un ensemble de règles, lesquelles ont été structurées à partir de l'analyse des réseaux de deux municipalités du Québec dont les caractéristiques de conception sont différentes (ces réseaux sont présentés à la section 4.2.2). Sans strictement chercher à définir des stratégies optimales de réponse, les deux procédures sont plutôt heuristiques et conjuguent, d'une part, les considérations théoriques liées à la modélisation

des écoulements en réseaux, et, d'autre part, les considérations pratiques dont dépend une mise en œuvre structurée, efficace et sécuritaire des opérations de réponse. Ainsi, dans le contexte du développement de procédures et d'outils pour la gestion des opérations en réponse aux contaminations de l'eau potable, c'est la prise en compte des aspects opérationnels liés à l'analyse de réseaux réels qui constitue l'originalité principale de la présente thèse de doctorat, par rapport à la littérature récente.

4.2.1 Aperçu général des travaux réalisés dans la présente thèse

En résumé, la figure 4.1 reprend, sous la forme d'un organigramme, les principaux éléments de réponse présentés au tableau 3.1. Les boîtes en bleu indiquent les aspects qui sont considérés dans le cadre de ces travaux et exposés aux chapitres 5 à 8.

Dans l'optique de la minimisation du risque pour la santé publique, on doit supposer, en amont du processus de réponse, l'existence de moyens pour la détection rapide des contaminations. À l'instar des études réalisées précédemment, des détecteurs de contaminants parfaits et idéaux sont ici considérés. La localisation optimale des détecteurs est obtenue en utilisant l'une des approches citées à la section 3.2.2.1. Dès que survient une première détection, l'ensemble du processus de réponse est déclenché. À ce stade, en fonction de la localisation des détecteurs, un ensemble de sources possibles de contamination peut être identifié. Un secteur potentiellement contaminé, dont l'étendue tient compte, de façon agrégée, de chacune de ces sources, est alors délimité (de façon similaire à l'approche de *Lansey et Boulos,* 2005). L'étendue de contamination délimitée à l'aide d'une telle approche est nécessairement plus importante qu'elle ne le serait en réalité, puisque la source exacte du contaminant demeure inconnue. Mais

l'argument d'une réaction rapide et diligente appuie une telle façon de faire, en utilisant au mieux l'information disponible (chapitre5).

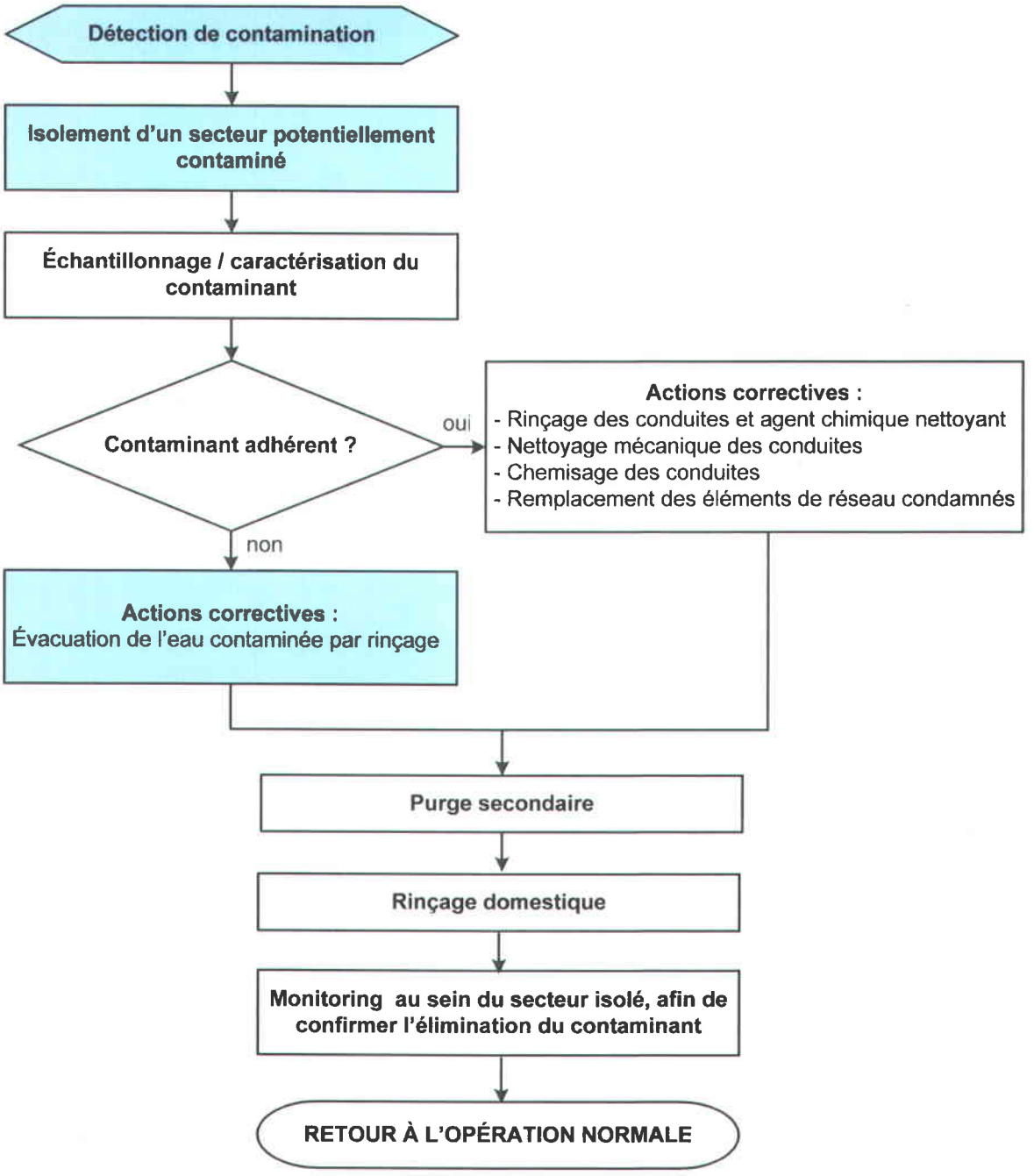


Figure 4.1 : Organigramme présentant l'ensemble des interventions concrètes à mettre en place suite à la détection de contamination en réseau d'eau potable

Contrairement aux quelques études récentes (sections 3.2.4.1 et 3.2.4.2), une mise en œuvre progressive des opérations d'isolement et de RUD est envisagée, et c'est pourquoi deux procédures distinctes ont été développées pour la gestion des opérations de réponse. D'abord, l'isolement vise à stopper rapidement la progression des contaminants au sein des réseaux d'eau potable, tout en permettant, en parallèle, de mener une caractérisation complète de la contamination (identification de la source et de la nature du contaminant, élimination de la source) et d'émettre les avis appropriés à la population concernée (chapitre 6). Ensuite, lorsque les équipements et ressources nécessaires ont été mobilisés, les opérations de RUD sont entreprises. Rappelons que cette technique de rinçage n'a pas encore été examinée, dans la littérature, en matière d'actions correctives. Dès l'instant où des avis sur la consommation d'eau sont émis à la population se trouvant au sein d'un secteur isolé, à moins de disposer d'outils de simulation en temps réel et de suivi de l'évolution des consommations, le déplacement d'une contamination reste difficile à prévoir. Pour des considérations évidentes de sécurité, il est envisagé que la totalité d'un secteur isolé soit soumise aux opérations de RUD (chapitres 7 et 8).

Sans s'être attardés en profondeur, à ce stade, aux questions plus complexes liées à la programmation à l'aide de langages informatiques, les travaux de cette thèse se veulent plutôt une première démarche en vue du développement d'une approche automatisée et applicable à divers réseaux. Éventuellement, une telle approche pourra être intégrée à des outils d'analyse et de gestion des réseaux d'eau potable tels que Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005).

4.2.2 Éléments non pris en compte

Les paragraphes qui suivent apportent des précisions concernant certains des éléments de la figure 4.1 qui ne font pas partie des objectifs spécifiques des présents travaux (boîtes laissées en blanc).

En premier lieu, en ce qui concerne les actions correctives, à l'instar des études précédentes, les présents travaux reposent sur l'hypothèse de contaminants qui n'adhèrent pas à la paroi interne des conduites de distribution, d'où l'emploi du RUD. *A priori*, il n'est pas simple d'identifier, de façon claire, des substances répondant à cette condition. L'adhérence pourra dépendre, entre autres, des conditions physico-bio-chimiques qui prévalent au sein d'un réseau donné (tubercules, biofilm, corrosion, etc.), lesquelles détermineront l'affinité d'une substance donnée pour les conduites. Une telle caractérisation dépasse la cadre de cette thèse, d'autant plus que pour les cas documentés de contaminations, les opératipons de réponse mises en place, peu importe leur nature, sont rarement détaillées. Mentionnons tout de même que, dans certains cas de substances adhérentes, le rinçage pourrait également être employé afin d'acheminer des doses importantes de désinfectant et/ou autre agent nettoyant au sein d'un secteur potentiellement contaminé et préalablement isolé. Ces questions sont abordées très brièvement au chapitre 8 (section 8.4.2).

Ensuite, en ce qui a trait à la purge secondaire, celle-ci comporte deux volets principaux, à savoir : (1) le rinçage de secteurs de réseau qui seraient privés de toute alimentation en eau suite à l'isolement du secteur contaminé, mais dont les eaux ne sont pas contaminées (section 6.2.2); et (2) le rinçage devant les vannes d'isolement fermées. Le premier volet pourra être examiné ultérieurement en prévoyant, par exemple, des procédures classiques de RUD ou de rinçage

traditionnel. Pour ce qui est du second volet, ce point a été soulevé par le Dr *Mark LeChevallier*, dans le cadre d'une communication personnelle (août 2006). D'après ce dernier, avant l'ouverture définitive des vannes ayant servi à l'isolement d'un secteur de réseau, des opérations devraient être entreprises afin de s'assurer de l'absence de contaminant au voisinage immédiat de ces vannes fermées (du côté du secteur isolé ou « devant les vannes fermées »). À la suggestion du Dr LeChevallier, un nettoyage supplémentaire pourra notamment être effectué au moyen d'opérations additionnelles de rinçage.

Enfin, d'après *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007), le rinçage domestique constitue une étape tout aussi importante du processus et visera à évacuer l'eau contaminée des plomberies des résidences, commerces, industries et institutions et/ou à les nettoyer.

4.2.3 Réseaux d'étude

Les réseaux de deux municipalités du Québec ont été considérés, soit celui de Valcourt et celui de Terrasse-Vaudreuil, dont les données nous ont été fournies par Aqua Data Inc. Les modèles physiques, générés au moyen d'Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005), comportent respectivement 303 nœuds / 324 conduites et 206 nœuds / 229 conduites. Il s'agit de « all pipes models » (section 2.1.4.2), puisque chaque tronçon de conduite ainsi que chaque borne et vanne existants y sont représentés (pour ces deux derniers items, voir les point rouges et les cercles verts aux figures 4.2 et 4.3). Les modèles hydrauliques ont été validés en mode stationnaire, sous un schéma de consommation moyenne journalière (CMJ). D'un point de vue topologique, on remarque, en examinant les figures 4.2 et 4.3, que le réseau de Terrasse-Vaudreuil est plus densément bouclé que celui de Valcourt.

4.2.3.1 Réseau de Valcourt

Le réseau de Valcourt est alimenté par une source d'eau de surface unique, représentée par un réservoir à charge constante (Figure 4.2). Il comporte deux secteurs, soit le Canton de Valcourt (trait pointillé à la figure 4.2) et la ville de Valcourt. Seul le second secteur est pris en considération dans ce qui suit (et sera dorénavant appelé « réseau de Valcourt »). Celui-ci alimente une population d'environ 3 400 personnes, par le biais de 20,4 km de conduites. La consommation journalière totale, en moyenne, est de 3 478 m^3 d'eau, dont on estime que 80 % sont destinés aux usagers résidentiels[26]. Les 20 % restants sont majoritairement attribués à un centre de recherche ainsi qu'à une usine de l'entreprise Bombardier (Figure 4.2).

Partant d'une production journalière d'eau connue, des valeurs de consommation agrégées ont été attribuées à 60 nœuds du réseau, lesquels se trouvent au centre de sous-secteurs délimités par Aqua Data (*Chevarie et Grondin,* 2002).

[26] Dans une étude de caractérisation du réseau de la ville de Valcourt effectuée par *Chevarie et Grondin* (2002), on indique que la consommation journalière totale est d'environ 2 260 m^3/j. Nous avons réalisé, quelques temps après avoir entrepris les travaux de cette thèse, que, dans le fichier de données fourni, des consommations totalisant 1 218 m^3/j avaient été ajoutées à certains nœuds (dont les consommations seraient nulles autrement), en tant que prédictions quant à des développements envisagés au sein de la ville de Valcourt. Ces ajouts ont nécessairement un impact quantitatif sur les résultats obtenus mais n'invalident en rien la démarche proposée.

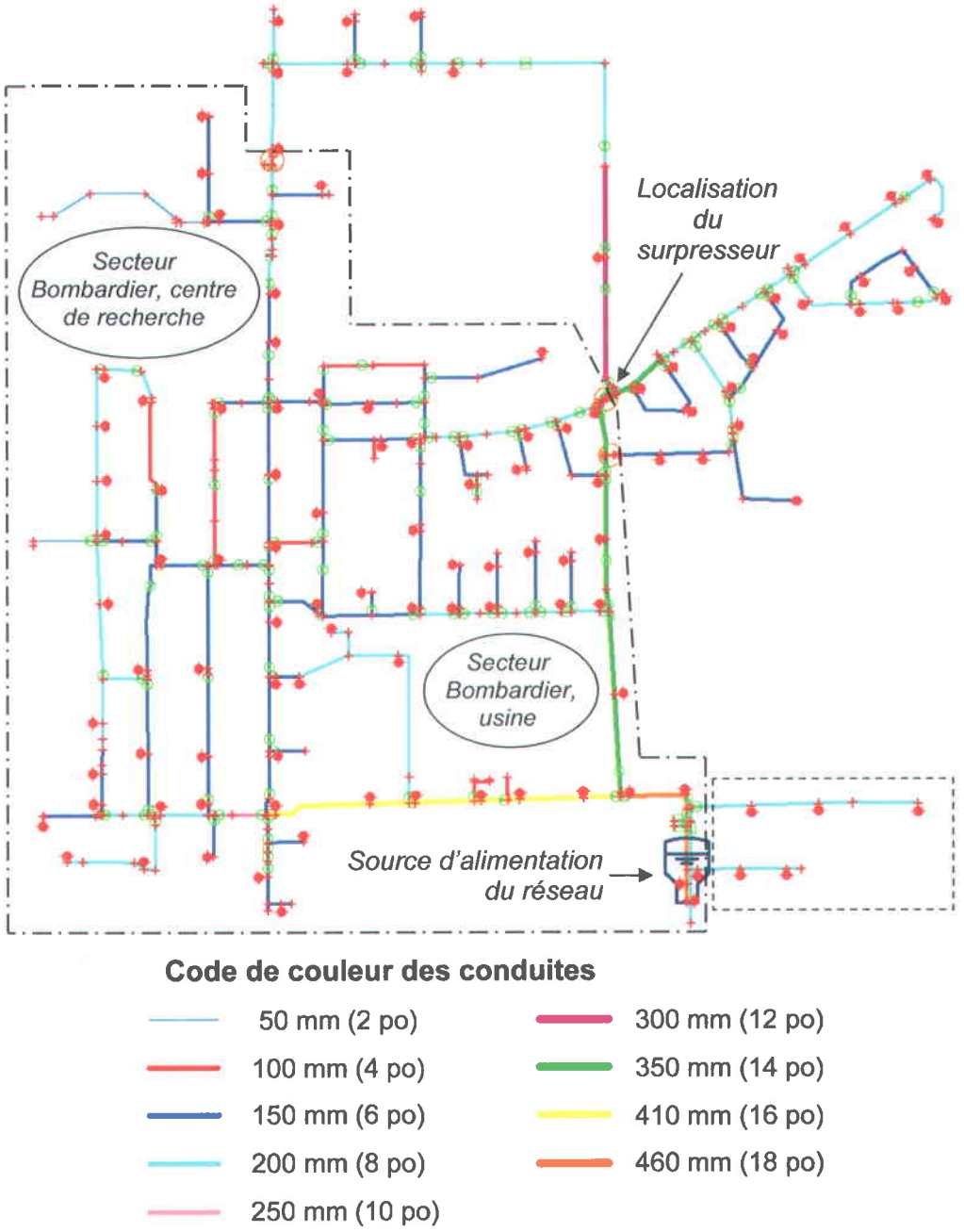


Figure 4.2 : Représentation du réseau de Valcourt. Les croix rouges indiquent les nœuds, les points rouges les bornes d'incendie et les cercles verts et orangés, respectivement les vannes ouvertes et fermées.

La majorité des conduites ont des diamètres de 150 et 200 mm (6 et 8 po), celles dont le diamètre est de 300 mm (12 po) et plus étant essentiellement localisées en tête de réseau (Figure 4.2). Les élévations varient de 197,5 à 233 m et il existe deux zones de pression au sein du réseau, tel que

l'indique le trait point-ligne à la figure 4.2. Les vannes fermées, représentées en orangé[27] ainsi qu'un surpresseur à charge constante (pour les fins de modélisation stationnaire, puisqu'en réalité il s'agirait d'une station de pompage) départagent les deux zones. Sous le patron de CMJ, les vitesses d'écoulement simulées sont en majorité inférieures à 0,2 m/s, et atteignent une valeur maximale de 0,78 m/s (moyenne : 0,062 m/s); les pressions simulées, pour leur part, varient entre 296 et 672 kPa (30, 2 et 68,5 m d'eau). Les nombres de bornes et vannes au kilomètre se trouvent parmi les gammes de valeurs indiquées à la section 3.1.2.5, soit 5,4 et 8,5 respectivement.

4.2.3.2 Réseau de Terrasse-Vaudreuil

Le réseau de Terrasse-Vaudreuil est connexe à celui de la municipalité de Pincourt, de taille beaucoup plus importante. C'est ce dernier qui alimente les usagers de Terrasse-Vaudreuil, via deux clapets unidirectionnels (en jaune, à la figure 4.3), à raison de 762 m^3 d'eau par jour, en moyenne. Quatre-vingt-dix pourcent (90 %) dessert le secteur résidentiel, et 10 % les secteurs industriel, commercial et institutionnel (ICI). Contrairement au réseau de Valcourt, les valeurs de consommations de chaque ICI étaient connues et ont été attribuées aux nœuds correspondants (*Ouimet et Grondin,* 1999). Les consommations résidentielles, pour leur part, ont été attribuées à 65 nœuds suivant la même méthode que pour le réseau de Valcourt (section précédente).

[27] Ces vannes sont fermées en permanence, ce qui engendre la création de BM (section 2.1.4.3).

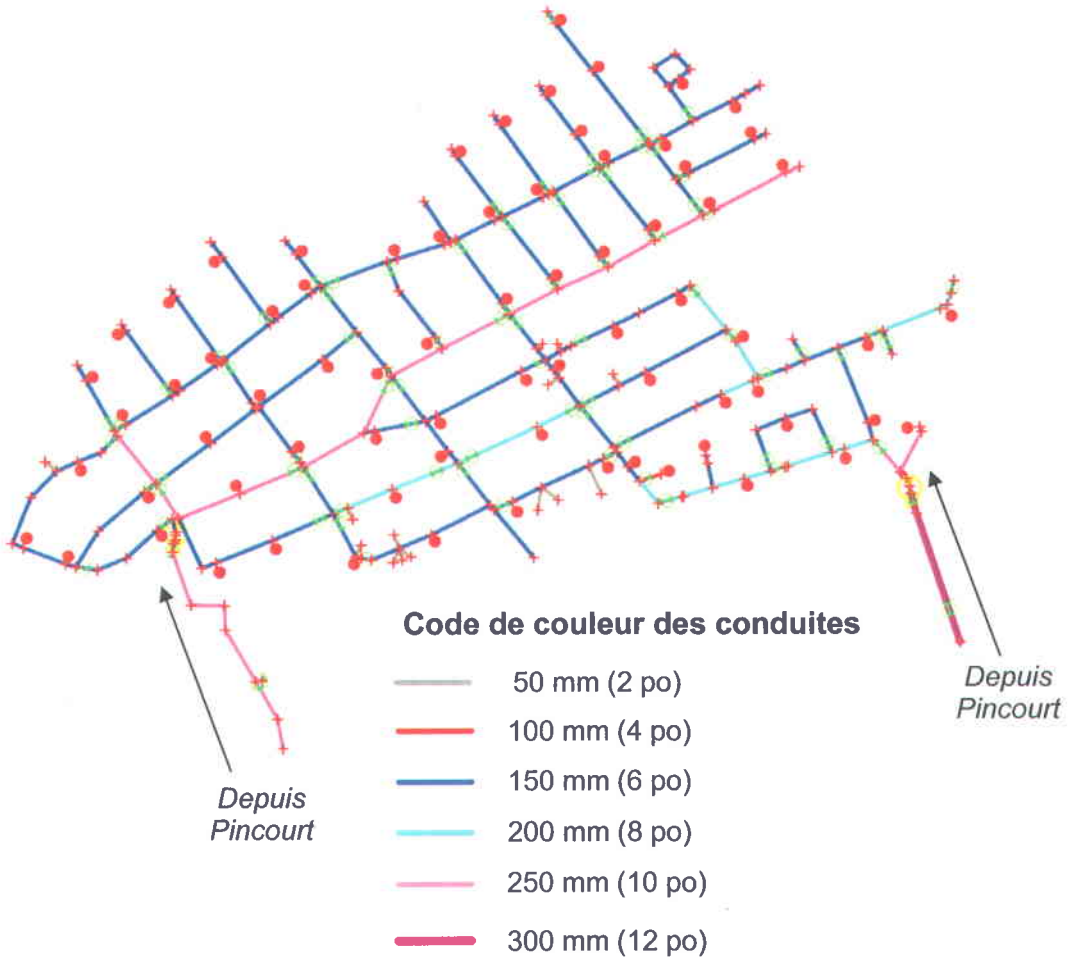


Figure 4.3 : Représentation du réseau de Terrasse-Vaudreuil. Les croix rouges indiquent les nœuds, les points rouges les bornes d'incendie et les cercles verts et jaunes, respectivement les vannes ouvertes et clapets unidirectionnels.

Le réseau de Terrasse-Vaudreuil comporte un pallier unique de pression et les élévations sont comprises entre 23,5 et 27,8 m. Sous le patron de CMJ, les vitesses d'écoulement simulées sont en majorité inférieures à 0,1 m/s, et atteignent une valeur maximale de 0,33 m/s (moyenne de 0,026 m/s); en ce qui a trait aux pressions simulées, elles varient entre 506 et 548 kPa (51,6 et 55,8 m d'eau). Le linéaire de conduites totalise 12,7 km et leurs diamètres sont en majorité de 150 mm (6 po). À noter la présence d'un long tronçon de 250 mm (10 po) de diamètre qui traverse le réseau de part en part, depuis l'un des points d'alimentation de Pincourt. Pour ce réseau également, les nombres de bornes et vannes au kilomètre se trouvent parmi les gammes de

valeurs indiquées à la section 3.1.2.5 et sont respectivement de 5,7 et 6,5. En ce qui concerne les vannes, toutefois, la valeur observée est plus faible pour ce réseau que pour celui de Valcourt.

CHAPITRE 5 – Localisation optimale des détecteurs de contamination

L'existence de détecteurs de contamination fonctionnant en temps réel et localisés de façon optimale a été mentionnée parmi les choix méthodologiques présentés au chapitre 4. Dans le cadre de cette recherche, la détection précoce de contaminations est considérée comme un élément de base à partir duquel s'élaborent les stratégies de réponse subséquentes visant à protéger la santé publique et assurer le retour à la normale.

Utilisant l'approche développée par *Watson et al.* (2004), des détecteurs ont été localisés au sein des réseaux d'étude. Dans les sections qui suivent, l'approche et les hypothèses sous-jacentes sont d'abord présentées, suivies de la validation et des résultats d'application aux réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil. Certains aspects particuliers du modèle de localisation des détecteurs sont l'objet de points de discussion insérés au cours de l'exposé. D'autres éléments sont repris dans une discussion plus générale présentée au chapitre 6, qui porte sur l'isolement de secteurs contaminés.

5.1 Description du modèle de Watson et al. (2004)

L'objectif en cas de contamination en réseau est de réduire au minimum, idéalement à zéro, les volumes d'eau contaminée consommés par les usagers. En contrepartie, la conception de systèmes de détection est inévitablement soumise à des contraintes budgétaires. Considérant un nombre donné de détecteurs, on peut à tout le moins chercher à les localiser de façon à minimiser la consommation d'eau contaminée dès la première détection d'une contamination (pour un ensemble de scénarios donné). Considérant cet objectif, le modèle de *Watson et al.* (2004) a été

utilisé dans le cadre des présents travaux. Il s'agit d'un modèle de nature stationnaire au sens où on l'entend à la section 3.2.2.1, c'est-à-dire basé uniquement sur la réalisation de simulations hydrauliques en régime permanent. Rappelons, dans ce cas, que seules la présence ou l'absence de contaminant aux nœuds du réseau sont simulées, connaissant les temps de parcours de l'eau dans les conduites. Les phénomènes de mélange et de dilution aux nœuds ne sont pas considérés, ni les caractéristiques d'injection des contaminants (durée, profil de concentration, etc.; voir la section 3.2.2.1).

Le problème d'optimisation est posé sous forme de MILP (tel que l'indiquent les équations 5.1 – 5.7 ci-après). Le modèle a été mis en place sur les réseaux d'étude en considérant un seul patron moyen d'écoulement estimé à partir de la CMJ, sur un horizon temporel de 24 heures. Tel qu'il est mentionné à la section 3.2.2.1, les modèles stationnaires (dont celui de *Watson et al.,* 2004) permettent de prendre en compte plus d'un patron d'écoulement, associés à différentes périodes de la journée pour lesquelles les profils moyens de consommations sont connus (p. ex. quatre périodes consécutives de six heures). Les résultats ainsi obtenus sont le reflet d'un comportement moyen, comptabilisé pour l'ensemble de ces patrons distincts. Sans tenir compte des transitions entre chaque patron d'écoulement, ces modèles saisissent, à tout le moins, les effets des inversions de sens d'écoulement, d'un patron à l'autre. Les réseaux de distribution étant des systèmes dynamiques, les impacts d'intrusions d'une contamination se produisant en un nœud donné seront nécessairement différents à chaque période de la journée, suivant les conditions courantes de consommation. En ne considérant qu'un seul patron d'écoulement moyen au cours d'une journée, ces effets ne sont évidemment pas pris en compte. Mais, dans le cadre de la présente thèse, il a été jugé que la prise en compte du seul patron associé à la CMJ était suffisante aux fins d'une première validation de l'approche globale (isolement et rinçage de

secteurs contaminés), d'autant plus que la calibration des modèles hydrauliques des réseaux d'étude repose entièrement sur ce patron. Cette hypothèse de modélisation, bien que simplificatrice, est également utile à la délimitation de secteurs potentiellement contaminés, comme nous le verrons à la section 5.1.4.

5.1.1 Hypothèses sous-jacentes

En plus des hypothèses de modélisation dont il a été question au paragraphe précédent, le modèle de *Watson et al.* (2004) est basé sur les hypothèses suivantes :

(1) Puisque les conditions d'écoulement sont invariantes dans le temps, le moment d'introduction de contaminants en réseau n'affecte pas les calculs de leur propagation.

(2) Les détecteurs sont supposés parfaits et idéaux : aucun bris, capacité de détecter une grande variété de contaminants, à des seuils de concentration infiniment petits.

(3) Une alarme est déclenchée instantanément suite à une première détection de contamination.

(4) De façon cohérente avec l'approche de modélisation adoptée, les contaminants sont nécessairement conservatifs.

(5) La contamination présente un danger pour la santé publique dès le premier instant où elle atteint un nœud de réseau où des usagers sont susceptibles de consommer l'eau distribuée (i.e. par le chemin le plus court depuis une source de contamination).

(6) Puisque les caractéristiques des intrusions de contaminants ne sont pas simulées, l'émission de contaminant en une source donnée est supposée continue jusqu'au moment où les résultats d'une investigation rigoureuse déterminent la localisation de la source (à tout le moins, avant que les opérations de RUD ne prennent place).

(7) La localisation des détecteurs de contamination est limitée aux nœuds de réseau.

De plus, dans le cadre de l'application du modèle aux réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil, les hypothèses suivantes ont été posées :

(8) Il est supposé que les technologies de détection sont suffisamment abordables, économiquement parlant, de façon à ce que des détecteurs puissent être installés en 7 % des nœuds des réseaux (soit respectivement 20 et 15 détecteurs). Ces valeurs demeurent raisonnables en regard des valeurs les plus faibles souvent considérées dans la littérature, lesquelles se situent entre 0 et 7,38 % (section 3.2.2.1).

(9) Les sources de réseau sont déjà protégées par des détecteurs existants et ne font donc pas partie des budgets alloués pour les détecteurs à localiser.

5.1.2 Description de l'approche

D'après le modèle de *Watson et al.* (2004), la fonction objectif (FO) à minimiser est la suivante :

$$F = \sum_{i \in V} \alpha_i \left(\sum_{j \in R^V(i)} d_j \, CT\,(i,j) \right). \tag{5.1}$$

- F représente le volume total d'eau contaminée consommé entre le temps où la contamination atteint chaque nœud et le temps de la première détection, pour l'ensemble des scénarios de contamination considéré (i.e. divers nœuds où la contamination est introduite en réseau).
- V est l'ensemble des nœuds v d'un réseau.
- i et j sont respectivement les indices des nœuds d'où proviennent les contaminations (sources) et des nœuds atteints par une contamination donnée.
- $R^V(i)$ est l'ensemble des nœuds v_j accessibles depuis les nœuds v_i, au cours du patron considéré (et contenant le nœud i).

- α_i est le poids attribué à chaque scénario de contamination dont l'origine est le nœud i; à noter que dans cette thèse, les poids sont supposés égaux pour chacun des scénarios.
- d_j est la consommation par unité de temps au nœud j.
- $CT(i,j)$ est le temps pendant lequel de l'eau contaminée est consommée au nœud j lorsque le contaminant provient du nœud i.

La FO de l'équation 5.1 est assujettie aux contraintes suivantes :

$$s^V \in \{0,1\}^{|V|}, \quad \sum_{v \in V} s^V(v) \leq N_s \tag{5.2}$$

$$DP \in \{0,1\}^{|R^V|+|V|}, \quad \sum_{j \in R^V(i)} DP(i,j) + DP(i,0) = 1 \tag{5.3}$$

$$DT(i) = \sum_{j \in R^V(i)} DP(i,j)\, t_{ij} + DP(i,0)\, \tau \tag{5.4}$$

$$DP(i,j) \leq s^V(v_j) \tag{5.5}$$

$$DP(i,0) \leq 1 - \sum_{j \in R^V(i)} s^V(v_j)/N_s \tag{5.6}$$

$$CT(i,j) \geq 0, \quad CT(i,j) \geq DT(i) - t_{ij}, \quad CT(i,j) \geq \tau DP(i,0) \tag{5.7}$$

Comme il s'agit d'un problème de MILP, certaines des variables de décision indiquées ci-haut ne peuvent prendre que des valeurs entières (s^V, DP) alors que d'autres sont réelles (DT, CT).

- s^V est la variable de décision associée au choix ou non de l'emplacement des détecteurs (nœuds); au terme de la résolution du problème, chaque nœud de réseau est soit muni d'un détecteur ($s^V = 1$) ou non ($s^V = 0$).
- $DP(i,j)$ est associée au choix du nœud de première détection, parmi tous les nœuds j accessibles par une contamination émanant du nœud i; pour un scénario donné, seul le premier nœud atteint (temps de parcours minimum) prend la valeur $DP = 1$ (0 aux autres

nœuds); $DP(i,0)$ est le nœud de première détection choisi dans les cas où la contamination prenant origine en i n'est pas détectée (voir les explications ci-après).

- $DT(i)$ est le temps de détection pour une contamination au nœud i, soit le délai entre le début de la contamination et la première détection.
- t_{ij} est le temps de parcours minimum entre les nœuds i et j (chemin le plus court).
- N_S impose une limite sur le nombre de détecteurs à placer (nombre fourni par l'utilisateur).
- τ est une pénalité, exprimée en unités de temps, qu'on impose pour les scénarios de contamination non détectés au cours du patron d'écoulement considéré (déterminée par l'utilisateur).

En d'autres termes, le premier ensemble de contraintes, à l'équation 5.2, indique que l'on souhaite localiser un nombre N_s de détecteurs aux nœuds d'un réseau donné. En 5.3, on impose que, pour chaque scénario de contamination, un seul site (nœud) détecte le contaminant en premier. Dans le cas où une contamination ne peut se propager à aucun site de détection en-deçà de l'horizon temporel de simulation considéré, on aura $DP(i,0) = 1$ (détection au « nœud bidon 0 »). Incidemment, la contrainte 5.4 impose que le temps de détection soit le temps de parcours (minimum) entre la source de contamination et le site de détection, ou égale à la valeur de τ si la détection se produit au nœud bidon. La contrainte 5.5 impose $DP(i,j) = 0$ s'il n'existe aucun détecteur en aval d'une source de contamination (nœud i). L'équation 5.6 impose qu'il y ait détection lorsqu'un détecteur est accessible depuis une source de contamination. Enfin, les contraintes données en 5.7 concernent le temps de consommation d'eau contaminée, à tous les nœuds j accessibles en-deçà du temps de détection, pour chaque scénario de contamination dont la source est i. Ce temps est : (1) non nul, et soit (2) égal à la différence entre le temps de détection et le temps de parcours vers un nœud j accessible, ou encore (3) égal à la valeur de τ

lorsque la détection se produit au nœud bidon 0. À ce titre, mentionnons que, le nombre de détecteurs étant limité, suivant la configuration d'un réseau ainsi que les temps de parcours de l'eau dans les conduites, il est effectivement envisageable que tous les scénarios de contamination ne puissent être détectés. Cette situation n'est évidemment pas souhaitable puisqu'elle implique, à la limite, que certains usagers ne seront « jamais » avertis que leur eau est contaminée. Par ailleurs, en ce qui concerne τ, en pénalisant les scénarios non détectés, ce paramètre vise précisément à limiter leur occurrence. Toutefois, sa valeur doit être judicieusement choisie puisque l'objectif premier du modèle de localisation des détecteurs est de protéger « rapidement » les points de forte consommation, et non d'éviter à tout prix les cas de non-détection (rappelons que d'autres modèles de localisation des détecteurs se sont concentrés sur ce dernier objectif; voir la section 3.2.2.1). Pour des réseaux tels que ceux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil, une valeur trop élevée de τ risque de faire en sorte que les détecteurs soient majoritairement localisés dans les bouts morts (BM) et que l'on perde de vue l'objectif fixé au départ. Ainsi, à l'instar de *Watson et al.* (2004), la valeur de τ a été fixée à 24 heures, soit la durée de l'horizon temporel considéré. Les résultats, qui seront présentés à la section 5.2, suggèrent que le choix de cette valeur est approprié puisque : (1) bon nombre des détecteurs sont localisés dans des secteurs de forte consommation; et (2) bien qu'un certain nombre de scénarios de contamination ne soient pas détectés, ceux-ci prennent origine dans des secteurs de réseau où leur propagation est très limitée, voire impossible.

Les équations 5.1 – 5.7 ont été programmées (langage C) et mises en forme de façon à être prises en charge par l'outil GLPK (*GNU,* 2006). Pour l'optimisation, un fichier d'entrée utilisable par GLPK doit être généré (format .txt) et inclure : (1) la matrice t (équations 5.4 et 5.7), donnant les plus courts chemins entre toute paire de nœuds du réseau analysé (section 2.1.3); une colonne

additionnelle (la dernière de la matrice) indique, au moyen de valeurs 1 ou 0, les nœuds qui sont considérés en tant que sources possibles de contamination; (2) le vecteur d (équation 5.1), donnant les consommations aux nœuds; et (3) la valeur de τ. La matrice t est générée à l'aide de l'algorithme de *Floyd* (1962), implanté dans Matlab (*MathWorks,* 2007) à partir des données de connexité entre les nœuds du réseau et des temps de parcours issus du logiciel de simulation Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005). Le vecteur d provient également d'Aqua Cad. Tous les traitements et calculs à l'aide de Matlab et GLPK ont été réalisés sur un ordinateur portable de 1 Go de mémoire vive, comportant un processeur de 1,83GHz et sous le système d'exploitation Microsoft® Windows.

5.1.3 Validation du modèle

Avant son application aux réseaux d'étude, le modèle décrit par les équations 5.1 – 5.7 a été validé au moyen d'un cas simple et hypothétique, pour lequel les calculs manuels ont pu être réalisés facilement (Figure 5.1). Nous avons posé $N_s = 2$ et quatre scénarios de contamination ont été considérés, consistant en l'introduction d'un contaminant en chacun des nœuds numérotés de 1 à 4 (Figure 5.1). La matrice t ainsi que le vecteur d sont les suivants :

$$t\ [\text{h}] = \begin{array}{c} \\ \text{indices noeuds } i \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{indices noeuds } j & & & \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccc:c} 0 & 0{,}89 & 1{,}52 & 0{,}75 & 1 \\ 24 & 0 & 0{,}89 & 24 & 1 \\ 24 & 24 & 0 & 24 & 1 \\ 24 & 7{,}49 & 0{,}77 & 0 & 1 \end{array}\right] \end{array} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array}, \quad d\ [\text{L/s}] = \begin{array}{c} \\ \left[\begin{array}{c} 31{,}5 \\ 12{,}6 \\ 31{,}5 \\ 31{,}5 \end{array}\right] \end{array} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array}.$$

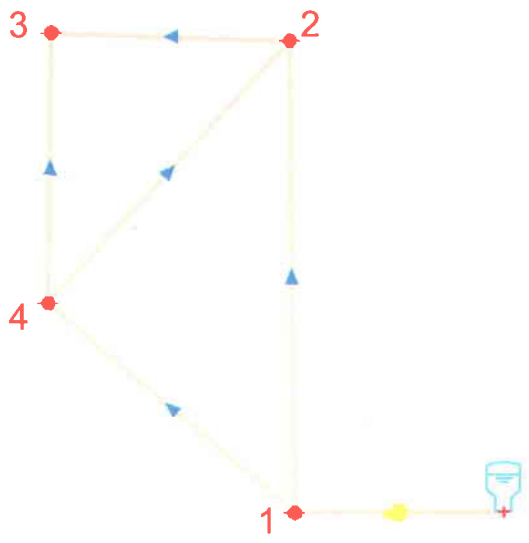


Figure 5.1 : Réseau simple ayant servi à la validation du modèle de localisation optimale de détecteurs (équations 5.1 – 5.7).

La validation a visé d'abord à s'assurer qu'une matrice intermédiaire C, dont chaque élément $c(i,j) = \sum_{j \in R^V(i)} d_j \; CT(i,j)$, ainsi que F (équation 5.1) prenaient les mêmes valeurs lorsque calculées manuellement et à l'aide du modèle. Bien entendu, nous avons également vérifié que les détecteurs étaient localisés aux même nœuds, soit 3 et 4 (voir l'encadré en trait pointillé rouge ainsi que les valeurs soulignées en rouge dans la matrice C, présentée ci-après). Les résultats obtenus pour C et F concordent tout à fait et sont les suivants :

$$C\ [\mathrm{L}] = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array} \overset{\overset{\textit{noeud bidon}}{\downarrow}}{\left[\begin{array}{c:ccc:cc} 0 & 0 & 116802 & 288263 & 85050 \\ 3810240 & \mathrm{na}^* & 0 & 40370 & \mathrm{na} \\ 2721600 & \mathrm{na} & \mathrm{na} & 0 & \mathrm{na} \\ 6531840 & \mathrm{na} & 1611414 & 87318 & 0 \end{array}\right]}, \qquad F\ [\mathrm{L}] = 31355.$$

* na = Noeud j (colonne) non accessible depuis le noeud i correspondant (ligne) en-deçà de τ, en raison des sens d'écoulement ou des temps de parcours. Dans ce cas, la consommation est assignée au noeud bidon, sur toute la durée de l'horizon τ.

Ainsi, lorsqu'un contaminant est introduit au nœud 1 ou au nœud 4, la première détection a lieu au détecteur qui se trouve au nœud 4. Pour les scénarios de contamination aux nœuds 2 et 3, dans chaque cas, c'est le détecteur placé au nœud 3 qui sera déclenché en premier. Dans cet exemple, tous les scénarios de contamination envisagés seront détectés.

5.1.4 Délimitation de secteurs potentiellement contaminés

L'exemple précédent démontre qu'il est possible d'identifier, pour chaque détecteur (première détection), un ensemble de sources potentielles d'où un contaminant peut provenir. Connaissant les temps de parcours en réseau (sous le patron d'écoulement stationnaire associé à la CMJ) ainsi que les temps de détection, et considérant toutes les sources de contamination associées à un détecteur, il est alors possible d'identifier un secteur regroupant l'ensemble des conduites susceptibles d'être contaminées depuis le moment d'introduction d'un contaminant et jusqu'à ce qu'il atteigne le détecteur. Par la suite, l'évolution de l'étendue de la contamination peut être suivie dans le temps, jusqu'à ce que les interventions visant à empêcher sa propagation ultérieure soient mises en œuvre. Pour un réseau donné, on l'aura compris, le nombre de secteurs pouvant être défini est égal au nombre de détecteurs qui y sont localisés.

L'hypothèse 6 posée à la section 5.1.1 indique que l'émission de contaminant depuis une source donnée demeure continue jusqu'à ce que les résultats d'une investigation déterminent la localisation de la source. Cette hypothèse, combinée à la prise en compte de toutes les sources possibles de contamination pour une détection donnée, contribue à accroître l'étendue du panache de contamination par rapport à ce qu'elle serait en réalité, sachant que (1) à la limite, le contaminant pourrait être introduit en réseau suivant un pulse de très courte durée; et (2) la source exacte du contaminant demeure inconnue. Tel qu'il est mentionné à la section 4.2, un tel

choix méthodologique est en accord avec l'idée d'une stratégie de réponse à mettre en œuvre rapidement suite à la détection d'une contamination, en utilisant au mieux l'information limitée dont on dispose à ce moment. En quelque sorte, il s'agit du « pire cas » de secteur contaminé, dans le contexte de modélisation stationnaire que nous avons choisi de considérer (section 5.1.1).

5.2 Résultats de la localisation des détecteurs sur les réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil

À l'aide de l'outil GLPK (*GNU,* 2006), des détecteurs de contamination ont été localisés de façon optimale en 7 % des nœuds des réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil (respectivement 20 et 15 détecteurs, section 5.1.1). Ces densités de détecteurs ont permis la délimitation de secteurs potentiellement contaminés dont l'étendue, au moment de première détection, demeure relativement restreinte et justifie la mise en œuvre d'interventions subséquentes afin de limiter le risque pour la santé publique (plus de précisions sont données à la section 6.1.3).

Excluant les sources d'alimentation des réseaux, 204 nœuds du réseau de Terrasse-Vaudreuil et 166 nœuds pour le réseau de Valcourt ont été considérés en tant que sites (ou sources) de contamination possibles, constituant dans chaque cas un ensemble de scénarios de contamination également probables (probabilités de 1/204 et 1/166, respectivement). Les sources de contamination retenues, pour le réseau de Valcourt, incluent les bornes d'incendie et les intersections de conduites non situées dans des BM de réseau (sections arborescentes), ainsi que les points de consommation. Cette façon de procéder a permis de réduire la taille du problème de MILP, tout en conservant un ensemble de scénarios réalistes. Tous les nœuds du réseau de Terrasse-Vaudreuil ont été pris en compte en raison de sa plus petite taille.

Le tableau 5.1 indique les nombres de contraintes et de variables binaires et réelles associées à la résolution du problème de MILP (équations 5.1 – 5.7) pour les réseaux d'étude. Les temps de calcul ainsi que la mémoire requise y sont également indiqués (pour une résolution à l'aide de l'ordinateur décrit à la section 5.1.2).

Les résultats de localisation des détecteurs sont représentés par les disques de couleur pourpre, aux figures 5.2 et 5.3. Un aspect particulier des résultats obtenus pour Valcourt est à l'effet que 12 des 20 détecteurs (60 %) se retrouvent dans des secteurs sans issue (BM ou boucles). Cette situation n'est que le reflet de la manière dont les valeurs de consommation (agrégées) ont été attribuées aux nœuds du réseau (section 4.2.2.1). Les résultats demeurent valides puisque, dans une optique de protection des usagers, les détecteurs sont nécessairement localisés dans les secteurs où la consommation est la plus importante.

Tableau 5.1 : Données associées à la résolution du problème MILP de la section 5.1.2, pour les réseaux d'étude.

Valeur	Réseau de Valcourt (303 nœuds, 166 scénarios de contamination)	Réseau de Terrasse-Vaudreuil (206 nœuds, 204 scénarios de contamination)
Nombre de variables binaires	7 786	7 027
Nombre de variables réelles	7 483	6 821
Nombre de contraintes	22 450	20 464
Temps nécessaire aux calculs	118,8 sec (2,0 min)	449,5 sec (7,5 min)
Mémoire utilisée	28,8 Mo	29,2 Mo

Tant pour le réseau de Valcourt que pour celui de Terrasse-Vaudreuil, les nombres de détecteurs installés ne permettent pas de détecter la totalité des scénarios de contamination supposés (section 5.1.2). Les scénarios non détectés sont aux nombres de 11 et 59 pour Valcourt et Terrasse-Vaudreuil respectivement, ce qui signifie que 2 % et 14 % des consommations

moyennes journalières ne sont pas protégées. Parmi les scénarios non couverts par les détecteurs sur le réseau de Terrasse-Vaudreuil, 52 (88 %) émanent de nœuds se trouvant dans des BM du réseau. Vingt-six (26) de ces derniers se produisent en des nœuds où aucune valeur de consommation n'a été assignée; rappelons que de tels sites de contamination, dans le cas du réseau de Valcourt, n'ont pas été considérés. Enfin, 25 autres scénarios, parmi les 52, sont associés à des nœuds où la consommation est relativement faible.

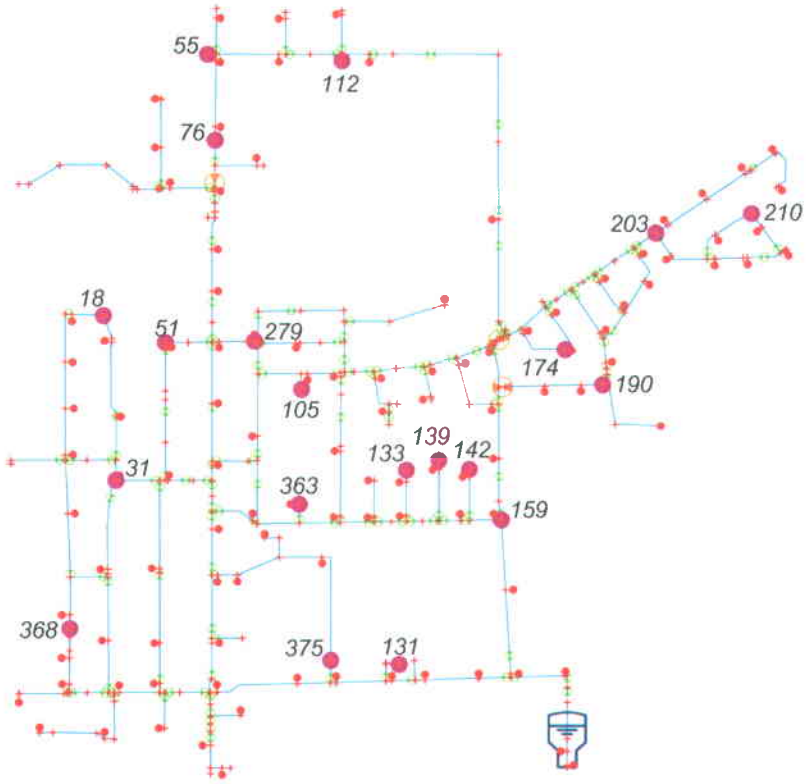


Figure 5.2 : Résultats de la localisation de 20 détecteurs de contamination sur le réseau de Valcourt (disques pourpres). Les détecteurs sont numérotés suivant leur numéro de nœud.

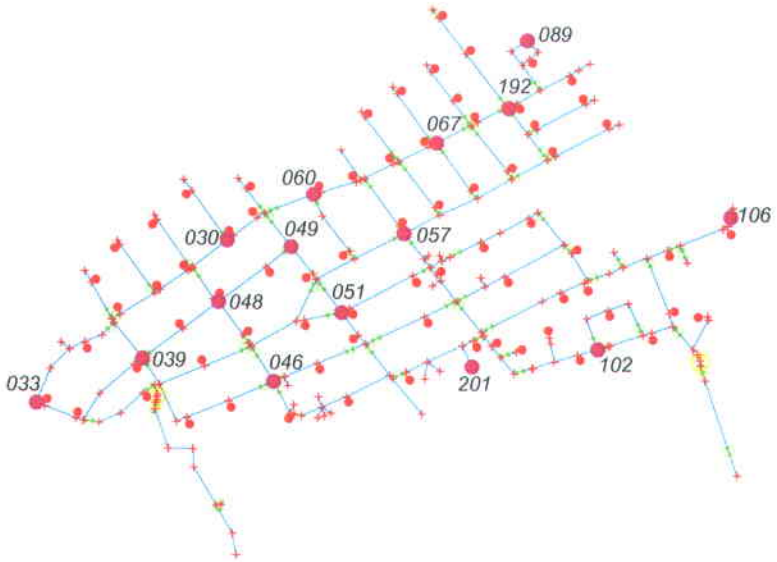


Figure 5.3 : Résultats de la localisation de 15 détecteurs de contamination sur le réseau de Terrasse-Vaudreuil (disques pourpres). Les détecteurs sont numérotés suivant leur numéro de nœud.

CHAPITRE 6 – Isolement des secteurs contaminés

Le chapitre précédent s'est concentré sur la localisation optimale de détecteurs de contamination en réseaux ainsi que sur la délimitation de secteurs potentiellement contaminés, dès que survient une première détection. Connaissant les résultats fournis par le modèle de localisation des détecteurs ainsi que les conditions hydrauliques simulées pour les réseaux d'étude (sous l'hypothèse d'un seul patron d'écoulement), chaque détecteur détermine un secteur potentiellement contaminé dont l'étendue augmente avec le temps. L'isolement de ces secteurs au moyen de la fermeture de vannes est considéré afin de circonscrire rapidement les eaux contaminées et d'en limiter la propagation. L'élaboration d'une procédure heuristique permettant de systématiser ces opérations constitue le premier des deux principaux objectifs de recherche posés au chapitre 4.

Le présent chapitre expose, dans un premier temps, les fondements sur lesquels s'appuie la procédure d'isolement. Un aperçu général de la méthode est présenté sous la forme d'un organigramme dont chacune des étapes est ensuite décrite en détail à l'aide de deux exemples d'application (un exemple pour chaque réseau d'étude). Une synthèse des résultats d'application de la procédure aux réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudeuil est ensuite présentée, suivie enfin d'une discussion.

6.1 Principes sous-jacents

La procédure d'isolement vise à délimiter des secteurs de réseau à isoler ainsi que les vannes devant être fermées à cette fin, en tenant compte, à la fois, de considérations de nature topologique, de critères liés à l'efficacité d'exécution des opérations et de marges de sécurité. À

cet égard, les sous-sections qui suivent décrivent l'ensemble des critères et hypothèses ayant présidé à l'élaboration de la procédure heuristique, laquelle se présente sous la forme d'une suite de règles (section 6.2) à appliquer à tout secteur potentiellement contaminé, délimité au moment de la détection (section 5.1.4).

Afin de mieux comprendre la démarche présentée ci-après, un réseau de distribution doit être considéré en fonction de ses BM, boucles naturelles et tronçons linéaires menant à des boucles en retrait, tel qu'il est suggéré à la section 2.1.4.3 (voir aussi la figure 2.5). Pour le moment, cette conceptualisation repose sur une identification visuelle, mais la séparation de réseaux en ces différents éléments est appelée à être automatisée dans le cadre de travaux futurs (comme le suggère la section 2.1.4.3).

6.1.1 Vannes à manipuler

Parmi les vannes à être identifiées afin d'isoler un secteur donné, deux sont retenues comme sources d'alimentation en eau propre. Ces vannes sont appelées vannes-sources primaire et secondaire. Les activités subséquentes de RUD (rinçage unidirectionnel) seront entreprises à partir de la source primaire. La source secondaire, pour sa part, pourra être potentiellement utilisée au cours du RUD. Lorsque les opérations d'isolement seront exécutées sur le terrain, la vanne-source primaire sera laissée ouverte alors que toutes les autres vannes seront fermées (incluant la vanne-source secondaire).

La sélection des vannes-sources repose sur deux critères essentiels, soit (1) leur grand diamètre (s'il y a lieu, le plus grand parmi toutes les vannes d'isolement identifiées) et/ou (2) leur proximité d'une source d'alimentation en eau du réseau. À noter que, dans certains cas

particuliers, une source d'alimentation de réseau peut remplir le rôle de source d'eau propre pour le secteur isolé (il s'agit alors d'un nœud réservoir ou nœud-source; par exemple, dans le cas de Terrasse-Vaudreuil, il s'agirait d'un nœud-source connexe à un clapet par lequel le réseau est alimenté, figure 4.3).

6.1.2 Structure topologique des secteurs à isoler

Tout secteur à isoler est délimité en cherchant à limiter les contraintes opérationnelles liées à l'exécution subséquente du RUD. En d'autres termes, les vannes d'isolement sont choisies de façon à ce que, idéalement, la totalité de l'eau contenue dans un secteur donné puisse être évacuée aisément et sans qu'il soit nécessaire de modifier son étendue. Ainsi, d'un point de vue topologique, ce secteur sera composé de boucles naturelles de réseau (section 2.1.4.3; voir B1 et B2 à la figure 6.1), auxquelles sont adjacents des BM (Figure 6.1). À partir de ce point dans le texte, l'acronyme BM prendra une signification légèrement différente :

(1) Comme auparavant, il peut s'agir de BM réels (section 2.1.4.3 et trait point-ligne à la figure 6.1 – *Cas 1*).

(2) Il peut également s'agir de BM *artificiels*, créés par la fermeture de vannes pour l'isolement du secteur contaminé, par exemple V2, V6 et V7 à la figure 6.1 (*Cas 2*). La vanne terminale de ces BM peut être soit une vanne-source (trait pointillé court en noir et bleu, figure 6.1) ou une vanne connexe à une borne d'incendie incluse dans le secteur isolé (trait pointillé long en bleu, figure 6.1).

(3) Enfin, il peut aussi s'agir d'un hybride entre les *Cas 1* et *2*.

Suite à l'isolement d'un secteur potentiellement contaminé, il est prévu que le RUD procédera en utilisant les bornes d'incendie se trouvant sur les conduites des boucles naturelles et à la terminaison des BM (réels ou artificiels).

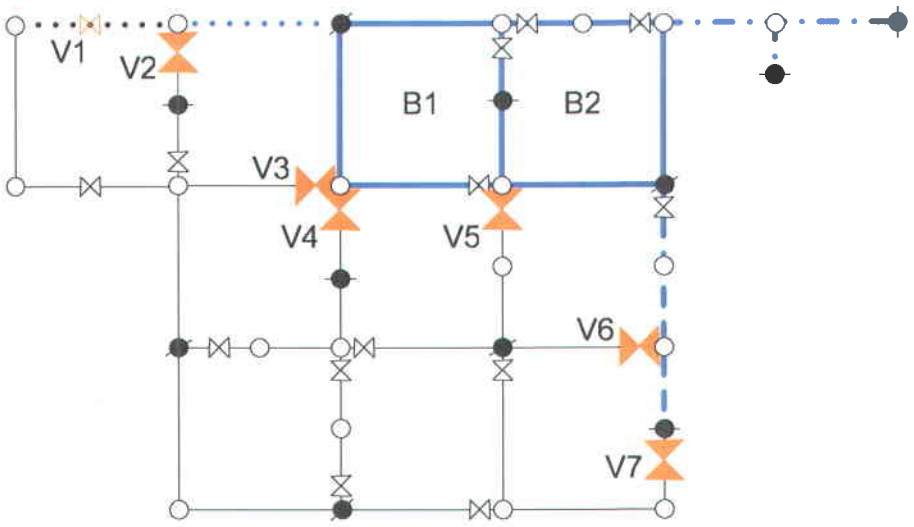


Figure 6.1 : Illustration de la topologie recherchée pour les secteurs à isoler. Les conduites en bleu sont incluses dans le secteur isolé. B1 et B2 désignent les boucles naturelles incluses dans ce secteur. Les vannes V2 à V7, en orangé, sont fermées, alors que la vanne V1 demeure ouverte. Les boucles naturelles B1 et B2 sont incluses dans le secteur isolé. Les points noirs représentent les bornes d'incendie, alors que les points blancs représentent les autres nœuds du réseau.

6.1.3 Sécurité et efficacité des interventions

Tel qu'il est mentionné à la section 5.1.4, le nombre de détecteurs de contamination localisés en réseau joue un rôle important à l'égard de l'étendue de contamination, et donc de l'efficacité d'une première réponse opérationnelle. Forcément, une plus grande densité de détecteurs favorisera une détection plus rapide des contaminants introduits en réseau et tendra à réduire, en moyenne, le nombre de sources possibles de contamination associées à chaque détection[28]. Les densités de détecteurs qui ont été considérées pour les réseaux d'étude ont justement permis de délimiter, au moment de première détection, des secteurs dont l'étendue potentielle demeure, en général, raisonnablement restreinte.

[28] À la limite, si chaque nœud d'un réseau est muni d'un détecteur, la détection est « instantanée » et la source possible de contamination est unique (soit le nœud lui-même).

L'efficacité d'exécution des opérations d'isolement importe également. C'est pourquoi, afin que l'isolement soit complété le plus rapidement possible, il est supposé que l'ensemble des vannes servant à isoler un secteur donné seront fermées simultanément par des équipes d'intervention qui se rendront sur le terrain (voir la section 6.1.4 ci-après, pour plus de détails). De plus, le fait de procéder à la délimitation du secteur à isoler en y incluant essentiellement des boucles naturelles implique que les vannes d'isolement se trouveront souvent adjacentes à (ou « autour de ») ces boucles. Cela permet, dans certains cas, de limiter le nombre total de vannes à fermer.

Dans une perspective de sécurité publique, la procédure d'isolement repose sur la prémisse selon laquelle toute contamination qui est rapidement prise en charge pourra et se doit d'être isolée à l'intérieur même des limites des zones de pression d'un réseau. Autrement, d'un point de vue purement pratique, on pourrait discuter de l'intérêt de la mise en place d'isolement, considérant que dans les réseaux à multiples zones de pression, ces dernières sont déjà délimitées par des vannes fermées ainsi que des stations de pompage et/ou vannes réductrices de pression souvent contrôlées à distance[29].

Enfin, lors de la délimitation des secteurs à isoler, une marge de sécurité est prévue, consistant en une longueur de conduite laissée entre toute conduite potentiellement contaminée et une vanne à fermer (la section 6.1.4 donne des précisions supplémentaires). Celle-ci constitue d'abord une marge de manœuvre pour la réalisation des opérations sur le terrain, puisque la contamination continue de se propager alors que les équipes d'intervention se dirigent vers les vannes

[29] Une contamination peut n'affecter qu'une seule zone de pression ou plus d'une zone à la fois, en supposant dans ce dernier cas qu'elle prenne source près d'une frontière entre des zones voisines. Mais peu importe la situation, on souhaitera, le plus souvent possible, limiter la propagation de contamination avant qu'elle n'affecte trop sévèrement toute une zone de pression.

d'isolement. Et somme toute, elle ajoute un facteur de sécurité, même dans les cas où l'écoulement de l'eau est dirigé à contresens par rapport aux vannes à fermer.

6.1.4 Hypothèses

Les hypothèses sous-jacentes à la procédure d'isolement des secteurs de réseau contenant de l'eau contaminée sont les suivantes :

(1) Les conditions de consommation sur l'ensemble d'un réseau de distribution demeurent inchangées lors de l'exécution des opérations d'isolement du secteur contaminé. Conformément à la progression des activités de réponse indiquée au tableau 3.1 (section 3.1), l'isolement de secteurs contaminés constitue la *toute première* réponse opérationnelle (stade B) et c'est ensuite que débute la diffusion d'avis sur la consommation à la population concernée (stade C). À noter, de plus, que sur la base des estimations réalisées, le temps requis pour la complétion de l'isolement est relativement court (de l'ordre de quelques minutes, voir la section 6.3 – valeurs DIM au tableau 6.1). Par ailleurs, on pourrait envisager un scénario où les avis sur la consommation d'eau sont diffusés et respectés (partiellement ou en totalité) avant que les activités d'isolement ne soient complétées. Dans ce cas, l'impact des avis sur la demande en eau est difficile, voire impossible à évaluer, considérant entre autres que la réponse de chaque usager est difficilement prévisible. L'hypothèse de consommations inchangées (non réduites) représente, dans ce contexte, le « pire cas » et demeure valable.

(2) Suite à une première détection de contamination, un *délai de réponse* est considéré, au cours duquel la contamination potentielle continue de se propager en réseau (toujours sous le régime de modélisation stationnaire considéré à la section 5.1). Ce délai est utile à : (a) la préparation et la mobilisation du personnel et des équipements nécessaires, en supposant

que les équipes d'intervention soient adéquatement entraînées et organisées; (b) la préparation des avis de non-consommation destinés à la population se trouvant au sein du secteur potentiellement contaminé; et (c) la mise en branle de procédures d'investigation approfondie visant à confirmer l'occurrence de contamination. C'est à la fin du délai de réponse que les opérations d'isolement sont initiées. À partir des indications données au tableau 3.1 (section 3.1), le délai de réponse a été fixé à deux heures.

(3) Rappelons que la planification des interventions d'isolement est entièrement basée sur la première détection de contamination. Afin d'intégrer l'information relative aux détections subséquentes, se produisant par exemple durant le délai de réponse, l'approche devra être adaptée. En effet, cet ajout d'information permettrait de mieux préciser le secteur potentiellement contaminé en éliminant des sources possibles de contamination (ce point rejoint les propos de la section 4.1)[30].

(4) Pour chaque municipalité, le schéma du réseau routier est le même que celui du réseau de distribution d'eau potable. La circulation est possible dans les deux sens, le long de chaque tronçon, quoique le fait qu'il y ait des sens uniques puisse facilement être pris en compte et ne changerait rien à l'approche.

(5) Tout service d'eau potable dispose d'une *caserne d'alerte*, où l'information relative à une situation d'urgence est colligée, traitée, et où les équipements et les équipes appelés à intervenir se trouvent. Ces casernes ont été localisées en des points relativement centraux des réseaux d'étude, en supposant qu'elles permettent un accès rapide aux grands axes routiers (Figures 6.3 et 6.4, section 6.2.2). Ces localisations pourraient éventuellement être optimisées, de façon à minimiser les délais associés aux déplacements.

[30] C'est en fait sur ce principe que repose le problème d'identification de sources de contamination introduit à la section 3.2.3. Au fur et à mesure qu'un contaminant se déplace et qu'il « déclenche » des détecteurs, les chemins d'écoulement possibles, et donc la provenance, se précisent.

(6) Les équipes d'intervention se déplacent à une vitesse moyenne de 30 km/h, sur le réseau routier d'une municipalité, et suivant le chemin le plus court entre la caserne d'alerte et chaque vanne à fermer.

(7) Chaque équipe d'intervention est constituée de deux personnes possédant la formation adéquate qui se déplacent dans un véhicule disposant des équipements appropriés.

(8) Toutes les vannes d'un réseau sont supposées accessibles, opérationnelles et étanches. Éventuellement, rien n'empêche que des contraintes à ces égards soient intégrées à l'approche.

(9) Toutes les vannes devant être fermées afin d'isoler un secteur potentiellement contaminé sont manipulées de façon simultanée. Il est sous-entendu que les opérations ne sont effectuées que lorsque chaque équipe est en place, et que le nombre d'équipes d'intervention disponible n'est pas limité.

(10) Un *délai de manipulation* fixe est supposé pour la fermeture de vannes, lequel dépend du diamètre maximal parmi un ensemble de vannes à manipuler simultanément. Pour éviter une perturbation subite des conditions hydrauliques en réseau (coup de bélier), les vannes de plus grand diamètre requièrent nécessairement des temps de fermeture plus importants. Considérant que la majorité des vannes à fermer se trouveront sur des conduites dont le diamètre est inférieur ou égal à 250 mm (10 po), le délai de manipulation est fixé à cinq minutes (suivant une communication personnelle de *Nathalie Periche*, juin 2006). L'appellation *délai d'intervention* réfère au temps total nécessaire à une équipe d'intervention pour se rendre à une vanne (*délai de déplacement* variable) et la fermer (*délai de manipulation* fixe).

(11) À l'extrémité de chaque BM (réel) de réseau qui n'est pas munie d'une borne d'incendie, il existe une vanne permettant de purger l'eau contaminée (*blow-off valve*), suivant en cela les recommandations données dans *Hanson et al.* (2007) et *Friedman et al.* (2005).

(12) La marge de sécurité (section 6.1.3) est fixée à une valeur de temps de parcours du contaminant au moins égale au délai de manipulation, soit cinq minutes (au moins une conduite ou encore un tronçon de conduites, selon le cas). En raison de la petite taille des réseaux d'étude, pour tous les cas analysés, les délais d'intervention sont largement dominés par leur portion fixe de cinq minutes. Ainsi, en première approximation, ce choix de valeur représente un juste équilibre entre l'ajout d'une marge de manœuvre pour l'exécution des opérations sur le terrain et l'extension conséquente du secteur à isoler (d'autres explications sont données aux sections 6.2.2 et 6.4.2).

6.2 *Méthode pour l'isolement de secteurs contaminés*

À partir de l'analyse des réseaux d'étude, les règles de la procédure d'isolement ont été structurées de façon à tenir compte de l'ensemble des éléments présentés aux sections 6.1.1 à 6.1.4. Le réseau de Valcourt a servi à élaborer une première version de la méthode qui a, par la suite, été validée et adaptée avec l'analyse de Terrasse-Vaudreuil. Ce réseau est plus densément bouclé (section 4.2.2.2), ce qui a ajouté un élément de difficulté.

6.2.1 Organigramme général

La figure 6.2 présente l'organigramme général de la procédure servant à planifier l'isolement de secteurs potentiellement contaminés. La méthode comporte trois parties essentielles. La première (étapes 0 à 5) permet de définir une stratégie préliminaire d'isolement. Le secteur à isoler est

délimité et les vannes devant être fermées à cette fin sont identifiées, à partir du secteur potentiellement contaminé deux heures suivant la détection. La seconde partie de la procédure (étapes 6 et 7) vise à vérifier que les équipes d'intervention disposent du temps leur permettant de se rendre aux vannes d'isolement et de les fermer, avant que la contamination potentielle n'atteigne ces dernières. Ensuite, avant l'obtention de la solution finale, l'étape 8 identifie tout secteur de réseau dont l'alimentation en eau sera interrompue suite à l'isolement du secteur contaminé, sans toutefois que l'eau y soit contaminée.

6.2.2 Applications détaillées

Afin de mieux comprendre l'application de la procédure d'isolement introduite à la section précédente (Figure 6.2), deux exemples détaillés sont présentés, le premier tiré du réseau de Valcourt et le second du réseau de Terrasse-Vaudreuil. En complément aux explications données ci-après, l'annexe 2 apporte des précisions et expose certains cas particuliers.

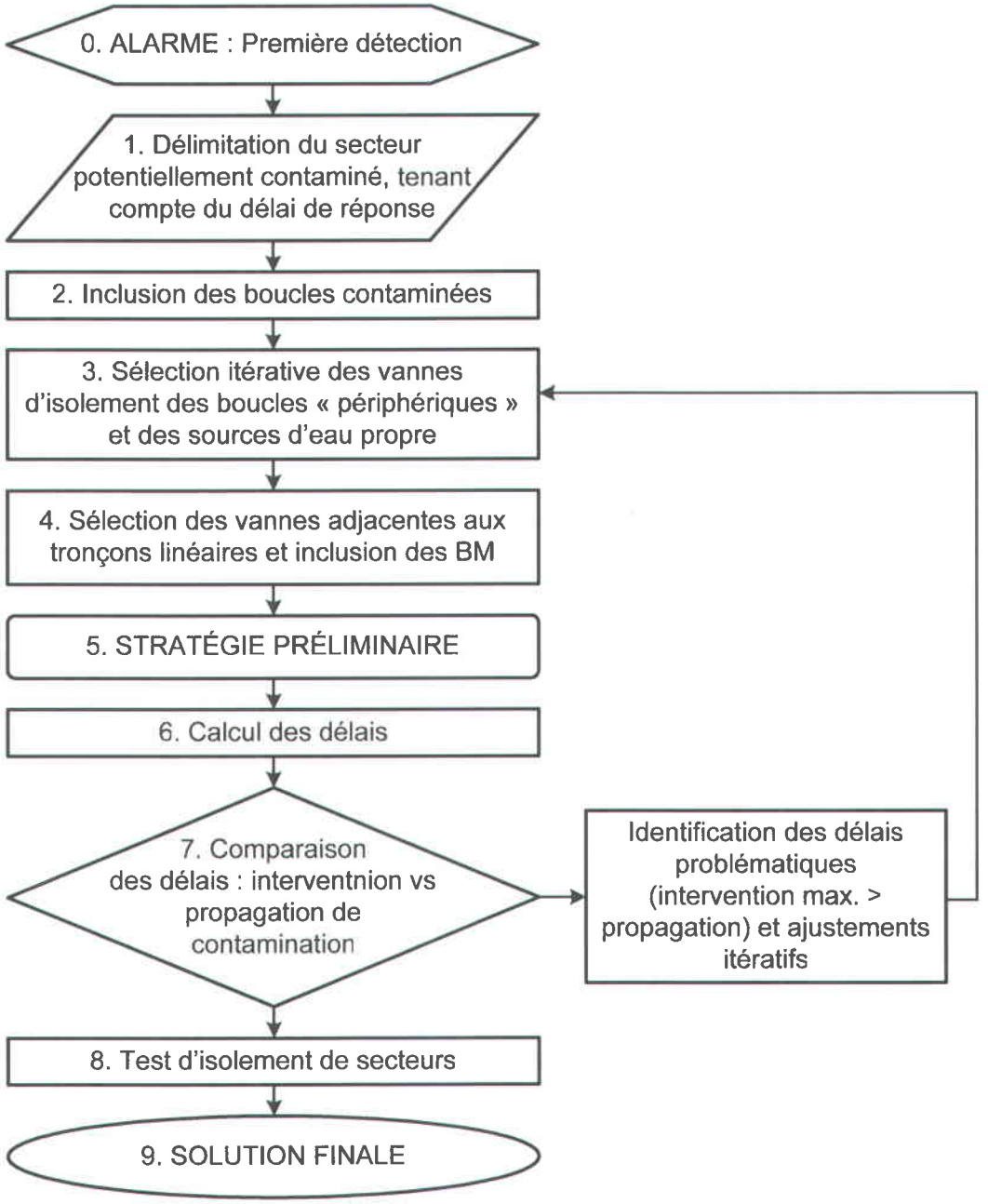


Figure 6.2 : Organigramme présentant la méthodologie pour la définition des opérations d'isolement.

L'application des règles de la procédure est décrite étape par étape et illustrée aux figures 6.3 et 6.4[31].Ces dernières représentent les cas de première détection aux détecteurs 368 et 051 pour les réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil respectivement. Elles ont été produites à l'aide de l'application ArcMap du logiciel ArcGIS (*ESRI,* 2007). Au fur et à mesure que les règles 1 à 4 sont appliquées, des conduites sont ajoutées au secteur à isoler[32]. Ces conduites sont représentées en utilisant la notation PI-*x* correspondante, aux figures 6.3 et 6.4. À noter qu'à partir de ce point dans le texte, les expressions « secteur contaminé » et « contamination » réfèrent indistinctement à l'ensemble des conduites potentiellement contaminées, deux heures suivant la première détection d'un contaminant (hypothèse 2 à la section 6.1.4).

1. Délimitation du secteur contaminé, tenant compte du délai de réponse

À cette première étape de la procédure, le secteur potentiellement contaminé, pour chaque cas traité, est délimité. Ce travail est effectué à partir d'un fichier de sortie produit par GLPK (*GNU,* 2006) et des temps de parcours issus d'Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005), à l'aide de fonctions programmées dans Matlab (*MathWorks,* 2007). Les conduites appartenant à ces secteurs sont représentées par les lignes PI-1 aux figures 6.3 et 6.4.

[31] À l'aide de figures similaires, l'annexe 3 présente les résultats d'application de la procédure d'isolement à tous les cas traités pour les réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil (section 6.3).

[32] D'un point de vue conceptuel, leur état se trouve alors modifié : de « non incluses », elles deviennent « incluses ».

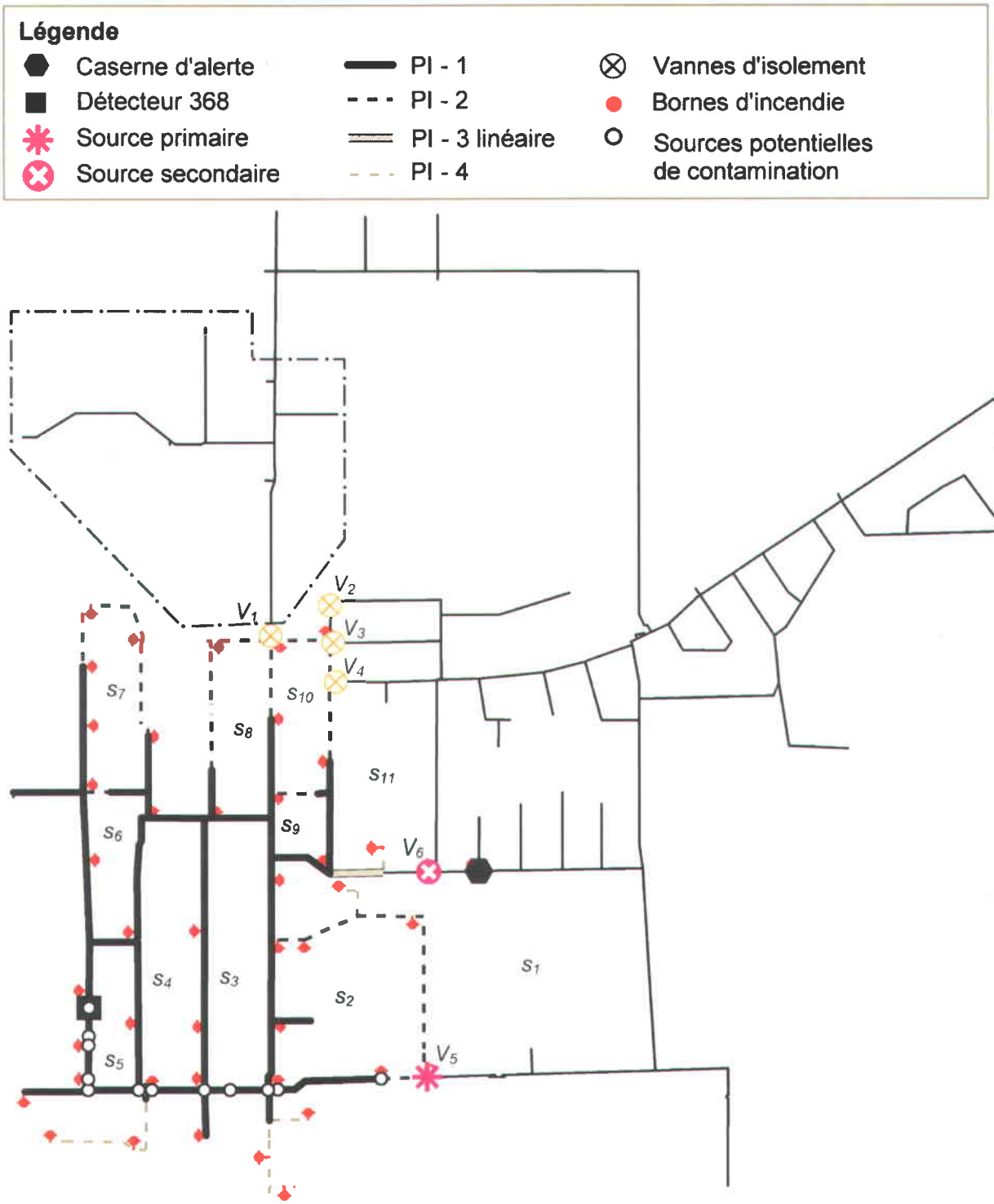


Figure 6.3 : Résultats de l'application de la procédure d'isolement au secteur potentiellement contaminé délimité suite à une première détection au détecteur 368 (D-368), réseau de Valcourt.

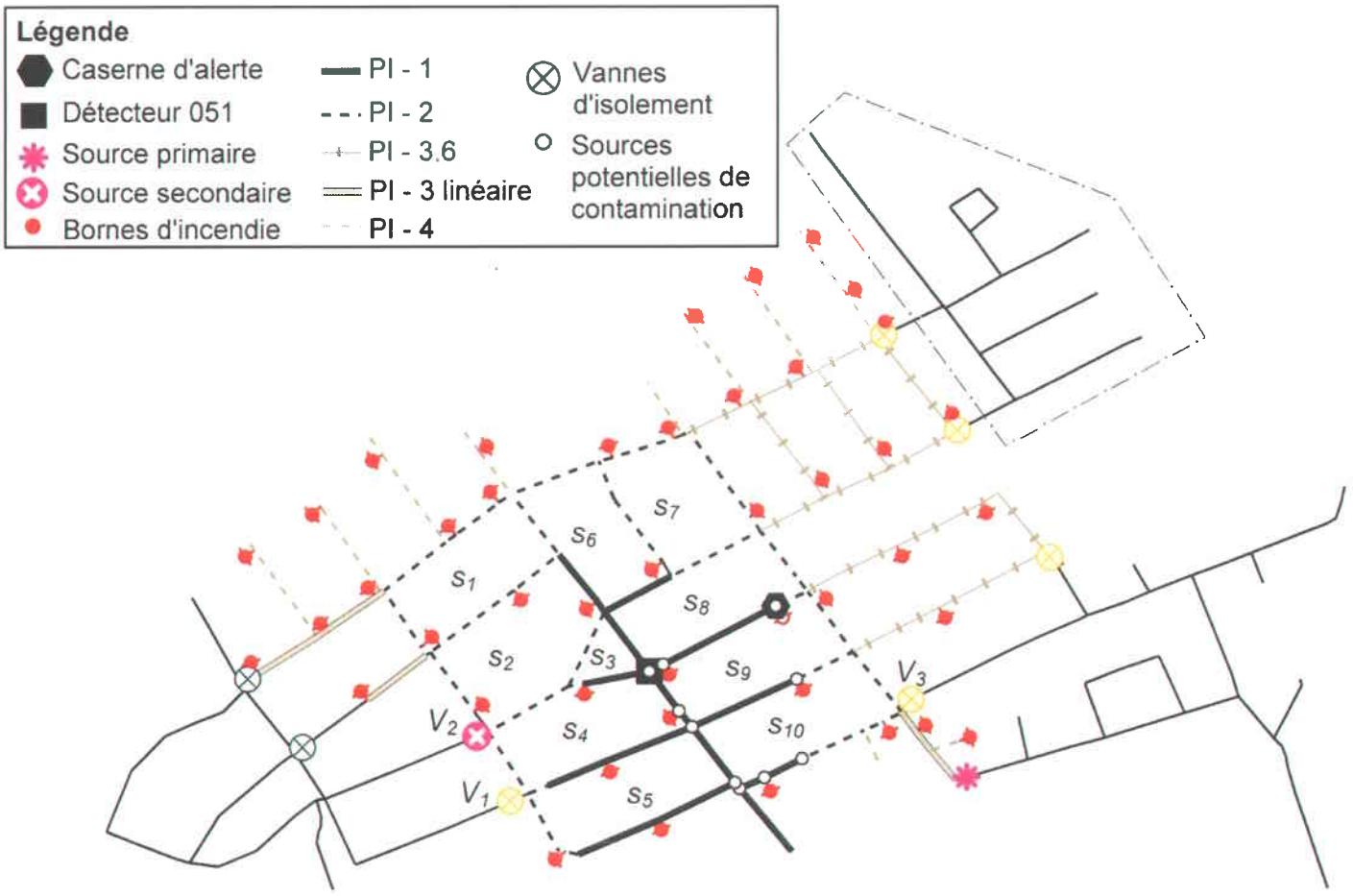


Figure 6.4 : Résultats de l'application de la procédure d'isolement au secteur potentiellement contaminé délimité suite à une première détection au détecteur 051 (D-051), réseau de Terrasse-Vaudreuil.

2. Inclusion des boucles contaminées

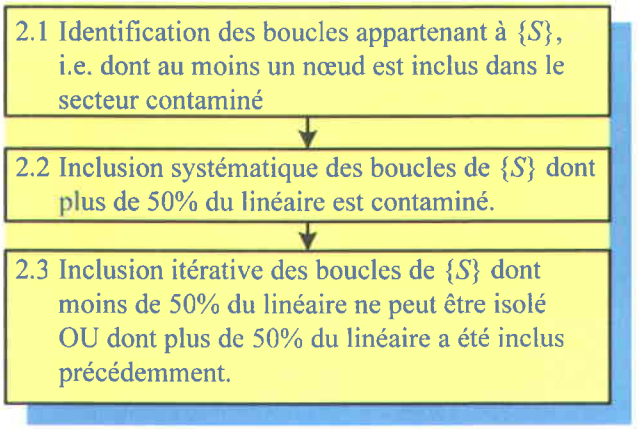


Figure 6.5 : Description de la seconde étape de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2.

La seconde étape de la procédure est structurée suivant trois règles appliquées de façon successive, tel que le montre la figure 6.5. Les boucles naturelles, dont au moins un nœud appartient au secteur contaminé, sont d'abord identifiées (règle 2.1). Ces boucles (et conséquemment leurs conduites) sont spécialement marquées comme appartenant à l'ensemble $\{S\}$ (section 2.1.4.3); elles sont notées s_i, $i \in \{1, \ldots, \ell\}$ aux figures 6.3 et 6.4. Les boucles de $\{S\}$ pourront être incluses au secteur à isoler si :

- d'après la règle 2.2, au moins 50 % de leur linéaire est contaminé, auquel cas l'inclusion est systématique (voir les boucles s_3, s_4, s_5, s_6, s_9 à la figure 6.3, ainsi que s_3, s_4, s_5, s_8, s_9, s_{10} à la figure 6.4);
- ou si, à la règle 2.3, en tenant compte de la marge de sécurité et de toute inclusion précédente, les vannes se trouvant sur les conduites de ces boucles ne permettent pas d'isoler la contamination à l'intérieur de 50 % de leur linéaire ou moins (voir les boucles s_2, s_7, s_8, s_{10} à la figure 6.3, et s_2, s_6 à la figure 6.4); ou encore, considérant les inclusions de boucles précédentes, au moins 50 % du linéaire de ces boucles est contaminé et/ou a déjà été inclus dans le secteur à isoler (voir les boucles s_1 et s_7 à la figure 6.4 et l'annexe 2).

Suite à l'inclusion d'une nouvelle boucle, l'information quant à l'état des conduites doit être mise à jour. L'identification des éléments de $\{S\}$, dès le départ, impose une limite sur les boucles pouvant être incluses dans le secteur à isoler, soit les boucles qui sont rejointes par la contamination (même minmalement, i.e. un seul nœud ainsi touché, tel qu'il est mentionné précédemment). Sinon, à la limite, le processus d'inclusion de boucles pourrait s'étendre à l'ensemble du réseau. Les résultats découlant de l'application de cette seconde étape sont représentés par les lignes PI-2, aux figures 6.3 et 6.4. On peut remarquer, sur ces figures, qu'il n'a pas été nécessaire d'inclure tous les éléments de $\{S\}$, pour l'exemple tiré du réseau de Valcourt (Figure 6.3). Notamment, la localisation des vannes ainsi que la taille relativement importante des boucles s_1 et s_{11} ont permis d'éviter de les inclure. Par contre, en ce qui concerne l'exemple du réseau de Terrasse-Vaudreuil, l'inclusion des boucles naturelles s'étend à tous les éléments de $\{S\}$ (Figure 6.4) puisqu'il n'est pas possible d'isoler autrement.

3. Sélection itérative des vannes d'isolement des boucles périphériques et des sources

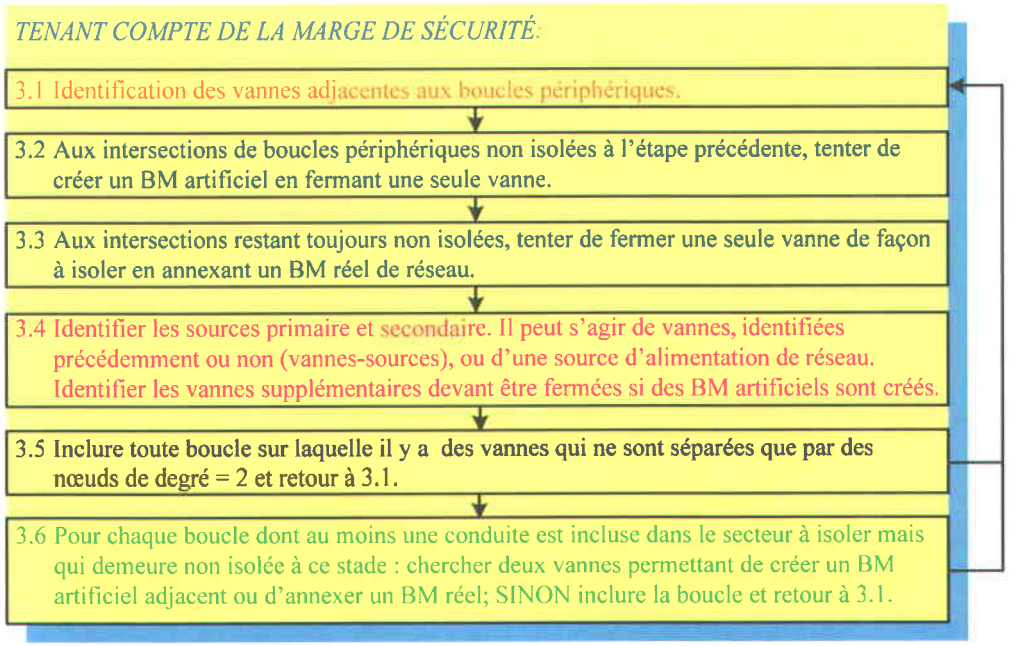


Figure 6.6 : Description de la troisième étape de la procédure d'isolement, présentée à la figure 6.2. Les couleurs du texte réfèrent aux couleurs des vannes d'isolement (Figures 6.3 et 6.4, annexe 3).

À l'étape 3 de la procédure d'isolement, les vannes servant à isoler le secteur bouclé précédemment délimité sont identifiées. Ces vannes se trouvent en périphérie du secteur (voir respectivement les boucles périphériques s_2, s_9, s_{10} et s_1, s_2, s_4, s_5, s_7, s_8, s_9, s_{10} aux figures 6.3 et 6.4) et excluent les vannes se trouvant dans des BM réels adjacents (ces derniers sont traités à l'étape 4 de la procédure). Leur identification est effectuée en appliquant les règles 3.1 à 3.6, indiquées à la figure 6.6. À noter que la marge de sécurité précédemment définie (hypothèse 12, section 6.1.4) s'applique à chacune des ces règles. D'abord, suivant la règle 3.1, les vannes adjacentes aux boucles périphériques sont identifiées (vannes en orangé et numérotées respectivement V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 et V_1, V_2, V_3 aux figures 6.3 et 6.4). Ensuite, aux jonctions toujours non isolées, les règles 3.2 et 3.3 sont appliquées afin d'identifier une seule vanne dont la fermeture permettra de créer soit (1) un BM artificiel dont le nœud terminal est une borne d'incendie (voir la vanne V_6 à la figure 6.3 et les vannes en bleu foncé à la figure 6.4) ou (2) d'annexer un BM réel de réseau au secteur délimité à ce stade (aucune vanne de la sorte identifiée aux figures 6.3 et 6.4). La règle 3.4 vise, pour sa part, l'identification des sources primaire et secondaire, adjacentes au secteur délimité à ce stade. Le choix est effectué sur la base des critères définis précédemment (section 6.1.1), soit le diamètre le plus grand et la proximité d'une source de réseau. Notons que les vannes-sources peuvent faire partie des vannes identifiées par les règles précédentes (3.1 – 3.3). Autrement, elles se trouveront sur des boucles voisines (à moins qu'une source d'alimentation de réseau ne soit retenue, section 6.1.1). Au besoin, des vannes supplémentaires sont également identifiées, servant à créer un segment linéaire par lequel l'eau pourra rejoindre le secteur à isoler (ou BM artificiel, voir le trait pointillé court en noir et bleu et la vanne V2 à la figure 6.1[33]; aucune occurrence aux figures 6.3 et 6.4). Dans les exemples présentés ici, les vannes-sources ont été sélectionnées, respectivement, sur la base de :

[33] Voir également l'annexe 3, plus particulièrement les vannes en rose aux figures présentant les résultats d'application de la procédure d'isolement pour les cas de première détection aux détecteurs 112, 131, 279 (Valcourt) et 039, 046, 048, 060, 067, 201 (Terrasse-Vaudreuil).

(1) leurs diamètre de 400 mm et proximité d'une source de réseau (vannes roses, figure 6.3), et (2) leurs diamètres de 250 et 200 mm (vannes roses, figure 6.4)[34]. Suite à l'application des règles 3.2 à 3.4, des conduites supplémentaires seront incluses dans le secteur à isoler, lesquelles sont indiquées par les lignes PI-3 linéaire, aux figures 6.3 et 6.4.

Les vannes identifiées par des étoiles aux figures 6.3 et 6.4, représentent les vannes-sources primaires, c'est-à-dire celles qui demeureront ouvertes lorsque les opérations d'isolement seront entreprises par les équipes de terrain. La règle 3.4 de la procédure d'isolement permet d'identifier, sans distinction, les sources primaire et secondaire. C'est la procédure pour la définition des opérations de RUD, présentée au chapitre 8 (section 8.2), qui détermine quelle sera, effectivement, la source primaire. Puisque c'est par cette source d'eau propre que les activités de rinçage seront d'abord entreprises, la règle 3.4 constitue, en quelque sorte, un point d'arrimage entre les procédures de planification des opérations d'isolement et de RUD.

La règle 3.5 prescrit l'inclusion de toute boucle sur laquelle des vannes identifiées précédemment ne seraient séparées que par un ou des nœud(s) de degré 2 (ce qui signifie que les vannes se trouveraient le long d'un même tronçon linéaire de conduites et que la boucle serait déjà presque entièrement incluse dans le secteur à isoler, suite à l'application de 3.2 à 3.4; voir l'annexe 2). Après toute nouvelle inclusion, le secteur à isoler se trouve modifié et une itération supplémentaire sur l'étape 3 est requise, où les règles précédentes (3.1 à 3.4) sont réappliquées. La règle 3.5 ne s'applique pas aux exemples des figures 6.3 et 6.4 et n'a trouvé aucune application parmi tous les cas traités pour les réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil, tel que

[34] À la figure 6.3, les vannes V_5 et V_6, identifiées respectivement en 3.1 et 3.3, deviennent des sources. À la figure 6.4, la vanne V_2, identifiée en 3.1, devient une source (voir aussi l'annexe 2).

le mentionne la figure 6.6. Il est envisagé, toutefois, que celle-ci soit utile lorsque d'autres réseaux seront analysés.

La règle 3.6 s'applique aux cas où des jonctions périphériques demeurent toujours non isolées suite à l'application des règles précédentes. Une telle situation prévaut dans le cas de l'exemple de la figure 6.4, où les boucles s_7 et s_9 demeurent non isolées. Ainsi, les vannes se trouvant sur les boucles voisines (partiellement incluses en raison de s_7 et s_9) sont insuffisantes, en ce sens où elles ne permettent pas de rencontrer aucune des conditions d'isolement précédemment établies. Partant de chacune des jonctions non isolées, un ultime effort est déployé afin d'identifier deux vannes qui permettraient de créer un BM (artificiel ou annexé). Si une telle condition ne peut être rencontrée pour chacune des jonctions d'une boucle dont l'isolement est incomplet, celle-ci est incluse au secteur à isoler tel que l'indiquent les lignes PI-3.6 à la figure 6.4. Tout comme la règle 3.5, cette sixième règle de l'étape 3 est itérative et suite à l'inclusion d'une (de) nouvelle(s) boucle(s), les règles 3.1 – 3.5 sont appliquées à nouveau (annexe 2). Dans l'exemple de la figure 6.4, trois itérations ont été nécessaires. Au cours de la première, deux boucles ont été incluses (soit s_7 et s_9), et à chacune des deuxième et troisième itérations, une boucle supplémentaire a été incluse (voir les vannes d'isolement orangées non numérotées obtenues suite à l'application de la règle 3.1). Dans ce cas spécifique, les vannes-sources sont demeurées les mêmes à chaque itération. Tel que le démontrent les figures de l'annexe 3, l'inclusion de boucles supplémentaires n'a été nécessaire que pour les cas tirés du réseau de Terrasse-Vaudreuil.

4. Sélection des vannes adjacentes aux tronçons linéaires et inclusion des BM

La quatrième étape de la procédure d'isolement comprend deux règles (Figure 6.7). Jusqu'à ce stade, la procédure d'isolement s'est concentrée sur l'identification des vannes permettant d'isoler un secteur bouclé. Bien que ce ne soit pas le cas pour les exemples des figures 6.3 et 6.4,

il est possible que des tronçons linéaires ou arborescents doivent encore être isolés. En tenant compte de la marge de sécurité, en 4.1, les vannes d'isolement nécessaires sont identifiées (annexe 2). À la règle 4.2, les BM réels de réseau sont inclus au secteur à isoler (lignes PI-4 aux figures 6.3 et 6.4; annexe 2). D'un point de vue tout à fait pragmatique, la fermeture de vannes supplémentaires dans chacune de ces portions de réseau n'est pas justifiée, d'autant plus que certains BM sont dépourvus de vannes. Rien n'empêche, cependant, qu'une condition supplémentaire soit ajoutée à la procédure afin d'imposer l'isolement de BM dans lesquels des usagers critiques (p. ex. hôpitaux) seraient localisés. Dans une telle situation, les usagers seraient complètement privés d'eau, mais à tout le moins, ne pourraient pas être touchés par la contamination. Il faudrait, dans ces cas, prévoir une source d'alimentation alternative (camion citerne par exemple).

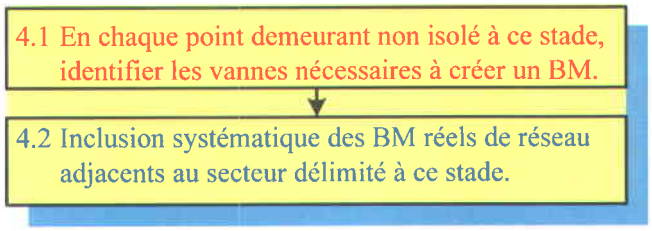


Figure 6.7 : Description de la quatrième étape de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2. La couleur du texte de la règle 4.1 réfère à la couleur des vannes d'isolement et des conduites ajoutées au secteur à isoler, suite à l'application de cette règle.

5. Solution préliminaire

À l'étape 5 de la procédure d'isolement, une solution préliminaire est obtenue. Tel que le mentionne la section 6.2.1, il s'agit d'une première stratégie identifiant les conduites incluses dans le secteur à isoler ainsi que les vannes d'isolement.

6. et 7. Calcul et comparaison des délais : intervention vs. propagation de contamination

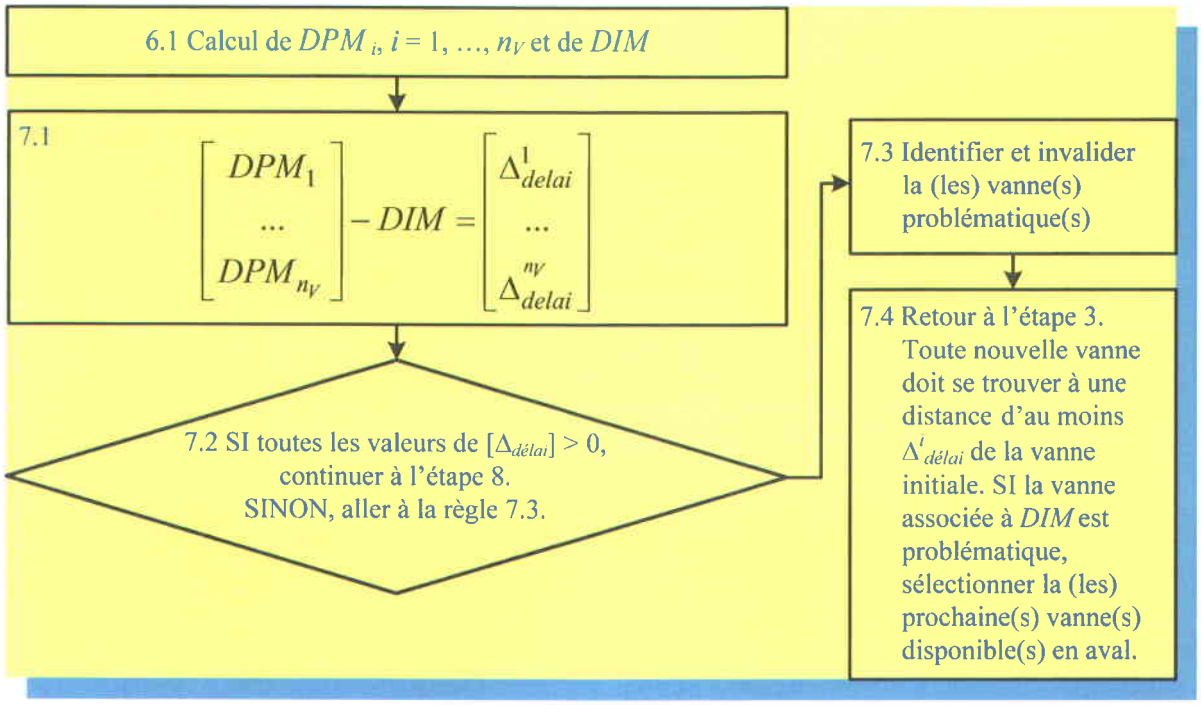


Figure 6.8 : Description des sixième et septième étapes de la procédure d'isolement, dont l'organigramme général est présenté à la figure 6.2.

La solution préliminaire obtenue précédemment doit être vérifiée, aux étapes 6 et 7 de la procédure (Figure 6.8), afin de s'assurer que chacune des vannes d'isolement peut être fermée par les équipes d'intervention avant que la contamination ne les atteigne en considérant le chemin d'écoulement le plus court. Ainsi, suivant la règle 6.1, le délai de propagation minimal DPM_i est calculé pour chaque vanne d'isolement identifiée (vecteur DPM[35] de taille $|n_V \times 1|$; $i = 1, \ldots, n_V$, soit le nombre de vannes d'isolement pour un secteur donné). Des fonctions nécessaires à la réalisation de ces calculs ont été codées dans Matlab (*MathWorks,* 2007). Ensuite, il s'agit d'identifier la vanne dont le délai d'intervention est maximal – DIM (déplacement + manipulation). En supposant que toutes les vannes seront fermées

[35] Le *délai de propagation minimal* correspond au temps de parcours minimal que prend la contamination pour atteindre une vanne à fermer, considérant l'ensemble des chemins d'écoulement par lesquels le contaminant peut y arriver. Il est possible, dans certains cas, qu'aucun chemin d'écoulement ne mène vers une vanne donnée. Le délai de propagation est alors « infini » (*inf*).

simultanément, ce délai impose une contrainte sur le temps de propagation de la contamination, avant qu'elle n'atteigne les vannes à fermer. Le délai de manipulation étant déterminé à l'avance (cinq minutes, hypothèse 10 à la section 6.1.4), le DIM est donc associé à la vanne la plus éloignée de la caserne d'alerte, par le chemin le plus court (délai de déplacement).

À la règle 7.1, chacun des DPM_i est comparé à DIM, donnant lieu au vecteur $\Delta_{délai}$ (de taille $|n_V \times 1|$). Aux endroits où la condition $DPM_i > DIM$ (ou $\Delta^i_{délai} > 0$) n'est pas respectée (règle 7.2), les vannes problématiques sont identifiées et éliminées en tant que candidates possibles pour l'isolement (règle 7.3). En revenant à l'étape 3 de la procédure, de nouvelles vannes doivent être identifiées, se trouvant au moins à une distance $\Delta^i_{délai}$ de la vanne initiale, en matière de temps de parcours du contaminant (règle 7.4). Dans le cas spécifique où le respect de la condition sur les délais fait défaut à la vanne associée au DIM, la (les) prochaine(s) vanne(s) disponible(s) en aval doit (doivent) être identifiée(s), tout simplement. À chaque itération, les calculs sont réinitialisés. Dans les exemples des figures 6.3 et 6.4, la première solution obtenue a été validée aux étapes 6 et 7. Une seule itération a donc été requise. Les valeurs de DIM et du DPM_i le plus faible sont données au tableau 6.1 (section suivante, cas D-368 et D-051). Parmi tous les cas traités pour les réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil, un seul a nécessité une seconde itération. Il s'agit de celui où une première détection se produit au détecteur 51, sur le réseau de Valcourt (D-51 tableau 6.1, où les résultats de la seconde itération sont présentés). Un choix judicieux, pour la valeur de la marge de sécurité, permet nécessairement de réduire le nombre d'itérations requis. Cette marge doit prendre une valeur qui accorde une certaine latitude aux équipes de terrain (d'où la valeur de cinq minutes fixée à l'hypothèse 12 de la section 6.1.4).

8. Test d'isolement de secteurs

Les étapes précédentes de la procédure permettent de définir une stratégie d'isolement étanche, de façon à circonscrire rapidement une contamination à l'intérieur d'un secteur de réseau. L'analyse effectuée à cette fin ne tient pas compte de l'impact des opérations sur le maintien de la connexité hydraulique, à l'extérieur du secteur isolé. Avant l'obtention d'une solution finale, l'étape 8 de la procédure vise donc à identifier les secteurs de réseau qui se trouvent complètement privés d'eau suite à la mise en place de l'isolement, sans toutefois que les usagers de ces secteurs ne soient affectés par la contamination (voir les traits point-ligne aux figures 6.3 et 6.4). Une telle situation s'avère inévitable dans certains cas, selon les configurations des réseaux et des secteurs isolés. Par exemple, à la figure 6.3, la vanne V_1 se trouve à l'amont d'un BM d'envergure relativement importante créé par la fermeture d'une vanne servant à délimiter des zones de pression sur le réseau de Valcourt (Figure 4.2 et annexe 2). Rappelons, à ce titre, la prémisse énoncée à la section 6.1.3, selon laquelle les contaminations sont isolées à l'intérieur des limites des zones de pression des réseaux.

En ayant l'information appropriée en main, les gestionnaires de réseaux seront informés de l'occurrence des secteurs « privés d'eau » et pourront, conséquemment, prendre les décisions appropriées à l'égard de ceux-ci. Par exemple, dans certains cas particuliers tels que celui qui est exposé à la figure 6.9, une vanne (V1) est fermée de façon à inclure un BM-source au secteur isolé, lequel servira de source d'eau propre pour les activités subséquentes de rinçage, par le biais de la source d'alimentation du réseau[36]. Par le fait même, le reste du réseau se trouve entièrement privé d'eau, seul le secteur isolé étant alors alimenté par la source unique du réseau. Or, la contamination indiquée par les lignes pourpres se trouve en aval du BM-source et,

[36] La vanne V1 est identifiée suite à l'application de la règle 3.4 de la procédure. Conséquemment, une seule source d'eau propre (source primaire) est disponible, soit la source d'alimentation du réseau (annexe 2).

hydrauliquement parlant, ne peut s'y propager. Dans un tel cas, des activités d'échantillonnage prioritaires pourraient viser à vérifier et à confirmer l'absence de contamination dans le BM-source, de façon à ce que la vanne V1 puisse rapidement être ouverte et éviter la « fermeture » complète du réseau (voir le cas de première détection au détecteur 131, réseau de Valcourt, à l'annexe 3; voir aussi les cas de premières détections aux détecteurs 046 et 048, réseau de Terrasse-Vaudreuil, à l'annexe 3; dans ces derniers cas, les secteurs privés d'eau sont moins importants puisque le réseau de Terrasse-Vaudreuil possède deux sources d'alimentation).

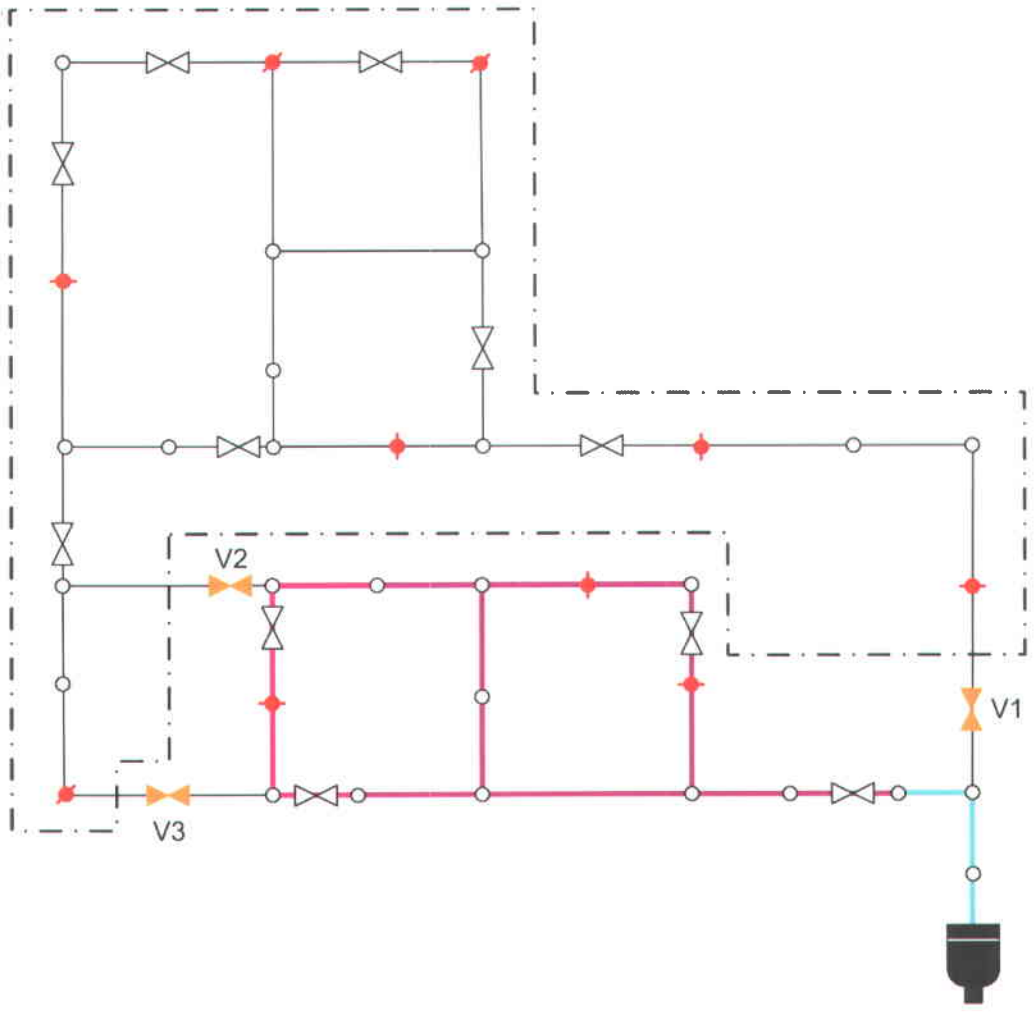


Figure 6.9 : Exemple de cas où une portion importante de réseau est entièrement privée d'eau (trait point-ligne) en raison de la fermeture d'une vanne (V1) servant à inclure un BM-source (en cyan) au secteur isolé. Les conduites en violet représentent la contamination. Les conduites en rose et en cyan sont celles qui ont été ajoutées au secteur à isoler, suite à l'application des étapes 1 à 7 de la procédure d'isolement.

6.3 *Synthèse des résultats*

Suivant la méthode détaillée à la section précédente, 26 cas de secteurs à isoler (13 pour Valcourt et 13 pour Terrasse-Vaudreuil) ont été analysés. Au total, le nombre de cas générés était égal au nombre de détecteurs localisés sur chaque réseau, soit 20 pour Valcourt et 15 pour Terrasse-Vaudreuil. Les cas non traités sont ceux pour lesquels l'étendue de contamination, à la première détection, était confinée à des secteurs de réseau sans issue (donc isolés par le fait même). Une synthèse des résultats obtenus pour l'ensemble des cas analysés est présentée dans cette section, sous forme d'un tableau (Tableau 6.1; voir aussi, en complément, les figures de l'annexe 3).

Un examen du tableau 6.1 montre que l'étendue des secteurs contaminés, deux heures suivant une première détection, varie considérablement d'un cas à l'autre. Rappelons que l'objectif de localisation des détecteurs est de permettre de minimiser le volume d'eau contaminée susceptible d'être consommé au moment de la détection, et non l'étendue de la contamination au sein du réseau. Ainsi, l'ampleur des secteurs à isoler est appelée à varier selon l'importance des valeurs de consommation en amont (considérant les sens d'écoulement) de chaque détecteur. De plus, notons que le délai de réponse (deux heures) n'est pas inclus dans le problème de localisation optimale des détecteurs. La propagation du contaminant au cours de ce délai dépend des sens et vitesses d'écoulement aux frontières des sous-secteurs déterminés par chaque première détection. Ce délai de réponse devrait éventuellement être intégré au problème de localisation optimale des détecteurs, afin que l'impact des contaminations sur la population d'un réseau soit minimisé sur une période qui, de façon réaliste, dépasse le moment de première détection.

Tableau 6.1 : Synthèse des résultats pour l'isolement des 26 cas analysés, réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil (DIM : délai d'intervention maximal; DPM : délai de propagation de contaminants).

Cas analysé	Linéaire (% longueur)		Facteur d'augmen-tation	Nombre de vannes	DIM [h]	MIN {DPM} [h]
	Contaminé	Isolé				
Valcourt						
D-18	7,6	11,3	1,5	2	0,1258	inf
D-31	27,2	54,0	2,0	3	0,1260	1,900
D-51	4,3	14,8	3,4	7	0,1279	2,409
D-105	6,4	13,4	2,1	4	0,1127	0,321
D-112	17,5	27,2	1,6	5	0,1271	0,492
D-131	10,7	27,8	2,6	7	0,1209	0,949
D-133	11,7	25,5	2,2	6	0,1125	0,844
D-142	10,5	25,5	2,4	6	0,1125	0,844
D-159	30,0	55,2	1,8	9	0,1376	0,267
D-279	13,6	27,8	2,0	6	0,1260	1,900
D-363	10,0	18,8	1,9	5	0,1125	0,983
D-368	24,2	40,0	1,7	5	0,1125	0,920
D-375	11,7	25,7	2,2	6	0,1209	0,314
Moyenne	14,3	*28,2*	*2,1*	*5,5*	-	-
Terrasse-Vaudreuil						
D-030	8,3	21,6	2,6	4	0,1112	inf
D-033	3,4	10,6	3,1	4	0,1106	inf
D-039	8,5	31,0	3,6	7	0,1000	1,245
D-046	7,5	24,4	3,3	11	0,1103	2,362
D-048	9,0	52,6	5,9	10	0,1103	3,461
D-049	7,8	44,6	5,8	10	0,1112	2,594
D-051	13,2	59,4	4,5	8	0,1112	0,658
D-057	27,6	80,5	2,9	5	0,1112	2,638
D-060	3,0	27,8	9,3	7	0,1112	9,883
D-067	15,4	24,3	1,6	4	0,1081	1,674
D-102	16,9	40,3	2,4	11	0,1027	0,817
D-192	9,8	24,9	2,5	2	0,0928	inf
D-201	14,6	46,7	3,2	10	0,1024	0,357
Moyenne	11,2	*37,6*	*3,9*	*7,2*	-	-

Le problème de l'isolement de secteurs de réseau étant de nature essentiellement topologique, tel que le font remarquer *Jun et al.* (2007), celui-ci est intimement lié à la conception des réseaux d'eau potable. Les quatre premières colonnes du tableau 6.1 présentent les caractéristiques des

secteurs isolés, pour les cas analysés. Ces caractéristiques sont justement révélatrices de certains aspects quant à la conception des réseaux d'étude. Tout d'abord, le nombre de vannes requis pour l'isolement est en général plus élevé pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil que pour celui de Valcourt. Cela est dû, en grande partie, à une plus grande densité de maillage (nombre de boucles naturelles) par unité de longueur pour Terrasse-Vaudreuil. En effet, dans la plupart des cas analysés pour ce réseau, un plus grand nombre de conduites étaient adjacentes aux boucles incluses dans le secteur à isoler, requérant ainsi un plus grand nombre de vannes d'isolement, à moins que les boucles ne se trouvent majoritairement à la périphérie du réseau (par exemple D-030, D-033, D-067 et D-192 au tableau 6.1 et à l'annexe 3).

Le facteur d'augmentation, au tableau 6.1, compare l'étendue d'un secteur isolé (en pourcentage du linéaire total de réseau) à l'étendue initiale de la contamination deux heures suivant la détection. Ce facteur révèle, qu'en général, l'augmentation de l'étendue des secteurs est plus importante pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil que pour celui de Valcourt. Deux aspects relevant de la disposition des vannes au sein des réseaux d'étude appuient cette observation. D'abord, le nombre total de vannes par rapport au nombre de conduites est plus faible pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil (0,36) que pour celui de Valcourt (0,53). De plus, la règle de base suggérant l'installation d'au moins n-1 vannes en toute intersection de n conduites (section 3.1.1) est moins souvent respectée pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil que pour le réseau de Valcourt. Ces deux caractéristiques contribuent inévitablement à étendre davantage les secteurs à isoler sur le réseau de Terrasse-Vaudreuil et font en sorte que des boucles autres que celles appartenant à $\{S\}$ s'ajoutent (voir les lignes PI-3.6 à la figure 6.4 et aux figures présentant les résultats sur le réseau de Terrasse-Vaudreuil, à l'annexe 3). Dans tous les cas étudiés pour le réseau de Valcourt, les boucles isolées sont toujours incluses dans $\{S\}$, alors que pour Terrasse-Vaudreuil, il n'en est ainsi que pour quatre secteurs isolés seulement (D-030, D-033, D-046 et D-067; voir l'annexe 3).

Deux points importants se dégagent de l'analyse présentée ci-haut. Dans un premier temps, cette analyse pourrait justifier l'apport éventuel d'améliorations aux infrastructures de distribution, afin de réduire les risques pour la santé liés aux incidents de contamination. Par exemple, des vannes jugées essentielles (ou qui seraient fréquemment sollicitées), considérant un ensemble de scénarios d'isolement envisageables, pourraient être ajoutées. Dans un second temps, cette analyse suggère que le réseau de Valcourt, globalement, se prête mieux à l'isolement de secteurs contaminés (voir aussi les figures 6.3 et 6.4). N'oublions pas, toutefois, que la configuration de ces secteurs dépend au départ de la localisation des détecteurs de contamination, laquelle est, dans le cas présent, obtenue par la résolution d'un problème indépendant.

6.4 Discussion

Les sections qui suivent présentent divers points de discussion se rapportant aux méthodes et résultats présentés dans ce chapitre ainsi qu'au chapitre 5. Certaines hypothèses sous-jacentes à la localisation optimale des détecteurs et à la procédure d'isolement sont d'abord examinées. Des considérations relatives aux délais et à la disponibilité du personnel de réponse, dans le cadre de la procédure d'isolement, sont ensuite abordées. La dernière section porte sur la validité générale de la procédure d'isolement. Une discussion plus générale, relative à l'ensemble de la méthode développée dans le cadre de cette thèse, est présentée au chapitre 8.

6.4.1 Hypothèses de modélisation

Les implications de certains des choix méthodologiques et hypothèses posés précédemment (sections 4.2, 5.1 et 6.1.4) sont examinées aux sous-sections suivantes.

6.4.1.1 Simulation du transport de contaminants en réseau

Afin de valider la méthode proposée dans un cadre de modélisation simple, l'on a supposé que les conditions d'écoulement au sein des réseaux d'étude étaient basées sur un comportement stationnaire moyen au cours d'une journée (associé à la CMJ). Or, la consommation résidentielle varie considérablement au cours d'une journée et une telle hypothèse constitue une forte simplification de la réalité. Les variations temporelles des vitesses d'écoulement, et donc les inversions possibles des sens d'écoulement dans les conduites, ne sont pas considérées, ce qui influe nécessairement sur la propagation envisagée des contaminants en réseau : d'abord lors de la recherche d'une localisation optimale des détecteurs; ensuite lors de l'identification des secteurs potentiellement contaminés (étape 1 de la procédure d'isolement); et lorsque les opérations d'isolement sont en cours. Notamment, si le patron qui prévaut au moment de la détection diffère du comportement moyen supposé, il est possible que les opérations d'isolement ne soient pas correctement définies et donc qu'une partie de la contamination ne soit pas adéquatement isolée.

En tant que première modification simple, quatre patrons d'écoulement consécutifs au cours d'une journée (d'une durée de six heures chacun) pourraient être considérés, s'appuyant sur la logique des modèles stationnaires de localisation optimale de détecteurs (section 3.2.2.1). Le modèle de *Watson et al.* (2004) pourrait toujours être utilisé afin de localiser les détecteurs. Une dimension supplémentaire s'ajouterait aux calculs, associée aux divers partons d'écoulement (p = 1, …, P, où P est le nombre de patrons), et la fonction objectif prendrait la forme suivante :

$$F = \sum_{i \in V, p \in P} \alpha_{ip} \left(\sum_{j \in R^V(i), p \in P} d_{jp} \, CT\,(i,j,p) \right),$$

où R^V représenterait l'ensemble des nœuds v_j accessibles depuis les nœuds v_i, au cours de chaque patron p. Les contraintes 5.2 – 5.7 seraient également ajustées en conséquence (tel qu'il est indiqué dans l'article de *Watson et al.,* 2004). Les détecteurs seraient alors localisés considérant un comportement moyen, comptabilisé pour l'ensemble des partons d'écoulement distincts (section 5.1).

Des stratégies d'isolement différentes pourraient ensuite être définies pour chaque patron d'écoulement. Les secteurs contaminés seraient délimités en considérant l'ensemble des sources potentielles de contamination pour le patron le plus réaliste au moment de la détection. En fait, le patron unique d'écoulement que nous avons considéré pourrait s'inscrire parmi un ensemble de patrons envisageables au cours d'une journée. Les modifications ici proposées n'auraient aucun impact sur la structure de base et l'applicabilité de la procédure d'isolement.

6.4.1.2 Densités de détecteurs

Considérant l'état actuel des connaissances en ce qui a trait au développement de technologies de détection ainsi que le coût d'acquisition élevé des équipements disponibles (dépassant les 10 000 $ l'unité), l'installation de détecteurs en 7 % des nœuds de réseaux d'eau potable (soit 15 à 20 pour les réseaux d'étude) ne s'avérerait aujourd'hui pas abordable, d'un point vue économique (sections 3.2.1.1 et 3.2.1.2). En revanche, n'installer que quelques détecteurs, par exemple deux ou trois, ne présente aucun intérêt, en pratique. Dans ce cas, il s'agirait de les placer aux endroits de grande consommation et où se trouvent des usagers critiques (p. ex. les hôpitaux). Une telle stratégie n'est pas en accord avec le concept de système d'alerte rapide (EWS) dont l'objectif est de mieux protéger l'ensemble d'une communauté de possibles contaminations de l'eau potable (section 1.3).

À terme, lorsque les technologies de détection atteindront des stades de développement plus avancés, elles deviendront, souhaitons-le, plus accessibles. De plus, le développement de technologies de plus en plus fiables devrait justifier davantage l'investissement monétaire.

6.4.1.3 Condition physique des éléments de réseau

L'application de la procédure d'isolement, dans sa forme actuelle, suppose que l'ensemble des vannes d'un réseau est fiable et opérationnel à 100 %. Ce n'est cependant pas souvent le cas dans la réalité : certaines vannes sont inopérables ou même introuvables, d'autres ne sont pas étanches. Les municipalités qui adoptent de saines pratiques de gestion des infrastructures de distribution maintiennent des registres quant à la condition des éléments de réseau tels que les bornes et les vannes. Lorsque des opérations sont effectuées en réseau, par exemple des campagnes de rinçage, les éléments défectueux sont identifiés. Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005) comporte, à cet effet, un module spécialement conçu pour la gestion de la condition des bornes et vannes. À partir des données contenues dans un tel module, des contraintes quant à la disponibilité des vannes pourraient être ajoutées dans l'analyse et l'impact sur l'étendue des secteurs à isoler pourrait ainsi être évalué. Bien entendu, il est à souhaiter que les composantes défectueuses fassent l'objet d'une attention particulière et qu'elles soient remplacées ou réparées en priorité. Dans cette optique, la procédure d'isolement pourrait aussi permettre d'identifier des vannes critiques dont l'entretien serait prioritaire.

6.4.1.4 Niveau de détail des modèles de réseau

Par rapport aux études réalisées précédemment (*Baranowski,* 2007; *Preis et al.,* 2007b), l'approche présentée dans ce chapitre se démarque, entre autres, par le fait qu'elle repose sur l'utilisation de modèles de réseaux suffisamment détaillés, où chaque vanne est représentée (et

donc chaque conduite). L'application du modèle de localisation des détecteurs et de la procédure d'isolement aux réseaux d'étude n'a fait l'objet d'aucune contrainte, en raison de leurs tailles relativement petites. Dans le cas de réseaux de plus grande taille, dont les représentations physiques risquent d'être simplifiées (*skeletonized*, section 2.1.4.2), l'applicabilité de l'approche devra être examinée en considérant les éléments suivants :

(1) L'impact de la squelettisation sur la localisation des détecteurs. Dans le cadre d'une étude préliminaire, *Janke et al.* (2007) ont noté que cet aspect avait peu d'influence sur la comptabilisation des impacts moyens et maximums sur la santé des usagers (fonctions objectifs) et sur la localisation des détecteurs. Cette question devrait néanmoins être étudiée plus en profondeur puisque chaque réseau est différent.

(2) Les modèles simplifiés n'incluent forcément pas toutes les vannes existantes. En l'absence d'information complète quant à la localisation des vannes, les secteurs à isoler tendront à s'étendre davantage par rapport à ce qu'ils seraient en réalité. Dans ce contexte, à la limite, la procédure d'isolement pourrait être utilisée afin d'identifier un ensemble virtuel de vannes à manipuler, lesquelles seraient ensuite traduites en fonction des meilleures opérations réelles envisageables. Cette question pourrait être examinée de concert avec l'identification de vannes critiques (donc à maintenir dans les modèles).

6.4.2 Considérations sur les délais et la disponibilité du personnel d'intervention

Les hypothèses posées quant aux délais de réponse et d'intervention ont un impact sur les résultats obtenus. Tout d'abord, en ce qui a trait au délai de réponse, il correspond, rappelons-le, au temps écoulé entre le moment de première détection et le moment où les opérations d'isolement sont mises en branle. Il a été fixé à deux heures en supposant que cette période était allouée à la préparation et à la mobilisation du personnel et autres ressources requises, tout en

initiant, en parallèle, un processus d'investigation/confirmation de l'occurrence de contamination. La valeur du délai de réponse pourra bien entendu varier d'un réseau à l'autre, selon la taille du réseau, selon les conditions hydrauliques, notamment les vitesses d'écoulement, et en fonction de certaines conditions particulières prévalant au moment où l'alarme est déclenchée. Mais comme l'indiquent *Murray et al.* (2006), une augmentation trop importante de ce délai tend à annuler l'utilité des outils de protection tels les CWS et celle des stratégies de réponse. Les gestionnaires de réseaux devraient chercher à minimiser le délai de réponse en améliorant les capacités à réagir adéquatement aux situations d'urgence, par exemple, en mettant en place et en respectant un calendrier d'entretien précis, et en effectuant des exercices visant à mieux préparer et coordonner les équipes de terrain.

En ce qui concerne les délais d'intervention, ils représentent le temps requis pour la fermeture de chacune des vannes, incluant le déplacement depuis la caserne d'alerte et la manipulation sur le terrain. En supposant que toutes les vannes sont fermées de façon simultanée, la durée totale des opérations est déterminée par la vanne la plus éloignée de la station d'alerte (section 6.2.2). Rappelons également qu'une vitesse de déplacement de 30 km/h a été supposée. En lien avec ces considérations, les éléments suivants se dégagent :

(1) La taille des réseaux d'étude étant relativement faible, les distances de déplacement y sont généralement petites et les délais d'intervention requis pour l'isolement de secteurs contaminés sont inférieurs à neuf minutes pour tous les cas analysés. Ces caractéristiques, combinées au fait que l'eau s'écoule à une vitesse beaucoup plus petite (de l'ordre de 0,36 – 0,72 km/h) que les équipes d'intervention, expliquent la relative efficacité de la procédure dans le cas des réseaux sous étude. Pour d'autres réseaux, des hypothèses différentes devraient être testées, en ce qui a trait par exemple aux vitesses de déplacement et à la marge de sécurité.

(2) L'hypothèse d'exécution simultanée des fermetures de vannes implique qu'un nombre suffisant d'équipes d'intervention soit disponible. Cela permet de réduire le temps d'intervention, mais en revanche, une telle hypothèse pourrait sembler fort optimiste dans le cas des réseaux de grande taille. Le nombre de vanne à manipuler est demeuré relativement petit, pour l'ensemble des cas analysés (Tableau 6.1). Pour des réseaux contenant jusqu'à 10 000 conduites et incluant plusieurs conduites parallèles, par exemple, le nombre de vannes nécessaires à l'isolement de secteurs contaminés pourrait faire en sorte qu'il devienne impossible d'envisager des manipulations simultanées. En procédant à la fermeture des vannes en plusieurs étapes, des chemins d'écoulement préférentiel à vitesse élevée risquent d'être créés, ce qui n'est *a priori* pas souhaitable. Éventuellement, les grands réseaux, et à la limite les réseaux de toute taille, pourraient compter sur l'installation de vannes contrôlées à distance, lesquelles, en cas de contamination, seraient actionnées de façon simultanée. Dans ce cas, les délais relatifs aux déplacements des équipes d'intervention seraient éliminés, ce qui contribuerait à améliorer l'efficacité de l'isolement.

Dans d'autres cas, on pourrait examiner des combinaisons de vannes contrôlées à distance, se trouvant par exemple sur des conduites principales, et de fermetures exécutées par des équipes de terrain, en ordonnant, au besoin, l'exécution des opérations de façon à minimiser la dissémination de contaminants. Mais pour ce faire, la procédure d'isolement actuelle devra nécessairement être adaptée.

6.4.3 Validité générale de la méthode

Les applications aux réseaux réels de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil ont permis d'élaborer une première version de la procédure d'isolement. Somme toute, ces résultats démontrent qu'on arrive à isoler des secteurs de réseau essentiellement constitués de boucles naturelles et de BM adjacents (artificiels ou réels), et dont l'étendue demeure relativement restreinte, à l'intérieur des limites des zones de pression. Des applications à des réseaux de topologies et de tailles variées seront bien entendu requises afin de valider/préciser davantage la procédure. Et surtout, il faut garder à l'esprit qu'il n'existe aucun réseau idéal lorsqu'il est question d'isoler et d'évacuer des contaminants; l'exécution des opérations requises aura nécessairement des répercussions sur des usagers supplémentaires, qui ne seront pas directement affectés par la contamination (*ASCE,* 2004).

En terminant, remarquons que, de par une structure basée sur un ensemble de règles heuristiques, la procédure d'isolement s'apparente à la conception d'un système expert, lequel permet de « résoudre les problèmes dans un domaine d'application déterminé, à l'aide d'une base de connaissances établie à partir de l'expertise humaine »[37]. L'intégration éventuelle de la procédure d'isolement à un tel système pourrait certainement être envisagée dans le cadre de travaux futurs.

[37] (http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp, 24 mars 2008)

CHAPITRE 7 – Considérations générales sur la procédure pour le rinçage des secteurs isolés

Suivant les choix méthodologiques exposés au chapitre 4, suite à l'isolement des contaminants à l'intérieur de secteurs de réseau, des activités de rinçage devront être prévues afin d'évacuer les eaux contaminées. L'élaboration d'une procédure heuristique visant à planifier les opérations de RUD (rinçage unidirectionnel) requises fait précisément l'objet du second objectif de recherche posé dans le cadre de cette thèse (section 4.2).

La procédure de rinçage vise à élaborer des stratégies permettant de définir et de préciser : l'ensemble des séquences de RUD[38] avec les données concurrentes sur les vitesses de rinçage attendues (simulées) et l'impact sur les pressions en réseau, l'ordre dans lequel les séquences doivent être exécutées ainsi que les bornes et vannes à manipuler pour l'exécution de chaque séquence sur le terrain. Les aspects opérationnels liés à la mise en œuvre du RUD étant nombreux, en guise de préambule, ce chapitre présente l'ensemble des critères et hypothèses sous-jacents à la procédure de rinçage. Cette dernière est décrite de façon détaillée au chapitre 8.

À noter qu'à partir de ce point dans le texte, les expressions « secteur isolé » et « secteur à rincer » seront utilisées sans distinction.

7.1 Étapes préalables

Comme pour l'application de la procédure d'isolement, une étape préalable est nécessaire afin de définir une représentation conceptuelle du secteur de réseau à rincer. Bien que cette

[38] L'expression « séquence de rinçage » réfère à tout tronçon unidirectionnel de conduites créé par la fermeture des vannes appropriées et duquel les eaux contaminées sont normalement évacuées par le biais d'une borne d'incendie se trouvant à la terminaison du tronçon (section 3.1.2.3).

représentation soit similaire à celle introduite précédemment (chapitre 6), afin de permettre au lecteur de bien saisir l'essence de la procédure de rinçage, les éléments pertinents sont présentés ci-après. C'est sur ces éléments, à la base, que s'appuie l'identification des séquences de RUD.

- boucles naturelles (déinies à la section 2.1.4.3 et ci-après appelées *boucles*; voir B1 à B6 à figure 7.1);
- tronçons linéaires menant à des boucles en retrait (définis à la section 2.1.4.3 et représentés à la figure 7.1);
- vannes-sources et/ou tronçons-sources, soit dans le second cas des segments linéaires formés de plus d'une conduite, qui sont adjacents à une boucle incluse dans le secteur isolé, et dont une extrémité est une vanne-source (voir le tronçon muni d'une flèche et contenant la vanne-source #1 à la figure 7.1)[39]; parfois, ceux-ci peuvent être des BM-sources, i.e. dont le nœud d'extrémité est une source d'alimentation en eau du réseau (trait pointillé en cyan, figure 7.1);
- tous les BM linéaires ou arborescents (sans distinction particulière ici), adjacents aux boucles, aux tronçons-sources ou aux tronçons linéaires menant à des boucles en retrait, qu'ils soient : (1) réels ou résultant de la fermeture permanente de vannes aux fins de délimitation de paliers hydrauliques (définis à la section 2.1.4.3 et représentés à la figure 7.1); (2) des BM artificiels, créés lors de la délimitation du secteur à isoler, et se terminant par une borne qui est attachée à une vanne fermée lors des opérations d'isolement (BM adjacent à la boucle B3, figure 7.1).

Ici encore, une telle conceptualisation repose, pour le moment, sur une identification visuelle des éléments.

[39] Lorsqu'un tel tronçon n'est formé que d'une conduite (directement adjacente à une boucle incluse dans le secteur à rincer), l'appellation vanne-source est conservée.

De plus, tout secteur à rincer doit être classifié comme appartenant à l'une des deux catégories suivantes, soit *grand secteur* ou *petit secteur*. Cette distinction déterminera certains aspects liés à la planification des opérations de RUD, en ce qui a trait à l'utilisation des sources d'eau propre et aux vannes à manipuler (tel que l'indique, de façon plus complète, la section 7.2.1 ci-après). Le critère de classification dépend des résultats obtenus pour l'isolement et pourra varier d'un réseau à l'autre. Dans le cadre de cette thèse, suite à l'examen du tableau 6.1 et des figures de l'annexe 3, il a été déterminé que tout secteur isolé dont le linéaire total était ≥ 40 % du linéaire total de réseau appartiendrait à la première classe, alors que les autres secteurs appartiendraient à la seconde.

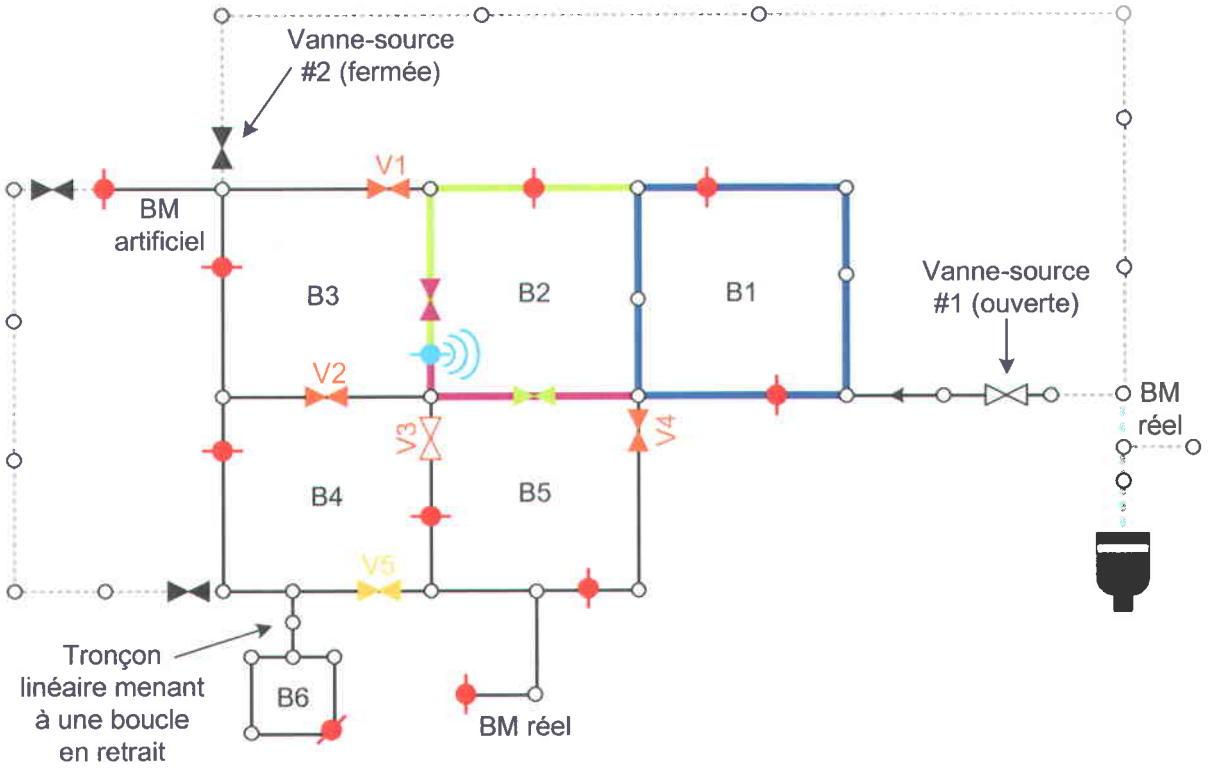


Figure 7.1 : Exemple de secteur de réseau à rincer et préalablement isolé. Les vannes servant à isoler le secteur du reste du réseau apparaissent en noir. Les conduites en trait continu noir ou de couleur appartiennent au secteur à rincer, alors que les conduites en trait pointillé gris ou cyan en sont exclues. Les bornes d'incendie sont représentées en rouge. La borne en bleu est utilisée pour le rinçage de la boucle B2 (section 7.2.1.1).

7.2 Considérations opérationnelles

La procédure visant à déterminer les opérations de RUD est constituée d'une suite de règles, appliquée à tout secteur de réseau préalablement isolé suivant la méthode exposée au chapitre 6. L'élaboration des opérations de RUD repose, d'une part, sur des considérations qui en déterminent la structure (soit la façon dont les opérations sont déployées), et, d'autre part, sur certains aspects hydrauliques. La prise en compte de l'ensemble de ces éléments permet d'assurer une exécution organisée, efficace et sécuritaire des opérations. Cette section présente l'ensemble des critères ayant présidé à l'élaboration des règles de la procédure de rinçage. Les hypothèses sous-jacentes seront présentées à la section 7.3. Il est utile, à ce stade, de mentionner que les consommations sont supposées réduites, mais non nulles, sur tout secteur à rincer (après que les opérations d'isolement aient été complétées). Une telle hypothèse demeure conservatrice (plus de détails sont donnés à la section 7.3).

7.2.1 Structure des opérations

En accord avec la topologie des secteurs isolés (essentiellement formés de boucles de réseau, section 6.1.2) et suivant les indications de *Friedman et al.* (2005) (section 3.1.2.4), le rinçage de tout secteur procède boucle par boucle. Les activités progressent depuis un point identifié comme source d'eau propre vers les boucles de plus en plus éloignées de ce point, de façon à ce que l'eau de rinçage transite uniquement par des conduites précédemment rincées[40]. Contrairement à ce qui serait observé si le rinçage traditionnel était employé, une telle façon de procéder permet de mieux contrôler l'évacuation des eaux contaminées (section 3.1.2.3). De plus, l'étanchéité du secteur à rincer est garantie par l'ouverture d'un seul point à la fois, en guise de source

[40] Puisque des boucles voisines partagent certaines conduites, le linéaire à rincer sur une boucle courante exclut nécessairement les conduites qui auront été rincées avec la (les) boucle(s) voisine(s) précédente(s) (par exemple, lors du rinçage de la boucle B2, à la figure 7.1, les conduites en bleu ne sont pas prises en compte, ayant été rincées avec B1).

d'alimentation en eau propre (l'eau propre ne peut donc qu'y entrer et l'eau potentiellement contaminée ne peut être disséminée au reste du réseau). D'un certain point de vue, un secteur isolé à rincer pourrait être assimilé à une « loop division » au sens où *Antoun et al.* (1999) l'entendent (section 3.1.2.4).

7.2.1.1 Séquences pour le rinçage des boucles

En général, chaque boucle est rincée en n'utilisant qu'une borne se trouvant sur la boucle même, de façon à créer, le plus souvent, deux séquences unidirectionnelles distinctes (d'après les indications de *Friedman et al.,* 2005, section 3.1.2.4)[41]. Ceci permet de réduire les déplacements liés aux manipulations sur le terrain, sachant de plus que la mise en place d'équipements sera possiblement requise afin de récupérer ou de traiter l'eau de rinçage évacuée par les bornes d'incendie (hypothèse 10, section 7.3). Pour une boucle donnée, des vannes se trouvant de part et d'autre de la borne sont manipulées en alternance afin d'isoler les séquences l'une de l'autre (à la figure 7.1, voir la boucle B2, rincée par la borne en bleu; les vannes verte et violette sont associées, chacune, à la séquence de même couleur). Ces vannes seront appelées *vannes de transition.*

Souvent, plus d'une borne seront disponibles pour le rinçage d'une boucle donnée. Le choix de la borne utilisée doit notamment faire en sorte qu'au moins l'une des vannes de transition y soit attachée (voir la vanne violette et la séquence violette sur la boucle B2, figure 7.1). Cette condition détermine l'ordre des séquences de rinçage de la boucle, qui doit se terminer par la séquence dont la vanne de transition est justement attachée à la borne (à la figure 7.1, pour le

[41] Ceci n'exclut pas la possibilité que, dans certains cas, afin d'atteindre les vitesses de rinçage désirées (section 7.2.2 ci-après), des bornes supplémentaires soient ouvertes (voir la section 7.3, où sont présentées les hypothèses sous-jacentes à la procédure de rinçage). Dans la majorité des cas, cependant, une seule borne devrait suffire.

rinçage de B2, la séquence verte sera exécutée en premier et la séquence violette en deuxième). Ceci vise à favoriser l'élimination du contaminant, en évitant, au possible, que de l'eau potentiellement contaminée ne se loge dans des conduites se trouvant entre une borne ouverte et une vanne fermée (une telle situation pourrait survenir si le rinçage de B2 se terminait par la séquence verte, à la figure 7.1, en raison de la présence d'un nœud entre la borne et la vanne verte, où de l'eau pourrait être consommée au moment du rinçage de la séquence verte[42]; rappelons que les consommations sont supposées réduites, mais non nulles au sein de tout secteur à rincer).

En plus des vannes de transition associées à chacune des séquences, préalablement au rinçage de chaque boucle, des vannes se trouvant sur des boucles voisines, en aval (par rapport à la progression du RUD), doivent être fermées. Ces vannes évitent que de l'eau potentiellement contaminée se trouvant sur les boucles non rincées ne se mélange à l'eau propre utilisée pour le rinçage d'une boucle et, par le fait même, assurent le caractère unidirectionnel des séquences (voir les vannes V1 à V4 pour le rinçage de la boucle B2, figure 7.1). De façon simple et intuitive, l'ensemble des *vannes adjacentes* à une boucle rincée seront systématiquement fermées, tel que l'illustre la figure 7.1 (les *vannes adjacentes* sont celles qui sont attachées aux nœuds d'une boucle dont le en cours de rinçage et se trouvant sur une boucle voisine, non rincée; on parlera alors d'*isolement adjacent*). Ces vannes demeureront fermées jusqu'au rinçage de la (des) boucle(s) à laquelle (auxquelles) elles appartiennent (boucles B3, B4 et B5 dans le présent cas, figure 7.1). Il est envisageable, pour certaines boucles, que l'isolement adjacent ne soit pas

[42] Une telle façon de définir les opérations de RUD repose entièrement sur la représentation conceptuelle des réseaux de distribution, où des valeurs de consommation sont agrégées en certains nœuds, alors qu'en réalité, des points de ponction d'eau existent sur toute la longueur des conduites (section 2.1.4.2). Mais l'outil informatisé de modélisation demeure le moyen sur lequel se basent l'analyse et l'opération des réseaux. Ceci dit, ce critère établissant l'ordre de séquences de RUD sur une boucle donnée contribue à structurer la démarche et à la rendre sécuritaire (voir aussi l'hypothèse 7, à la section 7.3, qui impose des mesures de sécurité supplémentaires, mises en œuvre en pratique).

complet. Supposons par exemple que la vanne V3 n'existe pas à la figure 7.1. Une telle situation est acceptable puisque, même en l'absence de V3, de l'eau potentiellement contaminée ne peut circuler que depuis la boucle B2, et non vers celle-ci (en supposant des consommations réduites sur le secteur à rincer). En règle générale, il ne faudra pas que plus d'un point de communication n'existe entre une boucle en cours de rinçage et le secteur aval, non rincé (tout dépendant de la configuration des séquences de RUD sur les boucles). Cette condition est acceptable pour les petits secteurs uniquement, sachant qu'elle permet entre autres de limiter le nombre de vannes à manipuler. Lorsqu'il s'agit du rinçage de grands secteurs, les vannes nécessaires à l'*isolement complet* de chaque boucle, au voisinage de celle-ci en aval, devront être identifiées. Cette règle tend à faciliter l'identification des vannes pour ces secteurs, où les boucles à rincer sont plus nombreuses (d'autant plus que dans le cas du réseau de Terrasse-Vaudreuil, les vannes disponibles sont en général moins nombreuses et moins bien disposées que sur le réseau de Valcourt; section 6.3). Cette règle constitue une sécurité supplémentaire, en éliminant tout point de communication entre une boucle dont le rinçage est en cours et les voisines non rincées (en aval). Ainsi, à la figure 7.1, la vanne V5 aurait pu être fermée, en l'absence de V3.

Afin de limiter les déplacements et les manipulations sur le terrain, lorsque possible, l'utilisation des vannes déjà fermées est favorisée, d'une boucle à la suivante. Notamment, l'une des vannes ayant servi à l'isolement d'une boucle (par exemple V2 pour la boucle B2 à la figure 7.1) pourra être utilisée en tant que vanne de transition pour la première séquence de rinçage de la boucle suivante (boucle B3 à la figure 7.1).

Dans certains cas, en raison de sa proximité d'une intersection entre des boucles voisines, une borne pourra être utilisée pour le rinçage de deux boucles consécutives[43], créant ainsi trois séquences de rinçage (deux pour la première boucle et une pour la seconde). La manipulation d'une vanne de transition supplémentaire sera alors nécessaire, afin d'assurer que chacune des séquences demeure unidirectionnelle. Par exemple, à la figure 7.1, la boucle B3 pourrait être rincée par la même borne que B2. Les opérations, dans l'ordre, seraient les suivantes : (1) fermeture des vannes V1 à V4 et de la vanne verte (à moins qu'elle n'ait été fermée précédemment lors du rinçage de la boucle B1); (2) rinçage de la séquence verte; (3) fermeture de la vanne violette et ouverture de la vanne verte; (4) rinçage de la séquence violette (la vanne violette demeure ensuite fermée); (5) fermeture, à nouveau, de la vanne verte (vanne de transition supplémentaire); (6) ouverture des vannes V1 et V2; (7) rinçage de la séquence ainsi créée sur la boucle B3. Ainsi, l'ordre des opérations, en général, est conforme aux indications données à la section 3.1.2.4, soit (en guise de rappel) : (1) fermeture des vannes servant à isoler la séquence et, par le fait même, à la rendre unidirectionnelle, (2) ouverture des vannes utiles au rinçage d'une séquence précédente mais devant être ouvertes pour la séquence courante, (3) ouverture de la borne, (4) fermeture de la borne. Au cours de la progression des opérations de RUD, les vannes de transition précédemment fermées, qui se trouvent sur une boucle dont le rinçage est complété, sont rouvertes.

7.2.1.2 Séquences pour le rinçage des bouts morts

Les BM sont rincés à la suite des séquences de la boucle à laquelle ils sont adjacents. Les BM étant unidirectionnels par définition, en principe, leur rinçage ne requiert la fermeture d'aucune vanne supplémentaire. De plus, cette façon de procéder permet généralement de tirer avantage de

[43] Seules les bornes se trouvant à proximité des intersections entre des boucles voisines sont retenues à cette fin, de façon à éviter le double rinçage de longs tronçons de conduites.

la proximité des BM en question, au moment où la boucle à laquelle ils sont adjacents est rincée. Ainsi, comme pour tout programme de RUD, les opérations procèdent de la source vers la périphérie d'un secteur isolé. Pour faire suite à l'exemple décrit à la section précédente, où les boucles B2 et B3 sont rincées par la même borne d'incendie, suite à l'exécution de la séquence sur B3, les vannes verte et violette (vannes de transition) seront rouvertes et le BM artificiel adjacent à B3 sera rincé par la borne qui se trouve à son extrémité.

7.2.1.3 Utilisation des sources primaire et secondaire

Le rinçage de tout secteur est entrepris via la source primaire, laissée ouverte lors de la mise en œuvre de l'isolement (section 6.1.1 et étape 3 de la procédure d'isolement à la section 6.2.2). Dans certains cas, notamment lors du rinçage de grands secteurs, il s'avérera utile, au cours des opérations, de poursuivre à l'aide de la seconde source d'eau propre (source secondaire). Nécessairement, la source primaire qui aura été utilisée jusqu'à ce stade, devra être fermée (fermer la vanne). Cette façon de faire présente notamment un intérêt dans le cas des grands secteurs à rincer. Plus le rinçage d'un secteur donné progresse, de façon logique, plus on s'éloigne de la source d'eau propre. À un certain stade, il peut donc devenir avantageux d'utiliser une source qui se trouve à proximité des boucles à rincer. L'eau utilisant toujours le chemin d'écoulement le plus court, l'alimentation est plus directe et les pertes de charge entre la source et la boucle à rincer sont moindres[44].

[44] Rappelons, à ce titre, que les sources primaire et secondaire servant à alimenter un secteur isolé en eau propre sont sélectionnées, dans le cadre de la procédure d'isolement, sur la base de critères liés à leur diamètre et à la proximité d'une source de réseau (section 6.1.1).

7.2.2 Critères hydrauliques

Les séquences de RUD doivent également être déterminées de façon à ce que des critères de vitesse et de pression soient respectés lors de la mise en œuvre des opérations. Comme le mentionne la section 3.1.2.3, le RUD permet d'atteindre des vitesses d'écoulement plus élevées que le rinçage traditionnel. En pratique, le RUD d'une séquence donnée est généralement poursuivi jusqu'à ce que le volume d'eau qu'elle contient ait été évacué un certain nombre de fois. Le temps de rinçage (auquel est lié le temps d'interruption du service normal d'alimentation en eau potable) dépend des vitesses atteintes pour chaque séquence unidirectionnelle. Ainsi, afin d'assurer l'efficacité d'exécution du RUD par le personnel ainsi que l'efficacité d'évacuation de l'eau contaminée, une vitesse minimale de 1 m/s est visée et devra être atteinte le plus souvent possible. Celle-ci est recommandée par *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007) et fait partie de la fourchette de valeurs relevée dans la littérature (section 3.1.2.4). À l'opposé, aucune limite n'est imposée sur la vitesse maximale. Les bornes sont ouvertes à pleine capacité. Toutefois, afin d'éviter de générer des débits trop importants, l'orifice de borne utilisé est celui de 64 mm (2,5 po) (voir l'hypothèse 8 posée à cette fin à la section 7.3).

En ce qui concerne la pression en réseau, lors des activités de RUD, elle devra être maintenue à une valeur minimale de 20 kPa (2 m d'eau). Ce critère, indiqué par *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007) pour les réseaux affichant des écarts d'élévation (section 3.1.2.4, contrairement aux réseaux d'élévation relativement constante), est *a priori* retenu, bien que la différence entre les points d'élévation maximum et minimum soit plus faible pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil que pour celui de Valcourt (4,3 m contre 35,5 m).

Selon *Nathalie Periche* (communication personnelle, juin 2007), afin d'aider à la satisfaction du critère de pression et d'éviter spécifiquement l'occurrence de pressions négatives en réseau au cours des opérations de RUD, les bornes et vannes à manipuler doivent être sélectionnées de façon à empêcher que des nœuds plus élevés qu'une borne à ouvrir ne se trouvent entre celle-ci et des vannes fermées (par exemple, à la figure 7.1, voir le nœud se trouvant entre la borne bleue et les vannes V2, V3 et verte; pour que les séquences de rinçage de B2 soient valides, et plus particulièrement la verte, il faut que ce nœud satisfasse à la condition d'élévation par rapport à la borne bleue, tel qu'il est indiqué ci-après). Dans le cadre de cette thèse, il a été déterminé, à partir de l'analyse des réseaux d'étude, qu'une différence d'élévation allant jusqu'à +2 m (entre nœud élevé et borne) pourrait être tolérée.

Enfin, dans le but de favoriser le respect du critère de vitesse, les points suivants doivent être considérés lors de la détermination des séquences de rinçage sur les boucles (section 3.1.2.4) :

- Le plus souvent possible, chaque séquence de rinçage doit être constituée de conduites dont le diamètre est soit constant ou décroissant, depuis l'origine de la séquence vers une borne à ouvrir (sachant que la configuration de certains secteurs à rincer ainsi que l'ordre de rinçage des boucles ne le permettront pas toujours).
- De façon générale, la longueur des séquences de rinçage ne doit pas dépasser 1 000 m.
- Les tronçons de diamètre supérieur ou égal à 300 mm (12 po; ci-après appelés *grands diamètres*) doivent faire l'objet de séquences de rinçage distinctes. Par exemple, si un tel tronçon fait partie du linéaire d'une boucle, une séquence supplémentaire, autre que les séquences normalement prévues pour le rinçage de la boucle, sera nécessaire. De plus, jusqu'à trois bornes pourront être utilisées afin de favoriser l'atteinte du critère de vitesse dans les séquences de grand diamètre. Cette hypothèse s'inspire des recommandations de

Antoun et al. (1999) indiquées à la section 3.1.2.4 et selon lesquelles, en théorie, l'atteinte d'une vitesse de 1,8 m/s dans un tronçon de 300 mm (12 po) requiert l'ouverture de trois orifices de 64 mm (2,5 po). Le critère de vitesse retenu dans le cadre de cette thèse est de 1,0 m/s, donc moins contraignant. Ainsi, même dans le cas des séquences de plus de 300 mm, il est supposé que trois bornes (donc trois orifices de 64 mm) seront suffisantes.

7.3 Hypothèses

Cette section présente les hypothèses sous-jacentes à la procédure permettant de définir l'ensemble des opérations de RUD.

(1) Les activités de RUD surviennent suite à la confirmation de l'occurrence d'un incident de contamination à l'intérieur d'un secteur préalablement isolé. À ce stade, la nature du contaminant est également connue. L'origine de la contamination a de plus été identifiée et réglée.

(2) Le contaminant est non adhérent aux parois internes des conduites de distribution et, de façon cohérente avec les hypothèses de modélisation du chapitre 5 (section 5.1.1), il est supposé non réactif (ni dans l'eau, ni au contact des conduites).

(3) Les avis émis à la population concernent la consommation humaine ainsi que certains usages où l'eau pourrait être en contact avec la peau (bain, douche, lave-vaisselle, laveuse, etc.). D'autres usages de base, tels que la chasse d'eau des toilettes par exemple, sont maintenus. Ainsi, il est supposé que les consommations au sein d'un secteur isolé sont réduites à leurs valeurs nocturnes, soit : 15 % de la consommation moyenne journalière pour les usagers résidentiels et 40 % pour les industries, commerces et institutions (*MEQ*, 2002). À noter que cette hypothèse, qui demeure conservatrice, n'est posée qu'à titre

indicatif, aux fins de modélisation du RUD. Toutes autres valeurs de consommations réduites pourraient être utilisées.

(4) Seuls les aspects hydrauliques du RUD sont examinés et simulés. Toute question relative aux concentrations de contaminant lors de l'évacuation de l'eau fera l'objet de vérifications sur le terrain. Un tel choix est motivé par le fait qu'il est pratiquement impossible, suite à l'émission d'avis à la population, d'évaluer le transport de contaminants et leur concentration au sein des secteurs à rincer (section 4.2). En effet, à moins de disposer d'outils de modélisation en temps réel, la simulation de l'écoulement de l'eau et du transport de substances en réseaux est soumise, en tout temps, à des hypothèses sur les consommations. Sous des conditions normales d'opération, il est possible d'acquérir une connaissance assez fiable du comportement des usagers. Dans une situation d'urgence, toutefois, où des avis sur la consommation sont émis, le champ d'hypothèses envisageables demeure très vaste. Rappelons de plus que, conformément au tableau 3.1 (section 3.1), il est présumé que les avis sur la consommation sont entièrement respectés par les usagers entre le moment de la fin des opérations d'isolement et le moment du début des opérations de RUD. De cette quatrième hypothèse découlent les suivantes, mentionnées aux points 5 à 7.

(5) Au moment où les activités de rinçage débutent, il est supposé que la concentration du contaminant est uniforme sur l'ensemble d'un secteur isolé. Ainsi, les opérations de RUD devront s'étendre à l'ensemble d'un tel secteur, sachant qu'il s'agit d'une mesure de sécurité essentielle afin d'assurer un retour à l'opération normale en bonne et due forme.

(6) La modélisation du RUD est effectuée sous l'hypothèse de conditions d'écoulement stationnaires. Selon *Walski et al.* (2003), une telle hypothèse est tout à fait raisonnable lorsque l'on s'intéresse aux aspects hydrauliques du RUD uniquement. D'autant plus que, au sein des secteurs isolés sur les réseaux d'étude, sous des conditions réduites de

consommation (hypothèse 3), les débits générés lors du RUD sont presque entièrement dus aux opérations de rinçage (la contribution des consommations en eau aux écoulements demeurant généralement faible).

(7) De façon à assurer l'élimination de l'eau contaminée, il est supposé que le rinçage de chaque séquence sera poursuivi jusqu'à l'atteinte d'un seuil de concentration déterminé, en fonction du contaminant en cause. Des échantillons de l'eau de rinçage pourront être recueillis et analysés en temps réel, à intervalles réguliers. Ceci sous-entend l'existence de méthodes analytiques élaborées, dont le fonctionnement s'inspirerait, par exemple, des méthodes d'échantillonnage ponctuel (*grab sampling*) existantes (section 3.2.1.2). Afin d'ajouter un facteur de sécurité, un critère est également imposé précisant le nombre de fois où l'équivalent du volume d'eau contenu dans chaque séquence de RUD devra être évacué. Dans un contexte de contamination, par exemple, ce nombre pourra être de huit ou neuf (*Patrice Grondin*, 2004, communication personnelle). Ainsi, la portée du rinçage de chaque séquence s'étendra au secteur amont, permettant de récupérer tout volume ponctuel d'eau contaminée qui pourrait, autrement, ne pas avoir été évacué par les séquences précédentes.

(8) Pour chaque borne utilisée lors du RUD, l'eau est évacuée par une prise de boyau de 64 mm (2,5 po). Ainsi, on suppose que le critère de vitesse peut être atteint pour la plupart des séquences de rinçage en utilisant une borne ou plus, tout en évitant de générer des débits trop importants qui pourraient résulter, par exemple, de l'ouverture de prises de 100 mm (4 po) sur des bornes connectées à des conduites de grand diamètre. Puisque, de toute façon, la majorité des bornes utilisées pour le rinçage des réseaux d'étude se trouve sur des conduites de diamètre relativement faible (150-200 mm), cette hypothèse demeure raisonnable. Elle pourra toutefois être examinée plus avant à la lumière d'applications ultérieures à d'autres réseaux.

(9) L'ensemble des mesures et équipements supplémentaires visant à assurer la décontamination *in situ* et/ou la récupération des eaux de rinçage ont été prévus. Le dernier cas de figure suppose que les eaux seront transportées dans un endroit où elles pourront subir des traitements spécifiques avant d'être déversées, par exemple, à l'égout sanitaire (section 3.1.2.6).

(10) Chaque équipe de rinçage est formée de deux opérateurs expérimentés, se déplaçant dans un véhicule entièrement équipé. Le choix quant au nombre d'équipes requis pour l'exécution des opérations pourra varier d'une municipalité à l'autre. Par exemple, considérant que jusqu'à trois bornes pourront être utilisées afin d'évacuer l'eau des séquences de grand diamètre (section 7.2.2), l'exigence minimale pourrait être fixée à trois équipes.

(11) Il est supposé que l'ensemble des vannes et bornes d'incendie se trouvant au sein du secteur à rincer sont parfaitement étanches et/ou opérationnelles. Rien n'empêche que des contraintes soient incluses à la méthodologie, éventuellement, de façon à éviter la manipulation des composantes ne respectant pas ces conditions. Cela pourrait cependant compliquer la planification des opérations et réduire, de façon globale, l'efficacité des interventions.

(12) À l'instar de l'hypothèse 10 posée à la section 6.1.4, il est supposé que la fermeture ainsi que l'ouverture des bornes et des vannes sont effectuées de façon graduelle, afin d'éviter les coups de bélier en réseau. Puisque le temps nécessaire aux opérations de RUD n'est pas spécifiquement comptabilisé dans le cadre de ces travaux, aucun délai de manipulation n'est explicitement indiqué. De telles pratiques sont impérativement respectées lors de la mise en œuvre d'opérations de RUD (*Nathalie Periche*, juin 2006, communication personnelle).

(13) L'hypothèse 11, posée à la section 6.1.4, demeure : suivant les recommandations de *Hanson et al.* (2007) et *Friedman et al.* (2005), à l'extrémité de chaque BM (réel) de réseau qui n'est pas munie d'une borne d'incendie, on suppose l'existence d'une vanne de décharge (*blow-off valve*) opérationnelle permettant de purger l'eau contaminée. Les opérations requises, cependant, ne sont pas spécifiquement couvertes dans la présente thèse (seules les opérations d'évacuation d'eau contaminée via les bornes d'incendie existantes sont ici considérées).

CHAPITRE 8 – Rinçage des secteurs isolés : procédure, résultats et discussion

S'appuyant sur les critères et hypothèses indiqués au chapitre 7, la procédure pour l'élaboration des opérations de rinçage des secteurs isolés est ici exposée. Comme pour la procédure d'isolement (chapitre 6), les règles de la procédure de rinçage ont été structurées sur la base de l'analyse des réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil.

Dans les sections qui suivent, la structure générale de la méthode est d'abord introduite sous forme d'un organigramme. Les étapes de cette démarche sont ensuite décrites à l'aide d'une application détaillée. Enfin, une synthèse des résultats obtenus pour l'ensemble des cas analysés ainsi qu'une discussion sont présentées.

8.1 Méthode pour l'élaboration des opérations de rinçage

La figure 8.1 présente l'organigramme résumant la méthode élaborée pour la définition des opérations de RUD dans le but d'évacuer l'eau contaminée des secteurs de réseau isolés. La procédure comporte deux parties majeures. La première (étapes 1 à 4, figure 8.1) vise à élaborer, de façon préliminaire, les séquences permettant de rincer un secteur isolé, sachant que les activités de RUD doivent procéder boucle par boucle et toujours depuis des conduites préalablement rincées vers des conduites à rincer (section 7.2.1). À la lumière de cette stratégie préliminaire, sont connus : (1) l'ordre dans lequel les boucles seront considérées lors des activités de RUD ainsi que l'utilisation envisagée des sources primaire et secondaire; (2) les bornes retenues pour le rinçage de chaque boucle et des BM adjacents[45]. Rappelons que,

[45] Les vannes servant à rendre les séquences unidirectionnelles (sur les boucles) sont identifiées de façon préliminaire, à ce stade. C'est à l'étape 5 que la sélection définitive des vannes est effectuée.

normalement, une boucle doit être rincée en n'utilisant qu'une borne, de façon à créer une ou deux séquences unidirectionnelles (section 7.2.1.1). Le choix des bornes permet, par le fait même, d'identifier le linéaire de conduites emprunté par chacune des séquences de RUD, sur les boucles et les BM (la borne se trouvant nécessairement à la terminaison d'une séquence).

Dans un second temps, (étape 5, figure 8.1), les vannes servant à rendre les séquences de boucles unidirectionnelles sont d'abord sélectionnées définitivement, sachant qu'on cherche à limiter les manipulations requises en favorisant la réutilisation des vannes d'une boucle à la suivante (section 7.2.1.1). L'ordre de rinçage des boucles étant connu dans le cadre de la stratégie préliminaire, cette fois l'ordre des séquences, pour chacune des boucles, est déterminé. Ensuite, les séquences de RUD sont l'objet d'une validation hydraulique, en fonction des critères sur les vitesses et les pressions minimales prescrits à la section 7.2.2. Selon les possibilités existantes, les séquences ne satisfaisant pas à ces critères sont revues et ajustées de façon itérative (toujours à l'intérieur même de l'étape 5). À noter que la validation hydraulique est effectuée au moyen du logiciel Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005). Puisque ce dernier n'était pas, au départ, adapté à la modélisation du rinçage, la méthode proposée à cette fin par *Walski* (1995) a été utilisée. Suivant cette méthode, chaque borne est représentée par une conduite ajoutée au nœud approprié dans le modèle de réseau. L'élévation du nœud se trouvant à la termination de la conduite ajoutée est égale à celle du point de prise du boyau à la borne (soit environ 2,5 m par rapport à l'élévation du réseau, en considérant un enfouissement de 2 m) et la charge à ce nœud est fixée à la pression atmosphérique[46]. À partir des équations de Bernoulli (Équation 2.2, section 2.2.1) et de Hazen-Williams (Équation 2.3, section 2.2.1) et pour un coefficient de résistance de la borne donné, les caractéristiques de la conduite ajoutée (diamètre, coefficient de frottement interne et longueur)

[46] Ou charge totale égale à l'élévation du nœud, soit pression = 0, puisque pour la modélisation des écoulements en réseaux de distribution, les pressions considérées sont généralement corrigées par rapport à la pression atmosphérique de 101,3 kPa (ou 10,3 m d'eau) (*Walski et al.*, 2003).

sont déterminées de façon à produire une perte de charge équivalente[47]. Lorsque les critères hydrauliques sont rencontrés pour l'ensemble des séquences ou qu'il ne reste plus d'alternatives possibles afin de modifier les séquences qui ne rencontrent pas le critère de vitesse, une solution finale est obtenue (étape 6).

La section qui suit illustre l'application de la méthode à l'aide d'un exemple détaillé tiré du réseau de Valcourt. L'annexe 4 apporte un complément d'information et certaines précisions pour des cas particuliers.

[47] Les détails quant à la méthode de *Walski* (1995) peuvent être trouvés dans l'article cité. S'inspirant de ces travaux, la valeur du coefficient de borne que nous avons considérée est de 39,5 L/s/m^{0,5} (520 gpm/psi^{0,5}); cette valeur dépend du diamètre de la prise de boyau (dans notre cas, 64 mm ou 2,5 po). Le diamètre ainsi que la longueur initiale de la conduite ajoutée ont été fixés respectivement à 150 mm (6 po) et 50 m, pour un coefficient de Hazen-Willians (CHW) de 49,65. Afin de tenir compte des pertes de charge singulières dans la conduite latérale liant le réseau et la borne (coude à 90° et vanne robinet) ainsi que des pertes linéaires dans cette conduite latérale, la longueur de la conduite ajoutée a été ajustée à 51,15 m (toujours en considérant un CHW de 49,65).

Les premiers calculs nécessitent qu'une valeur de vitesse soit fournie, alors que les résultats de simulation attendus sont justement les vitesses d'écoulement (et pressions) en réseau lors de l'ouverture de bornes d'incendie. Une valeur de 3,05 m/s a été considérée puisque, selon *Walski* (1995) et suivant nos résultats, c'est cette vitesse qui est généralement observée dans les bornes d'incendie. De plus, le calcul des valeurs des caractéristiques de la conduite ajoutée est très peu sensible à la vitesse. Dans certains cas peu fréquents où les vitesses dans la borne étaient plus faibles (> 1,3 m/s), le CHW de la conduite ajoutée a été ajusté en conséquence (CHW de 54,29, la modification sur la longueur étant négligeable).

Enfin, *Walski et al.* (2003) proposent une méthode basée sur le principe des « flow emitters », laquelle permet d'éviter l'ajout de conduites à chacun des nœuds représentant les bornes. Toutefois, cette méthode requiert une modification des équations dans le code de l'outil de simulation (en l'occurrence Aqua Cad). D'autres logiciels de simulation, tels que Epanet (*Rossman*, 2000) sont déjà adaptés à cet égard et considèrent l'ajout de conduites fictives, entre autres. Des démarches ont été entreprises, auprès d'Aqua Data, en vue de l'adaptation éventuelle d'Aqua Cad.

Figure 8.1 : Organigramme présentant la méthodologie pour la définition des opérations de RUD visant l'évacuation d'eau contaminée d'un secteur de réseau isolé.

8.2 *Application détaillée*

Le secteur à rincer est celui délimité et isolé suite à une première détection au détecteur 279 (Figure 8.3 et annexe 3). Il s'agit d'un *petit secteur* (i.e. contenant moins de 40 % du linéaire de réseau, section 7.1) où la longueur totale des conduites est de 5,68 km. Leurs diamètres sont de 100, 150 ou 200 mm (4, 6 ou 8 po).

8.2.1 Étape 1 : Choix de la source primaire et de la première boucle à rincer

Parmi les deux possibilités identifiées lors de la définition des opérations d'isolement (section 6.2.2), le choix de la source d'eau propre à partir de laquelle le rinçage sera initialement conduit est effectué en appliquant la règle 1.1, à la figure 8.2. Dans l'exemple ici présenté, c'est la proximité d'une source d'alimentation du réseau qui prévaut, afin de maximiser le débit disponible pour le rinçage. En effet, la vanne-source qui est retenue se trouve sur une boucle alimentée par la source du réseau (source 1 à la figure 8.3 et voir l'annexe 3). Conséquemment, la première boucle à rincer est celle qui est adjacente à cette vanne-source (règle 1.2, figure 8.2; voir la boucle 1 à la figure 8.3).

1.1 Choix de la source primaire
- En priorité, favoriser le choix d'une source d'alimentation du réseau OU retenir un tronçon-source / une vanne-source situé à proximité d'une source d'alimentation de réseau
- SINON, dans certains cas, sélectionner la vanne-source dont le diamètre ≥ au diamètre maximal au sein du secteur à rincer

1.2 Choix de la première boucle à rincer
- Adjacente à la vanne-source OU au tronçon-source
- S'il y a plus d'une candidate, choisir la boucle dont le % de linéaire partagé avec d'autres boucles du secteur à rincer est minimal

Figure 8.2 : Description de la première étape de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

8.2.2 Étape 2 : Sélection de la borne pour le rinçage de la première boucle

La seconde étape de la procédure vise à identifier la borne qui sera utilisée pour le rinçage de la première boucle du secteur isolé. La sélection est effectuée en appliquant les règles 2.1 à 2.9 indiquées à la figure 8.4, lesquelles ont été élaborées à partir des critères posés aux sections 7.2.1 et 7.2.2 (à noter que les mêmes règles serviront également à la sélection des bornes pour le rinçage des boucles subséquentes, à l'étape 3b de la procédure, figure 8.1).

Suivant la règle 2.1, dans le cas particulier où la boucle comporte un (des) tronçon(s) de conduites dont le diamètre est supérieur ou égal à 300 mm (12 po), ces derniers doivent être rincés séparément en utilisant, pour chacun, une borne sélectionnée à cette fin spécifique[48]. Ensuite, s'il reste une portion de la boucle à rincer, ou encore si la boucle ne contient pas de conduites de grand diamètre (cas de la boucle 1 à la figure 8.3), la règle 2.2 identifie l'ensemble des bornes candidates pour le rinçage de celle-ci. Ces bornes se trouvent sur la boucle elle-même ou sur une boucle voisine (i.e. possédant des conduites et/ou des nœuds en commun), à distance maximale de 25 m (Figure 8.4). Ce dernier critère ajoute une flexibilité au niveau du choix des bornes et permet, entre autres, que la même borne soit utilisée pour le rinçage de deux boucles consécutives (voir à cet égard la règle 2.8-ii à la figure 8.4). Puisque la distance de 25 m demeure relativement faible par rapport au linéaire constituant les boucles sur les réseaux d'étude, on peut considérer toute borne se trouvant en-deçà de cette distance comme étant presque à l'intersection de boucles voisines.

[48] Puisque les conduites de diamètre ≥ 300 mm (12 po) sont le plus souvent installées en tête de réseau et comme le rinçage progresse depuis des sources d'eau propre sélectionnées en fonction de leur grand diamètre et de leur proximité par rapport à une source de réseau, les tronçons de grand diamètre se trouveront normalement à la tête des conduites à rincer sur une boucle donnée (par rapport à la progression envisagée des opérations de RUD). Parmi tous les cas analysés, il en a été ainsi (voir les cas de secteurs isolés et à rincer suite à une première détection aux détecteurs 31, 112, 131, 133, 142, 159 et 375, réseau de Valcourt, à l'annexe 5; cette annexe présente des figures-synthèses où apparaissent chaque séquence de RUD ainsi que les bornes et vannes à manipuler pour l'ensemble des cas analysés).

L'application progressive des règles 2.3 à 2.8 permet, en procédant par élimination, d'identifier la borne qui sera finalement retenue, parmi les candidates identifiées en 2.2. Dans le cas où aucune borne n'est sélectionnée, la règle 2.9 identifie des alternatives possibles (à noter que d'autres pourront éventuellement s'ajouter, à la lumière d'applications à des réseaux supplémentaires). Les règles 2.3, 2.4 et 2.6 imposent que le choix des bornes soit effectué en tenant compte de la présence des vannes de transition et des vannes servant à éviter l'occurrence de pressions trop faibles, voire négatives. À ce stade, les vannes disponibles sont identifiées en vue de la sélection définitive, qui sera effectuée à l'étape 5a de la procédure (Figure 8.1 et section 8.2.5).

La borne retenue pour le rinçage d'une boucle permettra de générer une ou deux séquences unidirectionnelles. Dans le cas de la boucle 1, à la figure 8.3, la borne en question est notée BI1,2. Elle respecte l'ensemble des règles 2.2 à 2.7-i, en plus de 2.8-ii. Ainsi, utilisant cette borne, la boucle 1 (deux séquences, en rose) et la boucle 2 (une séquence, en vert) seront rincées (voir le tableau 8.1; à noter qu'à la section 8.2.6, au terme de l'application de l'étape 5 de la procédure, sera présenté le détail des séquences de RUD).

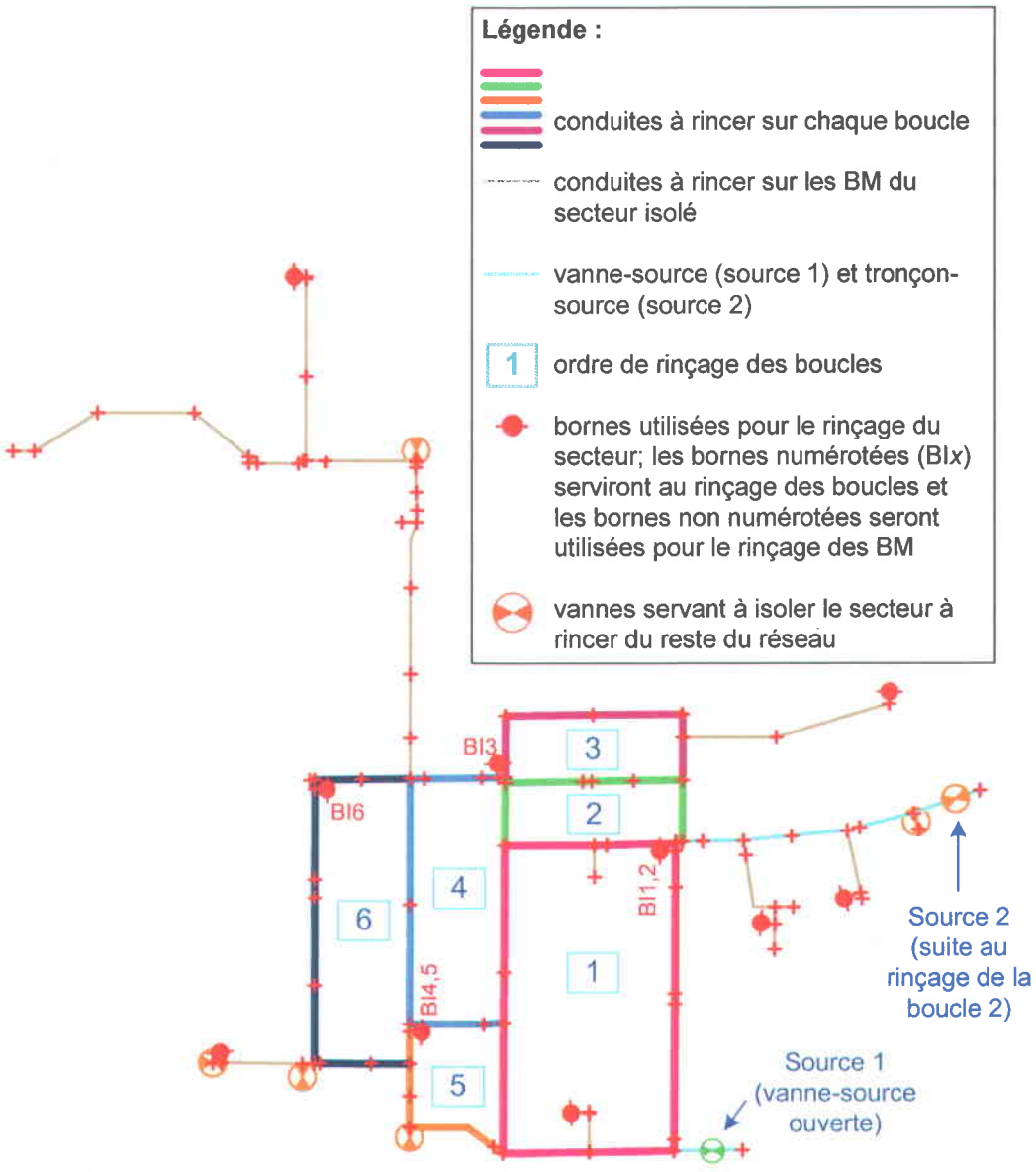


Figure 8.3 : Représentation du secteur isolé et à rincer, lors de l'occurrence d'une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. Afin de simplifier la présentation, seule la partie isolée du réseau de Valcourt est représentée.

2.1 Pour tout tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po), sélectionner la borne permettant de le rincer séparément, en respectant les règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7 ci-après.

S'il reste une portion de boucle à rincer dont le diamètre < 300 mm (12 po), continuer à 2.2.

2.2 Borne se trouvant : (1) sur la boucle courante; OU (2) sur une boucle voisine (précédemment rincée ou non), à distance maximale de 25 m de la boucle courante.

2.3 Borne faisant en sorte que les vannes de transition se trouvent sur la boucle courante (et/ou toute autre boucle qu'elle permet de rincer – voir 2.8), et non sur des boucles précédemment rincées.

2.4 Pour au moins l'une des séquences de la boucle, la (les) vanne(s) de transition doit (doivent) permettre d'éviter la présence de contaminant entre la borne et cette (ces) vanne(s). La séquence en question sera la dernière rincée sur la boucle. Les vannes en question sont retenues, en vue de l'étape 5a de la procédure (revoir, au besoin, l'exemple donné à la section 7.2.1.1 et à la figure 7.1).

2.5 Borne répartissant la longueur des séquences sur la boucle, de sorte qu'elles soient ≤ 1000 m.

2.6 Borne située de façon à ce que les vannes se trouvant à proximité permettent d'éviter les pressions trop faibles, voire négatives, dues à la variation des élévations au voisinage de la borne (une variation de +2 m est tolérée par rapport à la borne). Les vannes sont retenues, en vue de l'étape 5a de la procédure.

2.7 i. Borne qui permette, en priorité, d'élaborer des séquences de diamètre constant OU « grand vers petit »
ii. SI aucune borne ne le permet, tolérer 1 séquence « petit vers grand »; choisir, s'il y a lieu, une borne qui en réduit la longueur
iii. SI aucune borne ne le permet, tolérer 2 séquences « petit vers grand »

2.8 Critères supplémentaires à examiner (surtout utiles s'il persiste plus d'une borne candidate)
i. Borne permettant le rinçage de la boucle en une seule séquence
ii. SINON, borne permettant le rinçage d'une boucle voisine par même borne que la boucle courante, tout en s'assurant, pour cette 2e boucle, que les règles 2.2-2.8 seront respectées; retenir la 2e boucle et la borne comme candidates suivantes
iii. SINON, SI toutes les bornes candidates imposent le rinçage de la boucle courante en 2 séquences
CAS 1 : borne permettant de créer 2 séquences de diamètre constant, tout en assurant la meilleure répartition de la résistance hydraulique par unité de débit
CAS 2 : borne permettant de créer 1 séquence de diamètre constant et l'autre de diamètre variable, tout en minimisant la longueur de la séquence de diamètre variable

2.9 SI aucune borne n'a pu être sélectionnée :
i. Borne se trouvant sur un BM adjacent à la boucle et qui respecte les règles 2.3-2.8
ii. SINON, borne permettant le rinçage de la boucle en 2 séquences unidirectionnelles simultanées et qui respecte les règles 2.2, 2.5-2.8
iii. SINON, borne qui permet le rinçage de la boucle courante de façon simultanée avec l'une des séquences d'une boucle voisine et qui respecte les règles 2.3-2.8

Figure 8.4 : Description des règles permettant la sélection des bornes d'incendie pour le rinçage des boucles, aux étapes 2 et 3.b de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1 (à noter que dans le cas de l'étape 3b, la numérotation des règles est 3b.*x*, au lieu de 2.*x*).

8.2.3 Étape 3 de la procédure de rinçage

L'étape 3 de la procédure de rinçage se subdivise en quatre sous-points, lesquels sont appliqués de façon itérative, tant que toutes les boucles du secteur à rincer n'ont pas été analysées.

Étape 3a : Sélection de la boucle suivante à rincer

Le sous-point 3a vise à déterminer l'ordre suivant lequel les boucles seront rincées sur le terrain. À chaque itération, la boucle suivante est sélectionnée à partir des règles indiquées à la figure 8.5 (conséquemment, la boucle en question ainsi que les conduites visées passent du statut de « non analysées » au statut d'« analysées »).

3a.1 SI une boucle a déjà été sélectionnée, aller à 3b

3a.2 SINON

i. Sélectionner, en priorité, une boucle voisine partageant (1) des conduites OU (2) des nœuds avec la boucle précédente
   S'il y a plus d'une candidate,
   CAS 1 : chercher une boucle partiellement isolée (i.e. dont le linéaire partagé n'est commun qu'à la boucle précédemment rincée) et sélectionner cette dernière s'il y a lieu

   CAS 2 : aller à la boucle dont le % de linéaire partagé avec des boucles déjà rincées est maximal

ii. S'il n'y a aucune boucle partageant des conduites ou des nœuds avec la précédente
   SI l'utilisation de la 2e source est requise* (et que le changement de source n'a pas encore eu lieu), chercher une boucle déjà rincée en partie ET partageant des conduites avec une boucle à laquelle la 2e source est adjacente; retenir la boucle qui est adjacente à la 2e source comme étant la candidate suivante à rincer

   SINON, S'il y a un tronçon linéaire liant une boucle rincée et une boucle en retrait (non rincée), aller à la boucle en retrait

   SINON, aller à la boucle dont le % de linéaire partagé avec des boucles déjà rincées est maximal

** Voir l'étape 3c de la procédure de rinçage.*

Figure 8.5 : Description des règles permettant de déterminer l'ordre de rinçage des boucles, à l'étape 3a de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

En général, les activités de RUD progressent d'une boucle à une voisine. Dans certains cas, comme l'indique la règle 3a.1, la boucle suivante a déjà été sélectionnée avant l'étape 3a, soit à l'étape 2 ou lors d'une itération précédente sur l'étape 3. Par exemple, pour le cas présenté à la figure 8.3, aux deux premières itérations sur l'étape 3, les boucles 1 et 2 sont déjà identifiées. Elles ont été retenues suite à l'application de l'étape 2 et seront rincées utilisant la même borne (BI1,2). Autrement, la règle 3a.2-i détermine, parmi les boucles voisines candidates, laquelle sera sélectionnée. Pour l'exemple de la figure 8.3, l'ordre de rinçage des boucles est justifié au tableau 8.1, en fonction des règles de la figure 8.5.

Selon la configuration et la taille du secteur à rincer, il peut arriver, à un certain stade, qu'une boucle n'ait plus de voisine bien que l'ensemble des boucles du secteur n'ait pas été analysé. Dans un pareil cas, c'est la règle 3a.2-ii qui détermine quelle sera la boucle suivante (aucune occurrence dans l'exemple de la figure 8.3; voir par exemple l'ordre de rinçage des boucles pour les secteurs isolés suite à une première détection aux détecteurs 31 et 112 – Valcourt ainsi qu'au détecteur 201 – Terrasse-Vaudreuil, à l'annexe 5).

Étape 3b : Sélection de la borne pour le rinçage de la boucle

À chaque itération de l'étape 3, suite à la sélection d'une boucle à rincer, la borne qui sera utilisée à cette fin est ensuite sélectionnée, suivant les mêmes règles qu'à l'étape 2 (Figure 8.4). Pour l'exemple d'application de la figure 8.3, les bornes retenues sont identifiées à l'aide de la notation BIx, où x représente le numéro de la (des) boucle(s) pour le rinçage de laquelle (desquelles) la borne sera utilisée. Les règles justifiant le choix de chaque borne sont indiquées au tableau 8.1. Le linéaire de conduites à rincer sur chacune des boucles est indiqué à la figure 8.3 par une couleur différente (rappelons que la section 8.2.6 donne le détail des séquences de RUD, incluant les vannes à manipuler). Dans certains cas, une borne a été sélectionnée

précédemment (boucles 2 et 5, rincées respectivement par les mêmes bornes que les boucles 1 et 4 aux figure 8.3 et tableau 8.1). La procédure continue alors à l'étape 3c.

En fait, les règles 3b.1 à 3b.9 (ou 2.1 à 2.9; figure 8.4) permettent de définir une première stratégie de RUD qui respecte un ensemble de critères opérationnels, tout en favorisant dès le départ la validité hydraulique, afin qu'un nombre restreint d'ajustements subséquents soit nécessaire à l'étape 5 de la procédure (toujours à l'intérieur des limites imposées par la conception des réseaux ainsi que par la configuration des secteurs à rincer).

Étape 3c : Vérification de l'utilisation possible de la deuxième source

L'utilisation possible de la seconde source d'eau propre, si requise, est vérifiée à l'étape 3c de la procédure de rinçage (Figure 8.1). Deux conditions peuvent conduire à un changement de source au cours du rinçage d'un secteur donné : (1) ce dernier appartient à la classe des grands secteurs (i.e. la longueur totale de conduites à rincer $\geq$ 40 % de la longueur de conduites du réseau entier, section 7.1); (2) la seconde vanne-source se trouve à la terminaison d'un tronçon-source (Figure 7.1, section 7.1) dont le nœud terminal (auquel est attachée la vanne-source) n'est pas une borne d'incendie. L'application de ces conditions est vérifiée à l'avance, pour chaque secteur isolé. Dans les cas où aucune ne s'applique, à chaque itération, la procédure se poursuit avec l'étape 3d, après 3b. Sinon, si la boucle identifiée en 3a se trouve adjacente à la seconde source (vanne-source ou tronçon-source), un changement de source devra être effectué lors du rinçage de cette boucle. Afin d'éliminer toute contamination logée au voisinage de la vanne-source (ou dans le tronçon-source), une nouvelle séquence de rinçage doit être créée (ci-après appelée *séquence de changement de source*). À cette fin, une borne respectant les règles 3b.1 à 3b.7 (Figure 8.4) est sélectionnée. Avant l'ouverture de la seconde source, bien entendu, la première source devra être fermée (voir aussi l'étape 5b de la procédure de rinçage, section 8.2.5).

Tableau 8.1 : Justification des résultats présentés à la figure 8.3, suivant l'application des règles et critères des étapes 1 à 3b de la procédure de RUD.

Boucle	Règles justifiant l'ordre de sélection des boucles (Figures 8.2 et 8.5)	Règles justifiant le choix des bornes (Figure 8.4)
1	Règle 1.2 : boucle adjacente à la source primaire (vanne-source)	BI1,2 : respect des règles 2.2 à 2.7-i et 2.8-ii Deux séquences seront créées sur la boucle 1, en rose, de part et d'autre de la borne, depuis la source 1; la borne sera utilisée pour le rinçage de la boucle 2 (voisine).
2	Règle 3a.1 : voisine à la boucle 1 et sera rincée utilisant la même borne que la boucle 1	BI1,2 : respect des règles 2.2 à 2.7-ii et 2.8-i Étant utilisée pour le rinçage d'une seconde boucle consécutive, cette borne permet le rinçage de la boucle 2 en une seule séquence, en vert; le diamètre des conduites, pour cette séquence croît de 150 mm à 200 mm et redevient ensuite 150 mm.
3	Règle 3a.2-i : partage des conduites avec la boucle 2 et elle est partiellement isolée (i.e. partage des conduites avec une seule boucle, soit la 2)	BI3 : respect des règles 3b.2 à 3b.7-ii Deux séquences seront créées sur la boucle 3, en violet, de part et d'autre de la borne; le diamètre des conduites, pour l'une des séquences, décroît de 150 mm à 100 mm et augmente ensuite à 150 mm; à noter que l'autre séquence est d'une longueur de moins de 10 m (il s'agit de la seule borne disponible qui respecte les règles 3b.1 à3b.7; voir la section 8.2.6).
4	Règle 3a.2-i : partage un nœud avec la boucle 3 et il s'agit, dans ce cas, de la seule candidate (donc nécessairement, celle dont le linéaire partagé avec la boucle 3 est maximum)	BI4,5 : respect des règles 3b.2 à 3b.7-ii et 3b.8-ii Deux séquences seront créées sur la boucle 4, en bleu plus pâle, de part et d'autre de la borne; le diamètre des conduites, pour l'une des deux séquences, décroît de 150 mm à 100 mm et revient ensuite à 150 mm; la borne sera utilisée pour le rinçage de la boucle 5 (voisine).
5	Règle 3a.1 : voisine à la boucle 4 et rinçage par la même borne que la boucle 4 (décision relevant de l'application de la règle 3b.8-ii, figure 8.4)	BI4,5 : respect des règles 3b.2 à 3b.7-i et 3b.8-i Étant utilisée pour le rinçage d'une seconde boucle consécutive, cette borne permet le rinçage de la boucle 5 en une séquence, en orangé.
6	Règle 3a.2-i : conduites partagées avec la boucle 5 (seule candidate, étant la dernière boucle à analyser pour ce secteur)	BI6 : respect des règles 3b.2 à 3b.7-i Deux séquences seront créées sur la boucle 6, en bleu foncé, de part et d'autre de la borne.

Dans l'exemple de la figure 8.3, la seconde condition énoncée ci-haut est rencontrée. Un changement de source sera effectué lors du rinçage de la boucle 2, à laquelle le tronçon-source

(source 2) est adjacent (plus de détails sont donnés à la section 8.2.6). Dans le cas présent, la borne BI1,2 (Figure 8.3), qui aura servi au rinçage de la boucle 2 (et de la boucle 1), sera réutilisée pour la séquence de changement de source. Pour les boucles 3 à 6, les activités de RUD se poursuivront en utilisant la source secondaire.

Étape 3d : Sélection des bornes pour le rinçage des BM

Pour chaque boucle sélectionnée en 3a, l'étape 3d de la procédure de RUD identifie les bornes pour le rinçage des BM qui lui sont adjacents, le cas échéant (règle 3d.1, figure 8.6). Les bornes pour le rinçage des BM adjacents à tout tronçon-source sont également sélectionnées (règle 3d.2, figure 8.6). Deux critères particuliers doivent être respectés lors du choix des bornes, soit : (1) procéder au rinçage, de façon séparée, de tout tronçon dont le diamètre est supérieur ou égal à 300 mm (12 po) (aucune occurrence dans l'exemple de la figure 8.3)[49] (2) éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives, tout comme dans le cas du rinçage des boucles (voir par exemple la règle 2.6, figure 8.4).

En lien avec l'hypothèse 13, posée à la section 7.3, seuls les BM le long desquels au moins une borne est présente sont visés par la présente méthodologie. Tel qu'il est mentionné à la section 7.1, ces BM sont soit linéaires ou arborescents. Idéalement, les bornes se trouveront à la terminaison de chaque branche des BM, bien que ce ne soit pas toujours le cas. Dans l'exemple de la figure 8.3, sept BM sont identifiés (en gris), dont deux sont arborescents. Six de ces BM seront rincés en partie ou en totalité, utilisant les bornes ne portant pas de numéros représentées à la figure 8.3 et se trouvant à la terminaison ou le long de ces BM.

[49] Les tronçons de 300 mm (12 po) de diamètre et plus seront surtout présents le long de BM créés par la fermeture permanente de vannes aux fins de délimitation des zones de pression (réseau de Valcourt, figure 4.2; voir aussi les secteura isolés et à rincer suite à une première détection aux détecteurs 112 et 159, réseau de Valcourt, à l'annexe5).

3d.1 TANT QU'il y a des BM adjacents à la boucle

i. S'il y a un tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po), sélectionner une borne qui se trouve le plus près, en aval de ce tronçon; au besoin, retenir des vannes permettant d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives.

ii. TANT QU'il reste des branches au BM (i.e. segments terminés par des nœuds de degré = 1*), rechercher une borne se trouvant le plus près de l'extrémité de la branche; au besoin, retenir des vannes permettant d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives.

3d.2 SI un tronçon-source est adjacent à la boucle ET que des BM sont adjacents à ce tronçon, aller à 3d.1-ii.

* *Rappelons que ces segments sont soit réels ou créés artificiellement par la fermeture de vannes servant à l'isolement de secteurs contaminés.*

Figure 8.6 : Description des règles permettant de sélectionner les bornes pour le rinçage des BM, à l'étape 3d de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

8.2.4 Étape 4 : Stratégie préliminaire

Tel que le mentionne la section 8.1, au terme des étapes 1 à 3, une stratégie préliminaire de RUD est obtenue. Pour le présent exemple d'application, la figure 8.3 et le tableau 8.1 en déterminent les caractéristiques.

8.2.5 Étape 5 de la procédure de rinçage

À l'instar de l'étape 3 de la procédure de RUD, l'étape 5 est itérative (Figure 8.1). Elle procède en trois sous-points, jusqu'à ce que toutes les boucles du secteur à rincer aient été analysées (à nouveau). Pour une boucle donnée, à chaque itération : (1) les vannes à manipuler pour l'exécution du RUD sont sélectionnées, (2) l'ordre de rinçage des séquences sur la boucle et sur les BM adjacents (le cas échéant) est déterminé et (3) la validité hydraulique de chacune de ces séquences est vérifiée, en fonction des critères de vitesse et pression fixés à cet égard (section 7.2.2); au besoin, une correction est appliquée. À noter, dans ce dernier cas, qu'une nouvelle

stratégie préliminaire n'est pas entièrement redéfinie. Les alternatives de modifications disponibles localement sont plutôt examinées et la procédure retourne à l'étape 5a. Lorsque les critères hydrauliques sont respectés ou qu'il ne persiste pas d'alternatives de correction possibles pour l'ensemble des séquences de RUD associées à une boucle donnée, la boucle suivante est analysée (retour à 5a).

Dans les sous-sections qui suivent, les règles relatives à chacun des sous-points de l'étape 5 sont d'abord présentées. Ensuite, l'application de ces sous-points est illustrée pour le cas de la figure 8.3, à la section 8.2.6.

Étape 5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du rinçage unidirectionnel

Suivant les critères établis aux sections 7.2.1.1 et 7.2.2, les règles de l'étape 5a (Figure 8.7) permettent d'identifier les vannes qui serviront au RUD. À chaque itération, trois types de vannes sont sélectionnées de façon définitive, soit : (1) à la règle 5a.1, les vannes de transition (dont la disponibilité est considérée lors de l'application des étapes 2.3, 2.4 ainsi que 3b.3, 3b.4, à chacune des itérations sur l'étape 3); (2) à la règle 5a.2, les vannes servant à l'isolement, en aval, de la boucle à rincer; et (3) à la règle 5a.3, les vannes visant à éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives (identifiées lors de l'application des étapes 2.6 et 3b.6, à chacune des itérations sur l'étape 3). En ce qui concerne cette dernière règle, dans certains cas, les vannes sélectionnées en 5a.1 et 5a.2 remplissent déjà la fonction visée. Les vannes qui avaient été retenues sont alors ignorées.

C'est également à l'étape 5a que, dans le cas où une séquence est modifiée en 5c parce qu'elle ne respecte pas les critères de vitesse ou pression fixés, les vannes précédemment identifiées pour le

rinçage de la boucle à laquelle la séquence appartient sont modifiées au besoin (lors d'une itération supplémentaire à l'étape 5).

Tout en favorisant la réutilisation des vannes :

5a.1 Vannes de transition d'une séquence de boucle à l'autre, en considérant les vannes identifiées lors de l'application des règles 2.3, 2.4, 3b.3 et 3b.4

5a.2 Vannes servant à isoler, en aval de la boucle rincée (ou *des* boucles rincées par la même borne), sauf s'il s'agit de la dernière boucle analysée pour le présent secteur à rincer
SI les vannes ont déjà été sélectionnées (cas de boucles rincées par la même borne), aller à 5a.3

SINON,
i. Isolement adjacent aux boucles, de façon systématique

ii. Pour les petits secteurs de réseau, si l'isolement adjacent n'est pas suffisant ou réalisable, chercher des vannes supplémentaires de façon à ce que l'eau ne puisse toujours circuler que de sections rincées vers sections à rincer OU que de sections non rincées vers sections non rincées (i.e. au plus, un seul point de communication avec le secteur aval non rincé ET aucun point de communication entre la borne et le secteur déjà rincé)

iii. Pour les grands secteurs de réseau, isolement complet des boucles

5a.3 Considérant les vannes sélectionnées en 5a.1 et 5a.2, si besoin est, utiliser les vannes identifiées par les règles 2.6 et 3b.6 (visant à éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives)

Figure 8.7 : Description des règles permettant de sélectionner les vannes pour l'exécution du RUD, à l'étape 5a de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

Au fur et à mesure de la progression des opérations de RUD, un sous-secteur propre sera créé, lequel s'agrandira jusqu'à occuper la totalité du secteur à rincer, et ce, puisque : (1) les vannes appropriées permettant d'isoler, en aval, toute nouvelle boucle à rincer seront fermées (règle 5a.2); et (2) toute vanne et se trouvant sur une boucle dont le rinçage est terminé (et dont la fermeture n'est plus utile) sera rouverte (soit les vannes répondant principalement aux règles 5a.1 et 5a.3). Autant que faire se peut, les vannes sélectionnées précédemment (aux règles 5a.2 et/ou 5a.3; boucles précédentes) seront réutilisées en tant que vannes de transition pour le rinçage des séquences sur les boucles suivantes (section 7.2.1.1; plus d'explications sont données à la section 8.2.6, à l'aide d'illustrations concrètes).

Étape 5b : Détermination de l'ordre de rinçage des séquences sur la boucle

Connaissant l'ordre de rinçage des boucles (établi à l'étape 3), l'étape 5b de la procédure vise à déterminer, pour chacune, l'ordre dans lequel l'ensemble des séquences qui y sont associées seront rincées (Figure 8.8).

5b.1 S'il y a une (des) séquence(s) de diamètre ≥ 300 mm (12 po) sur la boucle, rincer celles-ci en priorité (*sachant qu'elles se trouveront à la tête des conduites à rincer sur la boucle, tel qu'il est mentionné précédemment, section 8.2.2*).

S'il persiste au moins une séquence de diamètre < 300 mm (12 po) sur la boucle, aller à 5b.2.

5b.2 L'ordre des séquences sur la boucle doit faire en sorte que le rinçage se termine avec la séquence pour laquelle la (les) vanne(s) de transition respectent les règles 2.4 et 3b.4 (i.e. éviter la présence de contaminant entre la borne et cette (ces) vanne(s)).

S'il y a au moins un BM adjacent à la boucle ET visé par le RUD (étape 3d), aller à 5b.3.

S'il y a une séquence de changement de source adjacente à la boucle, aller à 5b.4.

5b.3 Ordre de rinçage des BM adjacents à la boucle

i. S'il y a plus d'un BM adjacent à la boucle, rincer chaque BM à la suite de la séquence de boucle à laquelle il est adjacent, en conservant les vannes de transition fermées.

SI plus d'un BM est adjacent à une séquence donnée, rincer ceux-ci l'un à la suite de l'autre, depuis le point d'alimentation en eau propre de la séquence (boucle voisine précédemment rincée ou source d'eau propre au secteur à rincer).

ii. SI un seul BM est adjacent à la boucle, rincer celui-ci à la suite du rinçage complet de la boucle, après avoir ouvert les vannes de transition sur la boucle, à moins que celles-ci ne soient utiles pour une boucle ou séquence suivante; dans ce dernier cas, rincer le BM suite à la séquence de la boucle à laquelle il est adjacent.

5b.4 Rinçage des séquences de changement de source

i. SI la boucle se trouve adjacente à une seconde source (vanne-source ou tronçon-source) qui sera utilisée pour le rinçage des boucles suivantes : dans le respect de l'ordre imposé par la règle 5b.2 et en effectuant toutes les manipulations de vannes nécessaires au changement de source au fur et à mesure, rincer d'abord la séquence de boucle à laquelle la source est adjacente et ensuite la séquence de changement de source.

ii. S'il y a des BM adjacents à un tronçon-source, rincer ceux-ci immédiatement suite à la séquence de changement de source, en procédant dans l'ordre depuis la source d'eau propre.

Figure 8.8 : Description des règles permettant de déterminer l'ordre de rinçage des séquences de RUD associées à chaque boucle, à l'étape 5b de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

À la base, pour le rinçage des conduites sur la boucle même, c'est la règle 5b.2 qui impose l'ordre, sachant que les vannes de transition ont été sélectionnées de façon à éviter, pour la dernière séquence rincée, la présence de contamination entre ces vannes et la borne utilisée (sections 7.2.1.1, 8.2.2 et 8.2.3). Les règles 5b.1, 5b.3 et 5b.4 apportent des précisions pour les cas où s'ajoutent, respectivement, des séquences pour : (1) le rinçage de tronçons de grand diamètre sur la boucle, (2) le rinçage de BM adjacents à la boucle et/ou (3) un changement de source (lorsque celle-ci est adjacente à la boucle).

Étape 5c : Validation hydraulique

À chaque itération sur l'étape 5 de la procédure de RUD, en 5c l'ensemble des séquences se rapportant à une boucle donnée est l'objet d'une simulation hydraulique en tenant compte des indications sur les vannes à manipuler issues de l'étape 5a ainsi que de l'ordre d'exécution (et donc de simulation) des séquences obtenu à l'étape 5b.

Lorsque l'un des critères sur la vitesse minimale de rinçage ou la pression minimale à maintenir en réseau n'est pas respecté (soit 1 m/s et 20 kPa, section 7.2.2), les règles 5c.1 et 5c.2 proposent des corrections pour les séquences concernées (Figure 8.9). Notons d'abord que ces corrections ne sont pas toujours applicables et que, lorsqu'elles le sont, elles peuvent parfois permettre une amélioration sans toutefois que les critères ne soient nécessairement respectés. Dans l'une ou l'autre de ces situations, la séquence de rinçage originale est conservée. Dès qu'une correction possible est identifiée pour une séquence donnée, une itération supplémentaire sur l'étape 5 est nécessaire.

De façon générale, lorsque la vitesse de 1 m/s n'est pas atteinte, une ou des borne(s) supplémentaire(s) à ouvrir sont identifiées (règle 5c.1). Celles-ci se trouveront sur la boucle

même (en aval des conduites où la vitesse est trop faible) ou encore le long d'un BM. Dans le cas des séquences dont le diamètre est inférieur à 300 mm (12 po), une seule borne supplémentaire est identifiée (5c.1-i), laquelle pourra être ouverte de façon simultanée avec la borne initialement prévue pour le rinçage de la séquence (ESSAI 1), ou de façon successive (ESSAI 2; plus d'explications sont données à la section 8.2.6, à l'aide d'illustrations concrètes). Pour les séquences de grand diamètre (5c.1-ii), jusqu'à trois bornes pourront être ouvertes de façon simultanée, suivant en cela les indications données à la section 7.2.2.

5c.1 SI la vitesse de RUD simulée < 1 m/s

i. Le long d'une séquence de boucle, de changement de source ou de BM, dont le diamètre < 300 mm (12 po)

TANT QU'il y a des alternatives à tester ET que la vitesse < 1 m/s
ESSAI 1 : chercher une borne supplémentaire, le plus près en aval du tronçon de faible vitesse
(1) s'il s'agit d'une séquence de BM, sur le BM lui-même
(2) s'il s'agit d'une séquence de boucle ou de changement de source, le long d'un BM adjacent;
OU encore, une borne le long de la séquence même et respectant les règles 3b.3 à 3b.7;
cette borne sera ouverte de façon simultanée, avec la borne initialement prévue pour le rinçage de la séquence

ESSAI 2 : SI une borne supplémentaire a déjà été sélectionnée à l'essai 1, procéder en deux séquences qui seront rincées l'une après l'autre (utilisant respectivement la borne supplémentaire et la borne initialement prévue).

ii. Le long d'une séquence pour le rinçage d'un tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po)

TANT QUE la vitesse simulée demeure < 1 m/s ET que le nombre de bornes sélectionné < 3
Chercher une borne supplémentaire, en aval du tronçon où la vitesse est trop faible
(1) s'il s'agit d'une séquence de BM, sur le BM lui-même
(2) s'il s'agit d'une séquence de boucle ou de changement de source, le long d'un BM adjacent;
OU encore, une borne sur la boucle même (ou sur la boucle à laquelle la séquence de changement de source est adjacente) et respectant les règles 3b.3 à 3b.7;
cette borne sera ouverte de façon simultanée, avec la borne initialement prévue pour le rinçage de la séquence

5c.2 SI la pression simulée < 20 kPa en un nœud, aller à 5c.1.

5c.3 SI l'ouverture d'une borne sur un BM vise à rincer une séquence de boucle (règles 2.9-i, 3b.9-i, 5c.1-i ou 5c.1-ii) ET la borne est celle qui se trouve à l'extrémité (ou le plus près de l'extrémité) du BM ET la vitesse de RUD atteinte dans le BM ≥ 1 m/s, considérer celui-ci comme étant rincé.

Figure 8.9 : Description des règles pour la validation hydraulique des séquences de RUD sur chaque boucle, à l'étape 5c de la procédure de rinçage, dont l'organigramme général est présenté à la figure 8.1.

En ce qui concerne le critère de pression (règle 5c.2), notons que pour l'ensemble des cas analysés dans la présente thèse, chaque fois que la pression simulée ne respectait pas le critère de 20 kPa, la vitesse minimale de RUD n'était pas non plus respectée. C'est pourquoi la règle 5c.2, pour le moment, renvoie à la règle 5c.1 (Figure 8.9). D'autres applications à des réseaux différents pourront contribuer à préciser la règle 5c.2.

8.2.6 Description des séquences individuelles de rinçage unidirectionnel

Afin d'illustrer l'application de l'étape 5 de la procédure de RUD, les séquences de rinçage obtenues pour l'exemple de la figure 8.3 sont présentées boucle par boucle, ci-après (Figures 8.10 à 8.25). Un encadré, où sont précisées les règles de l'étape 5, ainsi que des commentaires accompagnent les figures associées à chaque boucle. Enfin, le tableau 8.2, présenté à la suite de l'ensemble des figures et encadrés, indique les valeurs de vitesse et pression simulées pour la version finale de chacune des séquences de RUD. Rappelons que le secteur à rincer ne contient aucune conduite de grand diamètre (section 8.2).

Boucle 1

L'ensemble des activités de rinçage associées à la boucle 1 impliquent trois séquences unidirectionnelles, soit deux sur la boucle même (séquences 1 et 2, rincées par la borne BI1,2) et une sur un BM adjacent à la boucle (Encadré 1 et figures 8.10 à 8.12).

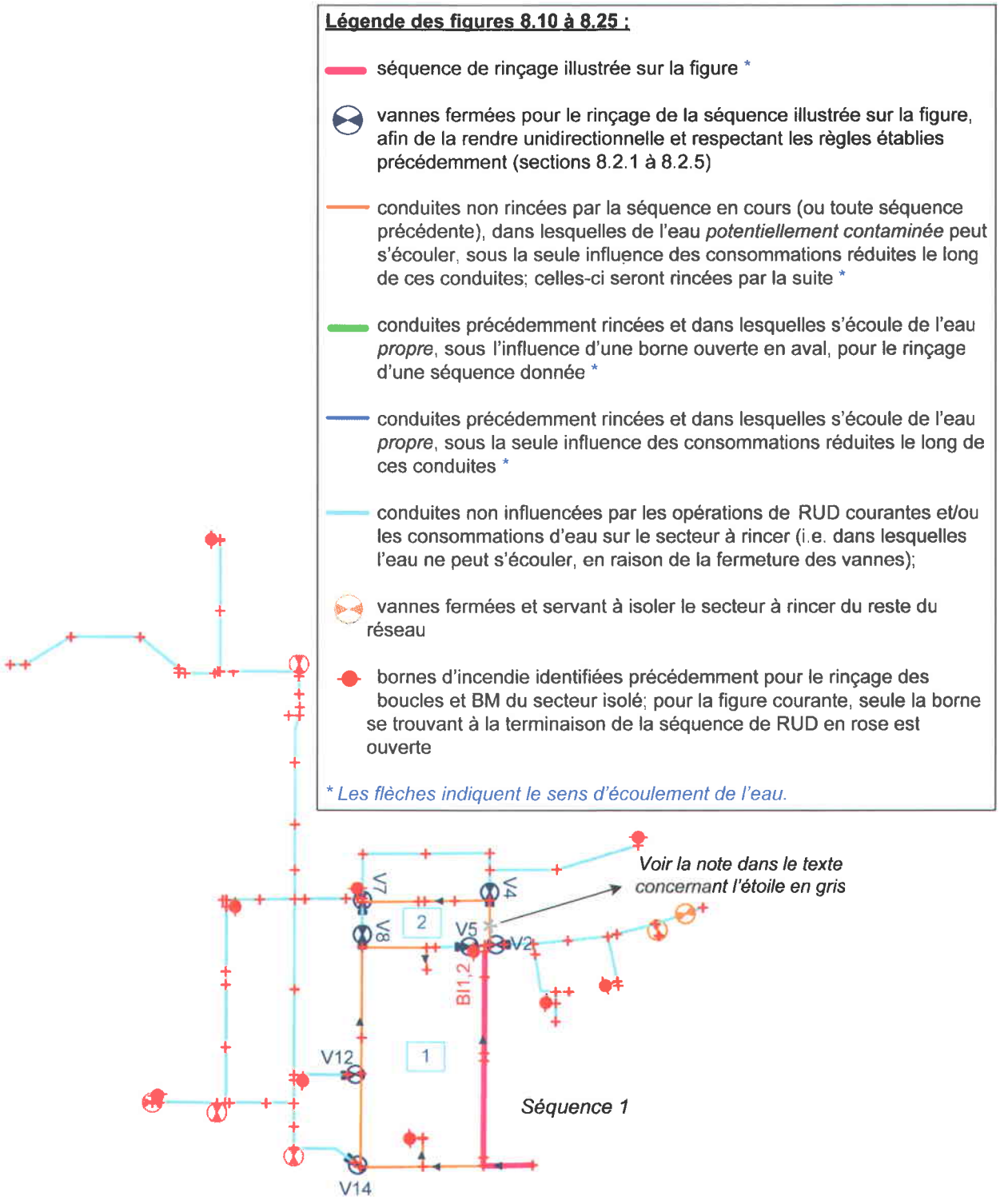


Figure 8.10 : Illustration de la séquence 1, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 1).

Encadré 1

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vannes de transition (de part et d'autre de la borne BI1,2, sur la boucle 1) : V5 (Figure 8.10) et V1 (Figure 8.11). Cette dernière est attachée à la borne BI1,2.
	5a.2-i	Vannes pour l'isolement adjacent à la boucle, en aval de celle-ci (par rapport à la progression envisagée des opérations de RUD; section 7.2.1.1) : V8, V12, V14 (Figure 8.10)[50].
		Les vannes V4 et V7 remplissent la même fonction, pour la boucle 2 (Figure 8.10). Elles sont identifiées à ce stade, sachant que la boucle 2 sera rincée par la même borne que la boucle 1.
	5a.3	La vanne V2 est fermée afin d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives le long du tronçon-source (plus élevé), lors du rinçage de la séquence 1. Autrement, elle n'aurait pas été nécessaire, étant située sur un tronçon s'apparentant à un BM (Figure 8.10).
		V2, V4, V5, V7, V8, V12 et V14 seront fermées dans la même série d'opérations, sur le terrain. (Note : Le texte sur trame bleue, dans chacun des encadrés de la présente section, donne des précisions concernant le moment et l'ordre de manipulation des vannes, sur le terrain, suivant les indications de la section 7.2.1.1).
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	C'est la localisation de la vanne V1 qui détermine l'ordre de rinçage des deux séquences sur la boucle (d'où l'ordre indiqué par les numéros des séquences 1 et 2).
		Suite au rinçage de la séquence 1, V1 sera fermée et V5 (grisée à la figure 8.11) sera ensuite ouverte.
	5b.3-ii	Le BM à rincer est unique (le seul muni d'une borne d'incendie; BM1, figure 8.12). Il sera rincé à la suite de la séquence 2 puisqu'il est adjacent à cette dernière, dont la vanne de transition V1 doit demeurer fermée pour le rinçage de la boucle 2, utilisant la même borne que la boucle 1.
5c : Validation hydraulique		Aucune itération supplémentaire n'a été nécessaire. Les séquences 1, 2 et BM1 ont respecté, dès le départ, les critères de vitesse et de pression minimales (voir le tableau 8.2).
Remarques supplémentaires		*En vue du rinçage de la boucle 2, la vanne V8 (grisée à la figure 8.13) sera ouverte (n'étant plus utile), mais seulement après que la vanne de transition nécessaire au rinçage de la séquence associée à la boucle 2 aura été fermée (vanne V5, règle 5a.1, encadré 2 et figure 8.13).*

[50] La fermeture des vannes V4, V7, V8, V12 et V14 fait en sorte que tous les usagers se trouvant en aval de la boucle 2 (par rapport à la progression envisagée des activités de RUD) sont complètement privés d'eau. Or, il a été supposé, à la section 7.3, que certains usages essentiels de l'eau étaient maintenus. *Nathalie Periche*, lors d'une communication personnelle (juin 2007), a indiqué qu'une telle situation n'était pas nécessairement problématique puisqu'en réalité il persiste de l'eau à une certaine pression, même dans ces secteurs. En bout de ligne, mieux vaut favoriser la sécurité des opérations.

À la figure 8.10, de l'eau potentiellement contaminée peut s'écouler le long des conduites en orangé, sous des consommations supposées réduites (hypothèse 3 posée à la section 7.3), sachant que (1) l'eau contenue dans ces conduites peut être contaminée, n'ayant pas encore été évacuée (elle le sera lors d'opérations subséquentes) et (2) l'eau provenant de la séquence en rose (en amont) est potentiellement contaminée, le rinçage de cette séquence étant en cours.

Le choix des vannes doit, en tout temps, faire en sorte que la couleur orangé n'apparaisse pas (au sens figuré) sur des conduites précédemment rincées (voir par exemple l'endroit marqué d'une étoile grise à la figure 8.10, où il n'existe pas de vanne d'isolement adjacente à la boucle 1, en aval de celle-ci; en maintenant ce point ouvert, de l'eau possiblement contaminée peut s'écouler dans des conduites dont le rinçage subséquent est prévu avec la boucle 2, figure 8.13). De plus, le fait que l'écoulement soit possible dans les conduites orangées ne nuit en rien au caractère unidirectionnel de la séquence illustrée (en rose).

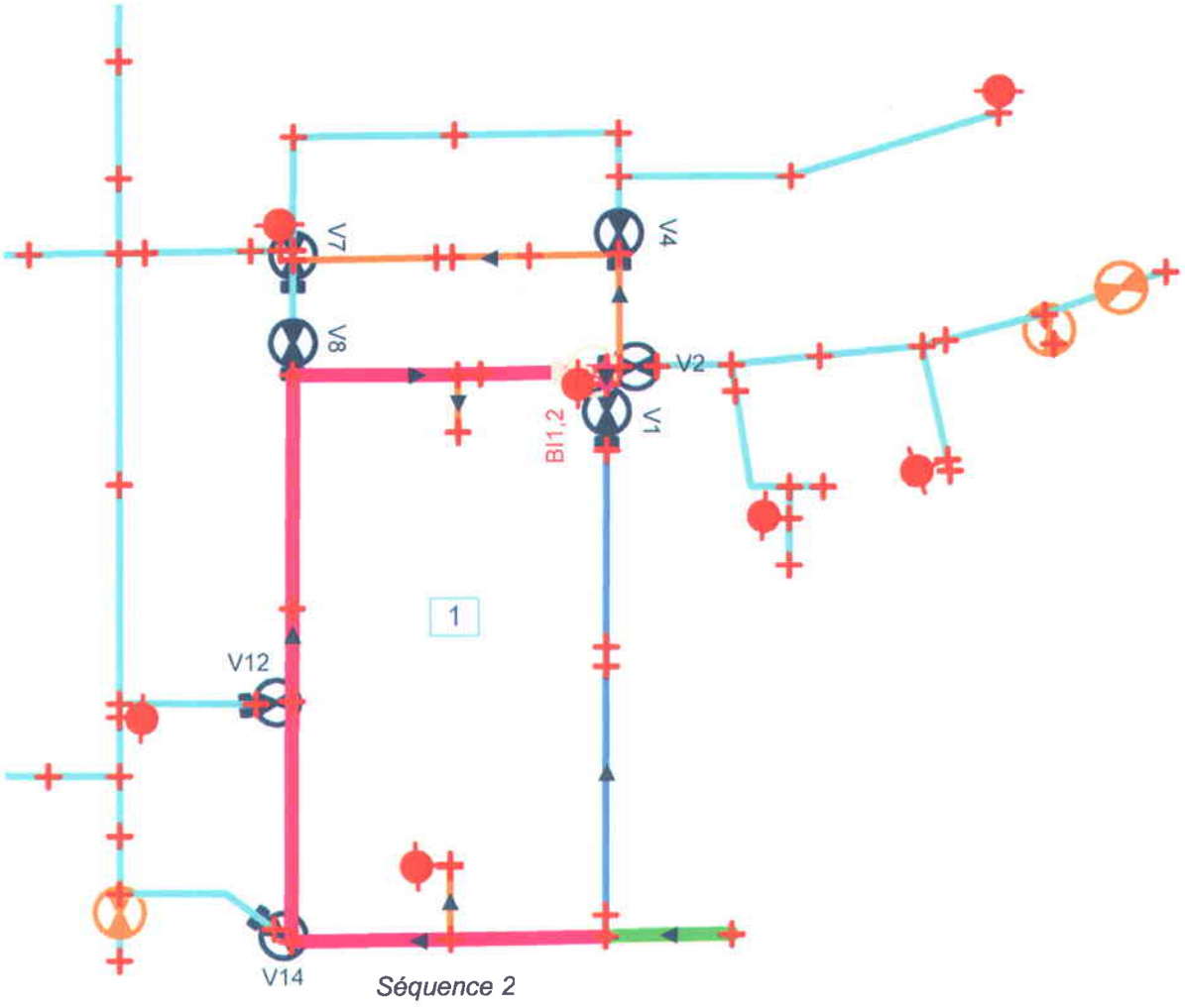


Figure 8.11 : Illustration de la séquence 2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V5 est grisée, indiquant qu'elle est manipulée entre l'exécution des séquences 1 et 2 : V5 était fermée lors du rinçage de la séquence 1 et elle est ouverte pour le rinçage de la séquence 2 (Encadré 1).

Dans les conduites en bleu plus foncé, à la figure 8.11, de l'eau propre s'écoule sous la seule influence des consommations réduites. Ces conduites ont été rincées par la séquence précédente et l'eau qui s'y écoule provient de conduites qui ont, elles aussi, été précédemment rincées (en vert). Au cours de la progression des activités de RUD, les sections orangées seront nécessairement remplacées par des sections en bleu foncé et en vert. Lorsque les opérations de RUD pour l'ensemble des séquences associées à une boucle donnée sont complétées, la couleur orangé ne peut y apparaître à nouveau (au sens figuré).

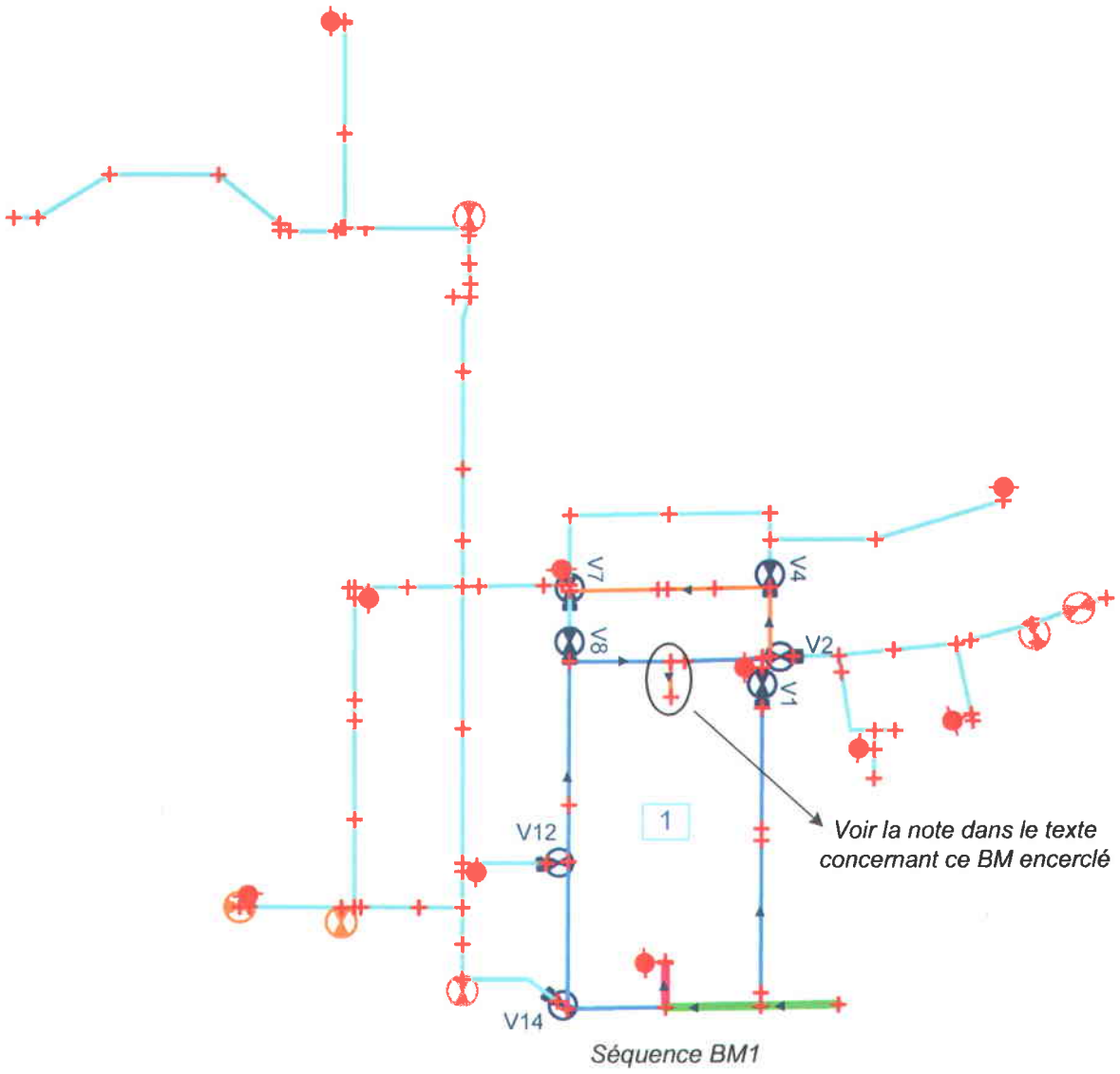


Figure 8.12 : Illustration de la séquence BM1, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 1).

Lors de la transition entre le rinçage de la séquence 2 (Figure 8.11) et le rinçage de la séquence BM1 (Figure 8.12), il est possible, à la limite, que le contaminant diffuse dans les conduites précédemment rincées, en supposant que le panache de contamination s'étende sur la longueur complète du BM et que les consommations soient pratiquement nulles. De façon cohérente avec le cadre de modélisation hydraulique décrit aux chapitres 2 et 5, la diffusion du contaminant est ignorée. Toutefois, en pratique, si une telle situation devait effectivement survenir, l'hypothèse 7

posée à la section 7.3 (et suivant laquelle le rinçage d'une séquence se poursuit jusqu'à ce que le volume d'eau qu'elle contient ait été évacué de huit à neuf fois), fait en sorte que l'eau potentiellement contaminée serait « récupérée » lors du rinçage d'une séquence subséquente (par exemple, la séquence 3, figure 8.13)[51].

En ce qui concerne le BM encerclé à la figure 8.12, celui-ci étant dépourvu d'une borne d'incendie, les opérations de rinçage requises ne sont pas spécifiquement décrites dans le cadre des présents travaux (hypothèse 13, section 7.3). En pratique, cependant, le rinçage de ce BM devra effectivement être effectué et c'est pourquoi, aux figures subséquentes, celui-ci apparaîtra en bleu.

Boucle 2

Pour ce qui est de la boucle 2, les activités de RUD qui y sont rattachées impliquent quatre séquences (Encadré 2 et figures 8.13 à 8.16). Les deux premières (séquences 3 et 4) utilisent la borne BI1,2 pour : (1) le rinçage du linéaire sur la boucle 2 (en une séquence) et (2) la séquence de changement de source (le tronçon-source associé à la source secondaire étant adjacent à la boucle 2, il avait été établi, à l'étape 3c, que cette deuxième source serait utilisée, en remplacement de la source 1, suite au rinçage de la boucle 2; voir la section 8.2.3 et la figure 8.3). Deux autres séquences sont nécessaires au rinçage des BM adjacents au tronçon-source.

[51] En fait, il en est ainsi de toute section de conduites dont le rinçage est prévu ultérieurement et qui est adjacente à une séquence, sur une boucle, dont le rinçage a déjà eu lieu.

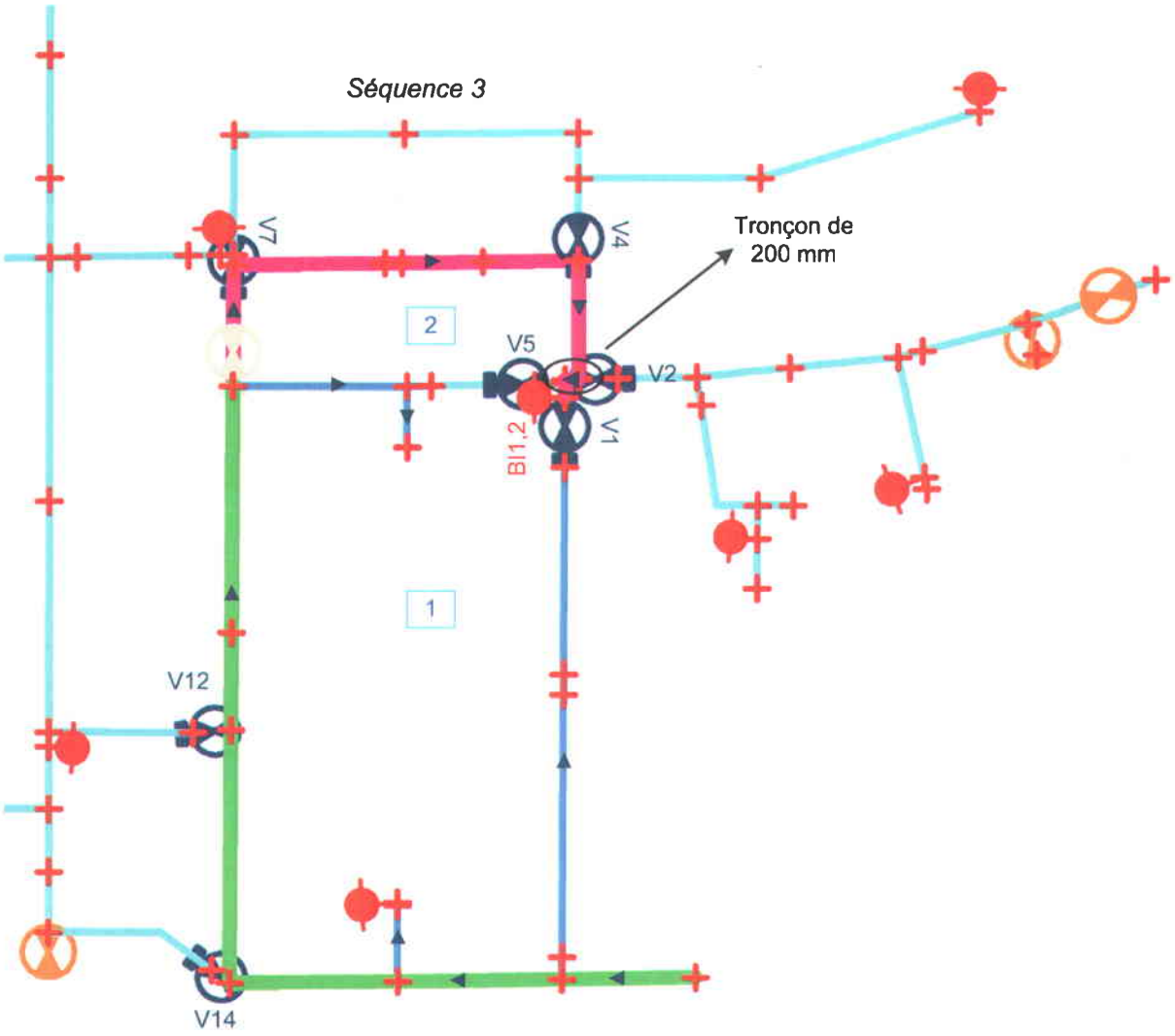


Figure 8.13 : Illustration de la séquence 3, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 2). La vanne V8 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences BM1 et 3. La même borne est utilisée pour le rinçage de la boucle 1 (2 séquences sur la boucle) et de la boucle 2 (1 séquence sur la boucle).

Encadré 2

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vannes de transition : V1, déjà fermée, et V5 (Figure 8.13). La vanne V1 est attachée à la borne BI1,2, alors que V5 empêche la communication entre les conduites de la boucle 2 (potentiellement contaminées) dont le rinçage est en cours et les conduites (propres) de la boucle 1 dont le rinçage est terminé. *La vanne V5 est manipulée plus d'une fois aux fins du rinçage des boucles 1 et 2 (séquences 1 et 3 aux figures 8.10 et 8.13). Une telle situation peut survenir lorsque deux boucles sont rincées en utilisant la même borne.* Les vannes V1, V3 et V5 remplissent également le rôle de vannes de transition pour le rinçage de la séquence de changement de source (Figure 8.14).
	5a.2-i	Vannes pour l'isolement adjacent à la boucle, en aval : V4 et V7, déjà identifiées avec la boucle 1 (Encadré 1). À noter que l'isolement est complet (section 7.2.1.1)
	5a.3	La vanne V2, identifiée précédemment (Encadré 1), demeure fermée pour le rinçage de la séquence 3.
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	Une seule séquence sur la boucle (séquence 3), rincée la première. *Suite au rinçage de la séquence 3, V1 et V5 demeureront fermées, en vue du rinçage de la séquence de changement de source (voir 5b.4 ci-après).*
	5b.3	Aucun BM adjacent au linéaire rincé par la séquence 3 sur la boucle 2.
	5b.4-i	La séquence 4 (Figure 8.14), pour le changement de source, est rincée à la suite de la séquence 3 (à laquelle elle est adjacente). *À cette fin, les manipulations de vannes nécessaires, dans l'ordre, sont : fermeture de V3 et de la vanne-source 1, ouverture de V2 et de la vanne-source 2 (grisées à la figure 8.14).*
	5b.4-ii	Les BM adjacents à la séquence 4 sont rincés à la suite de celle-ci, d'abord BM2 (Figure 8.15) et ensuite BM3 (Figure 8.16).
5c : Validation hydraulique	5c.1-i	La séquence 3 est constituée de conduites dont le diamètre croît de 150 mm (6 po) à 200 mm (8 po), pour ensuite diminuer à 150 mm. Le tronçon de 200 mm est très court, comme le montre la figure 8.13. Lors de la première validation hydraulique, une vitesse de rinçage < 1 m/s, soit 0,75 m/s, a été obtenue pour ce tronçon. La règle 5c.1-i a été appliquée sans succès : aucune borne supplémentaire à ouvrir n'a pu être identifiée en aval du tronçon de 200 mm (1) sur un BM adjacent à la séquence 3, ou (2) sur la séquence elle-même. La séquence originale a donc été conservée (voir le tableau 8.2).
Remarques supplémentaires		*En vue du rinçage de la boucle 3, la vanne V7 demeurera fermée (Figure 8.16) puisqu'elle sera utilisée en tant que vanne de transition. Les vannes V1, V3, V4 et V5 (grisées à la figure 8.17) seront ouvertes, mais seulement après que la vanne d'isolement en aval de la boucle 3 aura été fermée (vanne V9, règle 5a.3, encadré 3 et figure 8.17).*

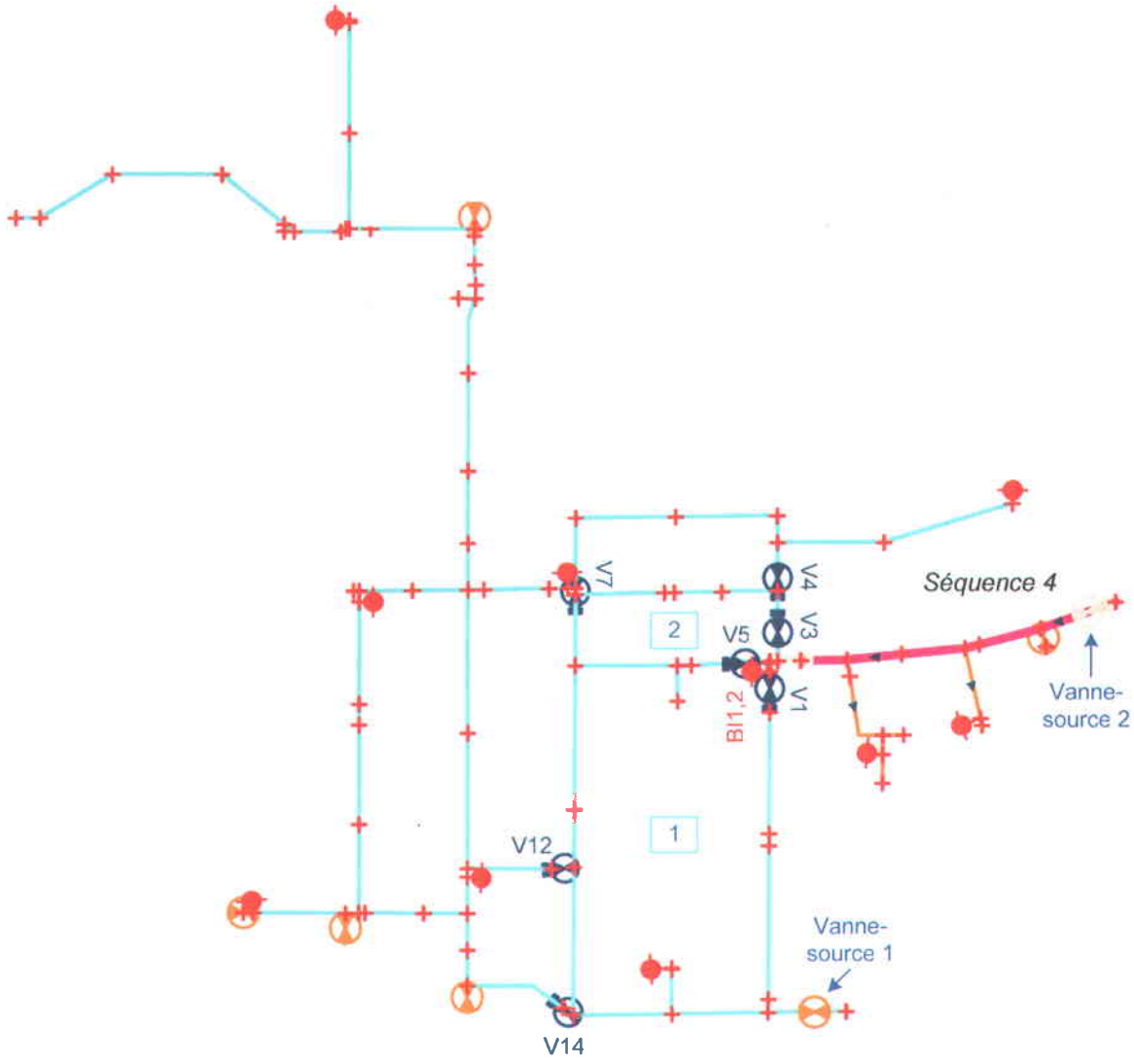


Figure 8.14 : Illustration de la séquence 4, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V2 et la vanne-source 2 sont grisées, indiquant qu'elles sont ouvertes entre les séquences 3 et 4 (Encadré 2).

En raison de la fermeture des vannes V1, V3 et V5, qui empêchent que les boucles 1 et 2 ne soient contaminées à nouveau, et puisqu'il s'agit de l'ouverture d'une nouvelle source d'eau propre, il n'y a forcément pas de conduites déjà rincées sur la figure 8.14 (qui apparaîtraient en vert ou bleu foncé – voir la légende de la figure 8.10).

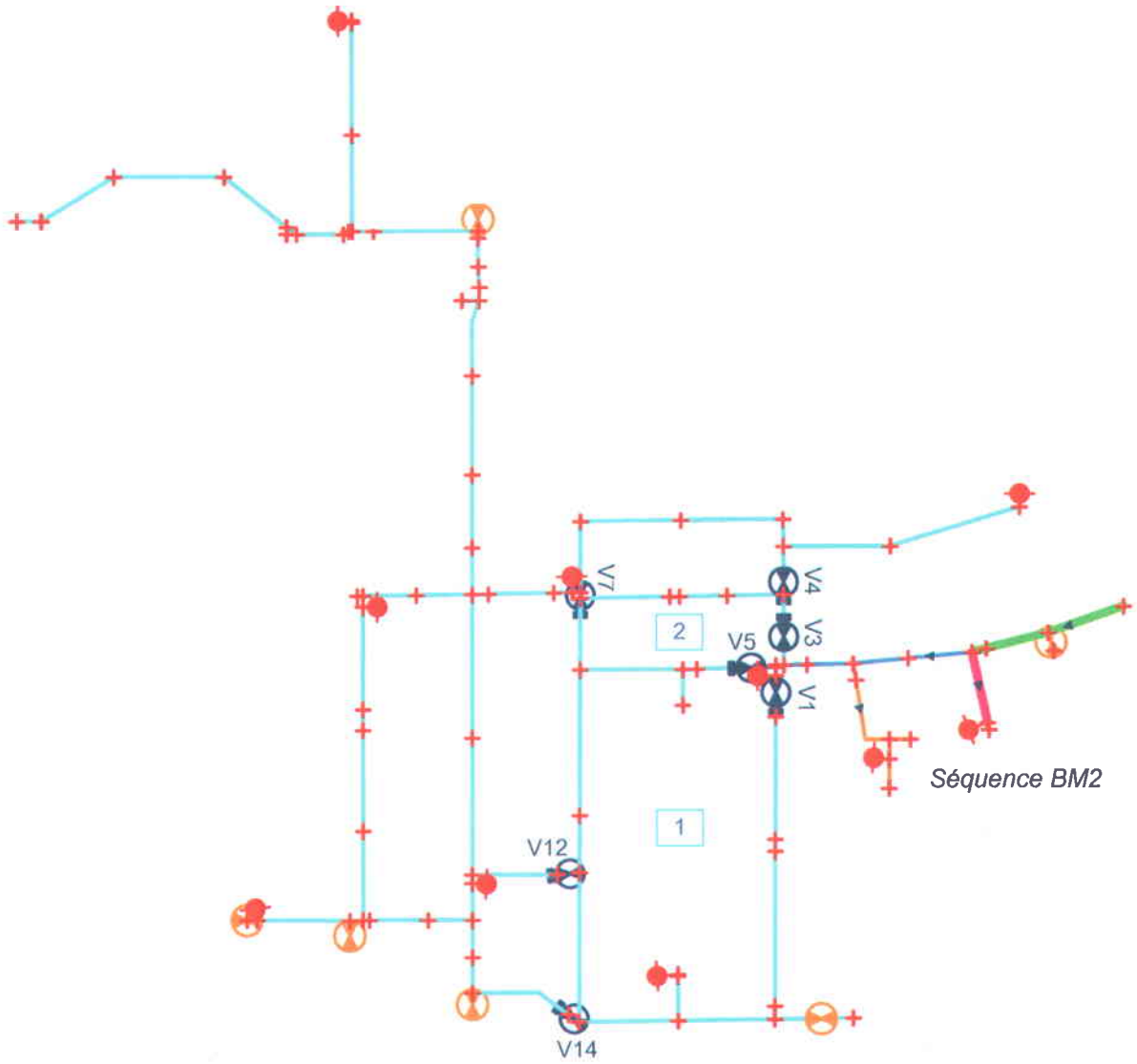


Figure 8.15 : Illustration de la séquence BM2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 2).

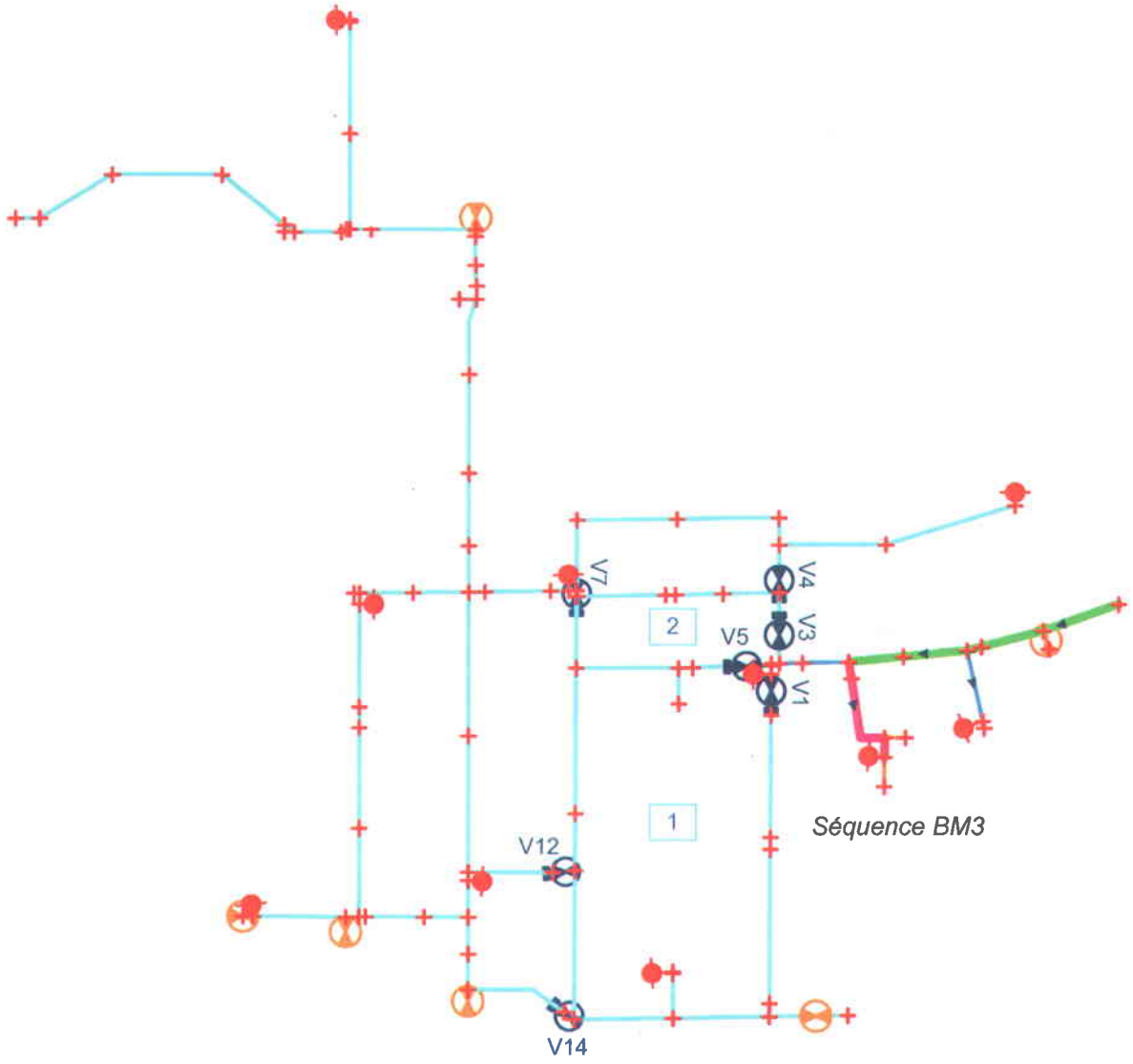


Figure 8.16 : Illustration de la séquence BM3, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 2).

À la figure 8.16, le BM est arborescent et la borne pour le rinçage de la séquence BM3 n'est pas située à l'une des extrémités du BM. Pour ces raisons, il persiste des sections orangées sur la figure. Tel qu'il est indiqué précédemment (voir la figure 8.12), en pratique, le rinçage de ce BM devra être complété par des opérations qui ne sont pas ici spécifiquement décrites (d'où la couleur bleu foncé en remplacement de l'orangé, aux figures subséquentes).

Boucle 3

Trois séquences sont associées au rinçage de la boucle 3, soit deux sur la boucle même (séquences 5 et 6), utilisant la borne BI3, et une visant à rincer un BM adjacent (Encadré 3 et figures 8.17 à 8.19). Tel que l'indique le tableau 8.1, la borne BI3 était la seule candidate disponible pour le rinçage de la boucle 3, suite à l'application des règles 3b.1 à 3b.7. Il en résulte notamment que (1) le diamètre des conduites sur la séquence 5 varie de « grand vers petit, vers grand à nouveau » (150 mm à 100 mm, à 150 mm) et (2) que la séquence 6 est beaucoup plus courte que la séquence 5 (bien qu'en pratique, cela ne pose aucun problème en ce qui concerne la mise en œuvre du RUD).

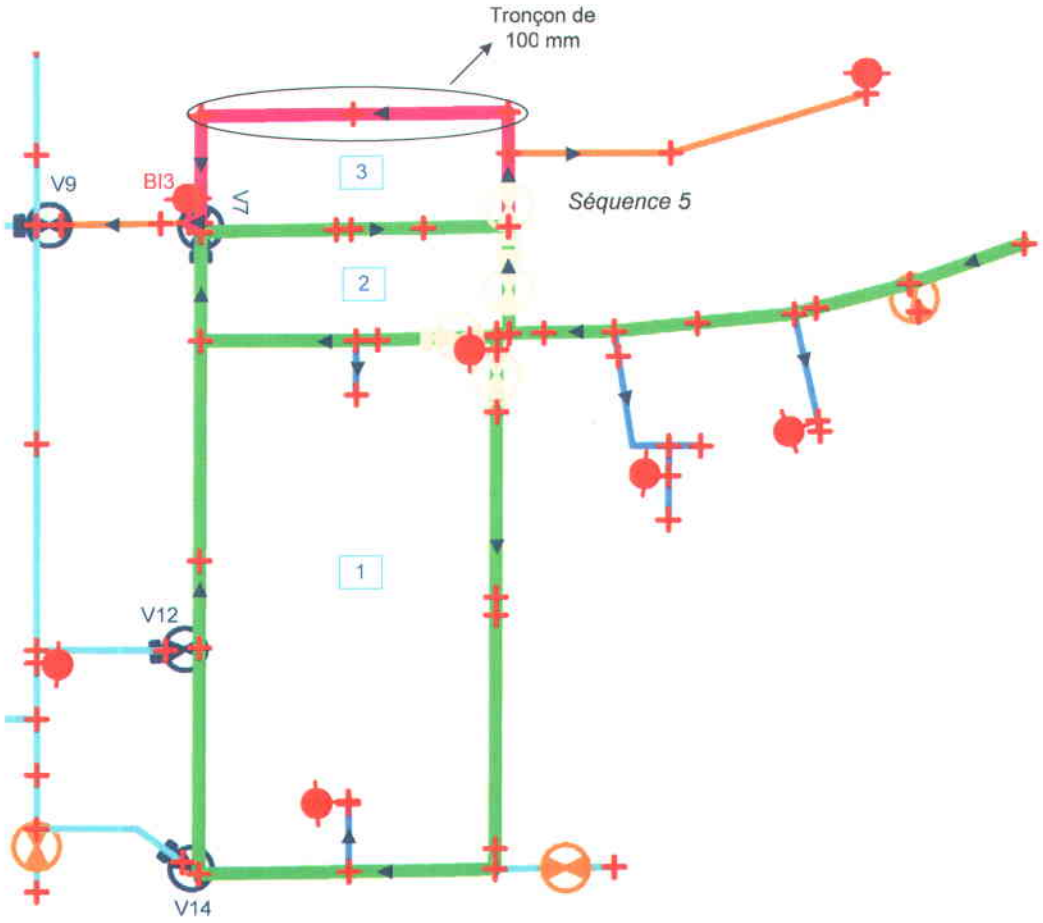


Figure 8.17 : Illustration de la séquence 5, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 3). Les vannes V1, V3, V4 et V5 sont grisées, indiquant qu'elles sont ouvertes entre les séquences BM3 et 5.

Encadré 3

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vannes de transition (de part et d'autre de l'intersection avec la boucle voisine, où se trouve BI3) : V7, déjà fermée (Figure 8.17) et V6 (Figure 8.18).
	5a.2-ii	L'isolement adjacent à la boucle, en aval (règle 5a.2-i), ne s'applique pas ici, notamment puisque la borne BI3 se trouve sur une boucle voisine. Toutefois, la règle 5a.2-ii s'applique et la vanne V9 est fermée.
	5a.3	La vanne V9 permet en outre d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives au sein du secteur non rincé (et plus élevé) se trouvant en aval de la boucle 3.
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	Le cas présent a la particularité suivante : les deux vannes de transition sont attachées au nœud se trouvant à l'intersection de la boucle 3 et de la voisine, sur laquelle est située la borne BI3. Ainsi, le rinçage pourrait être terminé par l'une ou l'autre des séquences 6 et 7, tout en respectant la règle 5b.2. Par contre, la vanne V7 est déjà fermée en raison du rinçage de la boucle 2. De façon à favoriser la réutilisation des vannes (tel qu'il est établi en 5a.1), la séquence 5 (première rincée sur la boucle) est donc celle qui utilise la vanne V7 en tant que vanne de transition. *Suite au rinçage de la séquence 5, V6 sera fermée et V7 (grisée à la figure 8.18) sera ensuite ouverte.*
	5b.3-ii	Le BM4 est rincé à la suite des séquences 5 et 6, après l'ouverture de la vanne V6 (grisée à la figure 8.19). C'est le seul BM adjacent au linéaire rincé sur la boucle 3 et V6 n'est nécessaire au rinçage d'aucune séquence subséquente.
5c : Validation hydraulique	5c.1-i	La séquence 5 est constituée de conduites dont le diamètre décroît de 150 mm (6 po) à 100 mm (8 po), pour ensuite augmenter à 150 mm (Figure 8.17). Lors de la première validation hydraulique, une vitesse de rinçage < 1 m/s, soit 0,92 m/s, a été obtenue pour les tronçons de 150 mm. La règle 5c.1-i a été appliquée sans succès : aucune borne supplémentaire à ouvrir n'a pu être identifiée en aval des tronçons de 150 mm (1) sur un BM adjacent à la séquence 5 ou (2) sur la séquence elle-même. La séquence originale a donc été conservée (voir le tableau 8.2). Mais dans ce cas, somme toute, une vitesse de 0,92 m/s demeure satisfaisante.
Remarques supplémentaires		*En vue du rinçage de la boucle 4, la vanne V12 sera conservée en tant que vanne de transition (Figure 8.19). La vanne V9 (grisée à la figure 8.20) sera ouverte, mais seulement après que les vannes d'isolement en aval de la boucle 4 auront été fermées (vannes V10 et V15, règle 5a.2, encadré 4 et figure 8.20).*

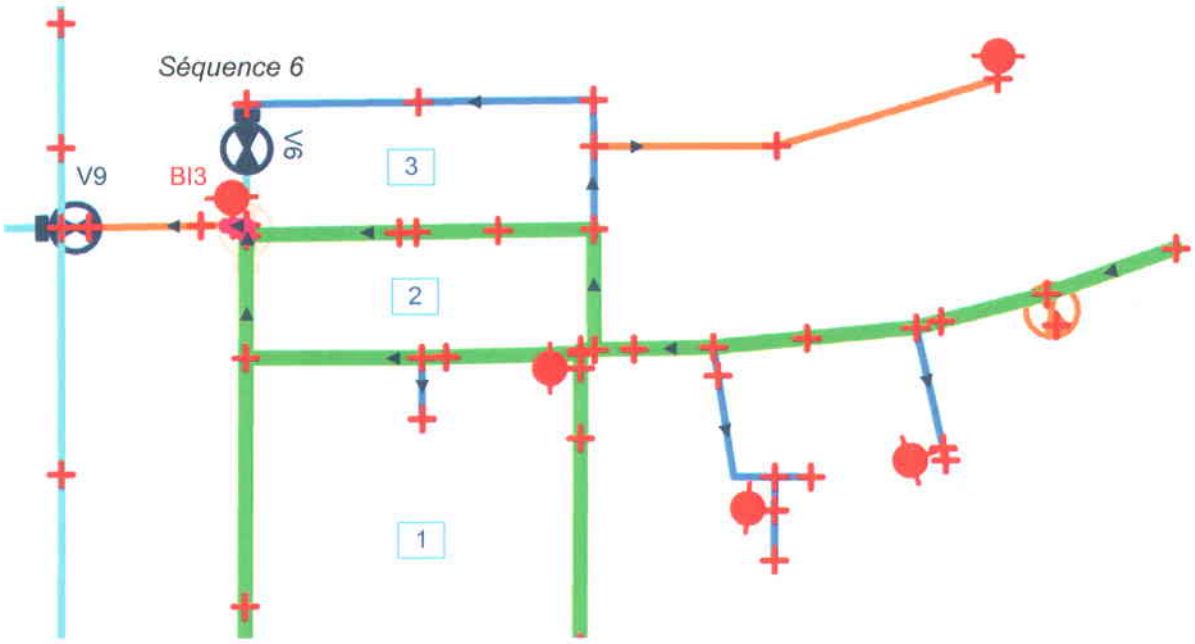


Figure 8.18 : Illustration de la séquence 6, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V7 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences 5 et 6 (Encadré 3).

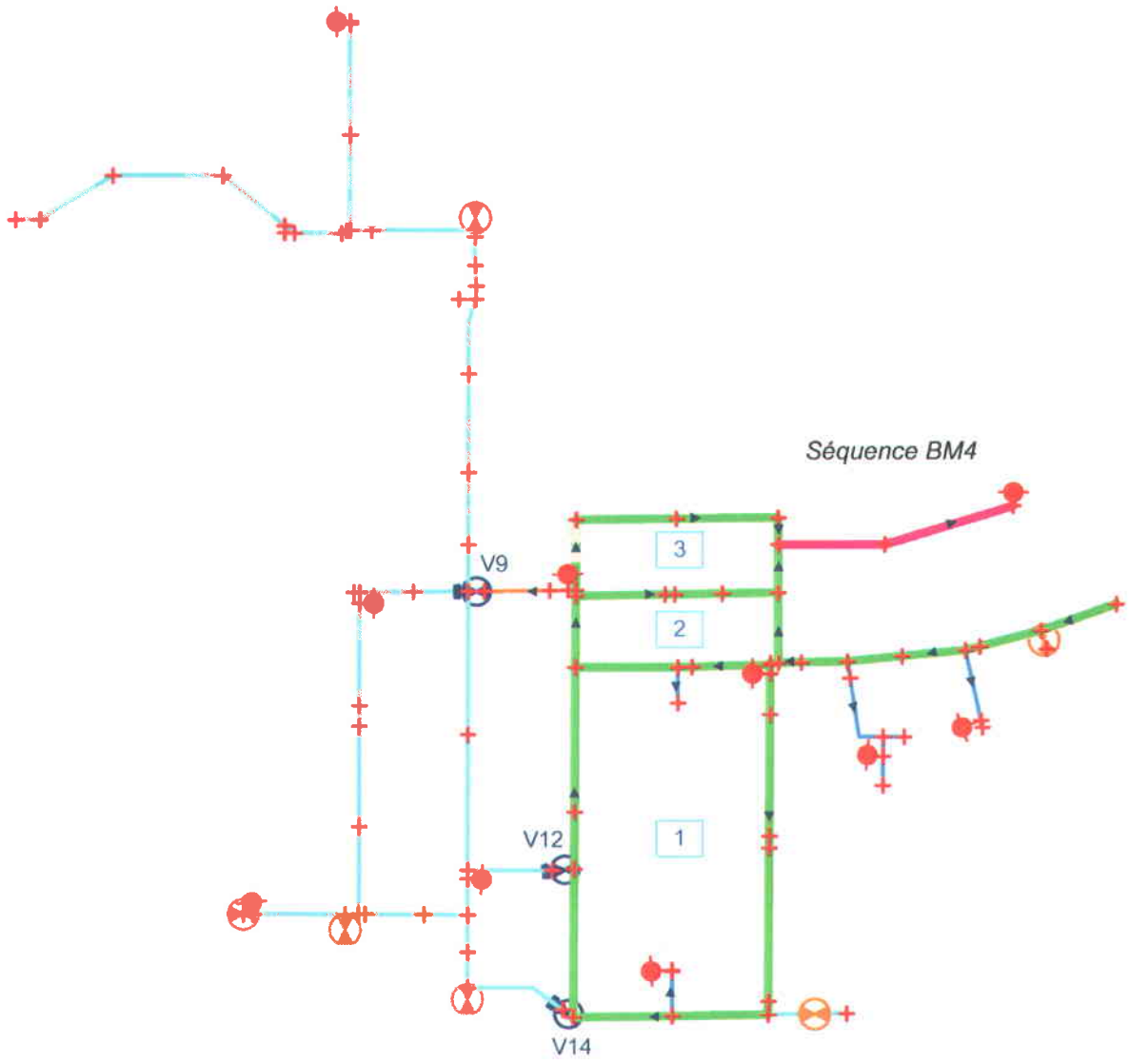


Figure 8.19 : Illustration de la séquence BM4, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V6 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences 6 et BM4 (Encadré 3).

Boucle 4

Les séquences de RUD associées à la boucle 4 sont, au départ, au nombre de trois. Deux séquences servent à rincer le linéaire sur la boucle (séquences 7 et 8, utilisant la borne BI4,5), et une autre est prévue pour le BM qui y est adjacent (Figures 8.20 à 8.22). Tel que l'indique l'encadré 4, une quatrième séquence sera finalement nécessaire puisque le BM sera scindé en

deux séquences en raison de vitesses trop faibles lors de la première validation hydraulique. Rappelons qu'à l'étape 3 de la procédure, il a été établi que la borne BI4,5 serait utilisée pour le rinçage du linéaire de conduites sur les boucles 4 et 5.

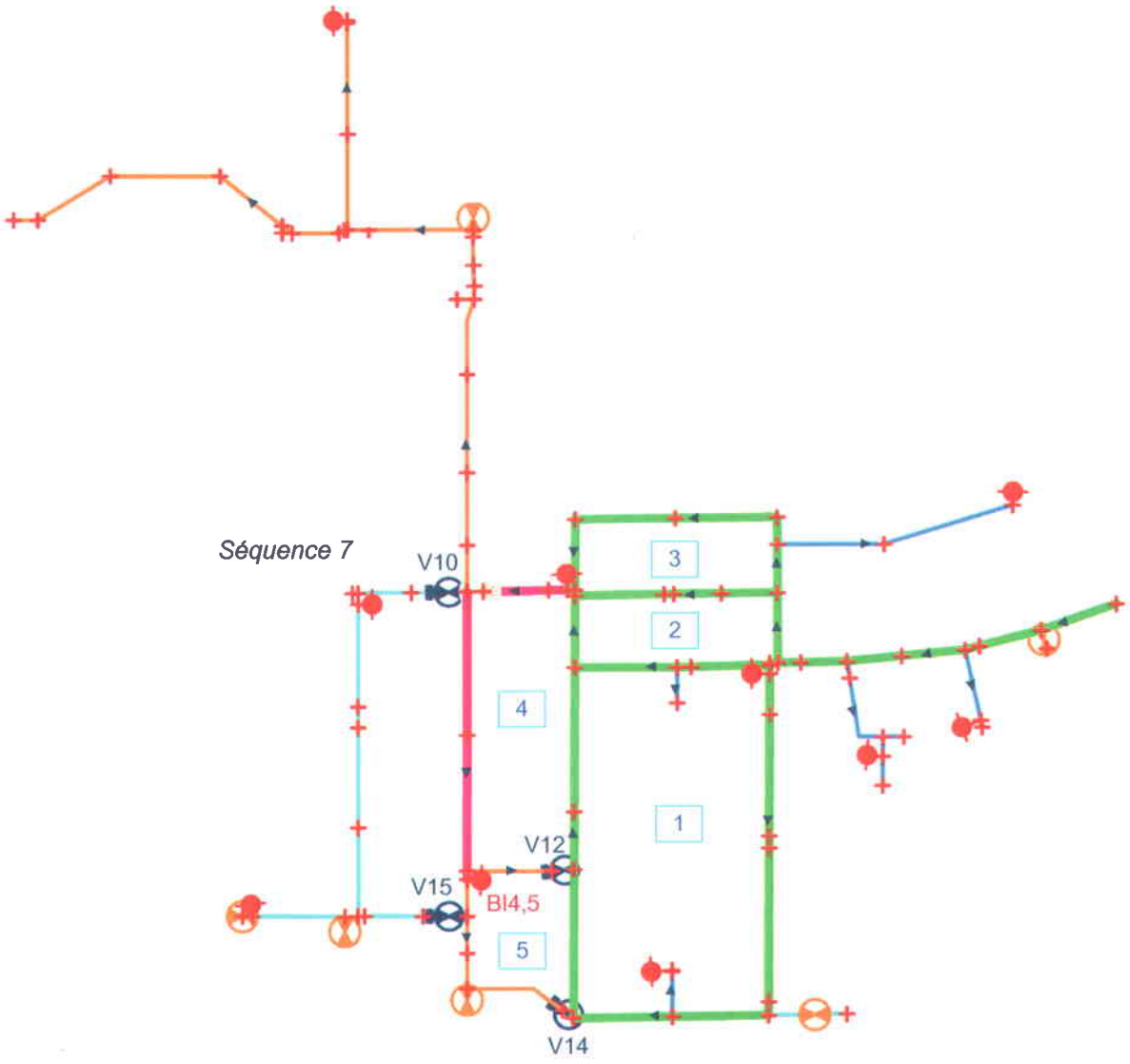


Figure 8.20 : Illustration de la séquence 7, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 4). La vanne V9 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences 6 et 7.

Encadré 4

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vannes de transition (de part et d'autre de l'intersection avec la boucle voisine, où se trouve BI4,5) : V12, déjà fermée (Figure 8.20) et V11 (Figure 8.21).
	5a.2-i	Vanne pour l'isolement adjacent à la boucle, en aval (5a.2-i) : V10 (Figure 8.20). La vanne V15 remplit la même fonction, pour la boucle 5 (Figure 8.20). Elle est identifiée à ce stade, sachant que la boucle 5 sera rincée par la même borne que la boucle 4 (5a.2-i).
	5a.2-ii	La vanne V14, déjà fermée, respecte la règle 5a.2-ii, afin d'éviter un contact entre le secteur déjà rincé et la borne ouverte (autrement, les séquences 7 et 8 ne seraient plus unidirectionnelles).
	5a.3	Cette règle ne s'applique pas au cas présent.
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	C'est la localisation de la vanne V11 qui détermine l'ordre de rinçage des deux séquences sur la boucle (d'où l'ordre indiqué par les numéros des séquences 7 et 8). *Suite au rinçage de la séquence 7, V11 sera fermée et V12 sera ensuite ouverte (grisée à la figure 8.21).*
	5b.3-ii	Le BM5 est rincé à la suite des séquences 7 et 8, après l'ouverture de la vanne V11 (grisée à la figure 8.22). C'est le seul BM adjacent au linéaire rincé sur la boucle 4, et V11, qui sera ouverte, n'est nécessaire au rinçage d'aucune séquence subséquente.
5c : Validation hydraulique	5c.1-i	Pour la séquence BM5 (Figure 8.22), la première validation hydraulique a révélé des vitesses d'écoulement insuffisantes (0,80 m/s) dans un tronçon de 200 mm (8 po) de diamètre, qui entrecoupe le BM dont les autres conduites sont de 150 mm (6 po). Une telle situation relève de la règle 5c.1-i, et pour obtenir des vitesses simulées de plus de 1 m/s, l'ESSAI 2 a déterminé que le BM devait être scindé en deux séquences, utilisant successivement les bornes BI-BM5.1 et BI-BM5.2 (prévue au départ) (voir le tableau 8.2). Lors de l'itération supplémentaire sur l'étape 5 visant à valider les séquences ainsi générées, il a été déterminé que la vanne V18 devait être fermée pour le rinçage de la séquence BM5.1, afin d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives dans une section plus élevée du BM (règle 5a.3). *Suite au rinçage de la séquence BM5.2, la vanne V18 sera ouverte (Figure 8.22). En vue du rinçage de la boucle 5, la vanne V14 sera ouverte (grisée à la figure 8.23), mais seulement après que la vanne de transition nécessaire aura été fermée (vanne V13, règle 5a.1, encadré 5 et figure 8.23).*

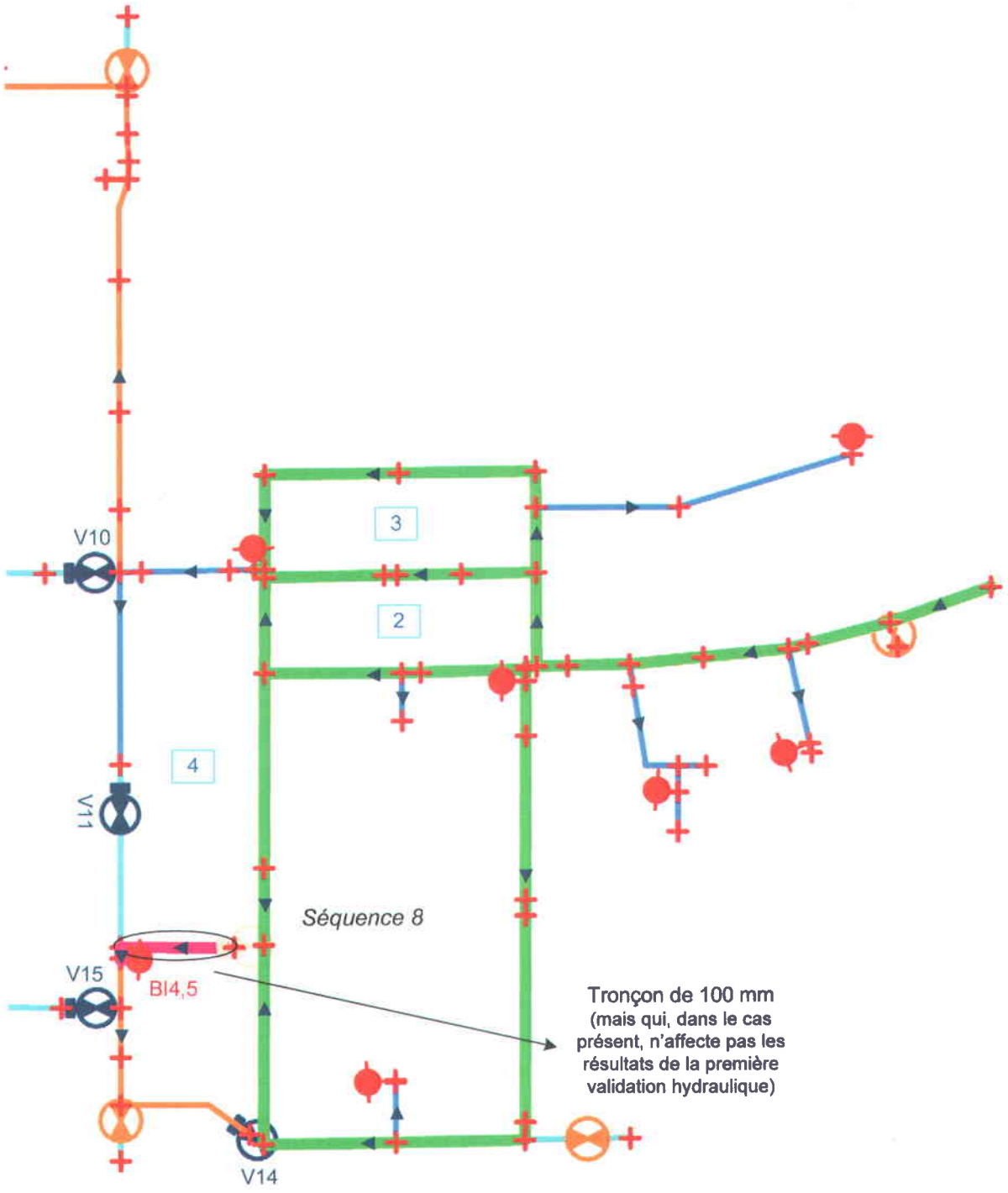


Figure 8.21 : Illustration de la séquence 8, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V12 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences 7 et 8 (Encadré 4).

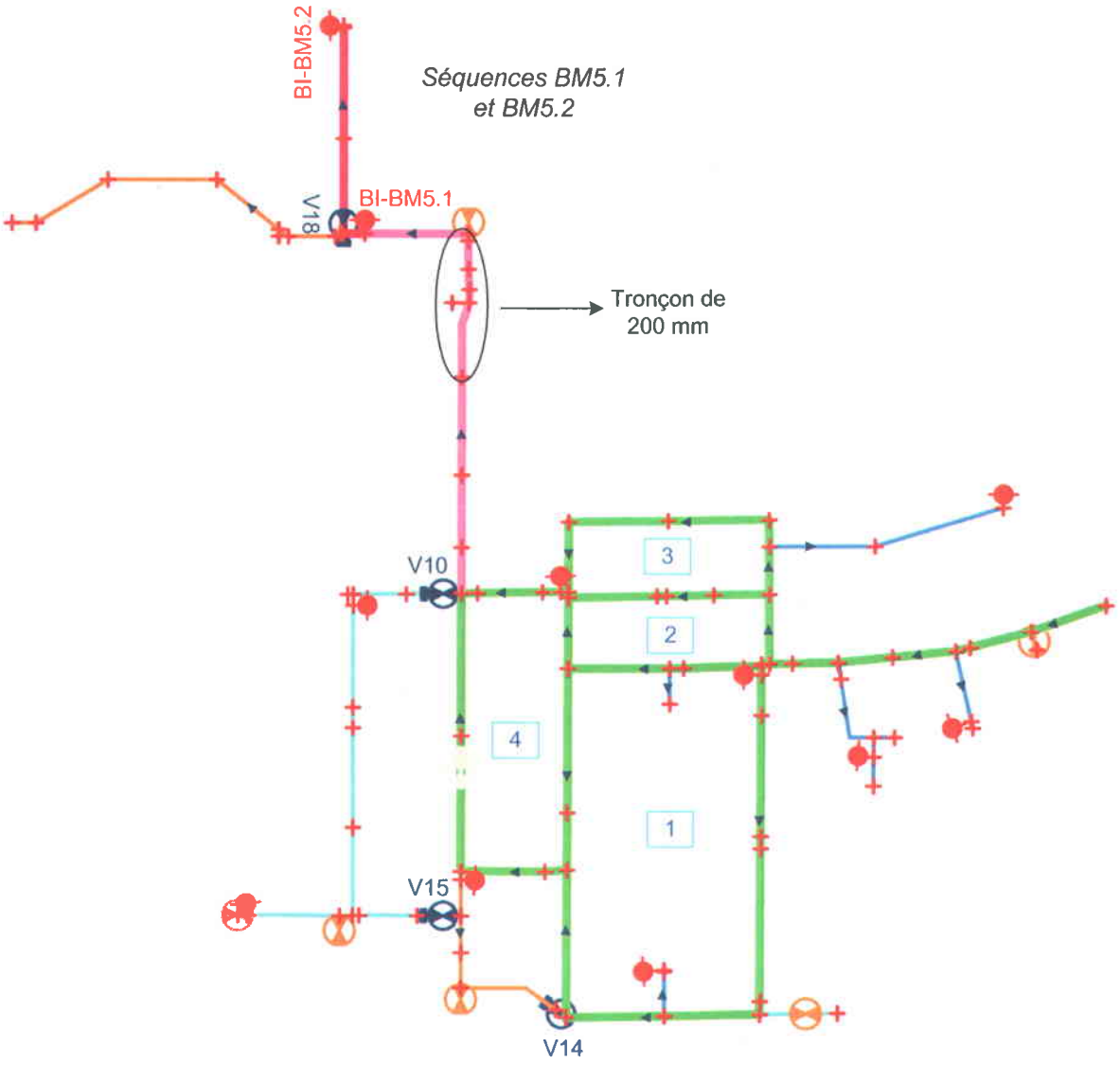


Figure 8.22 : Illustration des séquences BM5.1 et BM5.2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. Afin de rendre la présentation plus claire, la séquence BM5.1 apparaît en rose plus pâle et la séquence BM5.2, en rose plus foncé. La vanne V11 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte après le rinçage de la séquence 8 (Encadré 4).

À la figure 8.22, le BM dont le rinçage est illustré est arborescent et l'une des branches est dépourvue d'une borne d'incendie. Ainsi, il persiste des sections orangées le long du BM en question. Tel qu'il est indiqué précédemment (voir les figures 8.16 et 8.12), en pratique, le rinçage de ce BM devra être complété par des opérations ne faisant pas l'objet des présents travaux (la couleur bleu foncé remplacera l'orangé, aux figures subséquentes).

Boucle 5

Les conduites sur la boucle 5 sont rincées en une seule séquence par la même borne que la boucle 4 (BI4,5), tel que l'indiquent l'encadré 5 ainsi que la figure 8.23 (séquence 9).

Encadré 5

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vanne de transition : V13 (Figure 8.23). Cette dernière est attachée à la borne BI4,5.
	5a.2-i	Vanne pour l'isolement adjacent à la boucle, en aval : V15, déjà identifiée avec la boucle 4 (Encadré 4).
	5a.3	Cette règle ne s'applique pas au cas présent.
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	Une seule séquence sur la boucle (séquence 9), rincée la première.
	5b.3	Aucun BM adjacent au linéaire rincé par la séquence 9 sur la boucle 5.
5c : Validation hydraulique	5c.1-i	Aucune itération supplémentaire n'a été nécessaire. La séquence 9 a respecté, dès le départ, les critères de vitesse et de pression minimales (voir le tableau 8.2).
Remarques supplémentaires		*En vue du rinçage de la boucle 6, la vanne V10 demeurera fermée puisqu'elle sera utilisée en tant que vanne de transition (Figure 8.23). Les vannes V13 et V15 seront ouvertes (grisées à la figure 8.24).*

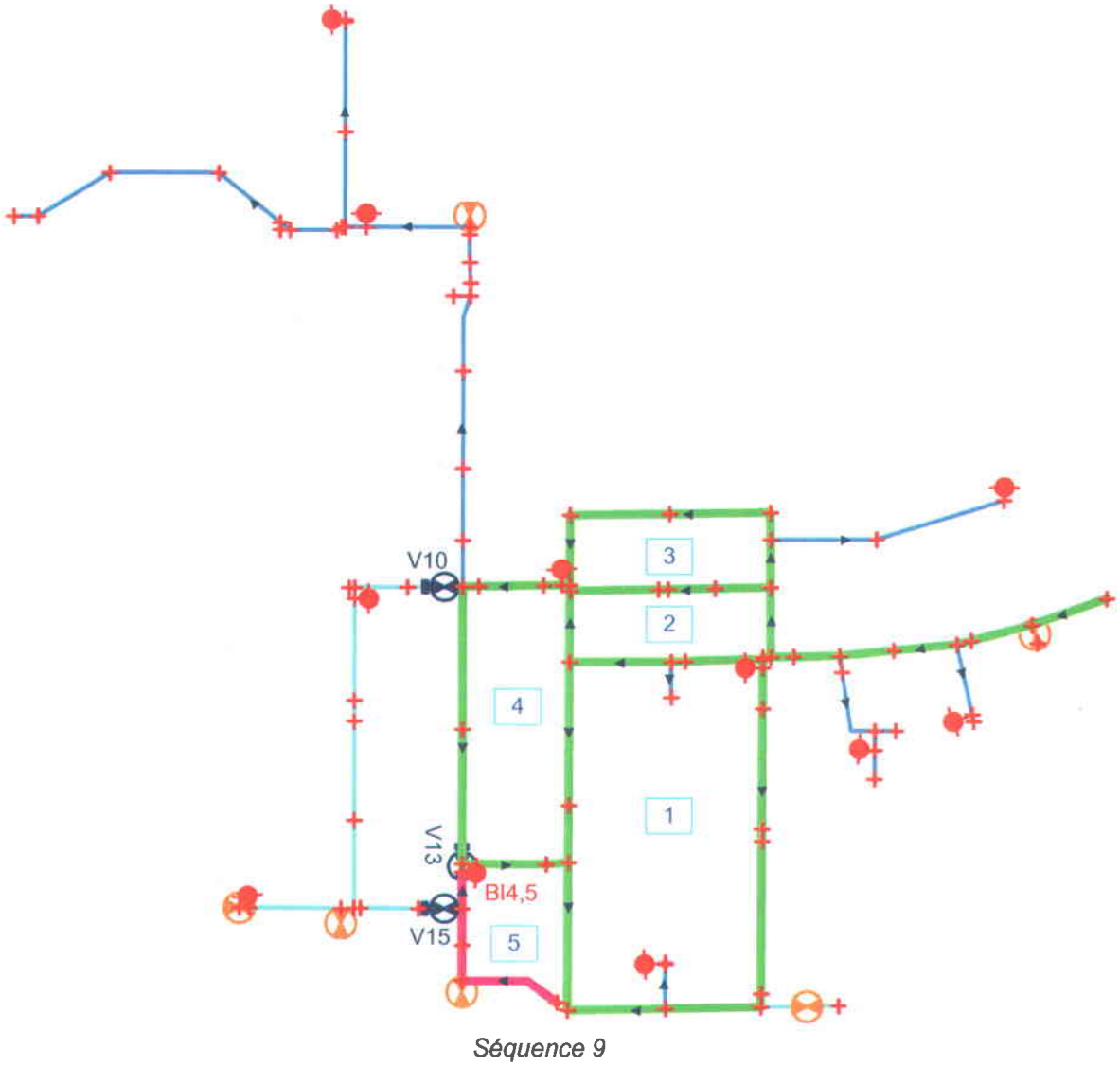


Figure 8.23 : Illustration de la séquence 9, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt (Encadré 5). La vanne V14 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte entre les séquences BM5.2 et 9.

Boucle 6

Normalement, trois séquences seraient nécessaires au rinçage complet de la boucle 6, à savoir deux séquences pour le linéaire sur la boucle même (séquences 10 et 11, utilisant la borne BI6) et une autre pour le BM (artificiel) qui s'y trouve adjacent. Tel qu'il est indiqué à l'encadré 6 ainsi qu'aux figures 8.24 et 8.25, la séquence 10 prévue au départ sera scindée en deux séquences,

10.1 et 10.2, utilisant d'abord la borne se trouvant à la terminaison du BM (notée BI-s10.1) et ensuite la borne BI6. Le BM sera donc rincé avec la séquence 10.1.

Encadré 6

Étape	Règle	Commentaires
5a : Sélection des vannes à manipuler pour l'exécution du RUD	5a.1	Vannes de transition : V10 (Figure 8.24) et V17 (Figure 8.25). Cette dernière est attachée à la borne BI6.
	5a.2	Vannes pour l'isolement en aval de la boucle : cette règle ne s'applique pas au cas présent, la boucle étant la dernière rincée sur le secteur isolé.
	5a.3	Cette règle ne s'applique pas au cas présent.
5b : Détermination de l'ordre des séquences sur la boucle	5b.2	C'est la localisation de la vanne V17 qui détermine l'ordre de rinçage des deux séquences sur la boucle (d'où l'ordre indiqué par les numéros des séquences 10 et 11). *Suite au rinçage des séquences 10.1 et 10.2, V17 sera fermée et V10 sera ouverte (grisée à la figure 8.25).*
	5b.3	Normalement, le BM (artificiel) serait rincé à la suite des séquences 10 et 11, après l'ouverture de la vanne V17 (Figures 8.24 et 8.25). Il s'agit du seul BM adjacent au linéaire rincé sur la boucle 6.
5c : Validation hydraulique	5c.1-i,	En raison de la présence d'un tronçon de conduites de 100 mm (4 po), la validation hydraulique de la séquence 10 (Figure 8.24) a indiqué une vitesse inférieures à 1 m/s (0,70) dans un tronçon amont de 150 mm (6 po). Comme dans le cas de la séquence BM5, la séquence initiale est scindée en deux séquences distinctes (règle 5c.1-i, ESSAI 2), la première utilisant la borne se trouvant à la terminaison du BM adjacent (BI-s10.1), et la seconde utilisant la borne prévue au départ (BI6).
	5c.3	Lors de l'itération supplémentaire sur l'étape 5 visant à valider les séquences ainsi générées, aucune vanne supplémentaire à manipuler n'a été identifiée, la borne BI-s10.1 étant située le long d'un BM. De plus, une vitesse $\geq$ 1 m/s a été atteinte dans le BM servant à scinder la séquence 10. Suivant la règle 5c.3, ce dernier est donc considéré comme étant rincé (voir le tableau 8.2).
Remarques supplémentaires		*À la suite du rinçage de la séquence 11, la vanne V17 sera ouverte, ce qui marque la terminaison des activités de RUD prévues suite à l'application de la procédure de la figure 8.1.*

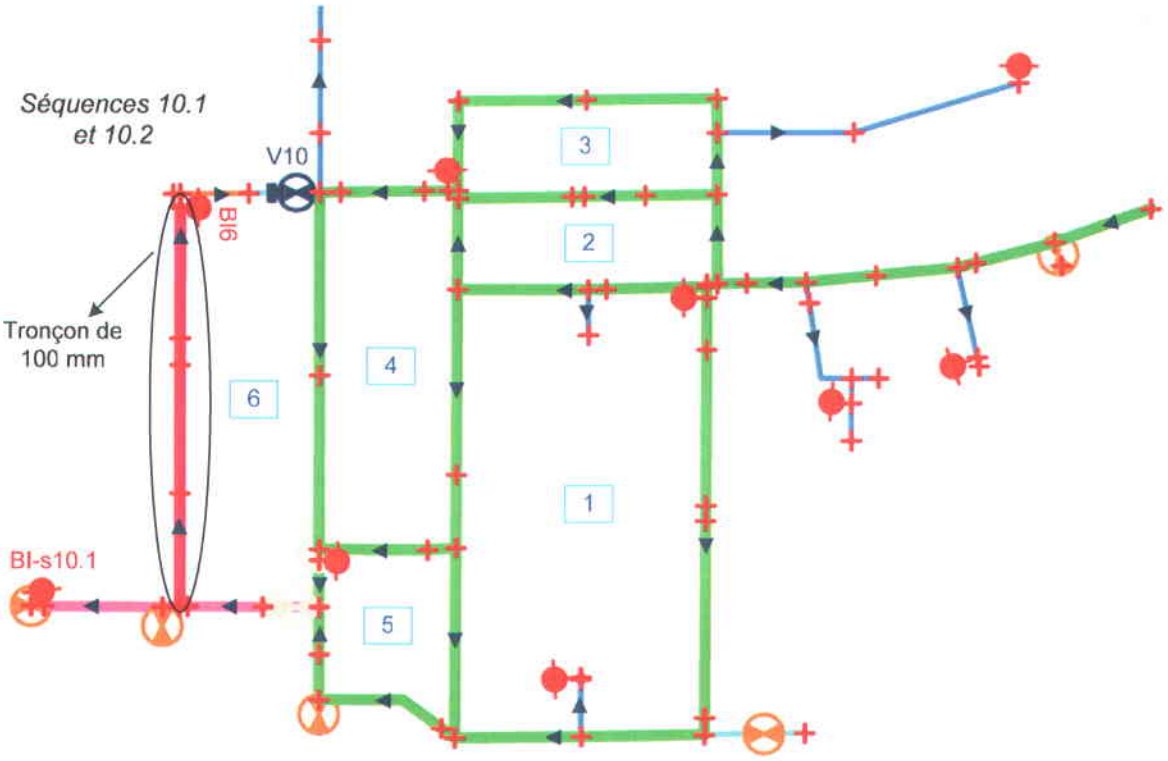


Figure 8.24 : Illustration des séquences 10.1 et 10.2, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. Afin de rendre la présentation plus claire, la séquence 10.1 apparaît en rose plus pâle et la séquence 10.2, en rose plus foncé (Encadré 6). Les vannes V13 et V15 sont grisées, indiquant qu'elles sont ouvertes entre la séquence 9 et la séquence 10.1.

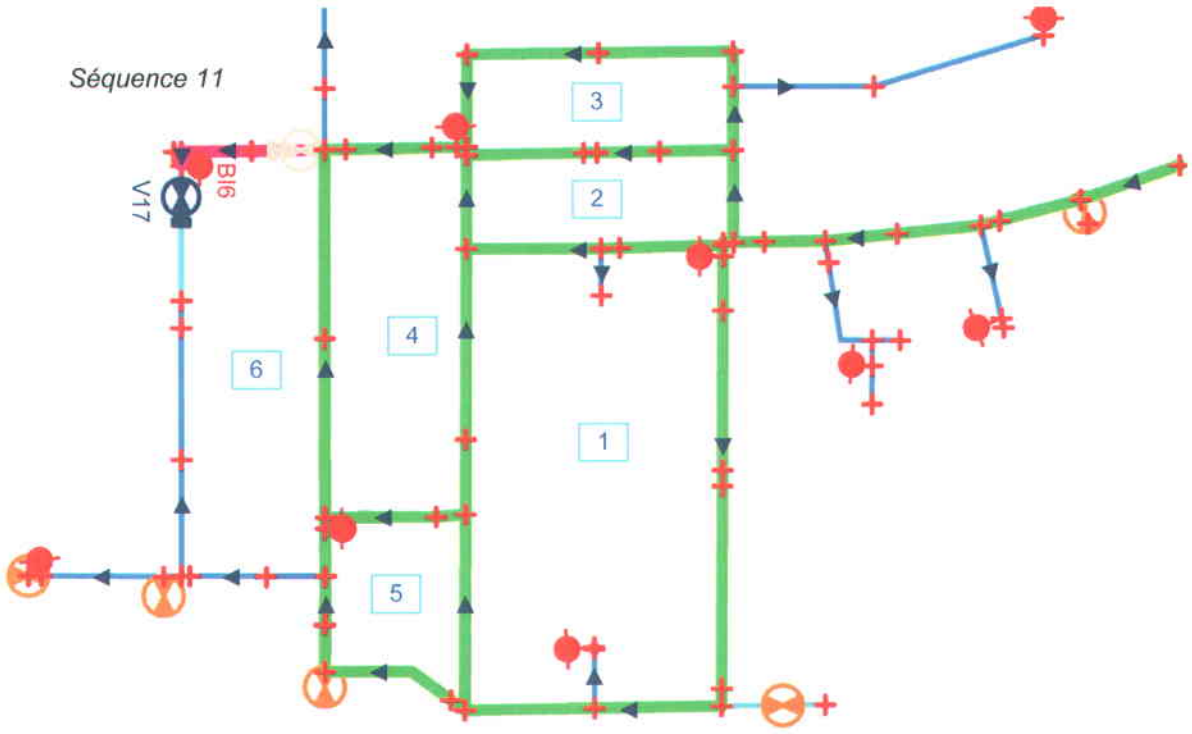


Figure 8.25 : Illustration de la séquence 11, pour le rinçage du secteur délimité et isolé suite à une première détection de contamination au détecteur 279, réseau de Valcourt. La vanne V10 est grisée, indiquant qu'elle est ouverte suite au rinçage de la séquence 10.2 (Encadré 6).

Le tableau 8.2 présente les vitesses de rinçage et de pressions obtenues par simulation hydraulique pour les séquences de RUD finales, présentées à la section précédente (Figures 8.10 à 8.25 et encadrés 1 à 6).

Tableau 8.2 : Vitesses et pressions simulées pour les séquences de rinçage unidirectionnel lorsqu'une première détection survient au détecteur 279, réseau de Valcourt.

Séquence (Figures 8.10 à 8.25)	Vitesse simulée*		Pression minimale simulée**		Pression simulée en réseau†	
	Minimum	Maximum				
	[m/s]	[m/s]	[kPa (m d'eau)]		[kPa (m d'eau)]	
1	-	2,06	104	(10,6)	209	(21,3)
2	-	1,46	66	(6,7)	181	(18,5)
BM1	-	2,50	139	(14,2)	139	(14,2)
3	0,75	1,30	60	(6,1)	156	(15,9)
4	-	1,75	195	(19,9)	195	(19,9)
BM2	-	2,83	168	(17,1)	168	(17,1)
BM3	-	2,52	140	(14,3)	140	(14,3)
5	0,92	2,13	43	(4,4)	295	(30,1)
6	-	2,82	167	(17,0)	167	(17,0)
BM4	-	2,09	106	(10,8)	223	(22,7)
7	-	1,49	68	(6,9)	196	(20,0)
8	1,22	2,75	54	(5,5)	295	(30,1)
BM5.1	1,00	1,88	81	(8,3)	154	(15,7)
BM5.2	-	1,47	67	(6,8)	147	(15,0)
9	-	1,90	95	(9,7)	154	(15,7)
10.1	-	1,91	93	(9,5)	169	(17,2)
10.2	-	1,61	22	(2,2)	172	(17,5)
11	2,16	4,85	108	(11,0)	219	(22,3)

* Lorsqu'un changement de diamètre survient le long des conduites d'une séquence donnée, des vitesses minimale et maximale sont indiquées. Lorsque le diamètre est constant, une seule valeur de vitesse est donnée (vitesse maximale).

** Le champ *Pression minimale simulée* indique la plus faible valeur de pression obtenue lors de la simulation de chaque séquence de RUD, le plus souvent le long de la séquence elle-même et/ou entre une borne ouverte et les vannes fermées aux fins de l'exécution du RUD.

†Le champ *Pression simulée en réseau* sert, pour chaque séquence de RUD, à évaluer l'impact du rinçage sur la pressions simulée dans le reste du réseau, excluant les secteurs qui sont privés d'eau (pressions simulées nulles). Par contre, lorsque la pression minimale simulée pour une séquence est supérieure ou égale à 138 kPa ou 14,1 m d'eau (pression minimale la plus souvent recommandée dans la littérarure), on ne cherche pas à évaluer l'impact du rinçage dans le reste du réseau et la valeur de *Pression minimale simulée* est directement nscrite dans le champ *Presssion simulées en réseau* (voir, dans le tableau, les séquences BM1, 4, BM2, BM3 et 6).

Le tableau 8.2 met en évidence la pression particulièrement faible simulée au voisinage de la séquence de rinçage 10.2 (mais respectant néanmoins le critère de pression minimale établi à 20 kPa) (Figure 8.24). Cette valeur est due, essentiellement, à la présence du tronçon de 100 mm (4 po) de diamètre et long de 359 m, dans lequel les pertes de charge linéaires, à une vitesse de 1,61 m/s (débit de 12,65 L/s), sont relativement importantes. Des situations semblables sont rencontrées lorsque le rinçage des séquences 5 (Figure 8.17) et 8 (Figure 8.21) est simulé. Dans ces deux derniers cas, les vitesses simulées le long des tronçons de 100 mm (4 po) sont plus élevées (respectivement 2,13 et 2,57 m/s), par contre les tronçons sont plus courts (respectivement 224 et 94 m).

Pour conclure cette présentation d'une application détaillée de la procédure de RUD, mentionnons que les encadrés 1 à 6, les figures 8.10 à 8.25 ainsi que le tableau 8.2 constituent la solution finale (étape 6 de la procédure, figure 8.1).

8.3 Synthèse des résultats

À l'aide d'un tableau, cette section présente une synthèse des résultats obtenus, pour chaque cas auquel la procédure de rinçage a été appliquée. Rappelons aussi que, pour chacun, une figure-synthèse est également présentée à l'annexe 5. Pour plus de clarté, les figures sont accompagnées de notes explicatives.

Parmi les 26 secteurs de réseau isolés et présentés au chapitre 6 ainsi qu'à l'annexe 3, 16 ont été retenus pour l'application de la méthode de définition des opérations de RUD, à raison de huit pour chacun des deux réseaux d'étude. Les cas sélectionnés (Valcourt D-31, D-112, D-131, D-133, D-142, D-159, D-375; Terrasse-Vaudreuil D-030, D-033, D-039, D-046, D-048, D-057, D-

060, D-201) présentent des longueurs totales de conduites à rincer et des configurations variées. Quant aux dix cas non examinés, il s'agit de secteurs similaires aux cas étudiés, en ce qui a trait à leur localisation au sein du réseau d'appartenance et à leur configuration. Une analyse préliminaire rapide permet de présumer que des résultats similaires seraient obtenus pour ces dix cas.

Le tableau 8.3 présente une synthèse des caractéristiques hydrauliques et opérationnelles de l'ensemble des séquences de RUD générées, par cas examiné. La signification des champs *Pression minimale simulée* et *Pression simulée en réseau* demeure la même qu'au tableau 8.2. Quant au champ *Pression statique simulée*, il correspond à la pression moyenne enregistrée au sein du secteur isolé, avant que les opérations de rinçage ne soient entreprises et sous des conditions de consommation réduites. Les astérisques identifient les grands secteurs de réseau à rincer.

Tableau 8.3 : Synthèse des résultats obtenus pour le RUD de chacun des secteurs examinés, réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil.

Secteur	Vitesse (V) de rinçage simulée [m/s]			Pression minimale simulée [kPa (m d'eau)]			Pression simulée en réseau [kPa (m d'eau)]	Pression statique simulée [kPa (m d'eau)]	Nombre total d'opérations pour chaque cas									
	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Moyenne	1. Séquences	2. Bornes manipulées	3. Vannes manipulées **	4. Séquences où V < 1 m/s***	5. Séquences où l'atteinte de V=1m/s requiert plus d'une borne ***	6. Boucles à rincer	7. Séquences sur les boucles †	8. Bornes pour le rinçage des boucles ††	9. Vannes de transition réutilisées	10. Isolement adjacent des boucles §
Valcourt																		
D-31*	2,10	0,57	5,47	136	20	292	201	527	33	22	37	3	3	12	23	11	13	7
D-112	2,48	0,95	5,19	225	134	292	228	509	17	16	7	0	2	4	6	5	0	3
D-131	2,52	0,92	5,47	179	35	291	212	508	14	12	11	1	1	4	6	3	2	3
D-133	2,14	0,90	5,70	110	41	170	187	437	18	13	15	0	1	6	9	3	6	5
D-142	2,14	0,90	5,70	110	41	170	187	437	18	13	15	0	1	6	9	3	6	5
D-159*	2,35	0,55	5,75	194	47	294	215	468	33	31	24	3	5	8	13	8	6	5
D-279	1,97	0,75	4,85	99	20	195	188	501	18	11	20	2	2	6	12	5	8	3
D-375	2,52	0,92	5,47	179	35	291	212	508	14	12	11	1	1	4	6	3	2	3
									Ratio§§	***Ratio***§§					***Ratio***§§	***Ratio***§§	***Ratio***†††	***Ratio***§§
Moyenne	***2,28***	***0,82***	***5,52***	***154 (15,7)***	***45 (4,6)***	***249 (25,4)***	***204 (20,8)***	***487 (49,7)***	***3,46***	***2,81***		***1,25***	***2,00***		***1,63***	***0,81***	***0,27***	***0,70***
Terrasse-Vaudreuil																		
D-030	2,00	1,09	3,13	146	85	393	204	530	13	10	7	0	1	3	7	4	2	2
D-033	1,79	0,97	3,19	186	92	272	202	530	6	5	3	0	1	2	4	3	1	2
D-039	1,80	0,76	3,38	158	89	240	220	531	20	12	15	2	0	7	14	7	4	2
D-046	1,68	0,49	3,34	140	74	234	194	527	15	8	15	2	0	6	12	6	4	2
D-048*	1,92	0,49	3,31	149	82	250	212	534	34	20	34	5	1	14	25	12	13	2
D-057*	2,10	0,83	4,87	157	74	330	223	532	48	31	46	3	2	18	33	17	15	4
D-060	1,99	1,05	3,15	130	76	213	214	534	18	13	12	0	0	5	10	5	6	2
D-201*	2,13	0,81	4,76	162	75	309	217	532	26	15	29	2	1	10	20	10	9	2
									Ratio§§	***Ratio***§§					***Ratio***§§	***Ratio***§§	***Ratio***†††	***Ratio***§§
Moyenne	***1,93***	***0,81***	***3,64***	***152 (15,5)***	***81 (8,3)***	***280 (28,6)***	***211 (21,5)***	***531 (54,1)***	***3,00***	***2,03***		***1,75***	***0,75***		***1,99***	***1,08***	***0,33***	***0,41***

* Identification des grands secteurs de réseau à rincer (i.e. dont le linéaire de conduites à rincer ≥ 40 % du linéaire total du réseau).

** Incluant les vannes ouvertes/fermées plus d'une fois, en raison du rinçage de boucles consécutives par la même borne et de changements de source, notamment.

*** Le champ no 5 indique, pour chaque cas analysé, le nombre de séquences où l'ouverture d'une (de) borne(s) supplémentaire(s) a été nécessaire à l'atteinte d'une vitesse minimale de 1 m/s, puisqu'une première validation hydraulique avait révélé des vitesses trop faibles. Ceci inclut le cas des séquences de grand diamètre, pour lesquelles, rappelons-le, jusqu'à trois bornes peuvent être ouvertes de façon simultanée (sections 7.3 et 8.2.5). Rappelons aussi qu'une solution alternative (ouverture de bornes supplémentaires) n'est pas toujours envisageable lorsque le critère de vitesse n'est pas atteint, d'où la raison d'être du champ no 4 précédent.

† Ce champ réfère aux séquences élaborées de façon à rincer le linéaire sur les boucles de réseau, excluant les séquences pour le rinçage de tronçons de grand diamètre qui, de façon systématique, constituent des séquences supplémentaires (les séquences dénombrées excluent nécessairement les séquences de BM et pour les changements de source).

†† Les bornes dont il est question sont celles qui ont servi au rinçage des séquences sur les boucles, donc dénombrées au champ précédent (champ no 7, faisant l'objet de la note explicative précédente).

††† Pour le calcul de ces ratios, un rapport est d'abord établi entre chacune des valeurs indiquées sous le champ en question et le nombre correspondant de vannes manipulées (indiqué au champ no 3). Ensuite, une moyenne est établie, soit la valeur qui apparaît sous l'appellation de ratio.

§ Rappelons que l'isolement adjacent signifie la fermeture de vannes attachées aux intersections d'une boucle couramment rincée et qui se trouvent sur des boucles voisines, en aval par rapport à la progression des opérations de RUD au sein d'un secteur à rincer (section 7.2.1.1).

§§ Pour le calcul de ces ratios, un rapport est d'abord établi entre chacune des valeurs indiquées sous le champ en question et le nombre correspondant de boucles à rincer (indiqué au champ no 6). Ensuite, une moyenne est établie, soit la valeur qui apparaît sous l'appellation de ratio.

8.3.1 Analyse des résultats d'un point de vue hydraulique

Le tableau 8.3 montre que les vitesses de rinçage accessibles (simulées) pour le réseau de Valcourt sont en moyenne un peu plus élevées, comparativement aux vitesses obtenues pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil. Ces résultats dépendent, dans un premier temps, de la pression disponible. À cet égard, toutefois, les deux réseaux affichent des comportements généralement similaires : les écarts entre pression statique et pression minimale simulée, en général, demeurent comparables dans les deux cas. Dans un second temps, les vitesses de rinçage sont nécessairement influencées par les caractéristiques physiques des secteurs à rincer, notamment le diamètre des conduites et sa variation le long de chacune des séquences de RUD, la valeur du coefficient de frottement interne des conduites ainsi que la longueur des séquences de RUD. Rappelons que, dans certains cas, en raison de la topologie des séquences de RUD et de la localisation des bornes et vannes, il n'est pas possible d'obtenir une vitesse d'au moins 1 m/s, et ce, même après avoir examiné différentes options où l'ouverture de bornes supplémentaires a été considérée (étape 5c de la procédure de rinçage, section 8.2.5). Les résultats obtenus suggèrent donc que les facteurs physiques et topologiques, lorsque considérés de façon simultanée, sont plus propices à l'élaboration des séquences de RUD dans le cas du réseau de Valcourt par rapport au réseau de Terrasse-Vaudreuil. Sur le plan des opérations, cette observation se traduit par le nombre de séquences de rinçage, pour chaque cas examiné, où la vitesse atteinte est inférieure au critère de 1 m/s (aucune correction possible). Comme l'indique le tableau 8.3, la valeur moyenne obtenue pour le réseau de Valcourt (1,25) est inférieure à celle du réseau de Terrasse-Vaudreuil (1,75) (champ no 4 sous la rubrique *Nombre total d'opérations pour chaque cas* au tableau 8.3). Notons qu'en ce qui concerne le réseau de Valcourt, c'est principalement dans les séquences contenant des conduites de 100 mm (4 po) de diamètre que le critère de vitesse n'a pu être respecté. En effet, les conduites de 100 mm limitent les débits, et donc les

vitesses accessibles dans les conduites adjacentes de 150 mm (6 po). Pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil, dans plusieurs séquences, c'est la présence de conduites de 150 mm adjacentes à des conduites de 250 mm (10 po) qui limite les vitesses accessibles dans ces dernières. De plus, en raison notamment de la disposition des boucles au sein des secteurs à rincer, le rinçage de certaines séquences a dû être effectué de façon contraire à la logique opérationnelle préconisée, c'est-à-dire depuis des conduites de 150 mm vers des conduites de 200 mm (8 po) ou même de 250 mm.

Pour ce qui est du critère de pression minimale fixé à 20 kPa (2m d'eau), il a été respecté dans tous les cas analysés. Pour le réseau de Valcourt, les valeurs minimales du champ *Pressions minimales simulées* (Tableau 8.3) sont en général plus faibles, en raison notamment des variations d'élévation qui y sont plus importantes. Les valeurs de pression les plus faibles sont aussi souvent associées au rinçage des tronçons de 100 mm (4 po). Pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil, où les variations d'élévation sont plus faibles, les résultats démontrent que le critère de 70 kPa (7,1 m d'eau) aurait pu être considéré (rappelons que ce critère avait été suggéré par Nathalie Periche pour les réseaux au sein desquels les variations d'élévations demeurent relativement faibles; voir la section 3.1.2.4).

8.3.2 Analyse des résultats du point de vue opérationnel

Mentionnons d'abord que la presque totalité des secteurs analysés pour le réseau de Valcourt contient des conduites de grand diamètre (i.e. $\geq$ 300 mm ou 12 po), exception faite du cas D-279 (présenté à la section 8.2; voir aussi la figure 4.2). En ce qui concerne le réseau de Terrasse-Vaudreuil, aucun des cas analysés ne contient de telles conduites. En effet, le diamètre des conduites demeure inférieur ou égal à 250 mm (10 po) pour tous les cas. Cette constatation

explique en partie la différence, d'un réseau l'autre, entre les ratios présentés aux champs nos 1 et 2, sous la rubrique *Nombre total d'opérations pour chaque cas* au tableau 8.3. Le premier de ces ratios est une valeur moyenne obtenue pour les rapports entre le nombre de séquences de RUD générées pour chaque secteur (champ no 1) et le nombre correspondant de boucles à rincer (indiqué au champ no 6). Le second ratio, pour sa part, établit la moyenne des rapports entre le nombre de bornes utilisées pour le rinçage de chacun des secteurs (champ no 2) et, encore une fois, le nombre correspondant de boucles à rincer (champ no 6). Les tronçons de grand diamètre font systématiquement l'objet de séquences de RUD supplémentaires qui requièrent, souvent, l'ouverture de plus d'une borne afin que le critère de vitesse minimale soit respecté, d'où les valeurs plus élevées obtenues pour Valcourt (respectivement 3,46 et 2,81 pour les ratios des champs 1 et 2), comparativement à Terrasse-Vaudreuil (respectivement 3,00 et 2,03 pour les ratios des champs 1 et 2). Ces observations sont en outre corroborées par le fait que le nombre de séquences de RUD où les vitesses de 1 m/s sont atteintes en utilisant plus d'une borne est généralement supérieur pour les secteurs à rincer sur le réseau de Valcourt, soit 2,00, comparativement à 0,75 pour Terrasse-Vaudreuil (moyennes indiquées au champ no 5, tableau 8.3).

Lorsque l'on considère le rinçage des boucles uniquement, soit en excluant les BM, les changements de source ainsi que les tronçons de grand diamètre, le réseau de Valcourt affiche des résultats plus intéressants que celui de Terrasse-Vaudreuil, en regard de l'efficacité générale d'exécution des opérations. En premier lieu, le nombre de séquences nécessaires au rinçage des boucles de chaque secteur (champ no 7, tableau 8.3), lorsque rapporté sur le nombre correspondant de boucles à rincer (champ no 6), donne un ratio moyen de 1,63 pour le réseau de Valcourt, comparativement à 1,99 pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil. Dans les deux réseaux, toutefois, ce résultat indique que, de façon générale, le critère selon lequel le rinçage d'une

boucle devrait nécessiter au plus deux séquences (section 7.2.1.1) est rencontré. En second lieu, en rapportant le nombre de bornes utilisé pour le rinçage des boucles de chaque cas analysé (champ no 8, tableau 8.3) sur le nombre de boucles à rincer (champ no 6, tableau 8.3), en moyenne, un ratio de 0,81 est obtenu pour Valcourt tandis qu'une valeur de 1,08 est obtenue pour Terrasse-Vaudreuil. Rappelons qu'idéalement, ces valeurs devraient être inférieures ou égales à 1, d'après les critères établis à la section 7.2.1.1. Les résultats ici obtenus suggèrent que des bornes sont plus souvent utilisées pour le rinçage consécutif de plus d'une boucle, sur le réseau de Valcourt.

En ce qui a trait aux vannes à manipuler, selon l'un des critères mentionnés à la section 7.2.1.1, les vannes d'isolement adjacentes à une boucle rincée, c'est-à-dire attachées aux nœuds se trouvant aux intersections entre celle-ci et des boucles voisines en aval (i.e. non rincées), sont systématiquement sélectionnées (revoir, au besoin, les résultats de la section 8.2.6). Idéalement, afin d'assurer le caractère unidirectionnel des séquences de rinçage et de faciliter le choix des vannes utiles à cette fin, chaque intersection entre une boucle en cours de rinçage et les voisines non rincées devrait pouvoir être isolée à l'aide d'une vanne d'isolement adjacente (*isolement adjacent complet*); autrement, notamment dans le cas des grands secteurs de réseau, d'autres vannes doivent être identifiées à cette fin. Or le respect de cette condition dépend de la localisation des vannes, de l'ordre de rinçage des boucles et de la configuration du secteur à rincer. Lorsque l'on rapporte le nombre de boucles pour lesquelles l'isolement adjacent est complet (champ no 10, tableau 8.3) sur le nombre correspondant de boucles à rincer (champ no 6, tableau 8.3), aucun des cas examinés ne remplit parfaitement la condition d'isolement adjacent (i.e. aucun cas où les valeurs indiquées sous les deux champs sont égales, donc tous les rapports sont inférieurs à 1). Cependant, en moyenne, les ratios du champ no 10 indiquent que les résultats obtenus sont meilleurs pour le réseau de Valcourt (0,70 contre 0,41 pour Terrasse-

Vaudreuil). Tel qu'il est mentionné aux sections 7.2.1.1 et 8.2.5, il est de plus souhaitable que les vannes soient réutilisées, d'une boucle à l'autre. Par exemple, les vannes ayant servi à l'isolement en aval d'une boucle (isolement adjacent ou autre) peuvent être réutilisées en tant que vannes de transition pour le rinçage de boucles voisines (section 8.2.6; voir aussi l'annexe 4). Pour l'ensemble des secteurs examinés, les ratios indiqués au champ no 9, qui comparent, en moyenne, le nombre de vannes réutilisées (champ no 9, tableau 8.3) au nombre total de vannes manipulées (champ no 3, tableau 8.3), indiquent des valeurs similaires pour Valcourt et Terrasse-Vaudreuil (respectivement 0,27 et 0,33). Étant supérieures à zéro, celles-ci montrent que les manipulations, sur le terrain, seront efficientes, dans la mesure où des vannes sont effectivement réutilisées.

En résumé, l'ensemble des résultats présentés au tableau 8.3 indique que les séquences de RUD sont en général plus aisément élaborées pour le réseau de Valcourt que pour celui de Terrasse-Vaudreuil, quoique, d'un point de vue global, les résultats obtenus pour ce dernier demeurent intéressants et démontrent l'applicabilité de la méthode. L'analyse montre, en outre, qu'il n'est pas simple, pour différents réseaux, de générer des séquences de RUD en tenant compte simultanément d'un ensemble de critères. L'adoption d'une approche heuristique a justement permis le développement d'une première version de la procédure, à la lumière de son application aux réseaux de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil dont les caractéristiques (topologie, conception) sont le propre des réseaux réels. Cette question, ainsi que d'autres aspects de la procédure de rinçage, sont examinés plus en détail dans la discussion qui suit.

8.4 Discussion

L'argumentaire présenté dans cette section concerne à la fois la procédure de RUD et, dans une perspective plus générale, la méthode globale élaborée dans le cadre de cette thèse. L'exposé s'articule autour des points suivants. Tout d'abord, une comparaison est établie entre les procédures de gestion des opérations de réponse faisant l'objet des présents travaux et les approches similaires existantes, développées par *Baranowski* (2007) ainsi que *Preis et al.* (2007b) (sections 3.2.4.1 et 3.2.4.2). Ensuite, les hypothèses formulées quant à la nature des contaminants sont examinées, suivies de commentaires sur la conception des réseaux de distribution et la protection contre les incendies dans un contexte d'interventions d'urgence.

8.4.1 Comparaison avec les approches existantes

Par rapport aux approches de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b), les procédures de gestion des opérations de réponse faisant l'objet de la présente recherche se différencient par deux aspects principaux : (1) la prise en compte des aspects opérationnels et (2) la nature des hypothèses sous-jacentes à la modélisation du transport de contaminants en réseaux. Ceux-ci sont abordés aux sous-sections suivantes.

8.4.1.1 Gestion des opérations de réponse et aspects opérationnels

Les procédures exposées aux chapitres 6 à 8 ont été élaborées en tenant compte d'un ensemble de critères opérationnels (sections 6.1 et 7.2) visant à ce que les opérations requises soient effectuées de façon structurée, efficace et sécuritaire. En résumé, ces procédures se concentrent chacune sur un volet particulier de la réponse aux incidents de contamination et s'intéressent : (1) en guise de première réponse rapide, à délimiter et à isoler des secteurs de réseau en

identifiant, de façon concrète, chacune des vannes nécessaires au confinement d'un contaminant, à l'intérieur même des zones de pression; et (2) à définir dans le détail une série d'opérations de RUD afin d'évacuer, dans un second temps, l'eau contaminée des secteurs isolés, en identifiant chaque borne et chaque vanne à manipuler ainsi que la séquence d'opération de ces composantes. Le travail d'élaboration des procédures ainsi que leur application subséquente à des cas d'étude impliquent que les modèles conceptuels des réseaux considérés présentent un niveau de détail suffisamment grand, entre autres en ce qui a trait à la localisation des bornes et vannes ainsi qu'aux caractéristiques individuelles des conduites.

Dans une toute autre perspective, *Baranowski* (2007) et *Preis et al.* (2007b) ont abordé le problème de gestion des opérations de réponse, rappelons-le, d'un point de vue plutôt théorique, faisant intervenir des techniques d'optimisation afin d'identifier des combinaisons de bornes à ouvrir et de vannes à fermer, de façon à favoriser l'évacuation de contaminants détectés au sein de réseaux d'étude fictifs et squelettisés (section 2.1.4.2). Leurs approches n'incluent aucune indication quant à la structure d'exécution des opérations sur les bornes et vannes, ce qui laisse entendre qu'elles sont effectuées simultanément, par des intervenants virtuels (ou encore à l'aide de mécanismes contrôlés à distance).

De façon plus spécifique, les éléments suivants, se rapportant aux études de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b), permettent de mettre en relief nos travaux :

(1) Ces approches suggèrent les « meilleures interventions de réponse envisageables », déterminées à partir de modèles simplifiés de réseaux de distribution d'eau potable où, à la limite, n'est représentée qu'une ossature de base. Dans le cas de l'étude de *Baranowski* (2007), notamment, les conduites des deux réseaux d'étude sont entièrement bouclées, les nœuds sont essentiellement localisés aux intersections de conduites et aucune donnée n'est

fournie quant à la localisation des bornes et vannes. Il est donc supposé que chaque conduite (dont la longueur varie entre 1,6 km et 3,6 km) est une vanne et qu'en chaque nœud l'eau contaminée peut être évacuée. Pour ce qui est du (seul) réseau d'étude considéré par *Preis et al.* (2007b), des informations limitées quant aux bornes et aux vannes sont disponibles.

(2) Le nombre de scénarios de contamination pour lesquels les opérations d'urgence ont été définies se limite à un par réseau d'étude, ce qui signifie que *Baranowski* (2007) a examiné deux scénarios (deux réseaux d'étude) et *Preis et al.* (2007b), un seul (un réseau d'étude)[52]. Dans une optique de planification et de préparation, un ensemble de scénarios envisageables devrait être normalement analysé. À ce titre, la présente thèse s'est penchée sur l'étude d'un ensemble de cas liés aux scénarios de première détection, pour un certain nombre de détecteurs localisés au sein des réseaux d'étude. Les résultats obtenus, pour chaque cas analysé, ont de plus permis d'apprécier la validité et l'utilité globales de l'approche développée (sections 6.3, 6.4.3, 8.3, 8.4.3).

(3) La fermeture de vannes et le rinçage sont combinés, dans le cas de *Preis et al.* (2007b), afin d'isoler à la fois un contaminant et de l'évacuer au moyen du rinçage traditionnel. Dans le cas de *Baranowski* (2007), les opérations s'apparentent soit au rinçage traditionnel (lorsque seule la modification des consommations est envisagée, section 3.2.4.1) ou encore à un hybride entre le rinçage traditionnel et le rinçage unidirectionnel, où certaines vannes sont fermées et où des consommations sont modifiées au même moment, de façon à mieux « diriger » l'eau contaminée vers les points d'évacuation. Ni l'approche de *Baranowski* (2007) ni celle de *Preis et al.* (2007b) n'incluent de considérations opérationnelles liées à la mise en œuvre et à l'efficacité des opérations. D'abord, en ce qui a trait à la manipulation

[52] Rappelons que la détection de contaminants est effectuée par des détecteurs préalablement localisés de façon optimale, en utilisant des approches existantes (sections 3.2.4.1 et 3.2.4.2).

de bornes et vannes, aucun délai de fermeture/ouverture, visant à éviter des perturbations importantes en réseau, n'est considéré. De façon réaliste, ces composantes de réseau ne peuvent être fermées instantanément (voir les hypothèses 10 et 12, respectivement aux sections 6.1.4 et 7.3). En supposant de plus que l'ensemble des opérations est effectué de façon simultanée, l'ajout d'un délai de manipulation pourrait avoir un impact sur les résultats (sans pour autant modifier l'essence même des approches). Pour ce qui est du rinçage, dans l'étude de *Baranowski* (2007), des débits d'évacuation d'eau (optimaux en vue de l'évacuation du contaminant) sont imposés en divers nœuds de réseau et sont soumis au respect d'un seul critère hydraulique, visant à éviter l'occurrence de pressions négatives. Rappelons de plus que lorsque le rinçage seulement est considéré (sans la fermeture de vannes), les débits imposés aux nœuds peuvent varier dans le temps (section 3.2.4.1). *Preis et al.* (2007b), pour leur part, imposent un débit de rinçage fixe de 3 L/s (50 gallons par minute)[53] à chaque borne ouverte et n'imposent aucun critère sur les pressions à maintenir en réseau (quoique les débits étant faibles, les activités de rinçage ne devraient normalement pas générer de problèmes au niveau des pressions). Deux principaux constats se dégagent de ces façons de considérer le rinçage. Premièrement, l'efficacité des opérations, sous l'angle des vitesses de rinçage, n'est pas intégrée à l'analyse, notamment dans le cas de *Preis et al.* (2007b), où les vitesses sont particulièrement faibles. L'efficacité d'exécution des opérations revêt une importance certaine puisqu'elle détermine la durée d'interruption du service d'eau potable aux usagers touchés par un incident de contamination. Deuxièmement, comme le fait remarquer

[53] Pour une meilleure idée de l'ordre de grandeur d'un débit de 3 L/s, par rapport à nos travaux sur le RUD : dans une conduite de 150 mm (6 po), un débit de 3 L/s génère une vitesse de 0,17 m/s. De plus, le rinçage traditionnel étant envisagé dans les travaux de *Preis et al.* (2007b), contrairement au RUD, l'ensemble des conduites attachées à une borne ouverte contribue au débit, ce qui limite d'autant plus les vitesses atteintes dans les conduites. Dans le cas de *Baranowski* (2007), une telle comparaison est plus difficile à établir puisque les résultats sont indiqués en pourcentage de variation de la consommation totale d'eau au sein des réseaux d'étude.

Nathalie Periche (communication personnelle, septembre 2006), il est difficile d'exercer un contrôle sur le débit d'évacuation d'eau aux bornes d'incendie (encore plus si celui-ci doit varier dans le temps). Et qui plus est, dans une situation d'urgence, les bornes seront vraisemblablement ouvertes à pleine capacité (utilisant un (des) orifice(s) de 64 ou 100 mm, selon le cas; dans le contexte des présents travaux, revoir l'hypothèse 8 à la section 7.3).

Nonobstant les points précédents, en ce qui concerne notre approche, celle-ci devra être validée davantage et appliquée à d'autres réseaux, notamment de plus grande taille.

8.4.1.2 Hypothèses sur les consommations et le transport de contaminants en réseau

À chacune des étapes de la gestion des opérations de réponse (isolement et rinçage), dans la présente recherche, des hypothèses différentes quant aux écoulements en réseau ont été formulées. D'abord, entre le moment de détection d'un contaminant et l'isolement de ce dernier, un patron unique est supposé, au cours duquel les consommations sont stationnaires et le transport de substances n'est pas spécifiquement simulé. Seule la présence ou l'absence de contaminant en divers nœuds de réseau sont considérées, en supposant qu'il se déplace à la vitesse moyenne de l'eau dans les conduites (par advection pure) et sans que les phénomènes de mélange ni de dilution aux nœuds ne soient pris en compte (section 5.1). Considérant la durée relativement courte du délai de réponse pris en compte, soit deux heures (section 6.1.4), l'utilisation d'un profil de demande constant demeure justifiable puisque, vraisemblablement, les conditions hydrauliques pendant cette période devraient changer peu. Par contre, ce patron d'écoulement est supposé représentatif des conditions moyennes au cours d'une journée

complète. Une telle hypothèse constitue une simplification de la réalité, tel qu'il en a été discuté à la section 6.4.1.1.

L'identification des opérations d'isolement tient compte de facteurs qui ajoutent une sécurité supplémentaire à l'approche. D'abord, les secteurs à isoler sont délimités en considérant le « pire cas », soit en tenant compte d'un ensemble des sources de contamination possibles, associées à chaque détecteur localisé sur les réseaux d'étude (ou chaque scénario de détection) et en y incluant toute conduite par laquelle le contaminant a possiblement transité (section 5.1.4). Ensuite, une marge de sécurité est considérée lors de la sélection des vannes d'isolement (section 6.1.4).

En ce qui a trait aux opérations de RUD, à la section 7.3, il est supposé qu'elles sont effectuées sous des conditions d'écoulement en régime permanent, déterminées par la consommation moyenne nocturne pour les réseaux d'études. Tel qu'il est mentionné à cette même section, selon *Walski et al.* (2003), l'hypothèse de conditions hydrauliques stationnaires est tout à fait justifiée dans un contexte où la modélisation s'intéresse uniquement aux aspects hydrauliques du RUD. Pour des raisons de sécurité, il est supposé que la totalité du secteur isolé doive être rincé, et toutes considérations liées à la qualité de l'eau sont prises en compte par l'imposition d'un critère d'arrêt du rinçage basé sur des mesures de la concentration du contaminant dans l'eau évacuée. Le RUD est simulé dans l'unique but de vérifier la validité hydraulique des séquences de rinçage, conformément aux critères de vitesse et de pression établis (section 7.2.2).

Dans les travaux de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b), la modélisation de la qualité de l'eau en réseau fait partie intégrante des approches élaborées. Les combinaisons obtenues de vannes et/ou bornes à manipuler sont basées sur des objectifs d'optimisation liés à la

consommation d'eau contaminée et à son évacuation. Ces approches reposent donc sur une connaissance (1) des consommations en tout point de réseau et à chaque pas de temps de l'analyse (pour toute sa durée) ainsi que (2) des caractéristiques d'injection de contaminants (moment d'injection, durée, profil de concentration), afin de rendre possible la simulation adéquate (sans trop d'incertitude) de la propagation et de l'évacuation des contaminants. Ces travaux supposent que la source du polluant est inconnue au départ et qu'elle est identifiée au cours d'un délai de réponse supposé entre la première détection et la mise en œuvre des opérations, sans indication particulière quant aux moyens utilisés afin de connaître la source de contamination en question (sections 3.2.4.1 et 3.2.4.2). *Baranowski* (2007), à l'instar de nos travaux, suppose un patron unique de consommation pour la période de simulation considérée, soit une journée. Toutefois, aucune hypothèse n'est posée quant à l'émission d'avis à la population et, conséquemment, la modification possible des consommations. Dans un contexte où la santé des usagers est mise en jeu, la population concernée devrait normalement en être informée, tel que le recommandent *USEPA* (2004b) et *USEPA* (2006) (section 3.1). *Preis et al.* (2007b), pour leur part, supposent que les consommations varient au cours d'une journée (comportement « dynamique »). Au moment où les vannes et bornes sont manipulées, ils font l'hypothèse que la consommation est nulle en 70 % des nœuds du réseau, en raison de l'émission d'avis à la population. Aux nœuds constituant les 30 % restants, on suppose que la consommation normale est maintenue, ces usagers ayant échappé à la diffusion des avis.

Le fait que les résultats obtenus par *Baranowski* (2007) et *Preis et al.* (2007b) soient entièrement basés sur la simulation du transport de contaminants demeure discutable, d'autant plus qu'aucune considération supplémentaire quant à la sécurité des opérations n'est considérée dans le cadre de ces approches. En premier lieu, plutôt qu'un scénario de détection, c'est un scénario d'injection de contaminant (dont les caractéristiques sont nécessairement connues) qui détermine

l'ensemble des opérations, sans qu'aucune marge de sécurité supplémentaire ne soit prise en compte. Considérant, de surcroît, que la mise en œuvre des opérations ne fait pas l'objet de directives quant à leur progression et à leur structure, les approches de *Baranowski* (2007) et de *Preis et al.* (2007b) ne font aucun cas d'une possible dissémination de la contamination résultant des opérations de rinçage. Enfin, dans ces travaux, aucune mesure n'est prévue qui vise à vérifier, lors de la mise en œuvre du rinçage, l'évacuation du contaminant. Ce point rejoint les considérations opérationnelles abordées à la section précédente où il est question, entre autres, d'efficacité. Dans un contexte de contamination, les opérations doivent être planifiées de façon à ce qu'elles soient à la fois efficaces et surtout sécuritaires. Notamment, dans la présente recherche, en plus de la vérification en temps réel de la concentration de contaminant dans l'eau de rinçage, un critère de sécurité supplémentaire est imposé, fixant à huit ou neuf le nombre de volumes d'eau devant être évacués de chacune des séquences de RUD (hypothèse 7, section 7.3). En contrepartie, un critère sur les vitesses de rinçage recherchées favorise l'efficacité des opérations.

8.4.2 Caractéristiques des contaminants

Aux chapitres 4 et 7, il a été supposé que les contaminants visés par la procédure de rinçage n'adhéraient pas à la paroi interne des conduites de distribution et qu'ils n'étaient pas réactifs. Connaissant les conditions qui prévalent généralement en réseaux de distribution d'eau potable, il est probable que le biofilm, des tubercules et/ou autres produits de corrosion soient présents sur la paroi interne des conduites. Plusieurs contaminants introduits en réseau (tant intentionnellement qu'accidentellement) auront une certaine affinité pour ces substances et pourraient, dans une certaine mesure, y adhérer. Pensons par exemple aux toxines, agents microbiologiques et agents chimiques tels que les pesticides (section 3.1.3). Dans de telles

situations, l'isolement des contaminants demeure applicable en tant que première réponse opérationnelle. Par contre, des actions correctives impliquant des interventions de nettoyage élaborées devront nécessairement être mises en place (Tableau 3.1, section 3.1). Ceci étant dit, les présents travaux sur le RUD doivent être considérés comme précurseurs à l'élaboration de telles stratégies. Peu importe la nature du contaminant en cause, il n'en demeure pas moins que l'eau contaminée devra être évacuée de façon sécuritaire et efficace et, à cette fin, le RUD demeure l'une des options à envisager. Par exemple, le RUD pourra aussi être utile au nettoyage des conduites, afin de contrôler l'acheminement d'agents nettoyants, et donc de procéder de façon systématique. Dans cette optique, rien n'empêche que certains paramètres de la procédure soient modifiés (les vitesses de rinçage visées, par exemple), ou encore que des critères supplémentaires soient ajoutés. Sans modifier l'idée de base selon laquelle le rinçage est effectué boucle par boucle, des règles pourraient également être ajoutées à l'étape 3.b de la méthode (Figure 6.2). De telles modifications sont ici suggérées à titre indicatif et devraient faire l'objet d'un examen minutieux. Jusqu'à un certain point, la méthode élaborée pourra être adaptée.

8.4.3 Conception des réseaux de distribution

Les résultats d'application des procédures de gestion des opérations de réponse aux cas réels de Valcourt et Terrasse-Vaudreuil s'avèrent utiles, d'un point de vue général, à l'identification d'améliorations quant à la conception des réseaux de distribution. Par exemple, dans le cas de nouveaux réseaux, les études de conception pourraient inclure un volet « sécurité », lequel intégrerait des règles visant à favoriser l'isolement et le rinçage de secteurs contaminés, sous divers scénarios de contamination.

Dans le cas de réseaux existants, les opérations de réhabilitation pourraient inclure l'ajout de vannes et de bornes, ou encore la modification des diamètres des conduites de certains secteurs tout en maintenant, dans ce dernier cas, la capacité du réseau de distribution à alimenter les divers usagers. Par exemple, pour la séquence de rinçage présentée à la figure 8.24 (séquence 10, réseau de Valcourt, première détection au détecteur 279), le fait de remplacer le tronçon de 100 mm par des conduites de 150 mm engendre, à la première validation hydraulique, une vitesse de rinçage de 1,37 m/s sur toute la longueur de la séquence. Il s'agit d'une amélioration considérable par rapport aux premiers résultats où l'ouverture d'une borne supplémentaire était requise pour l'atteinte du critère minimal de vitesse (1m/s).

Les questions liées à la conception des réseaux d'eau potable déterminent non seulement les résultats obtenus, mais également les règles sur lesquelles reposent les procédures d'isolement et de rinçage. L'approche ayant présidé à l'élaboration des procédures est heuristique, d'où la prise en compte d'un ensemble de critères topologiques et/ou opérationnels sélectionnés qui, appliqués aux réseaux d'étude, ont donné lieu aux règles constituant les procédures et à l'agencement de ces règles. D'une telle démarche sont d'abord nées des règles générales, mais chaque réseau réel étant différent de par sa configuration et sa conception, des règles plus particulières en sont également issues. Lors de l'application des procédures d'isolement et de rinçage à d'autres réseaux, des règles particulières s'ajouteront nécessairement, sans toutefois que la structure générale ni l'essence de la méthode n'en soient modifiées. Ces constats rejoignent la suggestion déjà amenée au chapitre 6, selon laquelle les procédures élaborées se prêteraient au développement éventuel d'un système expert.

8.4.4 Interventions d'urgence et protection contre les incendies

Les procédures d'isolement et de rinçage ont pour but de déterminer un ensemble d'opérations d'urgence à mettre en œuvre, en réponse à des incidents de contamination. Toutefois, ces procédures n'incluent aucune considération liée à la protection contre les incendies. Cet aspect doit nécessairement être intégré aux plans d'urgence des municipalités puisque si un feu survient alors que des opérations en réponse à la détection d'une contamination sont en cours, l'utilisation improvisée du réseau de distribution aux fins d'extinction risque fort d'aggraver la situation. Premièrement, l'ouverture de bornes d'incendie avant que la contamination n'ait été adéquatement isolée risque de disséminer le contaminant à des secteurs de réseaux qui, autrement, n'auraient pas été affectés. Deuxièmement, si un incendie se produit à l'intérieur ou près des limites d'un secteur contaminé (qu'il soit isolé / en cours de rinçage ou non), de l'eau contaminée sera donc fort probablement utilisée afin d'éteindre le feu.

Bristow et al. (2007) ont réalisé une étude préliminaire de vulnérabilité fondée sur des situations d'urgence faisant intervenir, à la fois, un (des) incendie(s) ainsi que divers incidents mettant en péril la protection contre les incendies normalement offerte par un réseau fictif de distribution d'eau potable. Ils ont entre autres considéré le scénario où un (des) incendie(s) se produit (produisent) au sein d'un secteur de réseau isolé suite à l'occurrence d'une contamination. Afin de procéder à l'extinction du (des) feu(x), ils suggèrent l'utilisation de canalisations hors terre branchées à des bornes d'incendie se trouvant à l'extérieur du secteur isolé (et, au besoin, raccordées à des bornes situées au sein du secteur isolé). Mais encore, pour qu'une telle solution soit envisageable de façon sécuritaire, il faut, en principe, que les opérations d'isolement soient complétées avant que l'extinction de feu(x) ne soit entreprise. De plus, il est fort probable que les activités de RUD et de protection incendie se nuisent mutuellement, et donc que les premières

doivent être temporairement suspendues. Toute question relative à l'occurrence concomitante d'incidents de contamination et d'incendies mériterait d'être examinée plus avant dans le cadre de travaux ultérieurs.

CHAPITRE 9 – Conclusions et perspectives de recherche

S'inscrivant dans le récent contexte de sécurisation des infrastructures d'eau potable, la présente recherche s'est penchée sur l'élaboration de procédures visant à systématiser les opérations à mettre en place, en réponse à la détection précoce de contaminations en réseaux de distribution. Afin de mieux protéger la santé publique lorsque de tels incidents se produisent et dans le but d'assurer le retour à l'opération normale des réseaux affectés, deux procédures heuristiques distinctes ont été développées. Ces procédures visent, dans un premier temps, à isoler rapidement les contaminants par la fermeture des vannes appropriées, et, dans un second temps, à évacuer les eaux contaminées au moyen du rinçage unidirectionnel (RUD). Contrairement aux approches similaires retracées dans la littérature, qui ont plutôt cherché, d'un point de vue général et purement théorique, à définir des combinaisons optimales d'opérations pour des réseaux fictifs et simplifiés, le problème de gestion des opérations de réponse, dans cette thèse, a été abordé en mettant l'accent sur les aspects opérationnels et pratiques. L'analyse de deux réseaux réels, pour lesquels l'information détaillée est disponible quant à la localisation des composantes hydrauliques (bornes d'incendie et vannes), ainsi que la prise en compte de critères topologiques et opérationnels, ont permis de définir et de structurer une série de règles sur lesquelles s'appuient chacune des procédures. Ainsi, l'ensemble des opérations sur les vannes et les bornes, tant au stade de l'isolement que de la mise en place du RUD, est défini de façon structurée, efficace et sécuritaire.

Ceci dit, à la lumière de l'analyse exposée aux chapitres précédents, la présente recherche soulève un certain nombre d'éléments qui mériteraient d'être examinés plus avant, dans le cadre de travaux futurs par exemple.

9.1 Perspectives de recherche

Rappelons d'abord que la méthode élaborée comporte trois éléments principaux : premièrement, (1) la localisation optimale de détecteurs de contamination; ensuite, pour chaque scénario de détection, (2) la délimitation de secteurs potentiellement contaminés et l'identification de stratégies d'isolement ainsi que (3) la détermination des séquences d'opérations de RUD.

À plusieurs reprises, il a été mentionné que la méthode devrait faire l'objet d'applications supplémentaires, afin de la valider davantage et même de la préciser. Certes, l'application aux réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil a permis de définir une première version de chacune des procédures de gestion des opérations de réponse. Ces réseaux sont toutefois de taille relativement petite et présentent, chacun, un certain type topologique ainsi qu'un assemblage donné de caractéristiques de conception. L'application à des réseaux de tailles et de configurations variées permettrait de consolider et/ou d'ajuster les règles actuelles des procédures, tout en ajoutant, au besoin, certaines règles s'adressant à des cas particuliers. En fait, l'approche devrait bénéficier, par apprentissage, de son application à d'autres cas et constitue, de ce fait, la base d'un système expert.

Afin justement de faciliter l'application à d'autres cas d'étude, l'approche devrait être entièrement automatisée. Pour le moment, quelques éléments seulement ont été codés à l'aide de langages informatiques et ceux-ci concernent essentiellement la localisation optimale de détecteurs de contamination, la délimitation de secteurs potentiellement contaminés et certains calculs relatifs à la procédure d'isolement. L'analyse conceptuelle des réseaux sur laquelle s'appuient les règles des procédures d'isolement et de RUD devrait entre autres faire appel à la théorie des graphes et, à cette fin, des pistes sont déjà suggérées dans la présente thèse, d'abord

au chapitre 2 (section 2.1.4.3), où est introduite l'idée de séparation des éléments de réseau, ensuite aux chapitres 6 et 7, où elle est illustrée (sections 6.1.2 et 7.1). Nécessairement, l'outil informatisé résultant devrait être intégré ou lié à un logiciel d'analyse tel qu'Aqua Cad (*Aqua Data,* 2005) qui permet la simulation des écoulements en réseau, essentielle à l'approche.

Une fois automatisée, l'approche pourrait en outre être davantage raffinée. Dans un premier temps, en ce qui a trait à la modélisation hydraulique et du transport de substances en réseau, un passage éventuel à une approche dynamique pourrait être envisagé. De façon plus réaliste, les inversions de sens et variations de vitesses d'écoulement au cours de périodes représentatives telles que la journée seraient simulées, ainsi que les séries temporelles de concentration du contaminant en chaque nœud de réseau. Les processus de démarrage/arrêt des pompes et de remplissage/vidange des réservoirs seraient également pris en compte. Une telle modification nécessiterait l'emploi d'un modèle de localisation de détecteurs dynamique, en remplacement du modèle en régime permanent utilisé actuellement. Ceci permettrait de franchir un pas supplémentaire par rapport à la suggestion déjà amenée au chapitre 6 (section 6.4.1.1), concernant l'utilisation d'un modèle en régime permanent en considérant divers patrons d'écoulement consécutifs au cours d'une même journée. L'analyse serait compliquée toutefois par le besoin de simuler un ensemble jugé suffisamment représentatif de scénarios de contamination. Pour ce qui est de la délimitation des secteurs potentiellement contaminés, la dimension temporelle ainsi que les concentrations de contaminant devraient être prises en compte, contrairement à l'approche de simulation actuellement considérée. Par exemple, les secteurs pourraient être définis en identifiant, parmi les séries temporelles de concentration simulées, l'ensemble des combinaisons source-concentration-heure ayant pu mener à une première détection observée, considérant un niveau d'incertitude donné. Afin de limiter les

possibilités et de préciser l'étendue des secteurs contaminés, les détections ultérieures, durant un délai de réponse préétabli, pourraient être prises en compte. À la limite, même un algorithme permettant d'identifier les sources de contamination pourrait être testé. Des hypothèses différentes, en ce qui a trait aux nombres de détecteurs localisés, devraient également être examinées.

Dans un second temps, des modifications pourraient être apportées à la méthode afin que celle-ci tienne compte d'un ensemble plus réaliste de possibilités concernant les opérations d'isolement, comme, par exemple : la présence de vannes contrôlées à distance et/ou une mise en œuvre graduelle de la fermeture de vannes, en priorisant les opérations de façon à minimiser la dissémination de contaminant. Ces suggestions, rappelons-le, avaient été soumises pour l'isolement de secteurs contaminés dans le cas des grands réseaux contenant par exemple plus de 10 000 conduites, pour lesquels la fermeture simultanée des vannes par des équipes d'intervention se déplaçant sur le terrain n'est évidemment plus envisageable (section 6.4.1.3). Les vannes contrôlées à distance pourraient également faciliter l'exécution des opérations de RUD. Une telle stratégie implique de pouvoir modéliser l'évolution des conditions hydrauliques durant les opérations, et ce point reste à être examiné.

À la lumière des précédentes suggestions, le traitement de cas limites (*worst case scenario analysis*) pourrait être réalisé, afin (1) d'examiner si des solutions sont envisageables et, le cas échéant, (2) d'identifier des règles pour l'isolement et le rinçage de secteurs contaminés dans diverses situations jugées critiques. Par exemple, l'occurrence concomitante d'incendies et d'incidents de contamination pourrait être examinée, ou encore divers scénarios d'intrusions multiples de contaminants en réseau. Notamment, la gestion d'incidents de contamination et

l'extinction d'incendies deviendraient des situations d'urgence « rivales », en ce qui a trait à l'utilisation du système d'eau potable. Ainsi, le risque pour la santé publique, dans ces situations, pourrait être mieux évalué. De plus, une variabilité aléatoire pourrait être imposée aux paramètres décrivant les conditions qui prévalent en réseau ainsi que les scénarios de contamination, en vue de tester l'applicabilité des procédures d'isolement et de RUD et d'examiner comment évoluent les opérations de réponse en fonction des divers scénarios.

Enfin, dans une perspective globale de réponse aux incidents de contamination, l'approche actuelle pourrait bénéficier de l'ajout de procédures qui s'y grefferaient afin de compléter l'organigramme présenté au chapitre 4. En guise de rappel, les éléments suivants devraient être considérés : (1) le nettoyage des conduites lorsque des contaminants adhérents sont en cause; à cet égard, rappelons que le RUD pourrait être considéré afin, dans un premier temps, d'évacuer les eaux contaminées, et, dans un second temps, d'acheminer des agents nettoyants (section 8.4.2); (2) la purge secondaire visant à évacuer les eaux stagnantes de secteurs non contaminés mais complètement privés d'eau suite à la mise en œuvre des opérations d'isolement; (3) les dernières opérations visant à assurer l'absence d'eau contaminée au voisinage des vannes fermées pour l'isolement de secteurs contaminés et à l'évacuer, au besoin.

9.2 *Utilité des présents travaux dans un cadre plus général de gestion, d'entretien et d'opération des réseaux d'eau potable*

En terminant, d'un point de vue plus pratique, l'approche globale pour l'isolement et le rinçage de secteurs de réseau contaminés a été élaborée dans une perspective de planification des opérations (section 4.2 – Objectifs et choix méthodologiques). Une telle approche repose sur un

ensemble envisageable de scénarios de détection de contamination, pour lesquels toute la série d'interventions à mettre en place peut être définie et structurée à l'avance. Tout en bénéficiant d'améliorations et de raffinements apportés par les perspectives de recherche proposées précédemment, une telle approche pourrait être intégrée dans le cadre d'études et d'exercices visant à mieux organiser l'ensemble des opérations et actions correctives en réponse à d'éventuels incidents de contamination. Notamment, les effectifs nécessaires en ce qui a trait au personnel et à l'équipement pourraient être réévalués; le personnel d'urgence pourrait être entraîné et préparé plus adéquatement; et les bornes et vannes critiques, dont le bon fonctionnement s'avère nécessaire en situation d'urgence, pourraient être identifiées, afin que leur entretien soit assuré. En outre, ces activités, pourraient viser à valider le succès de mise en place des opérations d'isolement et de RUD telles que définies par le biais des procédures de gestion. Par exemple, un traceur non nocif pour la santé tel que le fluorure (à concentration relativement faible) pourrait être injecté en réseau et l'on pourrait par la suite vérifier si l'on arrive à l'isoler adéquatement. En ce qui a trait au RUD, les vitesses de rinçage et valeurs de pression simulées pourraient également être validées. Les résultats de simultion dépendent entre autres du coefficient de borne sélectionné (section 8.1); la valeur de ce dernier pourrait être revue, à la lumière des observations recueillies sur le terrain. De telles activités devraient contribuer à préciser et ajuster les règles des procédures.

Ces questions de validation, de planification et d'organisation s'ajoutent aux améliorations quant à la conception des réseaux. À terme, l'ensemble de ces considérations tend à s'inscrire dans le cadre de saines pratiques de gestion, d'entretien et d'opération des infrastructures de distribution d'eau potable. Ainsi, la vulnérabilité des réseaux de distribution face à divers incidents de contamination n'en sera que mieux connue et l'identification de mesures correctrives, simplifiée.

Références bibliographiques

Al-Zahrani, M.A. et Moied, K. (2001). Locating optimum water quality monitoring stations in water distribution system. Dans *World Water and Environmental Resources Congress - Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*, American Society of Civil Engineers, 20-24 mai, Orlando, FL, [CD-ROM].

Al-Zahrani, M.A. et Moied, K. (2003). Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 28(1B), 57-75.

Allgeier, S.C. et Magnuson, M.L. (2004). Responding to threats and incidents of intentional drinking water contamination. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 129, 12-17.

Allman, T.P. et Carlson, K.H. (2005). Expanded summary: Modeling intentional distribution system contamination and detection. *Journal American Water Works Association*, 97(1), 58-61.

Antoun, E.N., Tyson, T. et Hiltebrabd, D.J. (1997). Unidirectional flushing: A remedy to quality problems such as biologically mediated corrosion. Dans *AWWA Annual Conference*, American Water Works Association, 15-19 juin, Atlanta, GA, pp. 259-273.

Antoun, E.N., Dyksen, J.E. et Hiltebrand, D.J. (1999). Unidirectional flushing: A powerful tool. *Journal American Water Works Association*, 91(7), 62-71.

Aqua Data (2005). Logiciel Aqua Cad Suite, <http://www.aquadata.com/default.aspx?scheme=34> (consulté le 30 novembre 2007).

ASCE (2004). Interim voluntary guidelines for designing an online contaminant monitoring system. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 558 pages.

AWWA (2007). WaterSentinel pilot on track for summer launch. *Journal American Water Works Association*, 99(1), 20-24.

Bahadur, R., Samuels, W.B. et Pickus, J. (2003). Case study for a distribution system emergency response tool. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 50 pages.

Baranowski, T.M. (2007). Development of consequence management strategies for water distribution systems. Thèse de doctorat, Vanderbilt University, Nashville, TN, 273 pages.

Bell, R.N., Brandon, M.K., Design, W.E., Gist, F.M., Hasit, Y., Hesner, R.T., Irrinki, S.I.A.B., Thompson, K.A. et Warren, L.P. (2004). Interim voluntary security guidance for water utilities. American Water Works Association, Denver, CO, http://www.awwa.org/awwa/science/wise/report/AWWA_Securities/page2.htm (février 2007).

Berry, J.W., Fleischer, L., Hart, W.E., Phillips, C.A. et Watson, J.-P. (2005a). Sensor placement in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 238-243.

Berry, J.W., Hart, W.E. et Phillips, C.A. (2005b). Scalability of integer programming computations for sensor placement in water networks. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Impacts of Global Climate Change*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Anchorage, AK, [CD-ROM].

Berry, J.W., Hart, W.E., Phillips, C.A., Uber, J.G. et Watson, J.-P. (2005c). Validation and assessment of integer programming sensor placement models. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Impacts of Global Climate Change*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Anchorage, AK, [CD-ROM].

Berry, J.W., Hart, W.E., Phillips, C.A., Uber, J.G. et Watson, J.-P. (2006a). Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 218-224.

Berry, J.W., Carr, R.D., Hart, W.E., Leung, V.J., Phillips, C.A. et Watson, J.-P. (2006b). On the placement of imperfect sensors in municipal water networks. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Berry, J.W., Carr, R.D., Hart, W.E. et Philips, C.A. (2007). Scalable water network sensor placement via aggregation. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Bouchart, F.J.C. et Davidson, J.W. (2004). Chapitre 15: Hydraulic and water quality modelling for contamination response. Dans *Water Supply Systems Security*, McGraw-Hill Professional Engineering, New York, NY.

Bristow, E., Brumbelow, K. et Kanta, L. (2007). Vulnerability assessment and mitigation methods for interdependent water distribution and urban fire response systems. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Byer, D. et Carlson, K. (2005). Real-time detection of intentional chemical contamination - In the distribution system. *Journal American Water Works Association*, 97(7), 130-133.

Carr, R.D., Greenberg, H.J., Hart, W.E., Konjevod, G., Lauer, E., Lin, H., Morrison, T. et Phillips, C.A. (2006). Robust optimization of contaminant sensor placement for community water systems. *Mathematical Programming, Series B*, 107(1-2), 337-356.

CFPTEP et CCME (2004). De la source au robinet : Guide d'application de l'approche à barrières multiples pour une eau potable saine. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg, MB, 274 pages.

Chevarie, P. et Grondin, P. (2002). Plan directeur d'interventions du réseau d'eau potable - Ville de Valcourt, Projet MT0091. Aqua Data Inc., Pincourt, QC, 62 pages.

Clark, R.M., Geldreich, E.E., Fox, K.R., Rice, E.W., Johnson, C.H., Goodrich, J.A., Barnick, J.A., Abdesaken, F., Hill, J.E. et Angulo, F.J. (1996). A waterborne *salmonella typhimurium* outbreak in Gideon, Missouri: Results from a field investigation. *International Journal of Environmental Health Resources*, 6(3), 187-193.

Clark, R.M. et Buchberger, S.G. (2004). Chapitre 9: Responding to a contamination threat in a drinking water network : The potential for modeling and monitoring. Dans *Water Supply Systems Security*, McGraw-Hill Professional Engineering, New York, NY.

Clark, R.M., Buchberger, S.G., Lee, Y. et Hartman, D.J. (2004). Chapitre 4: Drinking water distribution systems: An overview. Dans *Water Supply Systems Security*, McGraw-Hill Professional Engineering, New York, NY.

CMMTQ (2006). Les types de dispositifs antirefoulement. *Intermécanique du bâtiment, Numéro spécial : Les dispositifs antirefoulement*, 21(7), 17-19.

Craun, G.F. et Calderon, R.L. (2001). Waterborne disease outbreaks caused by distribution system deficiencies. *Journal American Water Works Association*, 93(9), 64-75.

Daneels, J. et Finley, R.E. (2004). Assessing the vulnerabilities of U.S. drinking water systems. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, (129), 8-12.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. et Meyarivan, T. (2000). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA II. Kanpur Genetic Algorithm Laboratory (KanGAL), Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 20 pages.

DeFrank, J.J. (2006). Catalytic enzyme-based methods for water treatment and water distribution system decontamination - 1. Literature survey. US Army Research, Development and Engineering Command, Edgewood Chemical Biological Center, 73 pages.

DeFrank, J.J., Fry, J.I. et Pellar, G.J. (2007). Catalytic enzyme-based methods for water treatment and water distribution system decontamination - Final report. National Homeland Security Research Center Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 37 pages.

Ellison, D., Duranceau, S.G., Ancel, S., Deagle, G. et McCoy, R. (2003). Investigation of pipe cleaning methods. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 158 pages.

Epp, R. et Fowler, A.G. (1970). Efficient code for steady-state flows in networks. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 96(1), 43-56.

ESRI (2007). ArcGIS: The complete enterprise GIS, <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html> (consulté le 3 janvier 2008).

Floyd, R.W. (1962). Algorithm 67: Shortest path. *Communications of ACM*, 5(6), 345.

Friedman, M., Kirmeyer, G.J. et Antoun, E. (2002). Developing and implementing a distribution system flushing program. *Journal American Water Works Association*, 94(7), 48-56.

Friedman, M., Martel, K., Hill, A., Holt, D., Smith, S., Sherwin, C., Hiltebrand, D., Pommerenk, P., Hinedi, Z. et Camper, A. (2003). Establishing site-specific flushing velocities. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 228 pages.

Friedman, M., Kirmeyer, G., Pierson, G., Harrison, S., Martel, K., Sandvig, A. et Hanson, A. (2005). Development of distribution system water quality optimization plans. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 229 pages.

GNU (2006). GLPK - GNU Linear Programming Kit, <http://www.gnu.org/software/glpk/> (consulté le 29 novembre 2007).

Guan, J., Aral, M.M., Maslia, M.L. et Grayman, W.M. (2006). Identification of contaminant sources in water distribution systems using simulation–optimization method: Case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 252-262.

Hall, J., Zaffiro, A.D., Marx, R.B., Kefauver, P.C., Krishnan, E.R. et Herrmann, J.G. (2007). On-line water quality parameters as indicators of distribution system contamination. *Journal American Water Works Association*, 99(1), 66-77.

Hanson, A., Kirmeyer, G., Gilmore, P., Banack, S. et Huston, C. (2007). What to do with unavoidable dead ends. *Opflow*, 33(2), 20-23.

Harmant, P., Robert, S. et Echavidre, P. (2002). Network audit: A case study for the diagnosis and the implementation of corrective actions. *Techniques Sciences Méthodes. Génie Urbain Génie Rural*, 6, 103-112.

Hart, D., McKenna, S.A., Klise, K., Cruz, V. et Wilson, M. (2007a). CANARY: A water quality event detection algorithm development tool. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Hart, W.E., Berry, J.W., Murray, R., Phillips, C.A., Riesen, L.A. et Watson, J.-P. (2007b). SPOT: A sensor placement optimization toolkit for drinking water contamination

warning system design. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Hasan, J., States, S. et Deininger, R. (2004). Safeguarding the security of public water supplies using early warning systems: A brief review. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, (129), 27-33.

Hasit, Y.K., DeNadai, A.J., Gorrill, H.M., McCammon, S.B., Raucher, R.S. et Withcomb, J. (2004). Cost and benefit analysis of flushing. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 110 pages.

Herrick, C., Pratt, J., Raucher, R. et Kalas-Adams, N. (2006). Emergency response and recovery planning for water systems: A kit of tools. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 65 pages.

Hill, J., van Bloemen Waanders, B. et Laird, C. (2006). Source inversion with uncertain sensor measurements. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Hrudey, S.E. et Hrudey, E.J. (2007). Published cases of waterborne disease outbreaks - Evidence of a recurrent threat. *Water Environment Research*, 79(3), 233-245.

Janke, R., Murray, R., Uber, J. et Taxon, T. (2006). Comparison of physical sampling and real-time monitoring strategies for designing a contamination warning system in a drinking water system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 310-313.

Janke, R., Murray, R., Uber, J., Bahadur, R., Taxon, T. et Samuels, W. (2007). Using TEVA to assess impact of model skeletonization on contaminant consequence assessment and sensor placement design. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, May 15-19, Tampa, FL, [CD-ROM].

Joseph, S. et Pimblett, J.G. (2000). Unidirectional flushing program is clean sweep. *OpFlow*, 26(1), 1, 6-7.

Jun, H. et Loganathan, G.V. (2007). Valve-controlled segments in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(2), 145-155.

Jun, H., Loganathan, G.V., Deb, A.K., Grayman, W. et Snyder, J. (2007). Valve distribution and impact analysis in water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 133(8), 790-799.

Karim, M.R., Abbaszadegan, M. et LeChevallier, M. (2003). Potential for pathogen intrusion during pressure transients. *Journal American Water Works Association*, 95(5), 134-146.

Kessler, A., Ostfeld, A. et Sinai, G. (1998). Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(4), 192-198.

Klise, K. et McKenna, S.A. (2006). Multivariate applications for detecting anomalous water quality. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Koltrun, P., Yang, S. et O'Halloran, R. (2007). Identification and tracking of water parcels using linguistic cluster analysis. Dans *Systems Engineering / Test and Evaluation: Complex Systems and Sustainability*, Systems Engineering Society of Australia, 24-27 septembre, Sydney, Autralie, [CD-ROM].

Kumar, A., Kansal, M.L. et Arora, G. (1997). Identification of monitoring stations in water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 123(8), 746-752.

Kumar, A., Kansal, M.L. et Arora, G. (1999). Detecting accidental contaminations in municipal water networks - Discussion. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(4), 308-310.

Kumar, S. M., Narasimhan, S. et Bahallamudi, S. M. (2008). State estimation in water distribution networks using graph-theoretic reduction strategy. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5), 395-403.

Lacomme, P., Prins, C. et Sevaux, M. (2003). *Algorithmes de graphes*, 2^{e} édition, Eyrolles, Paris, FR, 422 pages.

Laird, C.D., Biegler, L.T., van Bloemen Waanders, B.G. et Bartlett, R.A. (2005). Contamination source determination for water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(2), 125-134.

Laird, C.D., Biegler, L.T. et van Bloemen Waanders, B.G. (2006). Mixed-integer approach for obtaining unique solutions in source inversion of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 242-251.

Laird, C.D., Biegler, L.T. et van Bloemen Waanders, B.G. (2007). Closure to "Mixed-integer approach for obtaining unique solutions in source inversion of water networks" by Carl D. Laird, Lorenz T. Biegler and Bart G. van Bloemen Waanders. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(6), 575-578.

Lansey, K. et Boulos, P. (2005). *Comprehensive handbook on water quality analysis for distribution systems*, MWH Soft, Pasadena, CA, 448 pages.

Lansey, K., Delgado, D. et Banihani, Q. (2007). Discussion of "Mixed-integer approach for obtaining unique solutions in source inversion of water networks" by Carl D. Laird, Lorenz T. Biegler and Bart G. van Bloemen Waanders. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(6), 573-575.

Lee, B.H. et Deininger, R.A. (1992). Optimal location of monitoring stations in water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 118(1), 4-16.

Lindley, T.R. et Buchberger, S.G. (2002). Assessing intrusion susceptibility in distribution systems. *Journal American Water Works Association*, 94(6), 66-79.

Linville, T.J. et Thompson, K.A. (2006). Protecting the security of our nation's water systems: Challenges and successes. *Journal American Water Works Association*, 98(3), 234-241.

MathWorks (2007). MATLAB - The language of technical computing, <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (consulté le 30 novembre 2007).

Mays, L.W. (2004). Chapitre 1: Water supply security: An introduction. Dans *Water Supply Systems Security*, McGraw-Hill Professional Engineering, New York, NY.

McKenna, S.A., Klise, A.K. et Wilson, M.P. (2006). Testing water quality change detection algorithms. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

McKenna, S.A., Hart, D., Klise, K., Cruz, V. et Wilson, M. (2007). Event detection from water quality time series. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

MDDEP (2005). Règlement sur la qualité de l'eau potable (refonte), Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, QC, http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/index.htm (février 2007)

MEQ (2002). Directive 001 : Captage et distribution de l'eau (entrée en vigueur 20 février 1984). Ministère de l'Environnement du Québec, Québec, QC, 71 pages.

Morley, K., Janke, R., Murray, R. et Fox, K. (2007). Drinking water contamination warning systems: Water utilities driving water security research. *Journal American Water Works Association*, 99(6), 40-46.

Munavalli, G.R. et Kumar, M.S.M. (2004). Dynamic simulation of multicomponent reaction transport in water distribution systems. *Water Research*, 38(8), 1971-1988.

Murray, R., Janke, R. et Uber, J. (2004). The threat ensemble vulnerability assessment (TEVA) program for drinking water distribution system security. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, American Society of Civil Engineers, 27 juin-1er juillet, Salt Lake City, UT, [CD-ROM].

Murray, R., Uber, J. et Janke, R. (2006). Model for estimating acute health impacts from consumption of contaminated drinking water. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 293-299.

MWH Soft (2007). H2OMAP Water - Protector, <http://www.mwhsoft.com/page/p_product/water/wmodules/water_protect_o.htm> (consulté le 7 mars 2008).

O'Halloran, R., Yang, S., Tulloh, A., Koltrun, P. et Toifl, M. (2006). Sensor-based water parcel tracking. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Oberoi, K. (1994). Distribution flushing program: The benefits and results. Dans *AWWA Annual conference*, American Water Works Association, 19-23 juin, New York, NY, pp. 579-597.

Ostfeld, A., Kessler, A. et Goldberg, I. (2003). An early warning contaminants detection system for water distribution networks. Dans *Computing and Control for the Water Industry: Advances in Water Supply Management*, A.A. Balkema, Swets & Zeitlinger Publishers, 15-17 septembre, London, UK.

Ostfeld, A., Kessler, A. et Goldberg, I. (2004). A contaminant detection system for early warning in water distribution networks. *Engineering Optimization*, 36(5), 525-538.

Ostfeld, A. et 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. et Salomons, E. (2005). Optimal early warning monitoring system layout for water networks security: Inclusion of sensors sensitivities and response delays. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(3), 151-169.

Ostfeld, A. et Salomons, E. (2006). Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems. *Engineering Optimization*, 38(3), 337-352.

Ouimet, C. et Grondin, P. (1999). Modélisation du réseau de distribution d'eau potable et programme de rinçage unidirectionnel - Municipalité de Terrasse-Vaudreuil. Aqua Data Inc., Pincourt, QC, 41 pages.

Ozger, S. et Mays, L.W. (2004). Chapitre 13: Optimal location of isolation valves: A reliability approach. Dans *Water Supply Systems Security*, McGraw-Hill Professional Engineering, New York, NY.

Papadimitriou, C.H. Et Steiglitz, K. (1998) Combinatorial Optimization : Algorithms ans Complexity, 2e édition, Dover Publications, Mineola, NY, 512 pages.

Perelman, L. et Ostfeld, A. (2007). Rare events Monte Carlo sampling for contamination warning systems (CWS) evaluation. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

PNWS-AWWA , Cross Connection Control Committee (1995). Summary of backflow incidents, Fourth edition. Pacific Northwest Section - American Water Works Association, http://www.abpa.org/originalsite/pnw-all.htm#full (février 2007).

Preis, A. et Ostfeld, A. (2006a). Contamination source identification in water systems: A hybrid model trees–linear programming scheme. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 263-273.

Preis, A. et Ostfeld, A. (2006b). Optimal sensors layout for contamination source identification in water distribution systems. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Preis, A. et Ostfeld, A. (2007). Efficient contamination events sampling for sensors layout design. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineering, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Preis, A., Ostfeld, A. et Perelman, L. (2007a). Contamination source detection with fuzzy sensors data. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Preis, A., Mayorchik, Y. et Ostfeld, A. (2007b). Multiobjective contaminant response model. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Propato, M. et Uber, J.G. (2004a). Linear least-squares formulation for operation of booster disinfection systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 53-62.

Propato, M. et Uber, J.G. (2004b). Vulnerability of water distribution systems to pathogen intrusion: How effective is a disinfectant residual? *Environmental Science and Technology*, 38(13), 3713-3722.

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., Cheung, P.B. et Piller, O. (2006). Sensor location design for contaminant source identification in water distribution systems. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Propato, M., Tryby, M.E. et Piller, O. (2007). Linear algebra analysis for contaminant source identification in water distribution systems. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Rahal, H. (1995). A co-tree flows formulation for steady state in water distribution networks. *Advances in Engineering Software*, 22(3), 169-178.

RicoRamirez, V., FraustoHernandez, S., Diwekar, U.M. et HernandezCastro, S. (2007). Water networks security: A two-stage mixed-integer stochastic program for sensor placement under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 31(5-6), 565-573.

Roberson, A.J. et Morley, K.M. (2005). Contamination warning systems for water: An approach for providing actionable information to decision-makers. American Water Works Association, Denver, CO, 22 pages.

Rodriguez, M., Sérodes, J.-B., Bouchard, C. et Pelletier, G. (2006). De nouveaux défis en surveillance et en aide à la décision dans le domaine de l'eau potable. Dans *18e Atelier sur l'eau potable*, Réseau Environnement, 17-18 octobre, Boucherville, QC, Sommaire exécutif, Thème - Gestion de réseaux.

Rossman, L.A. et Boulos, P. (1996). Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(2), 137-146.

Rossman, L.A. (2000). Epanet 2 users manual. US Environemtal Protection Agency, Cincinnati, OH, http://www.epa.gov/nrmr/wswrd/dw/epanet/EN2manual.pdf (septembre 2008).

Sadiq, R., Kleiner, Y. et Rajani, B. (2005). An evidential reasoning approach to evaluate intrusion vulnerability in distribution systems. Dans *Computing and Control for the Water Industry: Water Management for the 21st Century*, Exeter University Center for Water Systems, 5-7 septembre, Exeter, UK, vol. 2, pp. 229-234.

Sadiq, R. et Rodriguez, M. (2005). Interpreting water quality in the distribution system using Dempster-Shafer theory of evidence. *Chemosphere*, 59(2), 177-188.

Shang, F., Uber, J.G. et Polycarpou, M.M. (2002). Particle backtracking algorithm for water distribution system analysis. *Journal of Environmental Engineering*, 128(5), 441-450.

Shang, F., Uber, J. et Murray, R. (2007). Uncertainty of contamination source characterization within water distribution systems. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Silverman, P., Hreha, M., Brinwasser, A., Tuttle, A., Faller, D., Vukotich, C. et Richards, N.M. (1981). Chlordane contamination of a public water supply - Pittsburgh, Pennsylvania. *Mortality and Morbidity Weekly Report*, 30(46), 571-578.

Tryby, M.E., Boccelli, D.L., Uber, J.G. et Rossman, L.A. (2002). Facility location model for booster disinfection of water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(5), 322-333.

Tryby, M.E., Propato, M. et Ranjithan, R. (2007). Monitoring sensor network design for water distribution source inversion problems. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Uber, J., Janke, R., Murray, R. et Meyer, P. (2004). Greedy heuristic methods for locating water quality sensors in distribution systems. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, American Society of Civil Engineers, 27 juin-1er juillet, Salt Lake City, UT, [CD-ROM].

Uber, J.G., Murray, R., Magnuson, M. et Umberg, K. (2007). Evaluating real-time event detection using synthetic data. Dans *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring our Natural Habitat*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Tampa, FL, [CD-ROM].

Umberg, K., Uber, J.G. et Murray, R. (2006). Performance evaluation of real-time event detection algorithms. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

USEPA (2002). Potential for contamination due to cross-connections and backflow and the associated risks. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 44 pages.

USEPA (2003a). Cross-connection control manual. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 45 pages.

USEPA (2003b). Response Protocol Toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - Overview and application, Interim final - December 2003. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 14 pages.

USEPA (2004a). Response Protocol Toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - Module 5: Public health response guide, Interim final - April 2004. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 83 pages.

USEPA (2004b). Response Protocol Toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - Module 6: Remediation and recovery guide. Interim final - April 2004. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 111 pages.

USEPA (2005a). Technologies and techniques for early warning systems to monitor and evaluate drinking water quality: A state-of-the-art review. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 236 pages.

USEPA (2005b). Overview of event detection systems for WaterSentinel, Draft, Version 1.0. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 33 pages.

USEPA (2006). *A Water Security Handbook: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents*, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 64 pages.

Vreeburg, J.H.G. (2007). Discolouration in drinking water systems: A particular approach. Thèse de doctorat, Université technologique de Delft, NH, 183 pages.

Walski, T.M., Brill, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Lee, H.L., Liebman, J.C., Mays, L., Morgan, D.R. et Ormsbee, L. (1987). Battle of the Network Models - Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.

Walski, T.M. (1995). An approach for handling sprinklers, hydrants and orifices in water distribution systems. Dans *AWWA Annual Conference*, American Water Works Association, 18-22 juin, Anaheim, CA, pp. 469-465.

Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W.M., Bockwith, S. et Koelle, E. (2003). *Advanced distribution system modeling and management*, Haestad Press, Waterbury, CT, 751 pages.

Walski, T.M., Weiler, J.S. et Culver, T. (2006). Using criticality analysis to identify impact of valve location. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Watson, J.-P., Greenberg, H.J. et Hart, W.E. (2004). A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, American Society of Civil Engineers, 27juin-1er juillet, Salt Lake City, UT, [CD-ROM].

Watson, J.-P., Hart, W.E. et Berry, J.W. (2005). Scalable high-performance heuristics for sensor placement in water distribution networks. Dans *World Water and Environmental Resources Congress: Impacts of Global Climate Change*, American Society of Civil Engineers, 15-19 mai, Anchorage, AK, [CD-ROM].

Watson, J.-P., Hart, W.E. et Murray, R. (2006). Formulation and optimization of robust sensor placement problems for contaminant warning systems. Dans *Water Distribution System Analysis Symposium*, American Society of Civil Engineers, 27-30 août, Cincinnati, OH, [CD-ROM].

Welter, G. (2005). Decontamination of water infrastructure: AwwaRF project 2981. Présentation dans le cadre de *AWWA DSS Conference and Exposition*. 18-21 septembre, Tampa, FL.

Wood, D.J. et Rayes, A.M. (1981). Reliability of algorithms for pipe network analysis. *Journal of Hydraulic Division ASCE*, 107(10), 1145-1161

ANNEXE 1

Précisions concernant les reflux d'eau contaminée

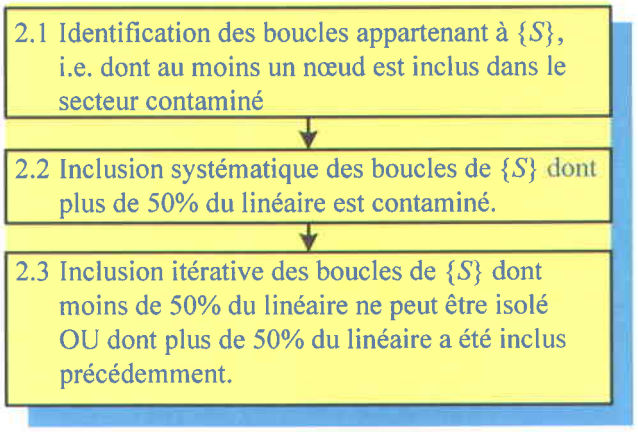
D'après *USEPA* (2003a), un raccordement croisé désigne un lien ou une connexion entre une source de pollution généralement liquide (eau non potable ou substance nuisible pour la santé) et un système de distribution d'eau potable, et par lequel un reflux d'eau contaminée peut éventuellement se produire. Deux conditions sont nécessaires à l'occurrence de reflux : 1) l'existence d'un raccordement croisé non sécurisé et 2) un différentiel de charge permettant l'écoulement d'eau contaminée vers le réseau d'eau potable. Le différentiel de charge peut se manifester de deux façons. D'abord, il peut s'agir de contrepression, où des conditions favorisent l'occurrence de pressions plus importantes au sein d'un système externe alimenté par l'eau potable, par rapport à la pression maintenue en réseau. Un siphonnement peut également se produire alors que, de façon transitoire, la pression absolue en réseau devient inférieure à la pression atmosphérique. Un effet de siphon est ainsi créé au sein d'un système externe alimenté par le système d'eau potable. Il existe divers mécanismes permettant d'empêcher les reflux d'eau contaminée. Pour plus d'information à ce sujet, le lecteur est invité à consulter *CMMTQ* (2006) et *USEPA* (2003a).

ANNEXE 2

Détail de la procédure d'isolement de secteurs contaminés

En complément au chapitre 6, cette annexe donne certaines précisions quant aux étapes et règles de la procédure d'isolement. Au besoin, des figures accompagnent les explications.

Étape 2 :



Règle 2.3
Considérant les boucles de $\{S\}$ qui ne sont, suite à l'application de 2.1 et 2.2, que partiellement incluses au secteur à isoler (en raison de l'inclusion de boucles voisines) :

TANT QU'il y a des boucles remplissant l'une des conditions suivantes :

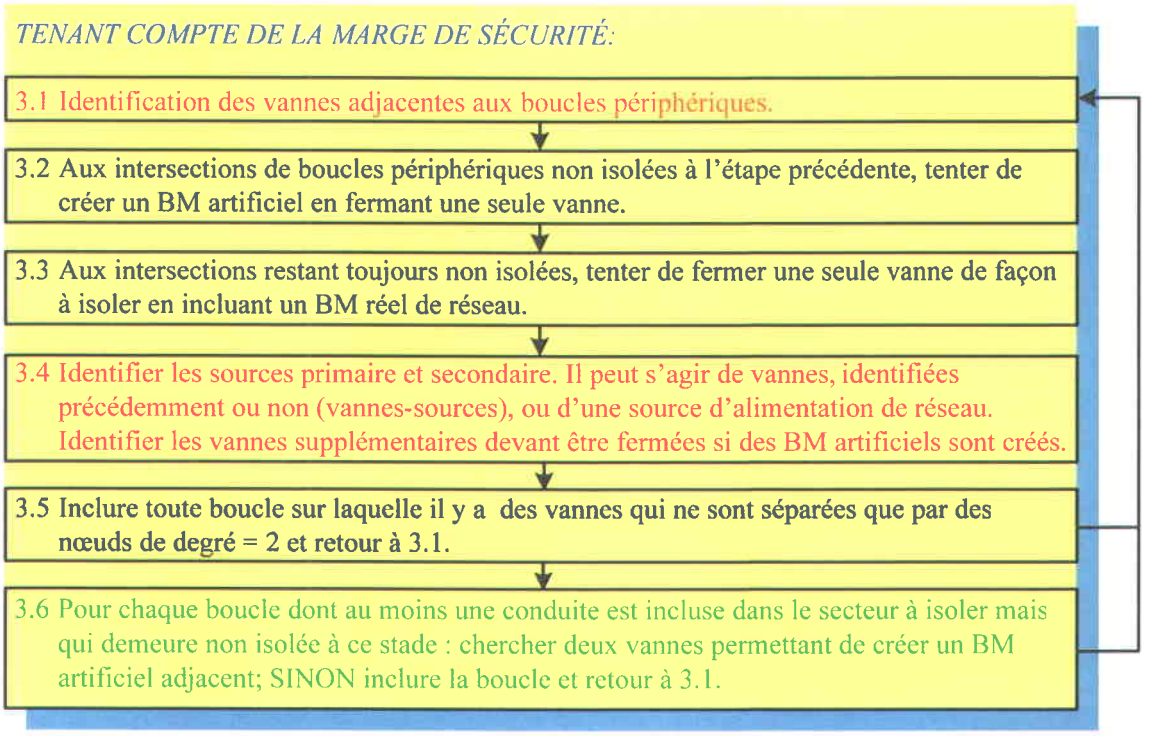
1) les vannes se trouvant sur les conduites de ces boucles ne permettent pas d'isoler la contamination à l'intérieur de 50 % de leur linéaire ou moins, en tenant compte de la marge de sécurité (section 6.1.3 et hypothèse 12 à la section 6.1.4) [1];

2) OU le linéaire affecté par des inclusions précédentes et / ou la contamination ≥ 50 %.

   - Ordonner ces boucles en fonction du % de linéaire déjà inclus, en ordre décroissant.
   - Inclure la boucle se trouvant en tête du classement précédent.
   - Mettre à jour la liste des boucles de $\{S\}$ non incluses en totalité.

[1] Rappel de la définition de « marge de sécurité » : distance minimale, en matière de temps de parcours dans les conduites, devant séparer une conduite contaminée et une vanne à fermer. Dans cette thèse, la marge de sécurité a été fixée à la valeur du délai de manipulation, soit cinq minutes.

Étape 3 :



Règles 3.1 à 3.3

D'un point de vue conceptuel, les jonctions périphériques sont les nœuds auxquels sont attachées (1) des conduites incluses dans le secteur à isoler avant l'application de 3.1; et (2) nécessairement, des conduites non incluses, où l'isolement est requis (voir les nœuds en vert à la figure A2.1). Aux règles 3.1 à 3.3, il s'agit donc d'isoler chacune de ces jonctions en identifiant des vannes pouvant appartenir à :

1) Une boucle (qui n'est forcément pas incluse en totalité, voir V4 et V5 à la figure A2.1).

2) Un BM créé par la fermeture permanente de vannes aux fins de délimitation des zones de pression (réseau de Valcourt, figure 4.2). Précisons que dans le cadre de cette thèse, ce type de BM a un statut particulier, étant d'envergure relativement importante. Tel que l'illustre la figure A2.1, les règles 3.1 à 3.3 peuvent être appliquées à ces BM afin d'identifier des vannes d'isolement (V2 et V3). Selon l'étendue de la contamination, il est possible qu'il n'existe aucune vanne remplissant ces conditions, en amont de la vanne fermée en permanence. Dans un pareil cas, cette dernière est retenue comme vanne d'isolement.

3) Un tronçon linéaire menant à une boucle retirée (voir la vanne V1 à la figure A2.1).

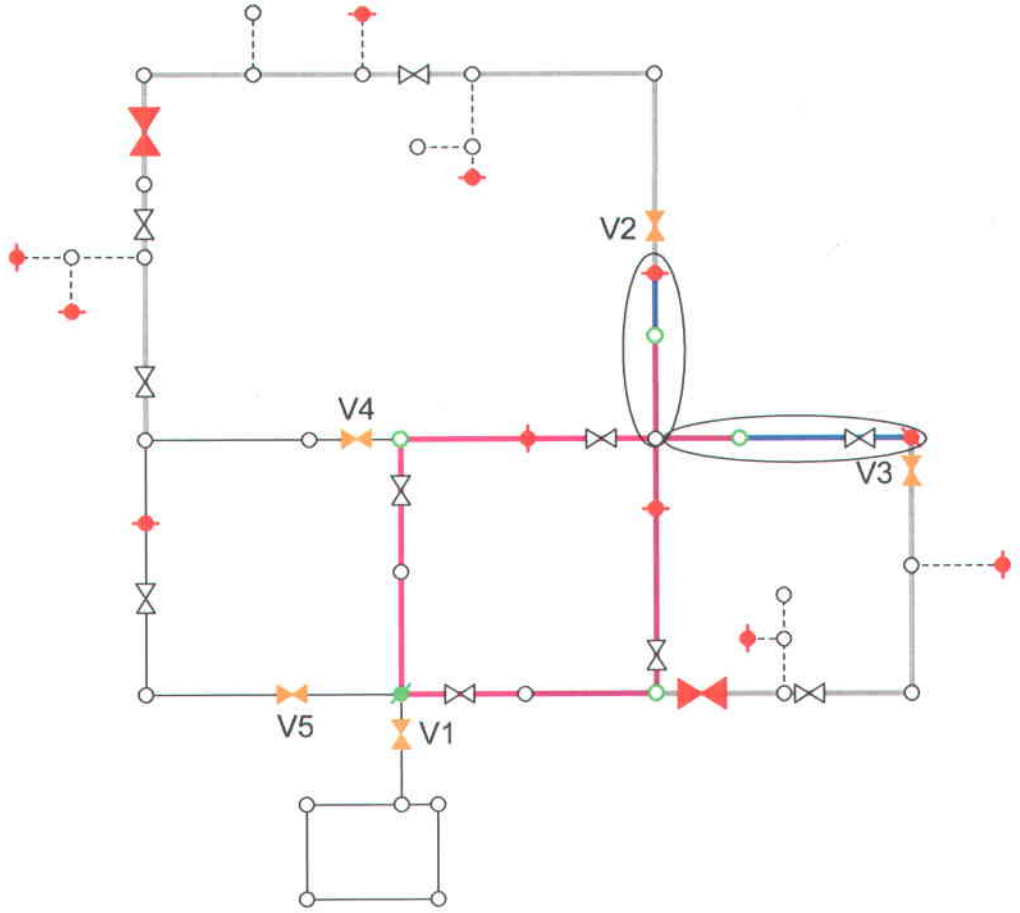


Figure A2.1 : Portion d'un secteur isolé où les conduites en violet représentent la contamination. Les conduites en rose ont été ajoutées au secteur suite à l'application de l'étape 2. Les conduites en bleu sont ajoutées à 3.2 et 3.3. Les vannes en orangé sont les vannes d'isolement (V1 à V5) et celles en rouge représentent des vannes fermées en permanence. Leur fermeture engendre la création de BM, apparaissant en gris (dont certaines sections, entourées d'ellipses sur la figure, ont été incluses au secteur à isoler et apparaissent ici en pourpre ou en bleu). Les traits pointillés illustrent les BM de réseau (ou BM réels).

Règle 3.4

Cette règle vise la sélection des deux sources d'eau propre pour le secteur à isoler, en fonction des critères suivants et en s'assurant qu'il existe un chemin d'écoulement (connexité) entre chacune de ces sources d'eau propre et une source d'alimentation du réseau :

- Source 1 : source de réseau (donc un nœud-source appartenant à un BM-source); SINON diamètre maximal; à diamètre égal, favoriser la proximité d'une source d'alimentation de réseau.

- Source 2 : diamètre maximal; à diamètre égal, profiter de l'opportunité d'isoler une jonction non isolée à ce stade; SINON favoriser la proximité d'une source de réseau[2].

[2] Rappelons qu'à l'étape 3.4, les deux sources sont sélectionnées sans égard à savoir laquelle sera la source primaire, i.e. celle qui restera ouverte lorsque les opérations d'isolement seront entreprises sur le terrain (section 6.2.2). Le choix est déterminé en consultant la première étape de la procédure de rinçage (chapitre 8 et annexe 4).

CAS PARTICULIER : Certains réseaux, tels que celui de Valcourt, possèdent une seule source d'alimentation d'où l'eau provient via un BM-source. La source du réseau peut être identifiée en tant que source d'eau propre pour un secteur à isoler, et conséquemment, le BM-source est inclus dans ce secteur (voir la figure A2.2, qui est une reprise de la figure 6.9, section 6.2.2). Dans une pareille situation, en raison de l'absence de connexité hydraulique, il n'est pas possible d'identifier une seconde source d'eau propre pour le secteur à isoler.

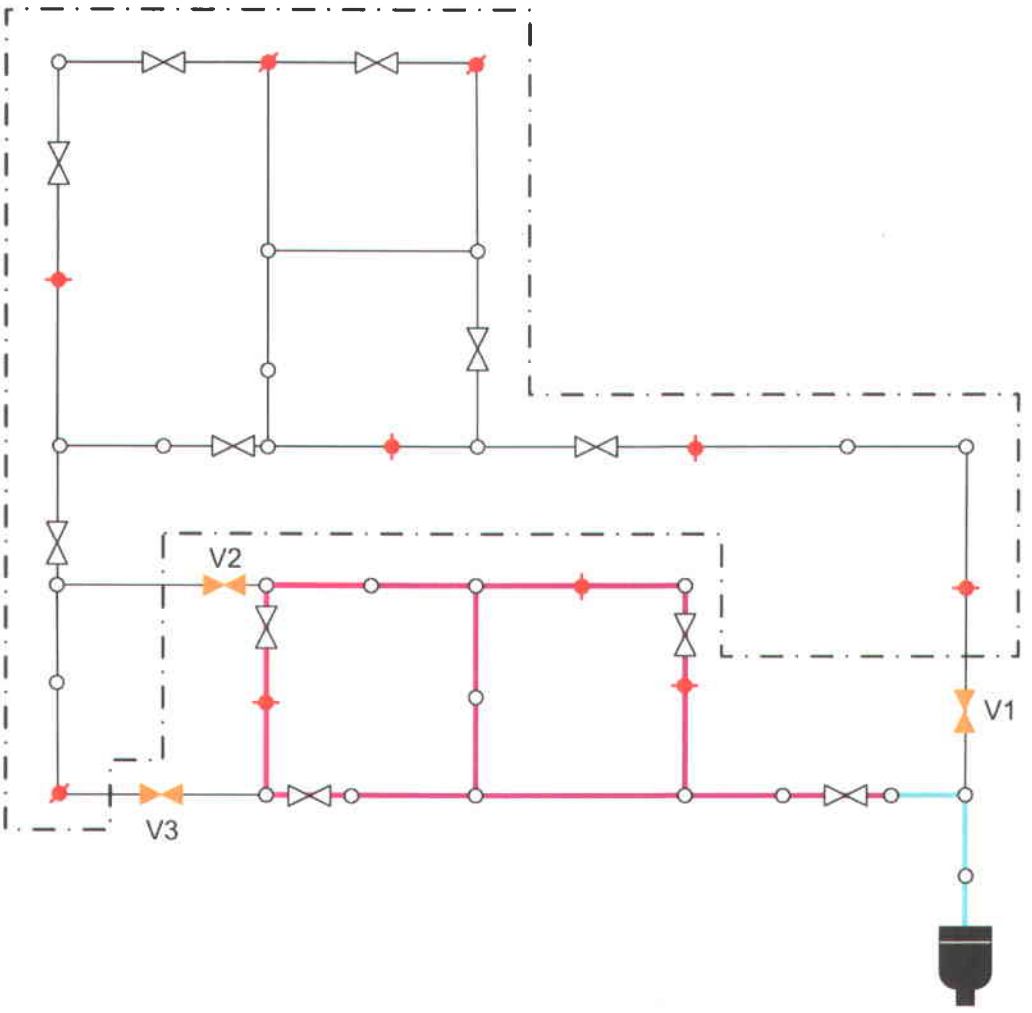


Figure A2.2 : Illustration d'une situation où il n'est pas possible d'identifier deux sources d'eau propre pour le secteur à isoler, en raison de la fermeture de V1.

Règle 3.5

Cette règle vise l'inclusion, au secteur à isoler, de toute boucle sur laquelle des vannes, identifiées aux règles précédentes, ne seraient séparées que par des nœuds de degré = 2 et/ou des intersections avec des BM réels de réseau. Ce cas particulier exclut les BM créés par la fermeture permanente de vannes et les BM-sources.

Règle 3.6

Cette règle s'adresse aux jonctions non isolées suite à l'application des règles 3.1 à 3.5 ET qui se trouvent à l'intersection d'une boucle entièrement incluse et d'une boucle dont au moins une conduite est incluse dans la zone à isoler (donc partageant des conduites avec la boucle incluse, mais n'appartenant pas à $\{S\}$).

Identifier les boucles concernées, à l'itération courante.

POUR chaque boucle identifiée :

- Partant de chaque jonction non isolée, tenter d'identifier deux vannes (une sur la boucle partiellement incluse et une autre), afin de créer un BM attaché à la jonction (BM artificiel et/ou annexion de BM réels).
    - S'assurer que les vannes ne sont pas séparées par des nœuds de degré = 2 seulement (ou nœuds de degré = 3 en raison d'intersections avec des BM réels de réseau) OU que le résultat ne fait pas en sorte qu'une seule vanne soit fermée sur la boucle partiellement incluse (voir les figures A2.3 et A2.4, illustrant respectivement des cas acceptables et non acceptables).
- S'il n'est pas possible de remplir les conditions précédentes, rouvrir les vannes se trouvant sur la boucle partiellement incluse (au besoin), inclure complètement celle-ci.

SI une (des) boucle(s) a (ont) été incluse(s), retour à 3.1.

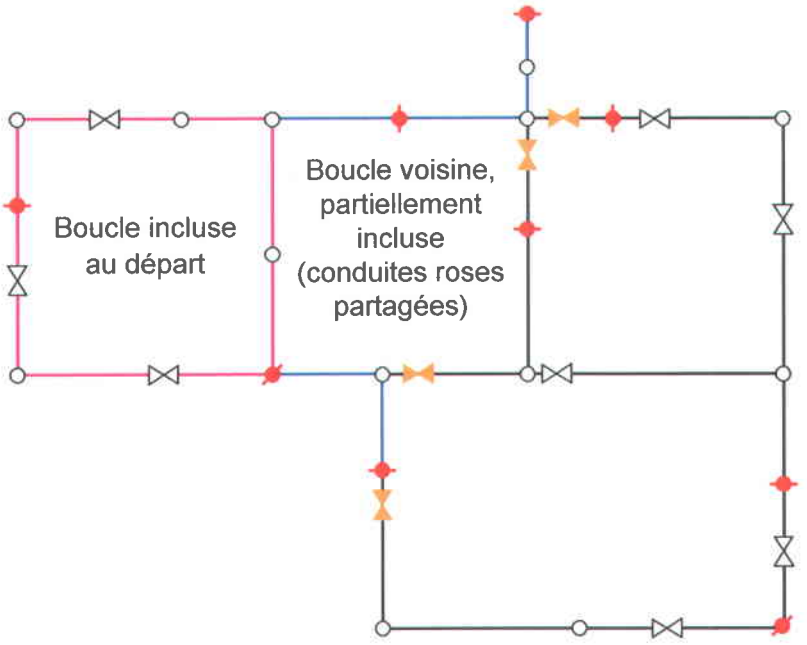


Figure A2.3 : Portion de secteur isolé illustrant ce qui est acceptable en regard de l'application de la règle 3.6. Les conduites roses ont été incluses avant l'application de cette règle; les conduites bleues sont ajoutées à 3.6; les vannes orangées sont fermées.

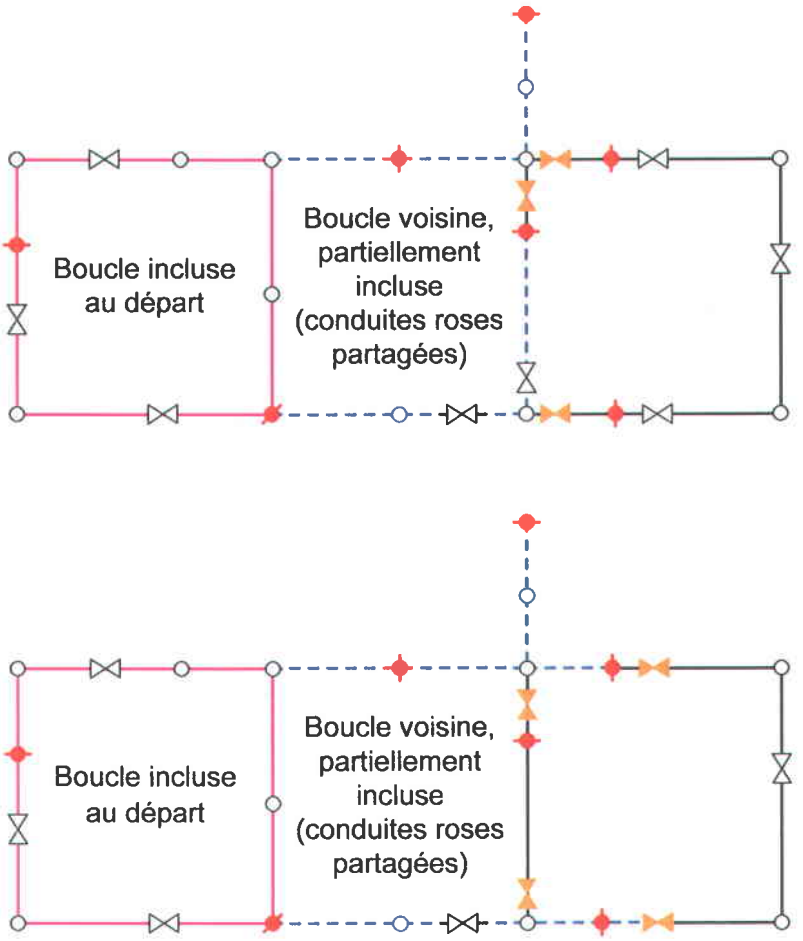


Figure A2.4 : Deux portions de secteurs isolés illustrant ce qui est n'est pas acceptable en regard de l'application de la règle 3.6. Les conduites roses ont été incluses avant l'application de cette règle; les conduites bleues ne seront pas ajoutées à 3.6 et les vannes orangées ne seront pas fermées, puisque (1) dans le premier cas, une seule vanne devrait être fermée sur la boucle en rose et bleu, (2) dans le second cas, les vannes, sur cette même boucle, ne sont séparées que par un nœud de degré 2. La boucle sera plutôt totalement incluse au secteur à isoler.

Étape 4 :

4.1 En chaque point demeurant non isolé à ce stade, identifier les vannes nécessaires à créer un BM.

4.2 Inclusion systématique des BM réels de réseau adjacents aux boucles incluses.

Règle 4.1

Cette règle s'adresse aux jonctions toujours non isolées, puisque les conditions de l'étape 3 n'ont pu être rencontrées. Nécessairement, ces jonctions se trouvent sur des boucles, mais *dont aucune*

conduite n'est incluse au secteur à isoler (contrairement à la règle 3.6). Le nombre de vannes à fermer, afin d'isoler ces jonctions, n'est ici pas limité.

Création d'un BM artificiel, dans ce cas :
Partant de la jonction à partir de laquelle on cherche à créer l'isolement et en progressant d'intersection en intersection (nœud de degré ≥ 3), TANT QUE le BM n'est pas complété :

- Fermer les vannes qui permettent de créer un tronçon linéaire, de façon à ce que celui-ci puisse, à l'intersection suivante, être

    1) complété;

    2) OU prolongé, tout en favorisant la progression vers l'endroit le plus rapproché où le BM pourra être complété.

- Inclure, au secteur isolé, les conduites appartenant au BM ainsi créé.

Le meilleur exemple d'une telle application est illustré par le cas de première détection au détecteur 102 pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 3). Celui-ci est repris à la figure A2.5 (voir les vannes et conduites en rouge).

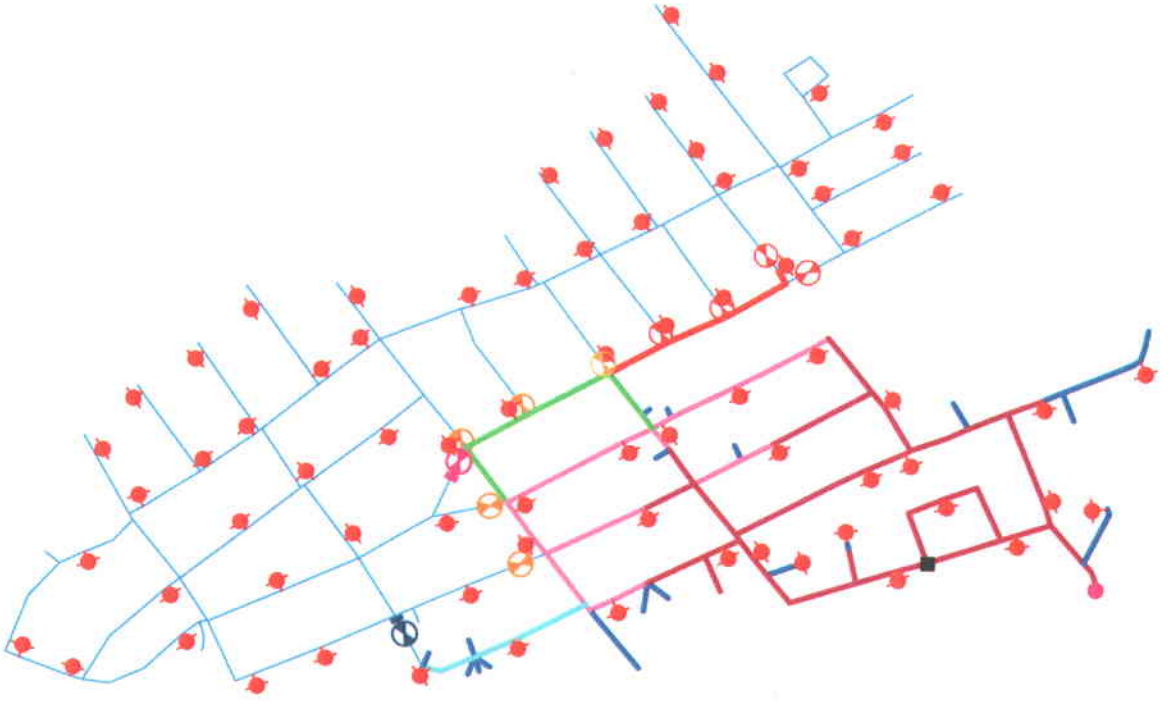
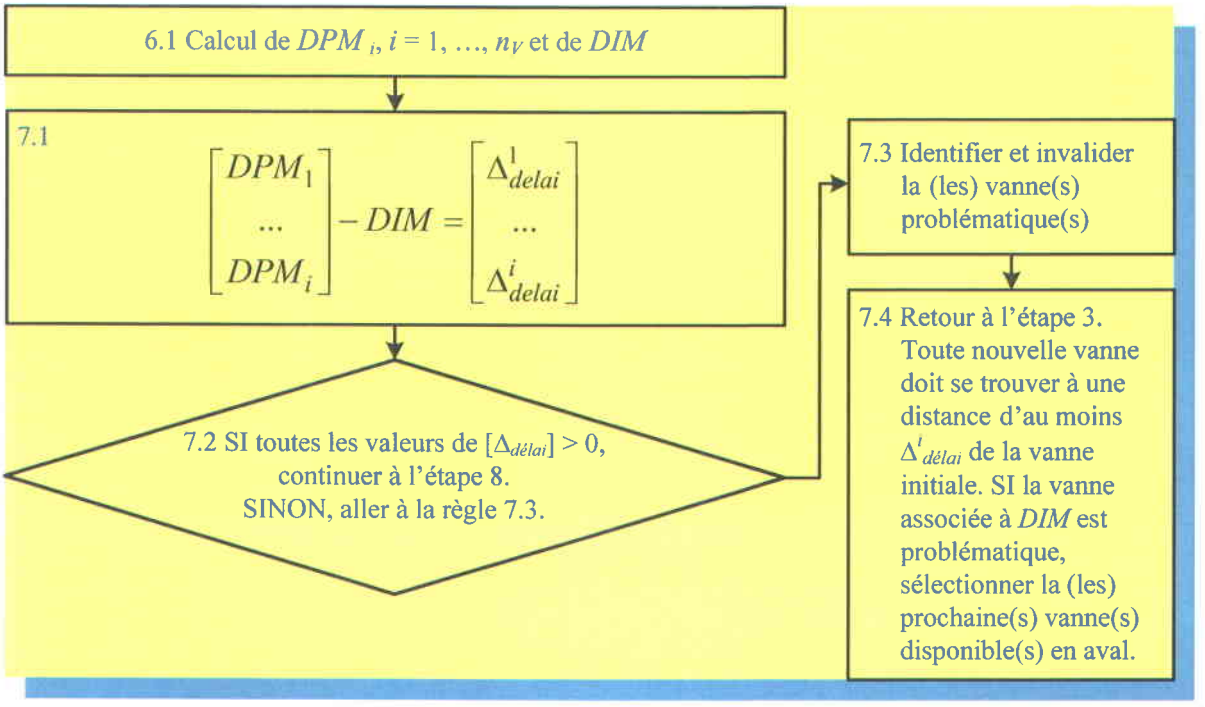


Figure A2.5 : Illustration d'un cas d'application de la règle 4.1, au moyen des conduites et vannes apparaissant en rouge (détection au détecteur 102, du réseau de Terrasse-Vaudreuil). Les conduites pourpres représentent la contamination. Les conduites en rose, cyan, vert et bleu ont été ajoutées au secteur isolé suite à l'application des règles 2.1 à 3.6 (voir, au besoin, la légende de l'annexe 3). Le carré noir représente le détecteur 102.

Règle 4.2
Cette règle vise l'inclusion, au secteur à isoler, des BM réels de réseau. Ceci exclut les BM créés par la fermeture permanente de vannes (faisant l'objet des règles 3.2 et 3.3) ainsi que les BM-sources.

Étape 5 : STRATÉGIE PRÉLIMINAIRE

Étapes 6 et 7 :



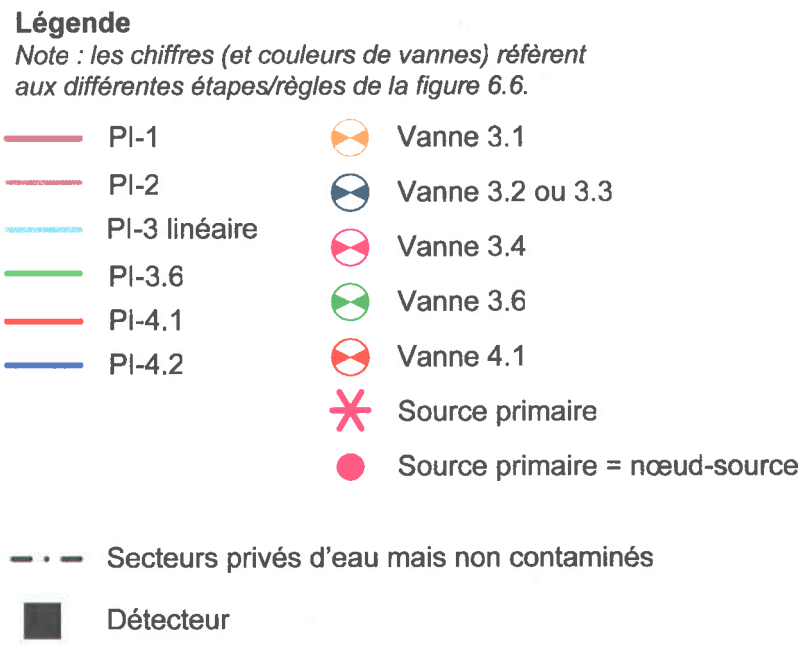
Règle 6.1 – Calcul des délais de propagation du contaminant et d'intervention
Tous les déplacements sont comptabilisés pour les vannes à fermer, considérant le chemin le plus court entre le nœud où se trouve la caserne d'alerte et le nœud situé en amont de la vanne à fermer à l'intérieur du secteur à isoler. Les délais de propagation de la contamination sont calculés entre le nœud terminal d'une conduite contaminée et le nœud se trouvant en amont de la vanne à fermer (incluant la vanne-source primaire), à l'intérieur du secteur à isoler.

Étape 8 :

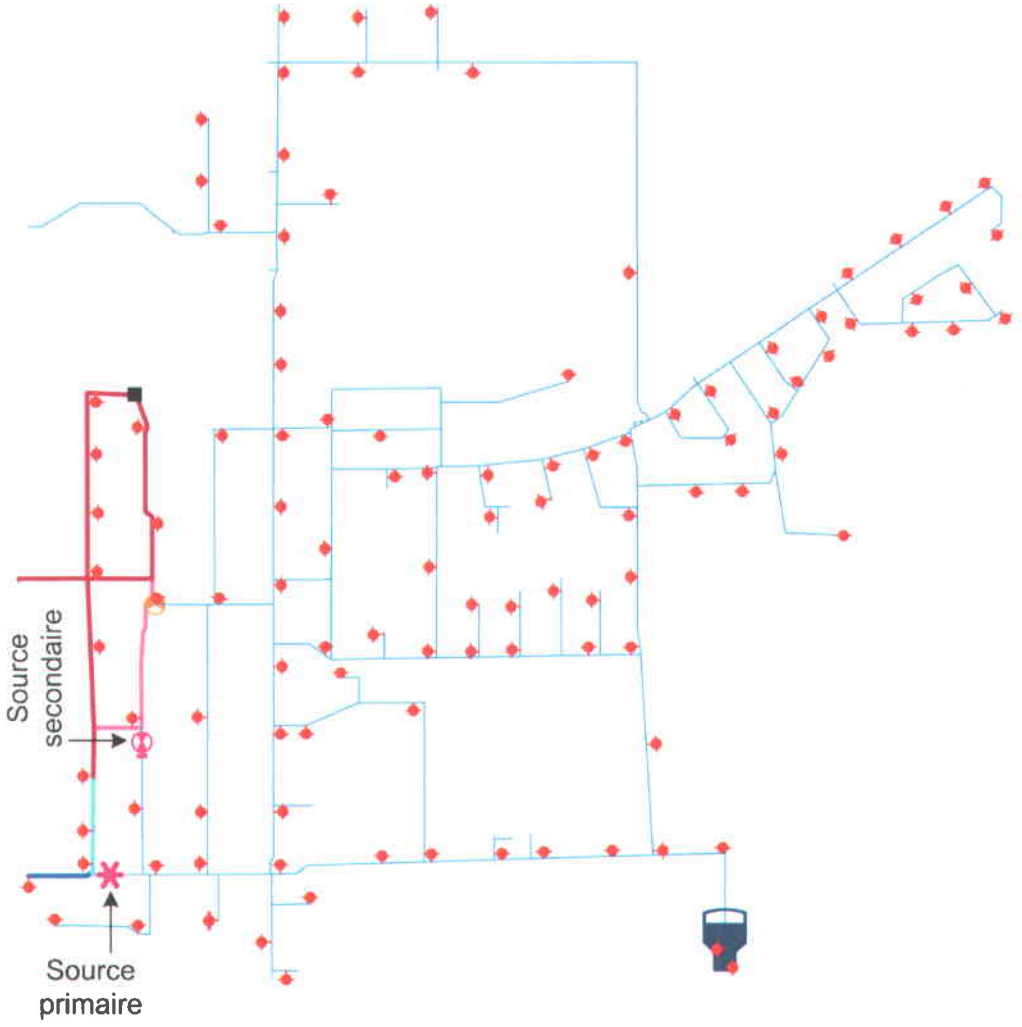
Test d'isolement de secteurs
Identification des secteurs qui seront complètement privés d'eau lors de l'isolement d'un secteur contaminé, au moyen d'une simulation hydraulique. Éventuellement, la théorie des graphes pourrait être utilisée à cette fin (voir par exemple *Jun et Loganathan,* 2007). À noter que dans le cadre de cette thèse, dans tous les cas, une première identification visuelle a pu être facilement effectuée.

ANNEXE 3

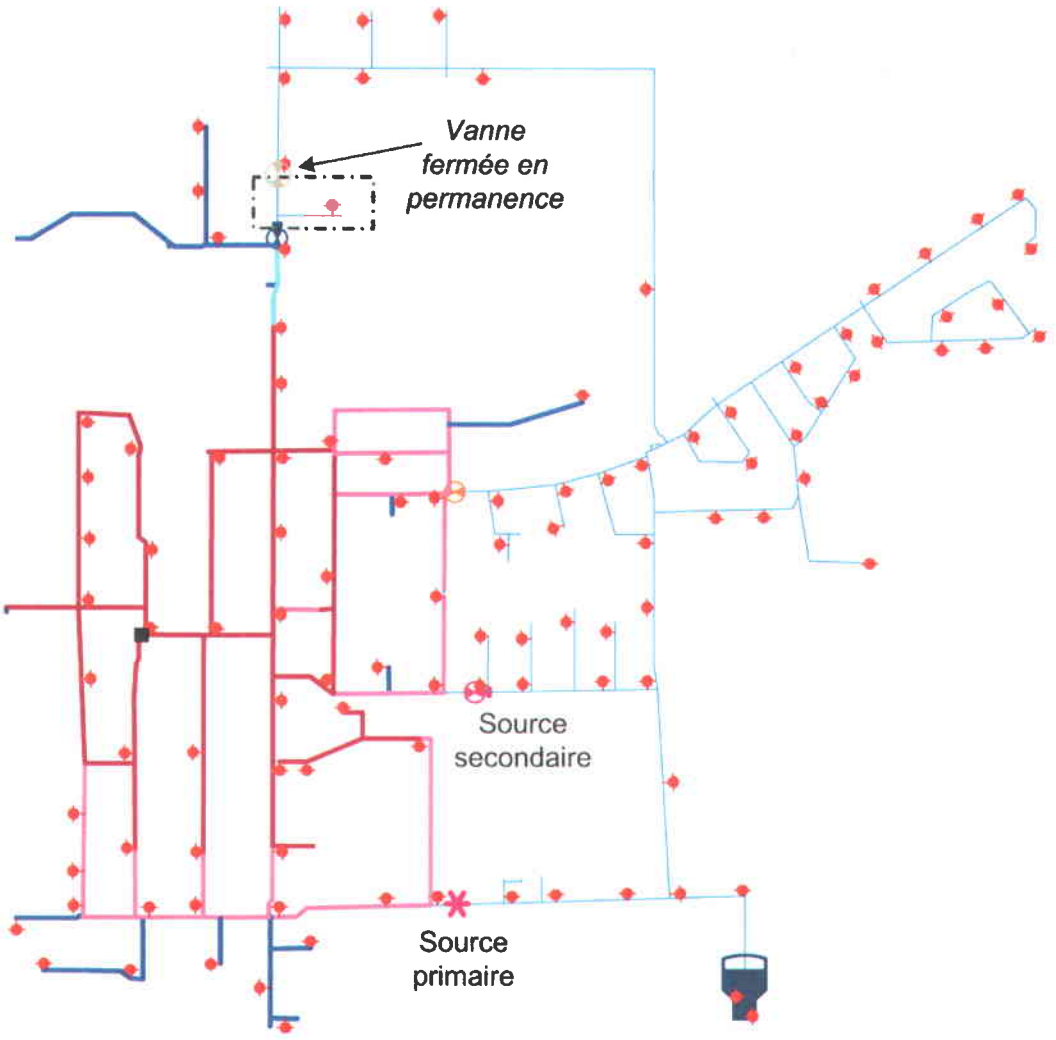
Figures présentant les résultats d'isolement de secteurs contaminés



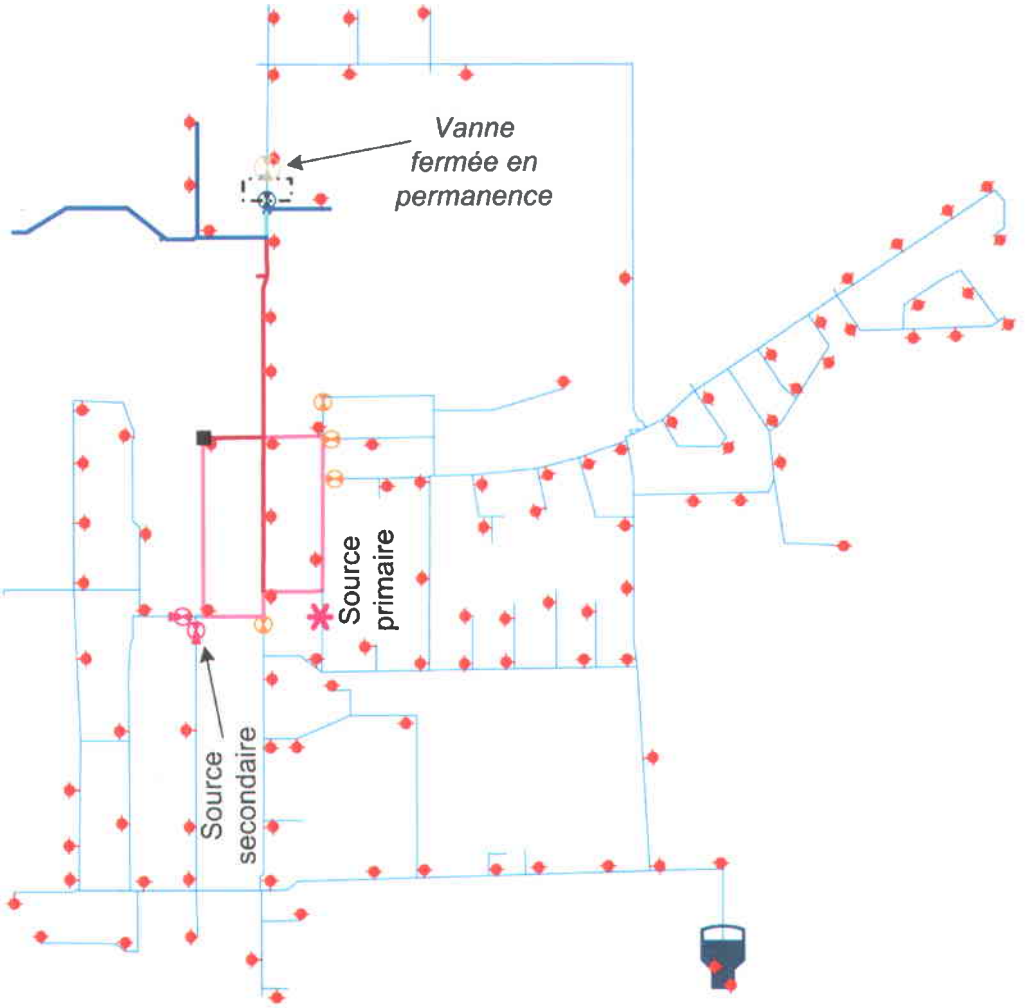
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 18



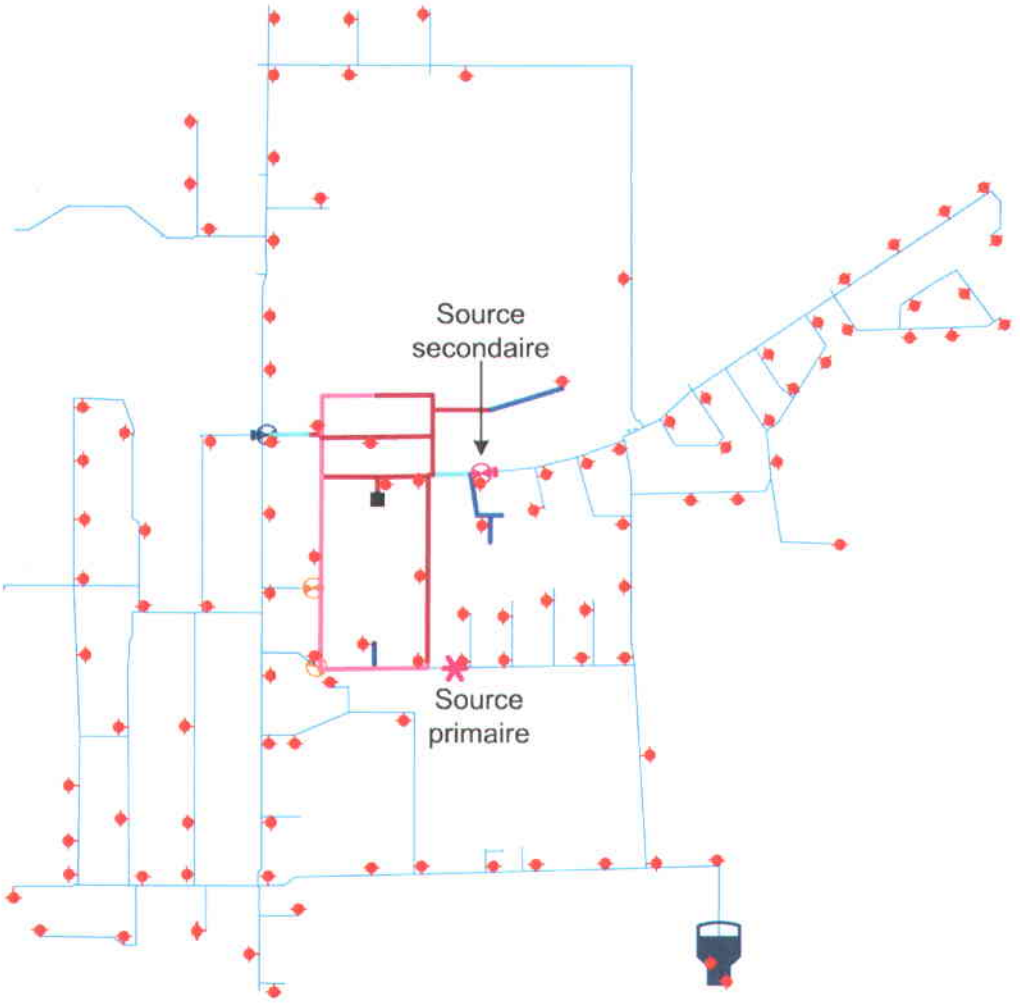
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 31



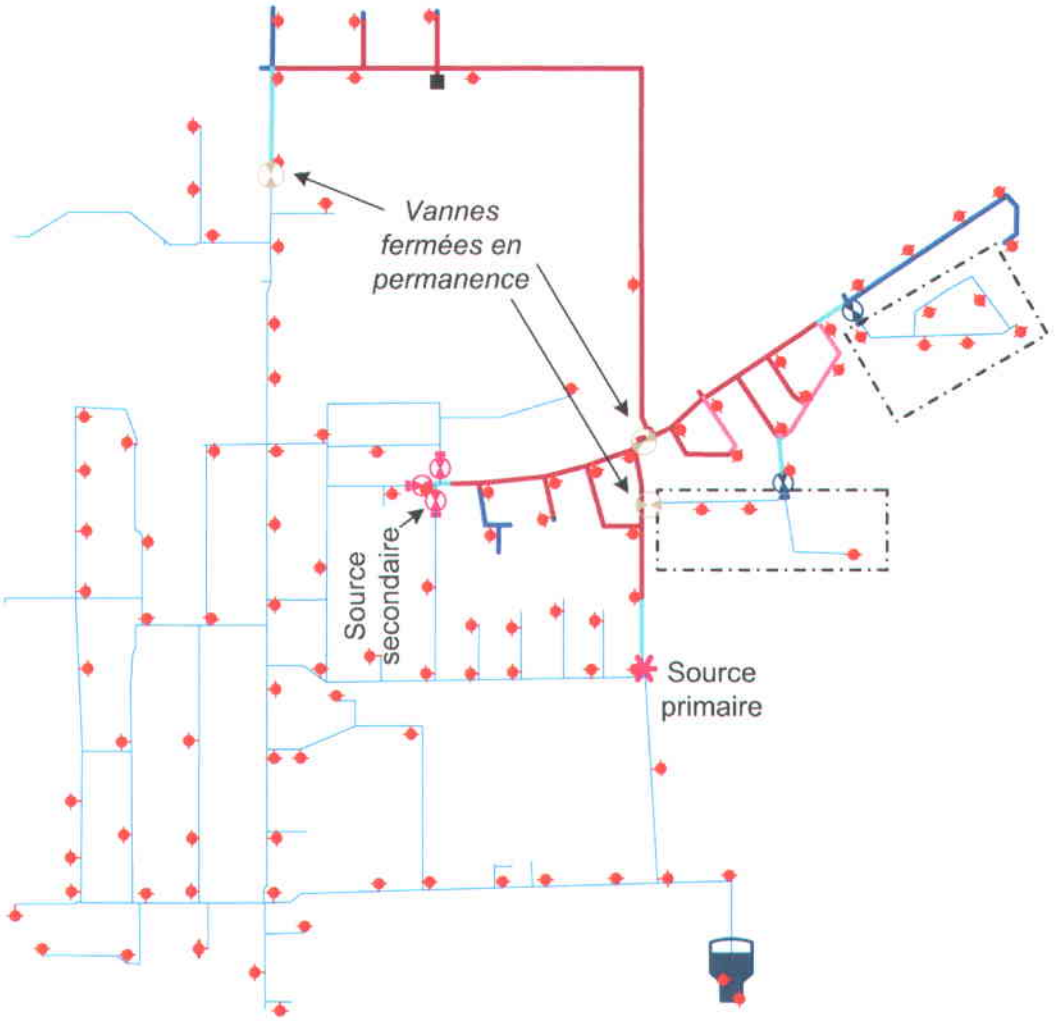
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 51



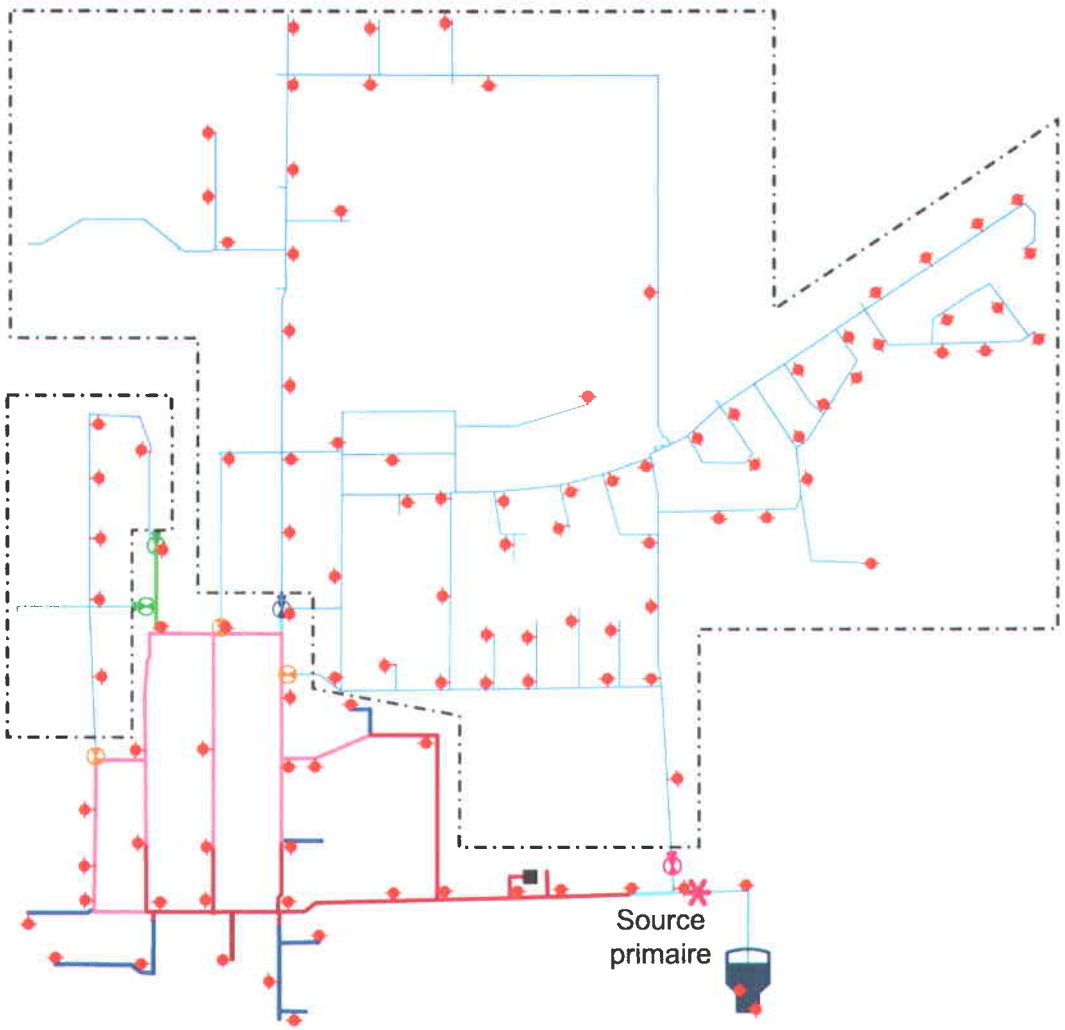
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 105



VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 112

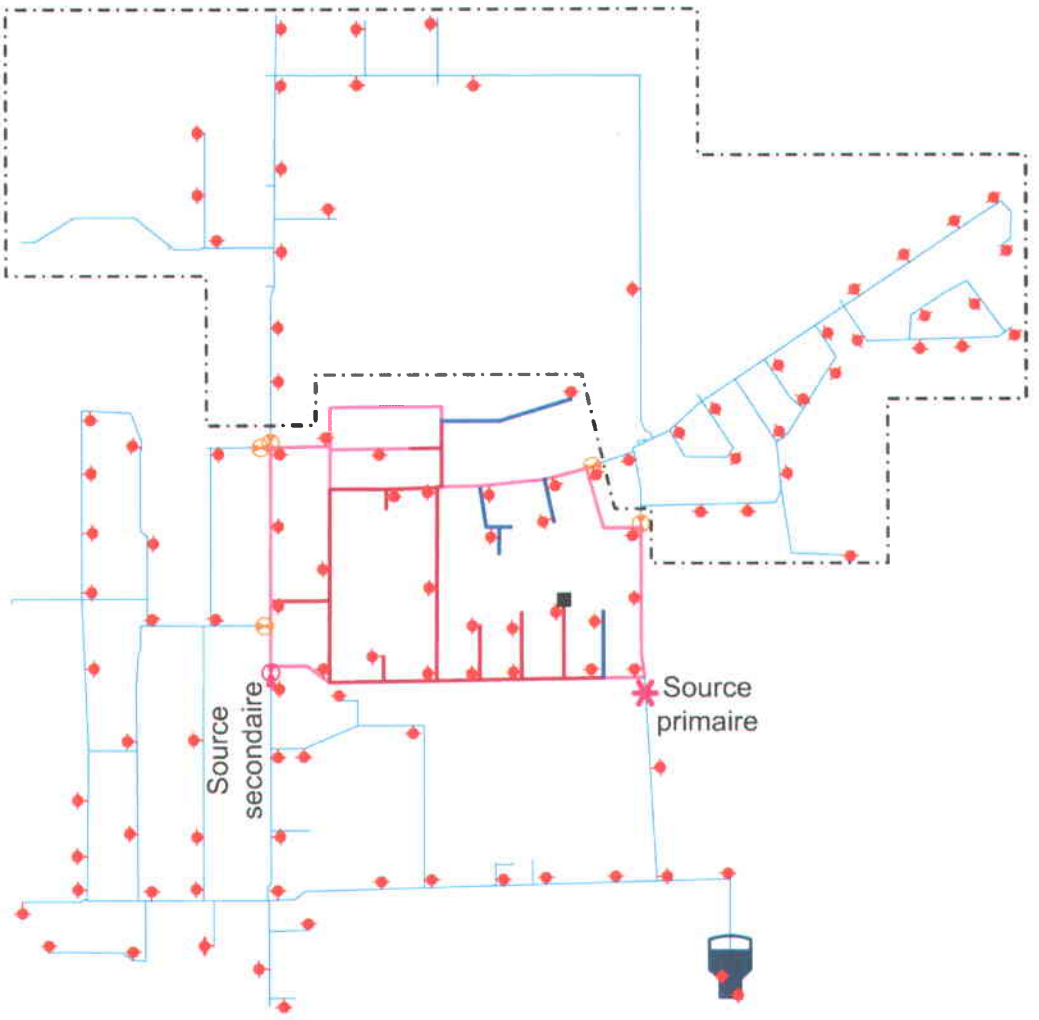


VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 131

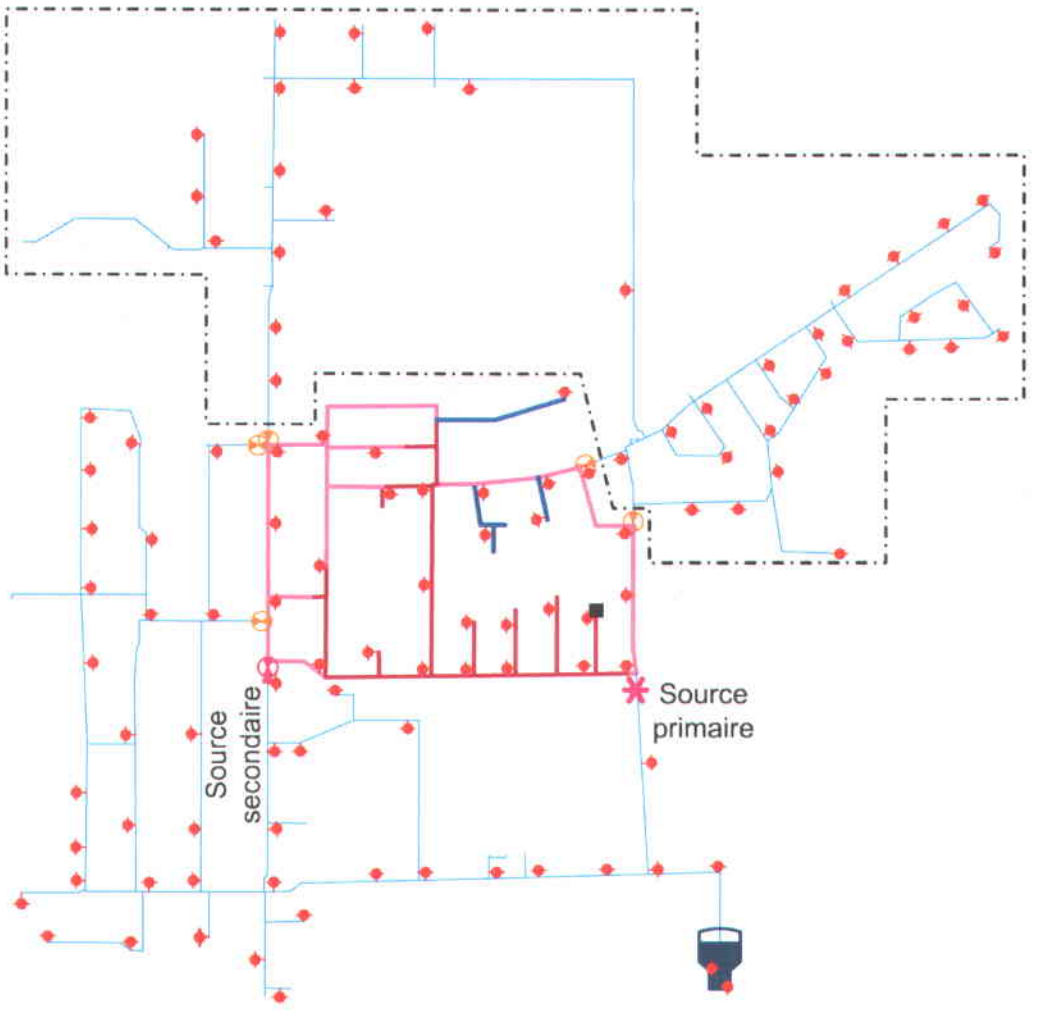


NOTE : La seconde vanne servant à l'isolement de la source primaire, dans le cas présent, pourrait ne pas être nécessaire. En la laissant ouverte, un important secteur de réseau pourrait ne pas être privé d'eau. En outre, d'un point de vue hydraulique, sa fermeture n'est pas nécessaire à l'isolement du contaminant.

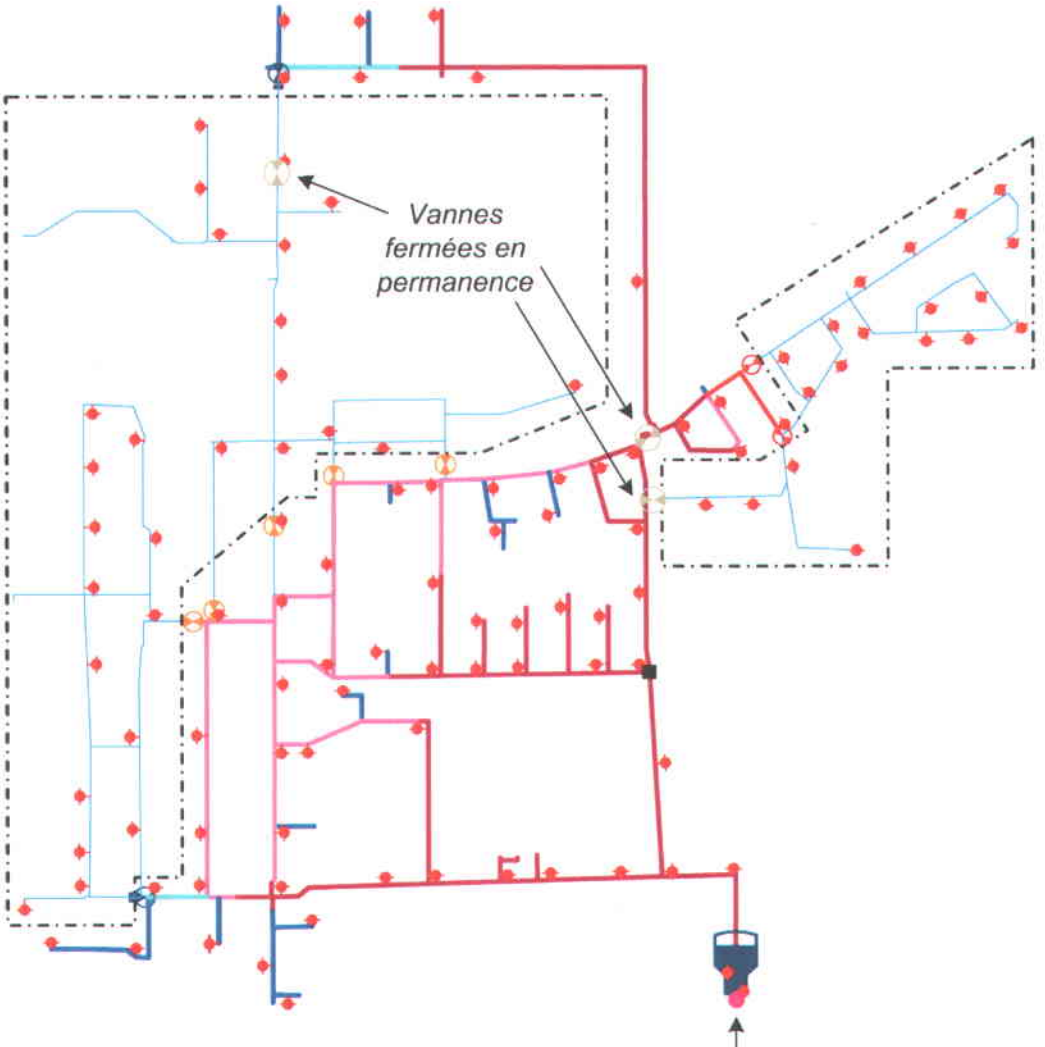
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 133



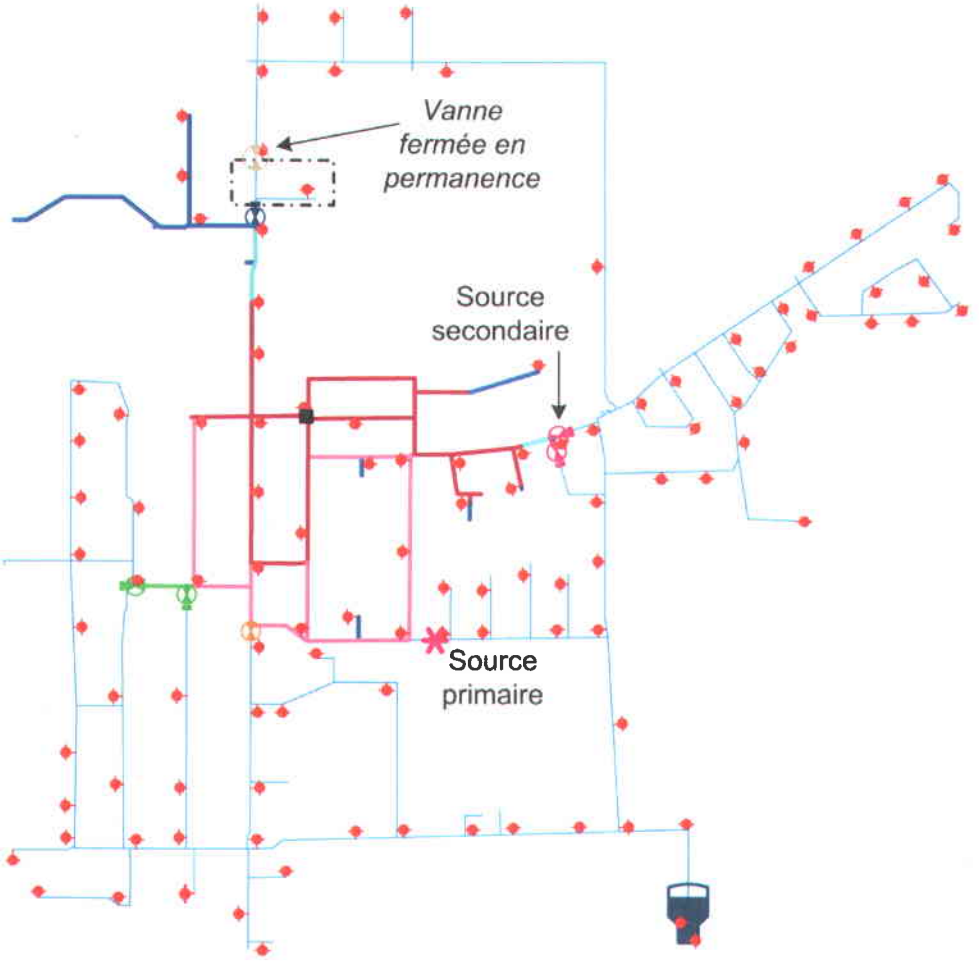
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 142



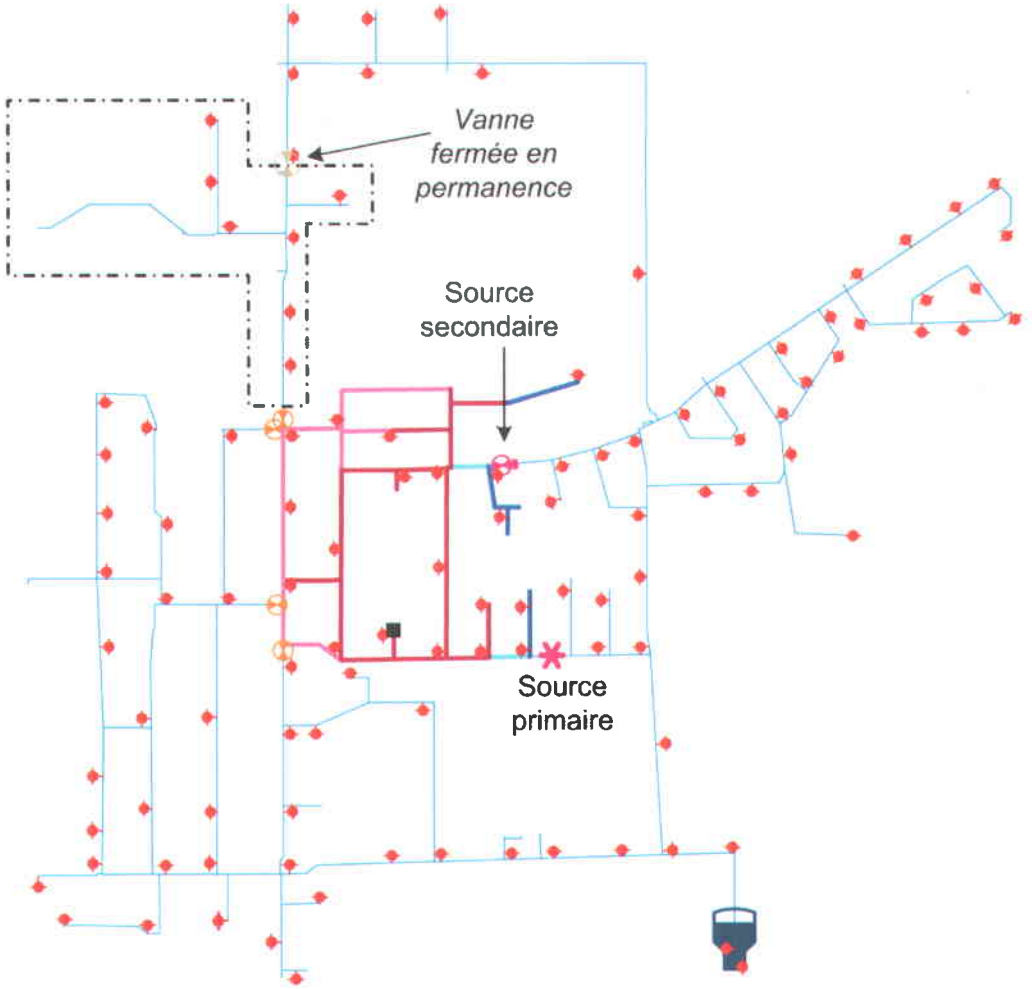
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 159



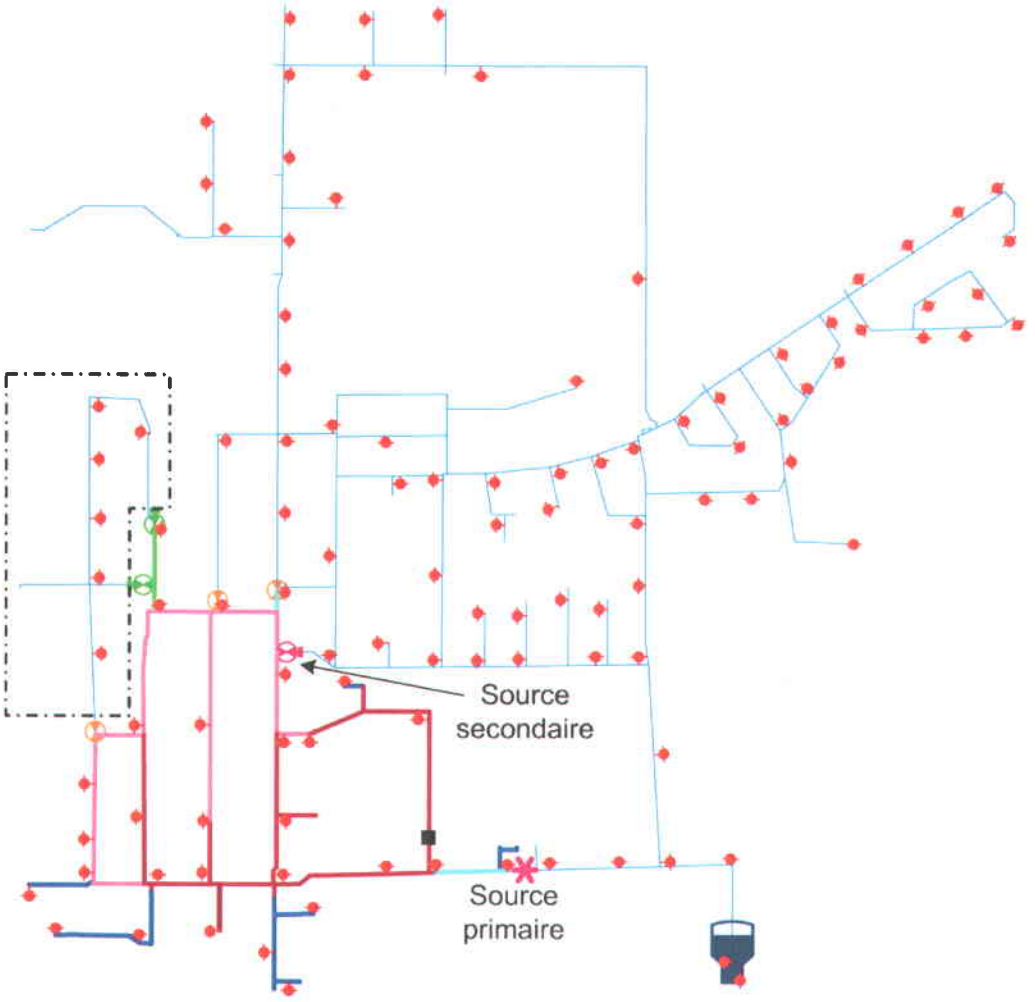
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 279



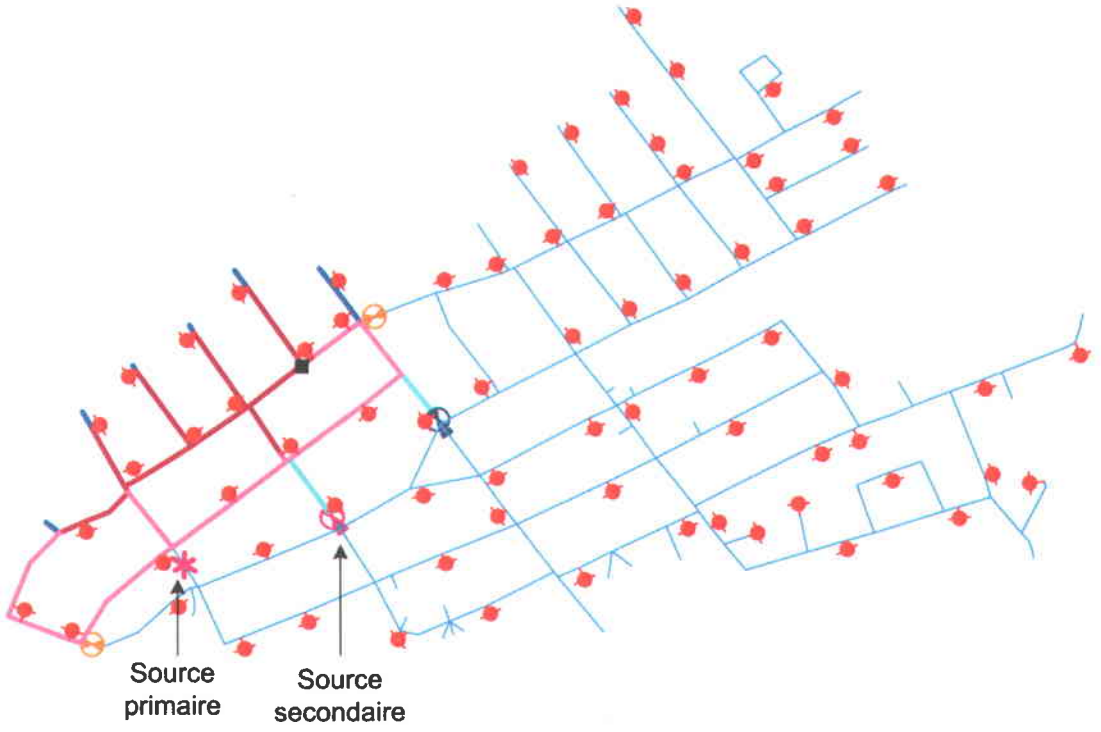
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 363



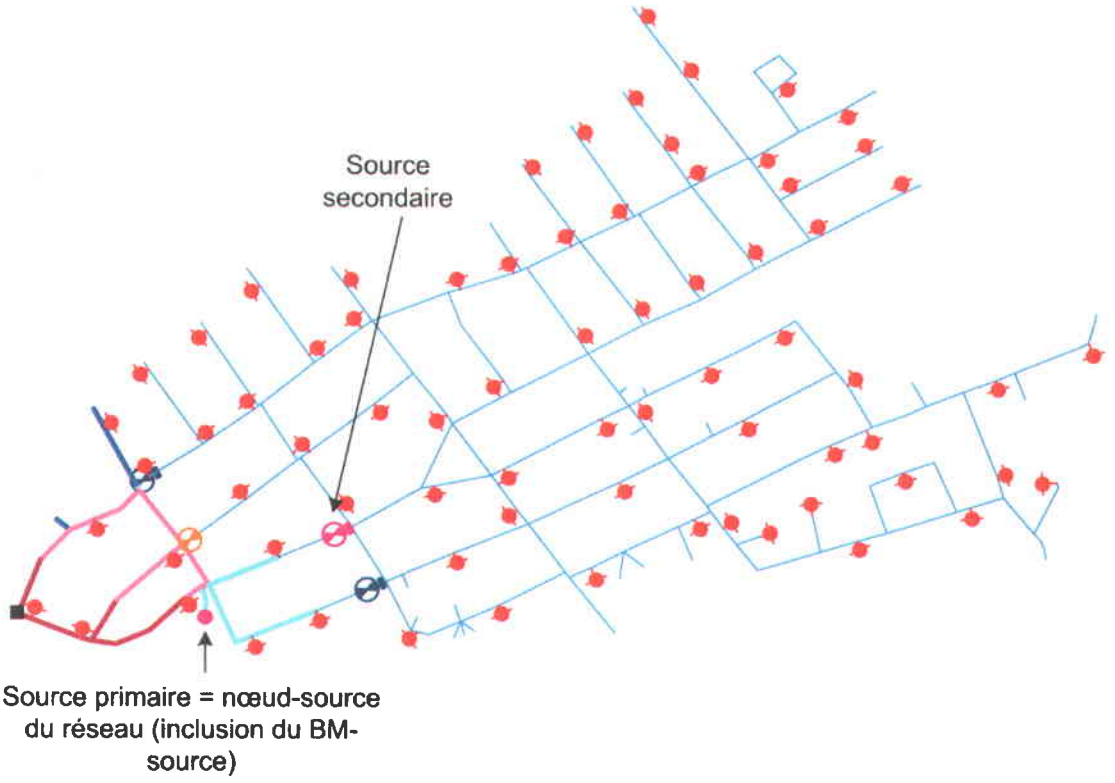
VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 375



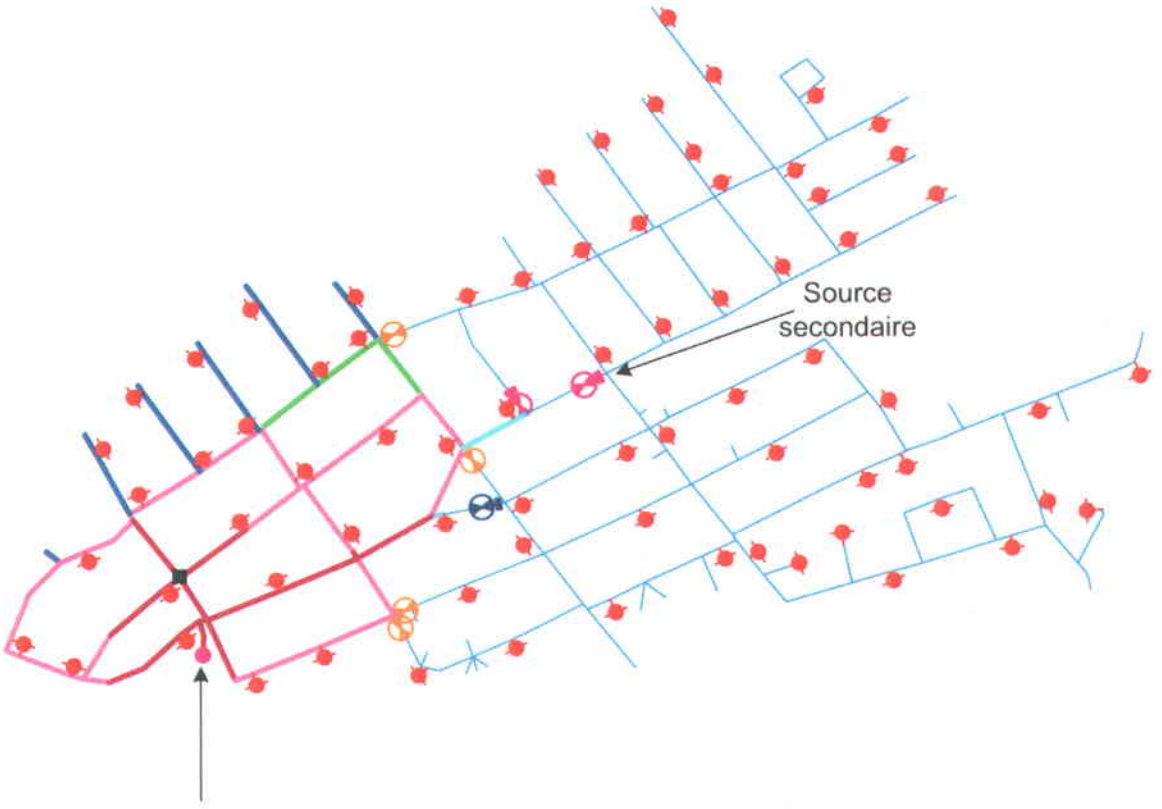
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 030



TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 033

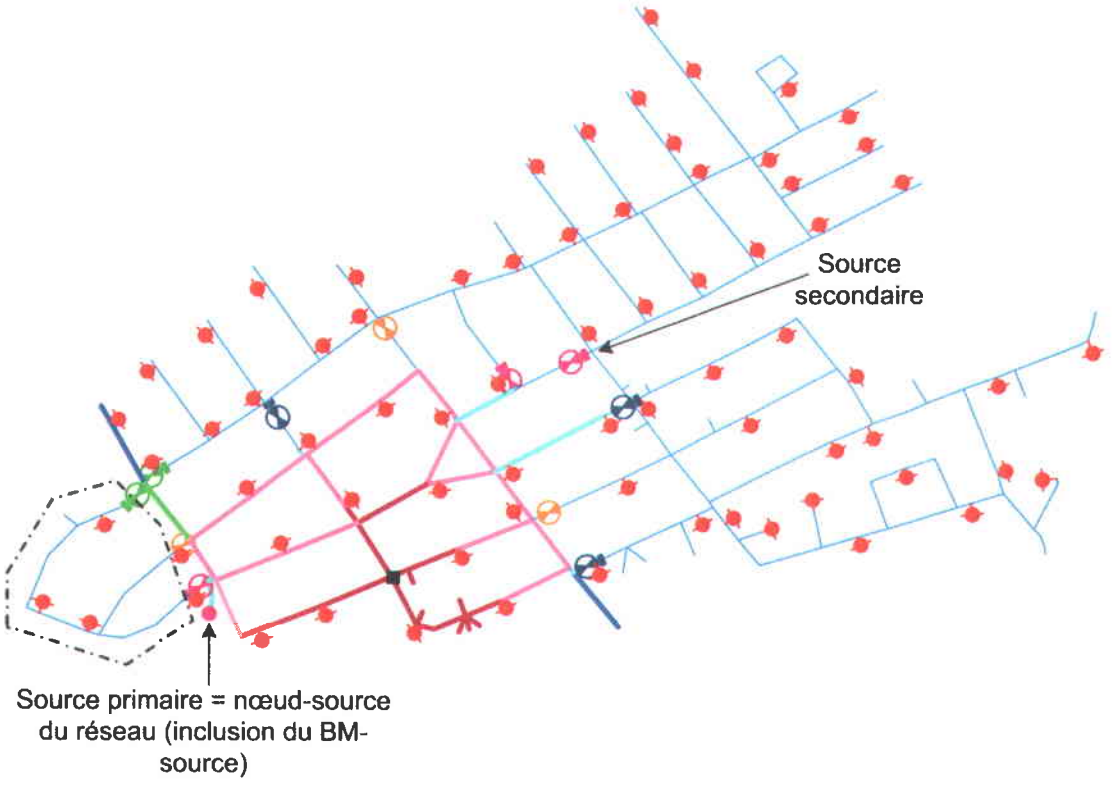


TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 039



Source primaire = nœud-source du réseau (exclu des scénarios de contamination; le BM-source est inclus au secteur en raison de l'étendue de contamination)

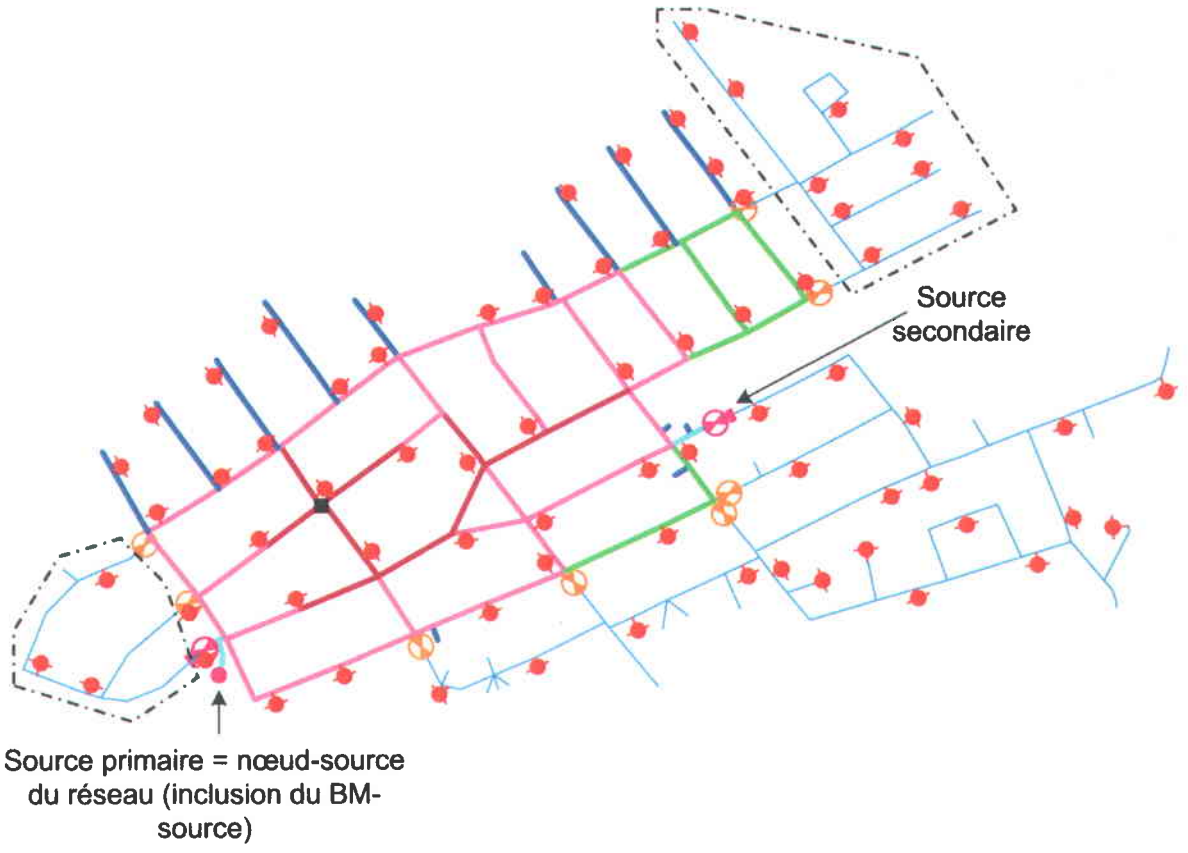
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 046



NOTE : La seconde vanne servant à l'isolement de la source primaire, dans le cas présent, pourrait ne pas être nécessaire. En la laissant ouverte, un secteur de réseau pourrait ne pas être privé d'eau. En outre, d'un point de vue hydraulique, sa fermeture n'est pas nécessaire à l'isolement du contaminant.

Par contre, si un changement de source (de primaire à secondaire) doit avoir lieu au cours du rinçage subséquent, la vanne en question devra être fermée et le secteur de réseau se trouvera à nouveau isolé. Tel que l'indique la figure appropriée à l'annexe 5, en effet, le changement de source doit avoir lieu.

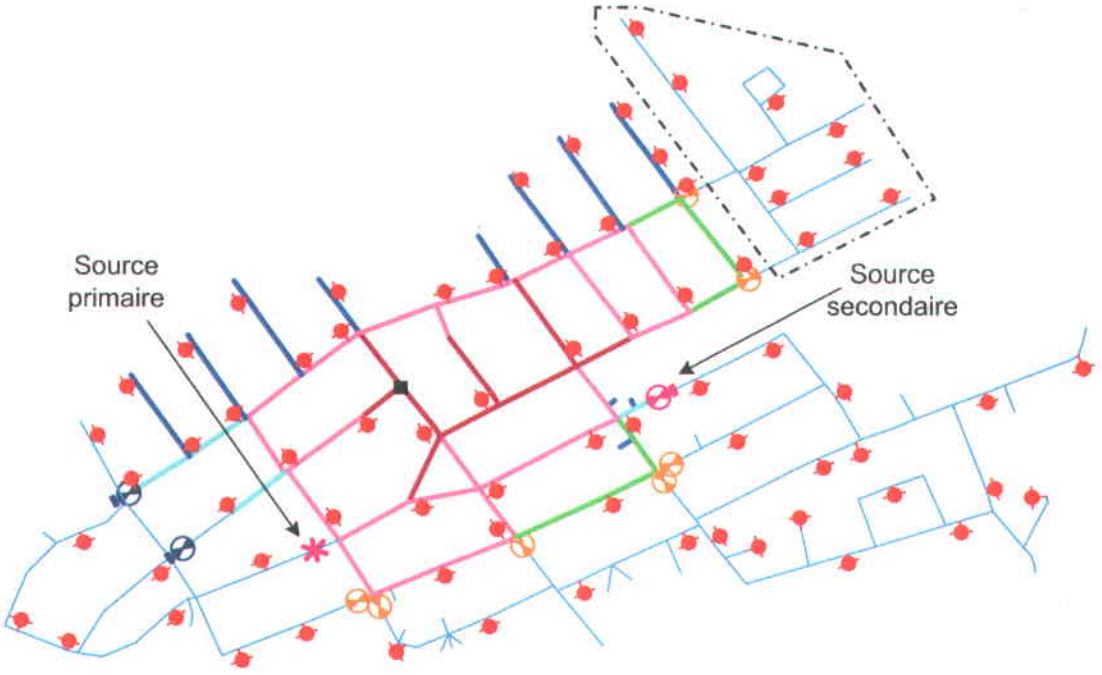
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 048



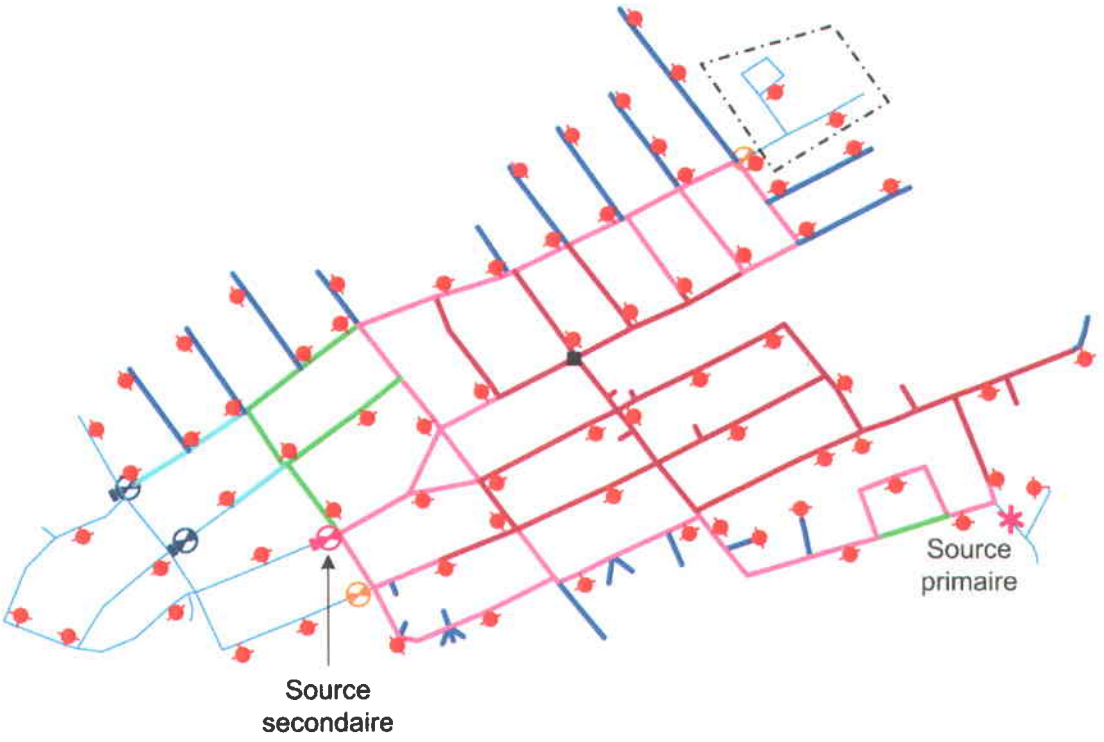
NOTE : La seconde vanne servant à l'isolement de la source primaire, dans le cas présent, pourrait ne pas être nécessaire. En la laissant ouverte, un secteur de réseau pourrait ne pas être privé d'eau. En outre, d'un point de vue hydraulique, sa fermeture n'est pas nécessaire à l'isolement du contaminant.

Par contre, si un changement de source (de primaire à secondaire) doit avoir lieu au cours du rinçage subséquent, la vanne en question devra être fermée et le secteur de réseau se trouvera à nouveau isolé. Tel que l'indique la figure appropriée à l'annexe 5, en effet, le changement de source doit avoir lieu.

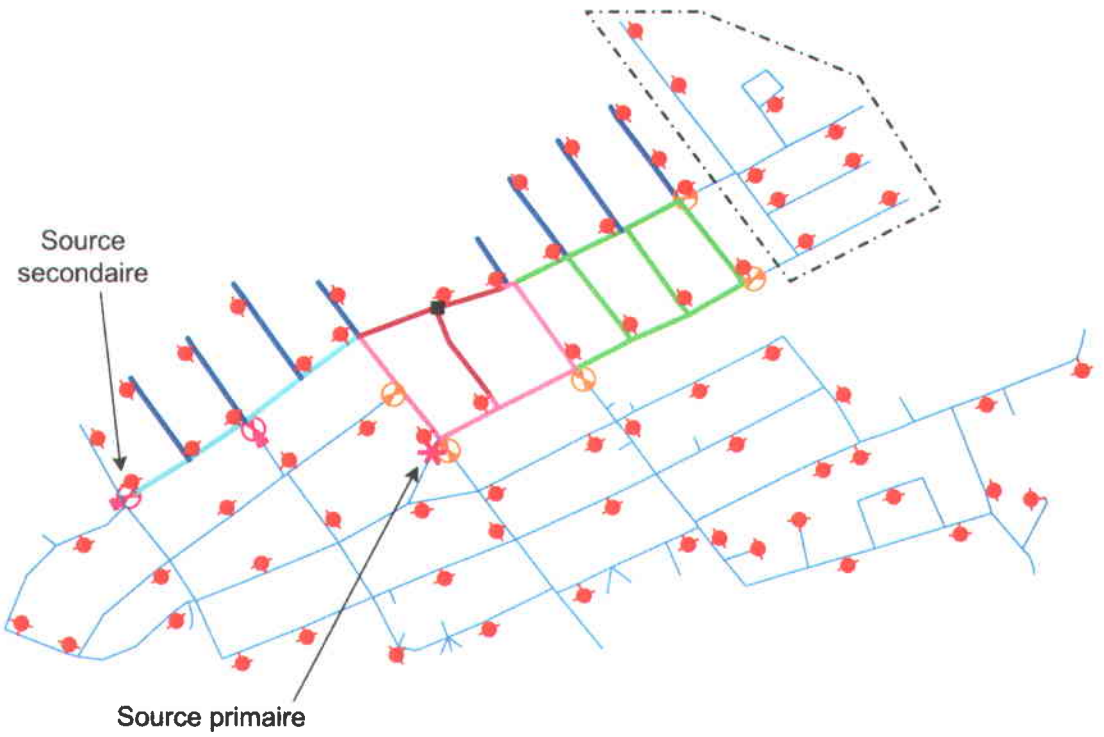
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 049



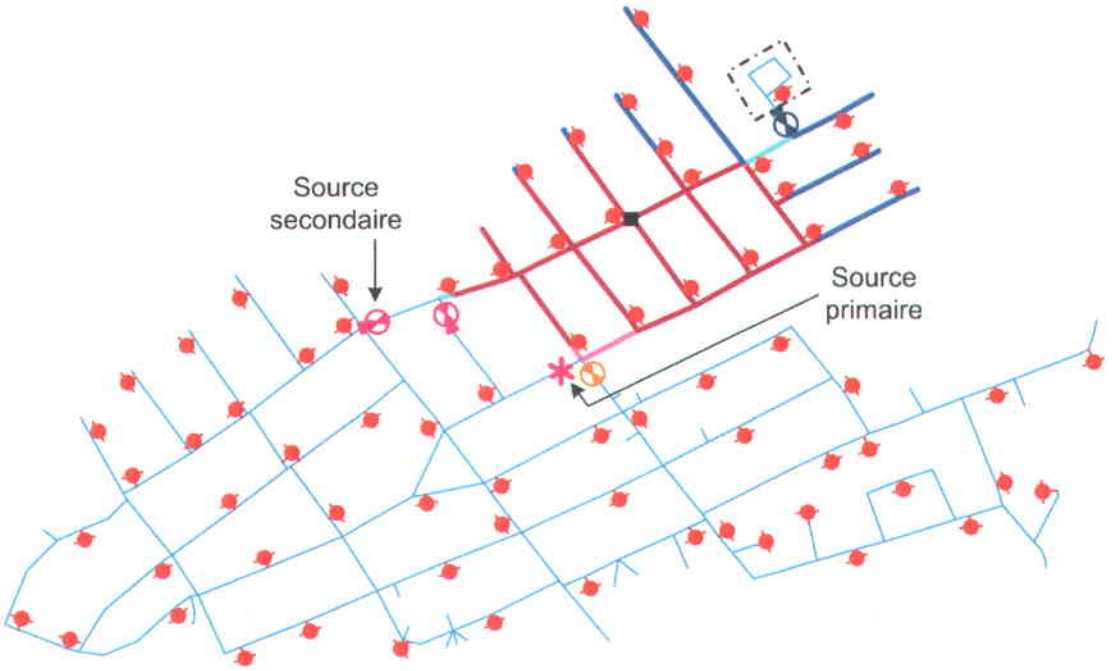
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 057



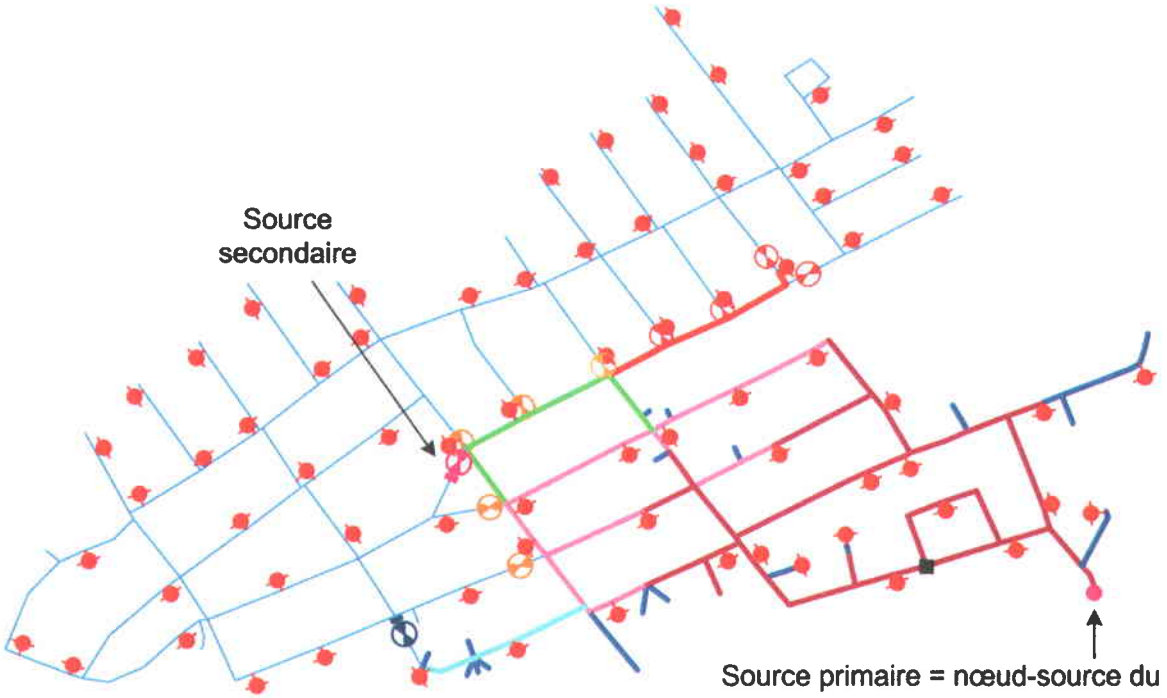
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 060



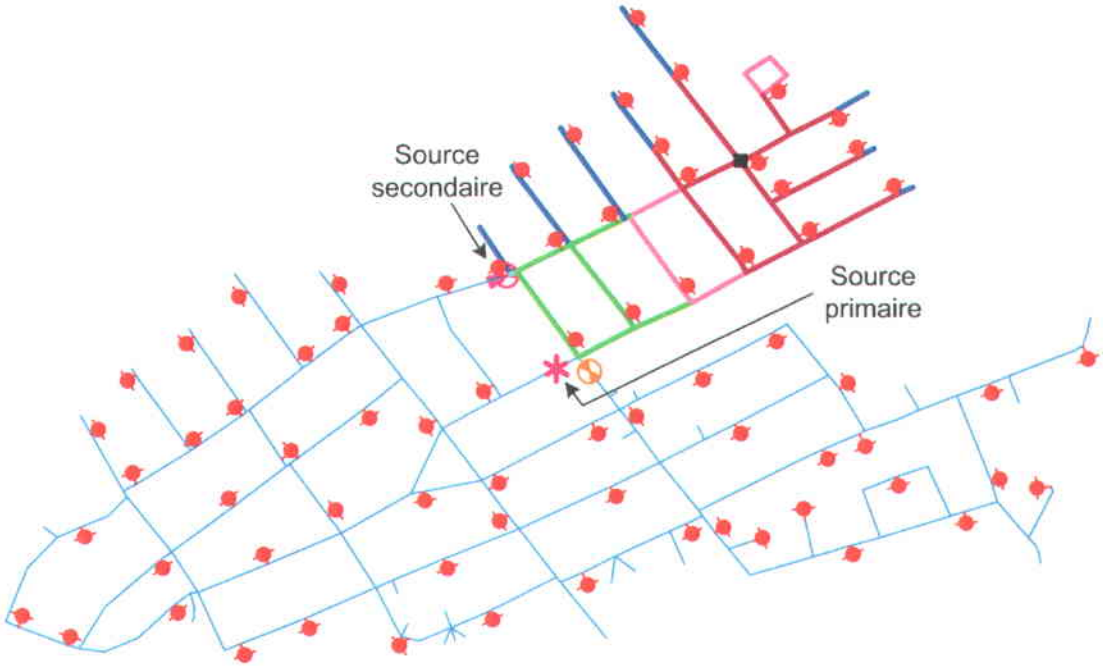
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 067



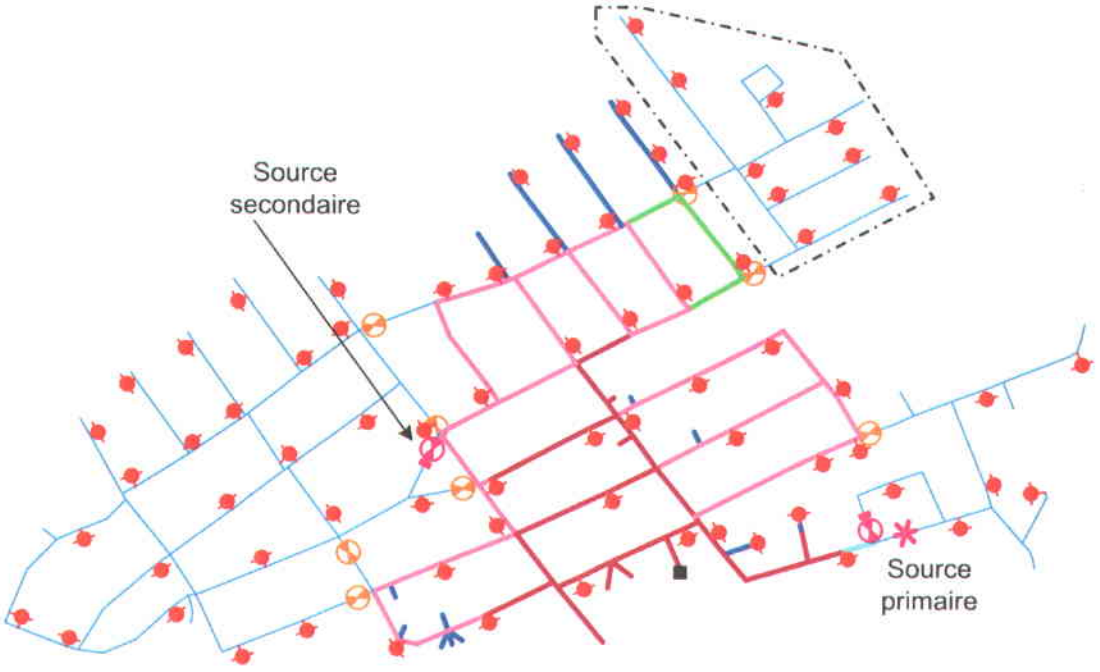
TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 102



TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 192



TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 201



ANNEXE 4

Détail de la procédure de rinçage unidirectionnel

En complément au chapitre 8, cette annexe donne certaines précisions quant aux étapes et règles de la procédure de RUD. Des cas particuliers sont également présentés. Au besoin, des figures accompagnent les explications. Des illustrations concrètes des diverses règles de la procédure sont également présentées à l'annexe 5 qui suit.

Étape 1 :

1.1 Choix de la source primaire
- En priorité, favoriser le choix d'une source d'alimentation du réseau OU retenir un tronçon-source / une vanne-source situé à proximité d'une source d'alimentation de réseau
- SINON, dans certains cas, sélectionner la vanne-source dont le diamètre ≥ au diamètre maximal au sein du secteur à rincer

1.2 Choix de la première boucle à rincer
- Adjacente à la vanne-source OU au tronçon-source
- S'il y a plus d'une candidate, choisir la boucle dont le % de linéaire partagé avec d'autres boucles du secteur à rincer est minimal

Règle 1.1

– S'il y a lieu, prioriser l'utilisation d'une source d'alimentation du réseau

OU retenir une source[3] située à proximité d'une source d'alimentation de réseau, et plus spécifiquement se trouvant sur une boucle à laquelle est adjacent un BM-source.

CAS PARTICULIER : À la figure A4.1 (cas du secteur isolé suite à une première détection au détecteur 201, réseau de Terrasse-Vaudreuil), la source primaire se trouve sur la boucle B et est attachée (par un nœud) à la boucle A. Cette dernière est adjacente à un BM-source. Ce cas est particulier puisque la boucle B est, en quelque sorte, « interne » à la boucle A. Règle spécifique : la source retenue est attachée à une boucle, à laquelle est adjacent un BM-source.

Si les deux sources (primaire et secondaire) répondent au critère précédent, retenir celle qui se trouve le plus près d'une source d'alimentation du réseau.

– SINON, si aucune des conditions précédentes ne prévaut parmi les deux sources disponibles, choisir une source dont le diamètre ≥ diamètre maximal rencontré sur le secteur à rincer

[3] Sans distinction particulière, le terme général de « source » réfère, dans cette annexe, à tout tronçon-source ou vanne-source (voir la figure 7.1, à la section 7.1).

À diamètre égal, privilégier la proximité d'une source de réseau.

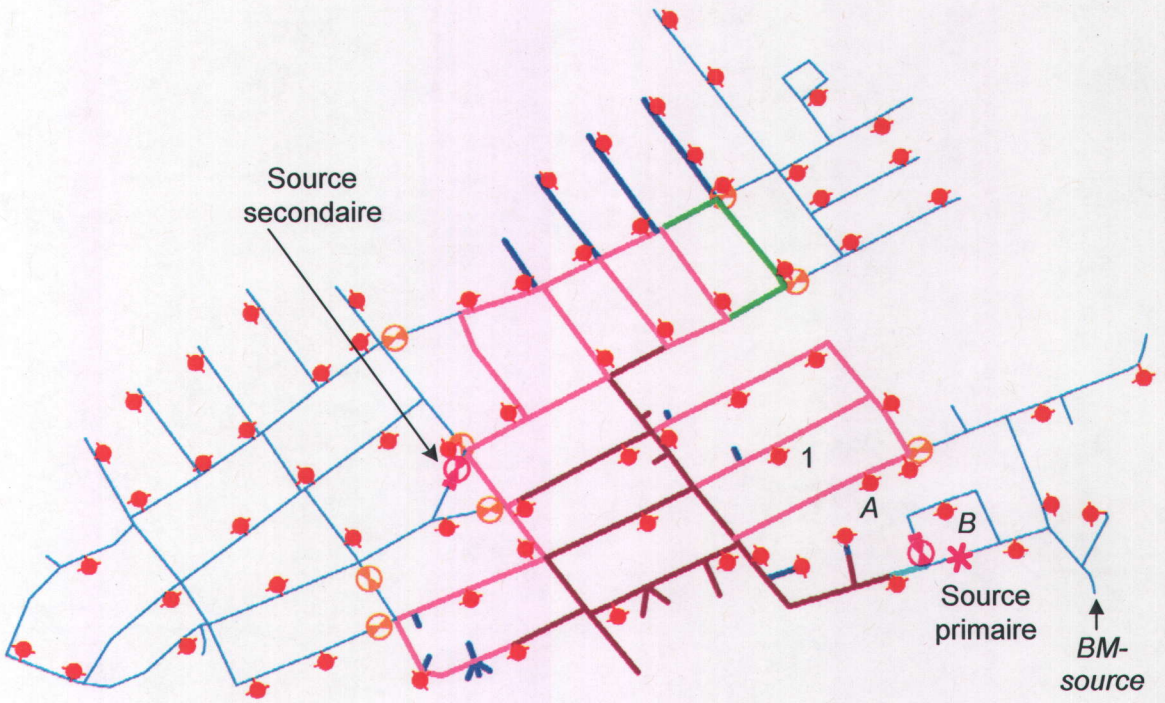


Figure A4.1 : Secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 201, réseau de Terrasse-Vaudreuil. La source primaire est indiquée par l'étoile rose. Cette figure provient de l'annexe 3.

Règle 1.2

- La première boucle qui sera sélectionnée pour le rinçage doit être adjacente à la source primaire retenue.

- SI deux boucles ou plus remplissent la condition précédente, retenir la boucle dont le linéaire partagé avec d'autres boucles du secteur à rincer est minimal. NOTE : Ce dernier critère favorise le choix d'une boucle se trouvant plutôt en « périphérie » du secteur à rincer, et par laquelle, logiquement, devraient débuter les opérations de RUD (par opposition à une boucle qui partage des conduites avec plusieurs voisines et qui se trouverait dans une position plus « intérieure », au sein du secteur à rincer).

  CAS PARTICULIER, illustré à la figure A4.1, où la source retenue est un tronçon-source. Ce dernier n'est pas, au sens strict, adjacent à la boucle 1, mais à sa voisine (en pourpre). Toutefois, dans l'esprit du point précédent, il est plus logique que le rinçage débute par la boucle 1 que par sa voisine. La règle spécifique, établie à cet égard, est la suivante : la première boucle retenue partage des conduites avec une boucle sur laquelle se trouve le tronçon-source.

Étape 2 :

2.1 Pour tout tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po), sélectionner la borne permettant de le rincer séparément, en respectant les règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7 ci-après.

S'il reste une portion de boucle à rincer dont le diamètre < 300 mm (12 po), continuer à 2.2.

2.2 Borne se trouvant : (1) sur la boucle courante; OU (2) sur une boucle voisine (précédemment rincée ou non), à distance maximale de 25 m de la boucle courante.

2.3 Borne faisant en sorte que les vannes de transition se trouvent sur la boucle courante (et/ou toute autre boucle qu'elle permet de rincer – voir 2.8), et non sur des boucles précédemment rincées.

2.4 Pour au moins l'une des séquences de la boucle, la (les) vanne(s) de transition doit (doivent) permettre d'éviter la présence de contaminant entre la borne et cette (ces) vanne(s). La séquence en question sera la dernière rincée sur la boucle. Les vannes en question sont retenues, en vue de l'étape 5a de la procédure (revoir, au besoin, l'exemple donné à la section 7.2.1.1 et à la figure 7.1).

2.5 Borne répartissant la longueur des séquences sur la boucle, de sorte qu'elles soient ≤ 1000 m.

2.6 Borne située de façon à ce que les vannes se trouvant à proximité permettent d'éviter les pressions trop faibles, voire négatives, dues à la variation des élévations au voisinage de la borne (une variation de +2 m est tolérée par rapport à la borne). Les vannes sont retenues, en vue de l'étape 5a de la procédure.

2.7 i. Borne qui permette, en priorité, d'élaborer des séquences de diamètre constant OU « grand vers petit »
ii. SI aucune borne ne le permet, tolérer 1 séquence « petit vers grand »; choisir, s'il y a lieu, une borne qui en réduit la longueur
iii. SI aucune borne ne le permet, tolérer 2 séquences « petit vers grand »

2.8 Critères supplémentaires à examiner (surtout utiles s'il persiste plus d'une borne candidate)
i. Borne permettant le rinçage de la boucle en une seule séquence
ii. SINON, borne permettant le rinçage d'une boucle voisine par même borne que la boucle courante, tout en s'assurant, pour cette 2e boucle, que les règles 2.2-2.8 seront respectées; retenir la 2e boucle et la borne comme candidates suivantes
iii. SINON, SI toutes les bornes candidates imposent le rinçage de la boucle courante en 2 séquences
CAS 1 : borne permettant de créer 2 séquences de diamètre constant, tout en assurant la meilleure répartition de la résistance hydraulique par unité de débit
CAS 2 : borne permettant de créer 1 séquence de diamètre constant et l'autre de diamètre variable, tout en minimisant la longueur de la séquence de diamètre variable

2.9 SI aucune borne n'a pu être sélectionnée :
i. Borne se trouvant sur un BM adjacent à la boucle et qui respecte les règles 2.3-2.8
ii. SINON, borne permettant le rinçage de la boucle en 2 séquences unidirectionnelles simultanées et qui respecte les règles 2.2, 2.5-2.8
iii. SINON, borne qui permet le rinçage de la boucle courante de façon simultanée avec l'une des séquences d'une boucle voisine et qui respecte les règles 2.3-2.8

Cette étape vise l'identification, dans un premier temps, de la borne pour le rinçage de la première boucle. Ensuite, à l'étape 3b, les mêmes règles sont reprises pour l'identification de la

borne qui sera utilisée pour le rinçage de chaque boucle d'un secteur donné. Pour les commentaires et cas particuliers, voir l'étape 3b.

Étape 3a :

L'étape 3 de la procédure de RUD est itérative et s'applique tant que toutes les boucles du secteur à rincer n'ont pas été analysées.

3a.1 SI une boucle a déjà été sélectionnée, aller à 3b

3a.2 SINON

i. Sélectionner, en priorité, une boucle voisine partageant (1) des conduites OU (2) des nœuds avec la boucle précédente

S'il y a plus d'une candidate,

CAS 1 : chercher une boucle partiellement isolée (i.e. dont le linéaire partagé n'est commun qu'à la boucle précédemment rincée) et sélectionner cette dernière s'il y a lieu

CAS 2 : aller à la boucle dont le % de linéaire partagé avec des boucles déjà rincées est maximal

ii. S'il n'y a aucune boucle partageant des conduites ou des nœuds avec la précédente

SI l'utilisation de la 2e source est requise* (et que le changement de source n'a pas encore eu lieu), chercher une boucle déjà rincée en partie ET partageant des conduites avec une boucle à laquelle la 2e source est adjacente; retenir la boucle qui est adjacente à la 2e source comme étant la candidate suivante à rincer

SINON, S'il y a un tronçon linéaire liant une boucle rincée et une boucle en retrait (non rincée), aller à la boucle en retrait

SINON, aller à à la boucle dont le % de linéaire partagé avec des boucles déjà rincées est maximal

* *Voir l'étape 3c de la procédure de rinçage.*

À l'étape 3a, la boucle suivante à rincer est sélectionnée.

NOTE : Plus particulièrement, en ce qui concerne la règle 3a.2-i, le CAS 1 cherche d'abord à identifier toute boucle partiellement isolée, de façon à ce que celle-ci, étant située plutôt en périphérie du secteur à isoler, soit identifiée avant une boucle plus intérieure (dans le même esprit que la règle 1.2). S'il n'existe pas de boucle partiellement isolée, le CAS 2 identifie une boucle dont le % de linéaire partagé avec les boucles précédemment rincées est maximal, de façon à ce que les activités de RUD progressent de boucle en boucle, en sélectionnant toujours la voisine la plus évidente (de façon simple et intuitive).

CAS PARTICULIER : Dans le cas des boucles en retrait, le tronçon linéaire qui y mène (figure A4.2) s'intègre aux activités de rinçage de la boucle, à chacun des sous-points de l'étape 3 (voir les commentaires ci-après, aux étapes 3b à 3d).

Étape 3b :

Règle 3b.1

Cette règle vise l'identification d'une borne pour le rinçage, de façon séparée, de tout tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po) sur une boucle. La borne retenue à cette fin doit se trouver le plus près, en aval du tronçon de grand diamètre, sur la boucle même. Elle doit également respecter les règles 3b.3, 3b.6 et 3b.7.

NOTE : Rappelons que seuls les secteurs à rincer sur le réseau de Valcourt contiennent des tronçons de grand diamètre. Dans tous les cas, ces tronçons se trouvent à la tête des conduites à rincer sur les boucles et se « prolongent », parfois, le long d'un tronçon-source qui alimente le secteur à rincer en eau propre ou d'un tronçon linéaire menant à une boucle en retrait (Figure A4.2). Dans ces deux cas, systématiquement, les séquences de RUD sont définies de façon à inclure (1) les conduites de grand diamètre sur la boucle et, à la fois, (2) le tronçon adjacent (tronçon-source ou tronçon menant à un boucle en retrait; voir les séquences en bleu et en cyan à la figure A4.1, sur les boucles 1 et 2; ces séquences seront rincées, en temps et lieu sur chaque boucle, utilisant les bornes en rouge et, respectivement, les vannes de transition – règles 2.3, 2.4. 3b.3 et 3b.4 – de la même couleur).

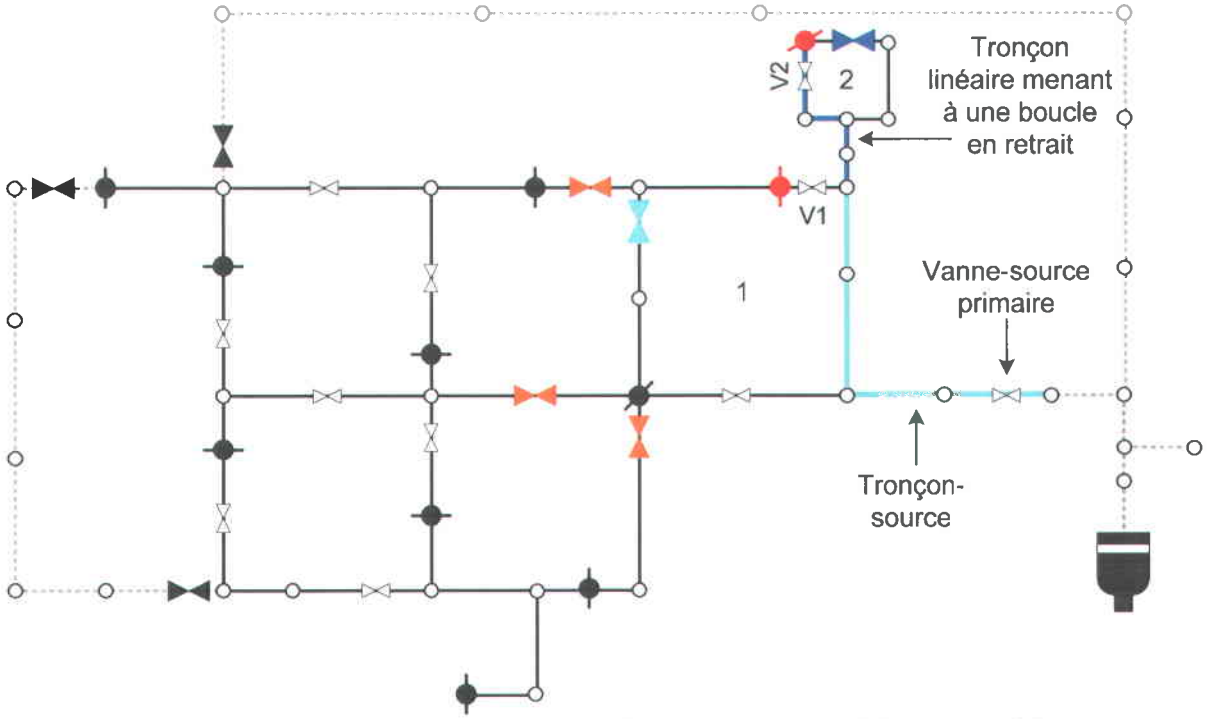


Figure A4.2 : Illustration de séquences de RUD pour les tronçons de grand diamètre, en bleu et cyan, sur les boucles 1 et 2. Le secteur à rincer est isolé par les vannes noires. Les vannes orangées servent à l'isolement adjacent, en aval de la boucle 1 (voir la règle 5a, ci-après). Les vannes blanches sont ouvertes.

Le rinçage des boucles 1 et 2 pourra se poursuivre, par exemple, en utilisant les bornes ayant servi au rinçage des séquences de grand diamètre, de façon à créer, dans chaque cas, une séquence unidirectionnelle supplémentaire (et utilisant les vannes de transition : V1 et V2).

NOTE : La règle 3b.5, qui impose une limite sur les longueurs des séquences de RUD, ne s'applique pas dans le cas des tronçons de grand diamètre puisque, à diamètre constant (dans la plupart des cas), rien ne sert de scinder de telles séquences, et de façon générale, sachant que c'est dans les conduites de 300 mm (12 po) ou plus que les vitesses de rinçage sont le plus difficilement accessibles, au besoin des itérations supplémentaires détermineront des bornes supplémentaires à ouvrir simultanément en vue de favoriser l'atteinte du critère minimal de vitesse fixé (à l'étape 5c).

CAS PARTICULIER : Rinçage du BM-source, pour le secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159 sur le réseau de Valcourt (Figure A4.3). Les conduites qui constituent le BM-source ont un diamètre particulièrement important de 460 mm (18 po), qui est de surcroît supérieur à celui des conduites de grand diamètre sur la boucle 1 (410 mm et 300 mm), auxquelles il est adjacent. Afin de favoriser l'atteinte de vitesses d'au moins 1 m/s dans le BM-source, celui-ci est rincé séparément (séquence en rose), et non avec l'une des séquences de grand diamètre sur la boucle 1. La borne sélectionnée à cette fin (identifiée BI-GD1) se trouve sur la boucle 1 et respecte les mêmes règles que précédemment (3b.3, 3b.6 et 3b.7).

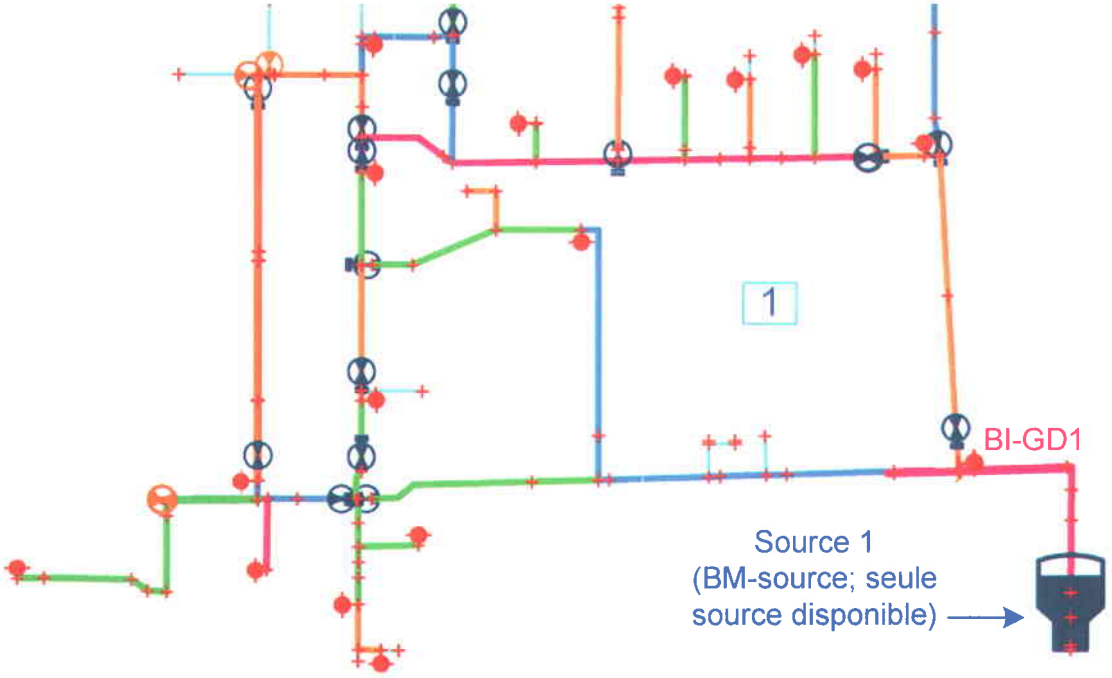


Figure A4.3 : Secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159, réseau de Valcourt. La même figure est reprise à l'annexe 5. À noter qu'elle a été ici rognée, afin d'attirer l'attention sur le BM-source, dont le rinçage est effectué par la séquence unidirectionnelle en rose.

Règle 3b.3

Afin d'éviter de multiplier les manipulations de vannes, il faut que la borne retenue fasse en sorte que les vannes de transition (qui assurent le caractère unidirectionnel des séquences) se trouvent sur la boucle couramment rincée, et non sur des boucles déjà rincées; pour les cas où plus d'une boucle est rincée par la même borne, les vannes de transition peuvent être situées sur l'ensemble de ces boucles.

Règle 3b.5

NOTE : Parmi tous les cas analysés pour les réseaux de Valcourt et de Terrasse-Vaudreuil, aucune des séquences de RUD, excluant les grands diamètres, n'avait une longueur de plus de 1 000 m en raison de la configuration des réseaux d'étude. Il serait intéressant de voir quels seraient les résultats obtenus, pour d'autres réseaux, si ce critère était éliminé ou modifié.

Règle 3b.7

Suivant la règle 3b.7-i, la borne retenue doit, en priorité, permettre d'élaborer deux séquences dont le diamètre est soit constant ou varie de « grand vers petit ». Sinon, la règle 3b.7-ii s'applique, où alors une séquence dont le diamètre varie de « petit vers grand » est tolérée (et en dernier recours, la règle 3b.7-iii s'applique).

CAS PARTICULIER : La règle 3b.7-ii peut, dans certaines situations, avoir préséance sur 3b.7-i. Lorsque, à la règle 3b.8, la borne retenue pour le rinçage de la boucle courante permet de rincer une voisine en utilisant la même borne (règle 3b.8-ii), si une seule séquence est alors créée sur la boucle voisine, on peut tolérer que les diamètres, le long de celle-ci, varient de « petit vers grand ». C'est le cas du rinçage de la boucle 2, pour l'exemple détaillé présenté au chapitre 8 (tableau 8.1 et figure 8.13).

Règle 3b.8

La règle 3b.8-iii permet de sélectionner une borne lorsque, à ce stade, il persiste plus d'une candidate qui permette de créer deux séquences unidirectionnelles sur la boucle courante.

NOTE : Au CAS 1, afin de déterminer la borne qui permette la meilleure répartition de la résistance hydraulique (RH) par unité de débit, un calcul simple utilisant l'équation de Hazen-Williams (équation 2.3, section 2.2.1) est effectué, tel que $RH = \frac{10,7L}{C^{1,852}D^{4,87}}$. Un compromis est alors établi en ce qui a trait au débit disponible pour le rinçage de chacune des séquences sur la boucle. Parmi les cas analysés, la plupart du temps, le calcul n'a pas été effectué puisqu'à diamètre (D) et à coefficient de Hazen-Williams (C) constants, c'est la répartition de la longueur (L), pour chaque séquence, qui a déterminé la borne à retenir (voir l'annexe 5).

Règle 3b.9

En ce qui concerne les critères supplémentaires pour les cas où aucune borne n'a encore été sélectionnée en raison du non-respect des règles 3b.2 à 3b.7 (en partie ou en totalité), les commentaires suivants s'adressent à chacun d'eux.

i. Lorsqu'aucune borne ne peut être sélectionnée sur la boucle courante ou à une distance maximale de 25 m, sur une voisine, une borne est cherchée sur un BM adjacent à la boucle. Pour qu'une telle borne soit sélectionnée, notamment, les vannes de transition doivent se trouver de part et d'autre du BM, tel que l'indique la figure A4.4. Deux séquences unidirectionnelles sont créées sur la boucle et sont rincées par la borne en rouge. La première, en rose, nécessite la vanne de transition rose. La seconde séquence, en bleu, nécessite la vanne de transition bleue. Cette dernière vanne est attachée à l'intersection entre la boucle et le BM, et respecte ainsi la règle 3b.4. Le BM est représenté en violet puisque

les conduites se trouvant le long de celui-ci sont sollicitées pour le rinçage des deux séquences.

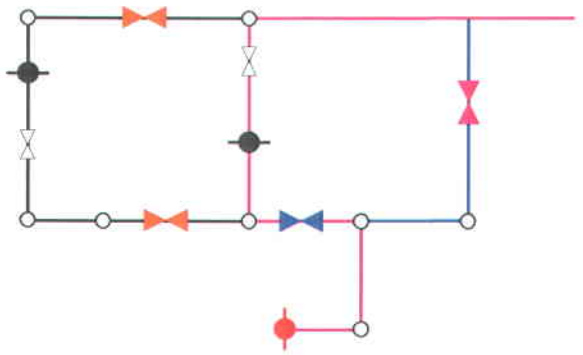


Figure A4.4 : Illustration de séquences de RUD pour le cas où une borne se trouvant sur un BM est utilisée pour le rinçage d'une boucle. Les vannes orangées servent à l'isolement adjacent, en aval, de la boucle (voir la règle 3a, ci-après). Les vannes blanches sont ouvertes.

ii. Le rinçage en deux séquences unidirectionnelles simultanées signifie que, sur la boucle courante, la borne est ouverte mais aucune vanne de transition n'est fermée (ce qui explique pourquoi le choix de la borne n'est pas soumis aux règles 3b.3 et 3b.4). Deux séquences sont toute de même créées de part et d'autre de la borne et celles-ci sont unidirectionnelles. Cette pratique n'est pas préférée en premier lieu puisqu'elle tend à diminuer les vitesses de RUD, par rapport à ce qu'elles seraient si les deux séquences étaient effectivement rincées séparément, en utilisant des vannes de transition.

iii. Dans certains cas particuliers, le rinçage d'une boucle est possible en une séquence, et celui-ci peut être intégré à l'une des séquences d'une boucle voisine. Par exemple, la figure A4.5 reprend le cas du rinçage de la boucle 11 sur le secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 048, pour le réseau de Terrasse-Vaudreuil. Suivant la progression des activités de RUD au sein du secteur, seul le tronçon en bleu (encerclé à la figure A4.5) reste à rincer sur la boucle 11 (le reste des conduites est partagé avec des boucles voisines 4, 5, 9 et 10, rincées précédemment). Au départ, aucune borne se trouvant sur la boucle 11 ou sur une voisine, à distance maximale de 25 m, n'a pu être sélectionnée pour le rinçage du tronçon bleu. Il est alors rincé avec la séquence (unique) en rose sur la boucle 10, utilisant la borne identifiée BI9,10,11 (cette borne avait été identifiée précédemment pour le rinçage de la boucle 9 – séquences verte et orangée – et de la boucle 10; consulter aussi l'annexe 5). Ce choix de borne respecte les règles 3b.3 à 3b.7-i (annexe 5).

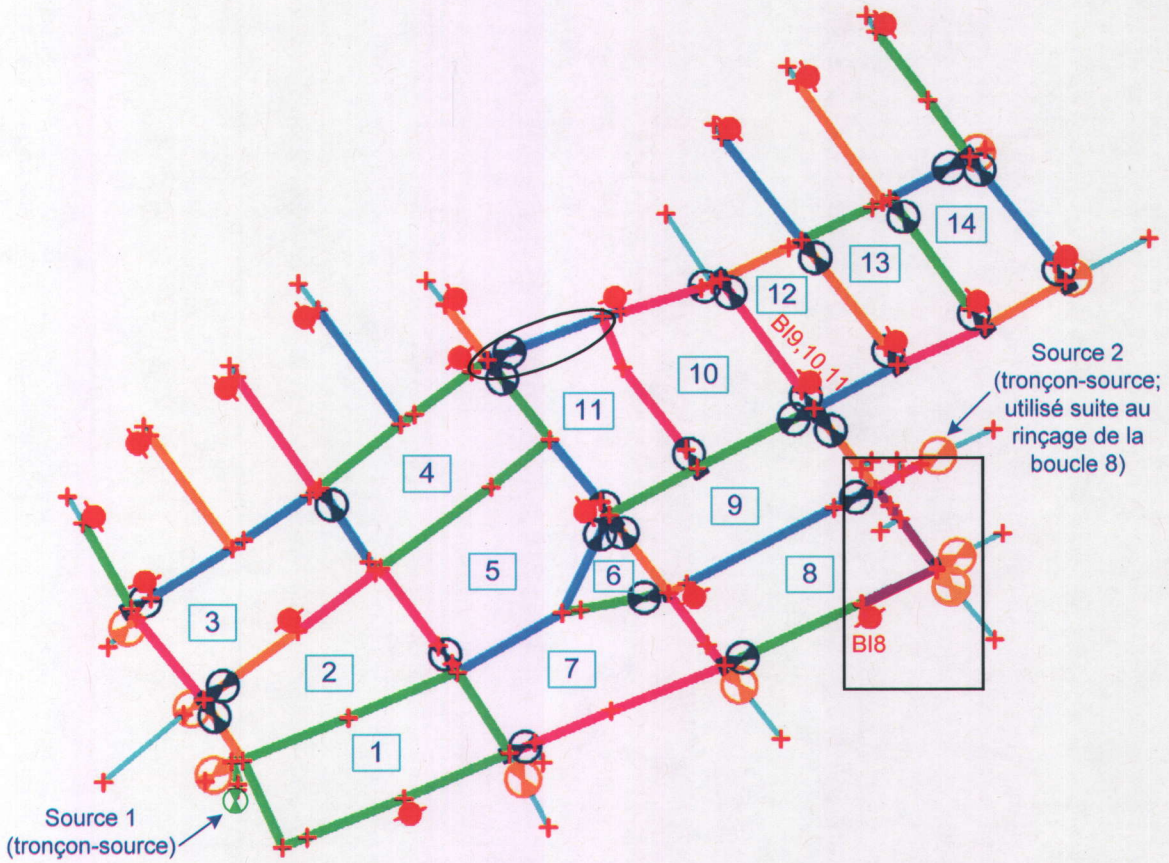


Figure A4.5 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 048, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose. Le tronçon de conduites en violet fait l'objet d'explications données dans le texte.

Étape 3c :

Lorsqu'une séquence de changement de source est nécessaire, l'utilisation de la borne qui permet déjà de rincer la boucle à laquelle elle est adjacente est favorisée, en s'assurant du respect des règles 3b.2 à 3b.7. Par exemple, à la figure A4.5, la séquence de changement de source, en rose et violet (dans l'encadré), utilise la même borne que les séquences de RUD sur la boucle 8 (identifiée BI8). Le tronçon-source, faisant l'objet de la séquence de changement de source, est adjacent à la boucle 8. La séquence de changement de source emprunte, en partie, des conduites de la séquence en bleu sur la boucle 8 (d'où la couleur violette).

Étape 3d :

3d.1 TANT QU'il y a des BM adjacents à la boucle

i. S'il y a un tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po), sélectionner une borne qui se trouve le plus près, en aval de ce tronçon; au besoin, retenir des vannes permettant d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives.

ii. TANT QU'il reste des branches au BM (i.e. segments terminés par des nœuds de degré = 1*), rechercher une borne se trouvant le plus près de l'extrémité de la branche; au besoin, retenir des vannes permettant d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives.

3d.2 SI un tronçon-source est adjacent à la boucle ET que des BM sont adjacents à ce tronçon, aller à 3d.1-ii.

* *Rappelons que ces segments sont soit réels ou créés artificiellement par la fermeture de vannes servant à l'isolement de secteurs contaminés.*

À l'étape 3d, les bornes servant au rinçage des BM adjacents à la boucle couramment analysée sont identifiées.

NOTE : En principe, le diamètre des conduites, le long des BM, respecte le principe du « grand vers petit », mais pas toujours. Dans un tel cas, puisque l'écoulement dans ces tronçons est unidirectionnel de par leur configuration linéaire ou arborescente, ils sont nécessairement rincés tels quels.

CAS PARTICULIER : La règle 3d.1 vise les BM adjacents à la boucle couramment analysée. Dans le cas d'une boucle en retrait, cette règle inclut les BM adjacents au tronçon linéaire menant à la boucle en question (voir par exemple le tronçon en trait pointillé à la figure A4.6).

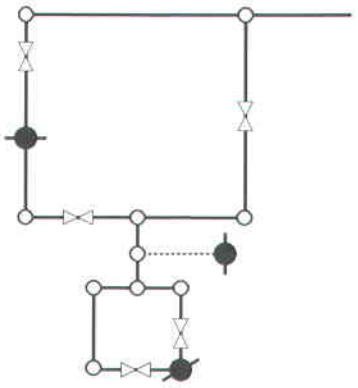


Figure A4.6 : Illustration d'un BM adjacent au tronçon linéaire menant à une boucle en retrait, en trait pointillé.

Étape 4 : STRATÉGIE PRÉLIMINAIRE

Étape 5a :

Tout comme l'étape 3 de la procédure, l'étape 5 est itérative. Elle procède en trois sous-points, jusqu'à ce que toutes les boucles du secteur à rincer aient été analysées (à nouveau).

Tout en favorisant la réutilisation des vannes :

5a.1 Vannes de transition d'une séquence de boucle à l'autre, en considérant les vannes identifiées lors de l'application des règles 2.3, 2.4, 3b.3 et 3b.4

5a.2 Vannes servant à isoler, en aval de la boucle rincée (ou *des* boucles rincées par la même borne), sauf s'il s'agit de la dernière boucle analysée pour le présent secteur à rincer
SI les vannes ont déjà été sélectionnées (cas de boucles rincées par la même borne), aller à 5a.3

SINON,
i. Isolement adjacent aux boucles, de façon systématique

ii. Pour les petits secteurs de réseau, si l'isolement adjacent n'est pas suffisant ou réalisable, chercher des vannes supplémentaires de façon à ce que l'eau ne puisse toujours circuler que de sections rincées vers sections à rincer OU que de sections non rincées vers sections non rincées (i.e. au plus, un seul point de communication avec le secteur aval non rincé ET aucun point de communication entre la borne et le secteur déjà rincé)

iii. Pour les grands secteurs de réseau, isolement complet des boucles

5a.3 Considérant les vannes sélectionnées en 5a.1 et 5a.2, si besoin est, utiliser les vannes identifiées par les règles 2.6 et 3b.6 (visant à éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives)

À l'étape 5a, le choix définitif des vannes à manipuler dans le cadre des opérations de RUD est déterminé.

INDICATIONS UTILES : (1) l'eau peut circuler en amont, dans les boucles précédemment rincées, depuis la source d'eau propre; (2) d'après la règle de conservation de l'énergie, l'eau ne peut circuler dans un même sens (horaire ou antihoraire) dans les conduites d'une boucle.

Règle 5a.1
CRITÈRES HEURISTIQUES ÉTABLIS POUR L'IDENTIFICATION DES VANNES DE TRANSITION :
Lorsque possible, favoriser l'utilisation de vannes déjà identifiées (aux règles 5a.2 ou 5a.3, pour le rinçage d'une boucle précédente); sinon, favoriser l'utilisation des vannes se trouvant le plus près, en aval, de la borne ouverte ou de vannes se trouvant près d'autres vannes à manipuler sur la boucle.

CAS PARTICULIER : Pour toute séquence supplémentaire sur une boucle donnée, soit (1) pour le rinçage des tronçons de grand diamètre ou (2) lorsqu'une séquence est scindée afin de permettre d'atteindre le critère de vitesse (étape 5c), si une vanne de transition est nécessaire afin de rendre la séquence supplémentaire unidirectionnelle, sélectionner la vanne se trouvant le plus près, en aval, de la borne à ouvrir (voir les vannes V2 et V3 à la figure A4.7, qui reprend le cas du secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159, réseau de Valcourt; ces vannes de transition ont été sélectionnées afin de rendre unidirectionnelles les séquences de grand diamètre en orangé et en bleu). Ces vannes supplémentaires pourront, dans certains cas, servir de vannes de transition pour les autres séquences sur la boucle (voir aussi les explications accompagnant les étapes 5b et 5c).

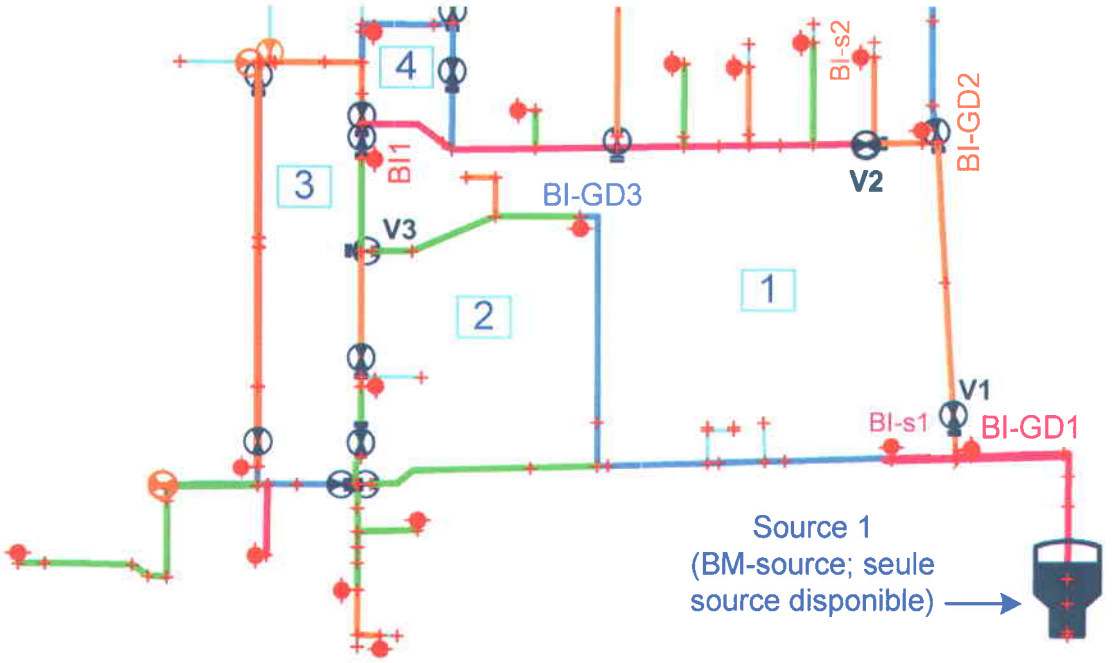


Figure A4.7 : Secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159, réseau de Valcourt. La même figure est reprise à l'annexe 5. À noter qu'elle a été ici rognée, afin d'attirer l'attention sur la boucle 1. Les vannes V1, V2 et V3 (en bleu foncé) font l'objet d'explications concernant les étapes 5a et 5b de la procédure de RUD.

Règle 5a.2

CRITÈRES HEURISTIQUES ÉTABLIS POUR L'IDENTIFICATION DES VANNES À FERMER EN AVAL D'UNE BOUCLE RINCÉE :

i. Pour les petits secteurs de réseau (i.e. dans notre cas ceux qui couvrent moins de 40 % du linéaire des réseaux d'étude, section 7.1), aux points où l'isolement adjacent n'est pas possible, vérifier s'il est nécessaire de fermer des vannes supplémentaires, afin d'assurer que les séquences sont bel et bien unidirectionnelles et que l'eau ne peut circuler que depuis des conduites précédemment rincées vers des conduites à rincer (ou non rincées vers non rincées).

- Si oui, (1) chercher à minimiser le nombre de vannes supplémentaires à manipuler tout en identifiant les vannes utiles pour le rinçage des boucles voisines et suivantes, donc cibler des vannes d'isolement aval adjacent et/ou de transition, connaissant l'ordre de rinçage des boucles et les vannes de transition considérées aux règles 2.4 et 3b.4 (voir la vanne V1 à la figure A4.8, qui reprend le cas du secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 030, réseau de Terrasse-Vaudreuil); (2) s'il existe des possibilités équivalentes relativement au nombre de vannes pouvant être fermées, retenir celles qui se trouvent près de vannes devant déjà être fermées/ouvertes.

- Sinon, ne pas fermer de vannes supplémentaires.

iii. Pour les grands secteurs de réseau (i.e. ceux qui couvrent 40 % et plus du linéaire des réseaux d'étude, section 7.1), l'isolement aval « complet » doit idéalement être accompli (section 7.2.1.1). Une fois les vannes d'isolement adjacent identifiées, s'il reste un ou des point(s) sans isolement, identifier des vannes (1) se trouvant le long d'un tronçon adjacent à la boucle (i.e. sur une boucle voisine ou un tronçon linéaire menant à une boucle; voir la vanne V2, servant à compléter l'isolement de la boucle 1, à la figure A4.9, qui reprend le cas du secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 057, réseau de Terrasse-Vaudreuil) et/ou (2) les vannes d'isolement adjacent des boucles voisines (ces vannes seront utilisées de toute façon; voir les vannes V3 et V4 identifiées pour l'isolement aval des boucles 3 et 4, à la figure A4.9). S'il n'y a pas de solution d'isolement complet possible, n'identifier que les vannes supplémentaires nécessaires.

NOTE : On se préoccupe toujours de l'aval de la boucle couramment rincée, sachant que l'aval « non rincé » des boucles précédentes a déjà été pris en charge.

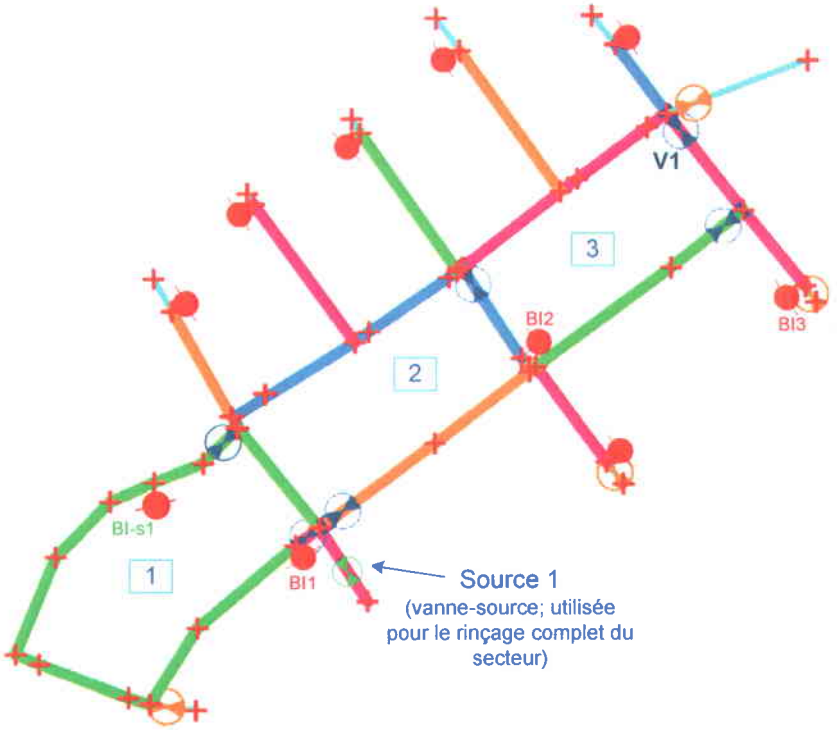


Figure A4.8 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 030, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose. Pour le rinçage de la boucle 2, aucune vanne d'isolement adjacent n'existe sur la boucle 3. La vanne V1 est donc fermée et servira de vanne de transition pour le rinçage de la première séquence sur la boucle 3 (en vert, par BI3).

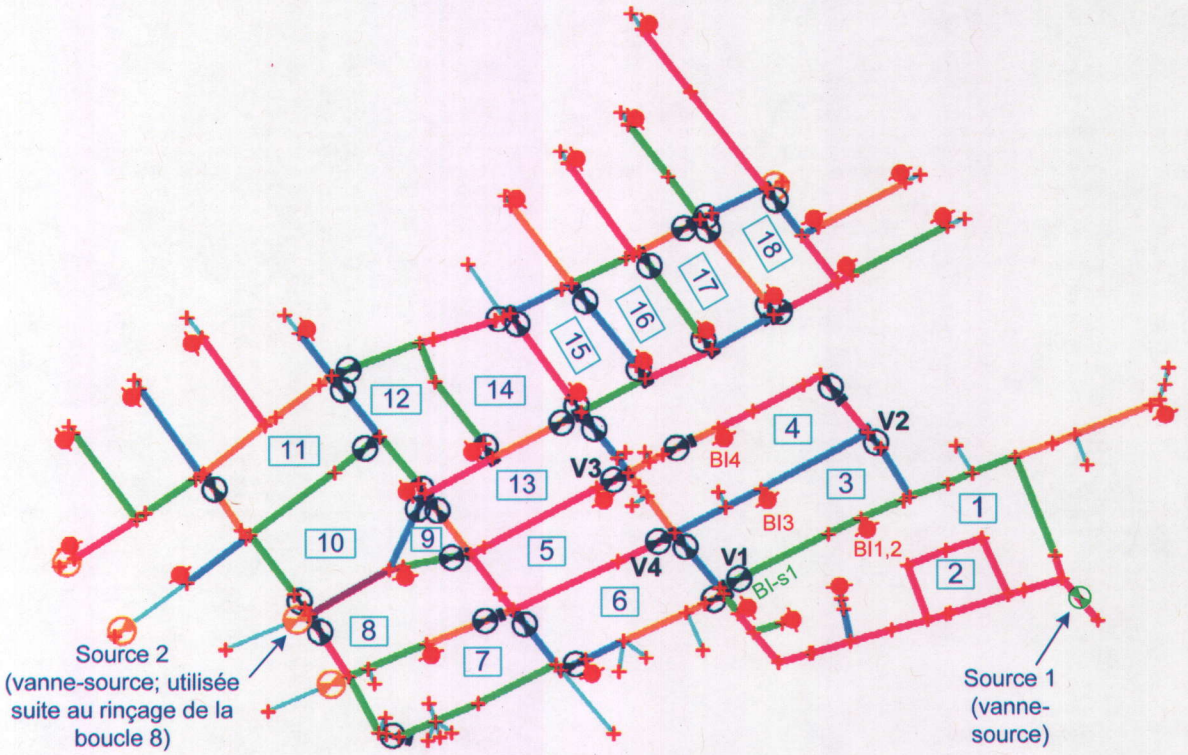


Figure A4.9 : Représentation du cas de secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 057, réseau de Terrasse-Vaudreuil (annexe 5). Les vannes orangées ont été identifiées afin d'isoler le secteur. Les opérations de RUD utilisent les bornes d'incendie rouges et les vannes en bleu foncé. Chaque séquence de rinçage est représentée en vert, bleu, orangé ou rose.

Étape 5b :

L'étape 5b détermine l'ordre des séquences de RUD associées au rinçage de chacune des boucles, en incluant (1) les tronçons de grand diamètre sur la boucle, (2) les BM adjacents à la boucle et/ou (3) les séquences de changement de source (lorsque celle-ci est adjacente à la boucle).

CAS PARTICULIER : Le rinçage de la boucle 1, pour le secteur isolé et à rincer suite à une première détection au détecteur 159 (réseau de Valcourt; figure A4.7), implique deux séquences de grand diamètre (en orangé et en bleu, utilisant respectivement les bornes BI-GD2 et BI-s2[4]

[4] La borne supplémentaire BI-s2 est nécessaire à l'atteinte du critère de vitesse pour la séquence en orange (voir l'étape 5c). Cette borne est identifiée lors d'une itération supplémentaire sur l'étape 5.

ainsi que BI-GD3). Il s'agit du seul cas, parmi tous ceux analysés, où plus d'une séquence de grand diamètre est associée au rinçage de la même boucle. L'ordre de rinçage de ces séquences est ici déterminé par la réutilisation de la vanne V3, en tant que vanne de transition. La séquence orangée sera d'abord rincée, utilisant la vanne V2 (après que la vanne V1, utilisée pour le rinçage du BM-source, ait été rouverte). Ensuite, pour le rinçage de la séquence bleue, la vanne V3 servira de vanne de transition (V3 sera fermée et ensuite V2, qui n'est plus utile, sera ouverte). V3 permettra, à la fois, d'éviter l'occurrence de pressions trop faibles ou négatives en des nœuds se trouvant sur la boucle 1 et plus élevés que la borne BI-GD3 (V2 ne peut donc pas être conservée en tant que vanne de transition). V3 sera réutilisée pour le rinçage de la séquence suivante sur la boucle 1 : en rose, diamètre < 300 mm (12 po), par la borne BI1. Enfin, le rinçage de la boucle se terminera par la séquence verte, utilisant la vanne de transition attachée à la borne BI1 (cette vanne sera fermée, V3 sera ouverte et ensuite le rinçage de la séquence aura lieu).

5b.1 S'il y a une (des) séquence(s) de diamètre ≥ 300 mm (12 po) sur la boucle, rincer celles-ci en priorité (*sachant qu'elles se trouveront à la tête des conduites à rincer sur la boucle, tel qu'il est mentionné précédemment, section 8.2.2*).

S'il persiste au moins une séquence de diamètre < 300 mm (12 po) sur la boucle, aller à 5b.2.

5b.2 L'ordre des séquences sur la boucle doit faire en sorte que le rinçage se termine avec la séquence pour laquelle la (les) vanne(s) de transition respectent les règles 2.4 et 3b.4 (i.e. éviter la présence de contaminant entre la borne et cette (ces) vanne(s)).

S'il y a au moins un BM adjacent à la boucle ET visé par le RUD (étape 3d), aller à 5b.3.

S'il y a une séquence de changement de source adjacente à la boucle, aller à 5b.4.

5b.3 Ordre de rinçage des BM adjacents à la boucle

i. S'il y a plus d'un BM adjacent à la boucle, rincer chaque BM à la suite de la séquence de boucle à laquelle il est adjacent, en conservant les vannes de transition fermées.

SI plus d'un BM est adjacent à une séquence donnée, rincer ceux-ci l'un à la suite de l'autre, depuis le point d'alimentation en eau propre de la séquence (boucle voisine précédemment rincée ou source d'eau propre au secteur à rincer).

ii. SI un seul BM est adjacent à la boucle, rincer celui-ci à la suite du rinçage complet de la boucle, après avoir ouvert les vannes de transition sur la boucle, à moins que celles-ci ne soient utiles pour une boucle ou séquence suivante; dans ce dernier cas, rincer le BM suite à la séquence de la boucle à laquelle il est adjacent.

5b.4 Rinçage des séquences de changement de source

i. SI la boucle se trouve adjacente à une seconde source (vanne-source ou tronçon-source) qui sera utilisée pour le rinçage des boucles suivantes : dans le respect de l'ordre imposé par la règle 5b.2 et en effectuant toutes les manipulations de vannes nécessaires au changement de source au fur et à mesure, rincer d'abord la séquence de boucle à laquelle la source est adjacente et ensuite la séquence de changement de source.

ii. S'il y a des BM adjacents à un tronçon-source, rincer ceux-ci immédiatement suite à la séquence de changement de source, en procédant dans l'ordre depuis la source d'eau propre.

Étape 5c :

5c.1 SI la vitesse de RUD simulée < 1 m/s

i. Le long d'une séquence de boucle, de changement de source ou de BM, dont le diamètre < 300 mm (12 po)

TANT QU'il y a des alternatives à tester ET que la vitesse < 1 m/s

ESSAI 1 : chercher une borne supplémentaire, le plus près en aval du tronçon de faible vitesse

(1) s'il s'agit d'une séquence de BM, sur le BM lui-même

(2) s'il s'agit d'une séquence de boucle ou de changement de source, le long d'un BM adjacent; OU encore, une borne le long de la séquence même et respectant les règles 3b.3 à 3b.7;

cette borne sera ouverte de façon simultanée, avec la borne initialement prévue pour le rinçage de la séquence

ESSAI 2 : SI une borne supplémentaire a déjà été sélectionnée à l'essai 1, procéder en deux séquences qui seront rincées l'une après l'autre (utilisant respectivement la borne supplémentaire et la borne initialement prévue).

ii. Le long d'une séquence pour le rinçage d'un tronçon de diamètre ≥ 300 mm (12 po)

TANT QUE la vitesse simulée demeure < 1 m/s ET que le nombre de bornes sélectionné < 3

Chercher une borne supplémentaire, en aval du tronçon où la vitesse est trop faible

(1) s'il s'agit d'une séquence de BM, sur le BM lui-même

(2) s'il s'agit d'une séquence de boucle ou de changement de source, le long d'un BM adjacent; OU encore, une borne sur la boucle même (ou sur la boucle à laquelle la séquence de changement de source est adjacente) et respectant les règles 3b.3 à 3b.7;

cette borne sera ouverte de façon simultanée, avec la borne initialement prévue pour le rinçage de la séquence

5c.2 SI la pression simulée < 20 kPa en un nœud, aller à 5c.1.

5c.3 SI l'ouverture d'une borne sur un BM vise à rincer une séquence de boucle (règles 2.9-i, 3b.9-i, 5c.1-i ou 5c.1-ii) ET la borne est celle qui se trouve à l'extrémité (ou le plus près de l'extrémité) du BM ET la vitesse de RUD atteinte dans le BM ≥ 1 m/s, considérer celui-ci comme étant rincé.

NOTES :

(1) L'étape 5c vise à valider les séquences élaborées précédemment pour le rinçage de chaque boucle. Lorsque les critères hydrauliques minimaux (vitesse de RUD et pression) ne sont pas respectés pour une séquence donnée, des corrections sont apportées et doivent être validées. La procédure retourne donc à l'étape 5a et identifie, au besoin, des vannes supplémentaires à manipuler, lesquelles pourraient remplacer des vannes de transition précédemment identifiées sur la boucle en question (aucune occurrence parmi les cas analysés dans cette thèse, toutefois). Ensuite, en 5b, l'ordre de rinçage des séquences, sur la boucle en question, est vérifié à nouveau. Dans certains cas, une séquence est ajoutée, tel que l'indique la règle 5c.1-i-ESSAI 2, laquelle doit normalement scinder une séquence pour laquelle le critère minimal de vitesse n'avait pas été respecté. Une telle correction s'applique, en général, aux séquences le long desquelles le diamètre des conduites varie de « grand vers petit ». Puisque c'est dans la portion de la séquence où le diamètre est le plus grand que la vitesse est trop faible, c'est en aval de ce tronçon qu'un borne supplémentaire sera identifiée (Figure A4.10). Nécessairement, cette section sera rincée la première,

utilisant la borne supplémentaire, et la section suivante sera rincée par la suite, utilisant la borne prévue au départ.

(2) Tel qu'il est mentionné à la section 8.2.5, les corrections appliquées à l'étape 5c ne visent pas l'identification d'une nouvelle stratégie préliminaire complète, mais identifient localement des bornes supplémentaires à ouvrir. À cette fin, elles font tout de même appel à certaines des règles définies à l'étape 3b.

(3) Aucun cas où le critère minimal de vitesse n'était pas atteint pour une séquence de changement de source de grand diamètre n'a été observé parmi les cas analysés (règle 5c.1-ii). Une telle séquence est nécessairement adjacente à une boucle à rincer et les conduites de grand diamètre devraient normalement se prolonger jusque sur cette boucle (voir les commentaires accompagnant la règle 3b.1). C'est donc pour cette raison qu'une borne supplémentaire pourra être recherchée sur la boucle même.

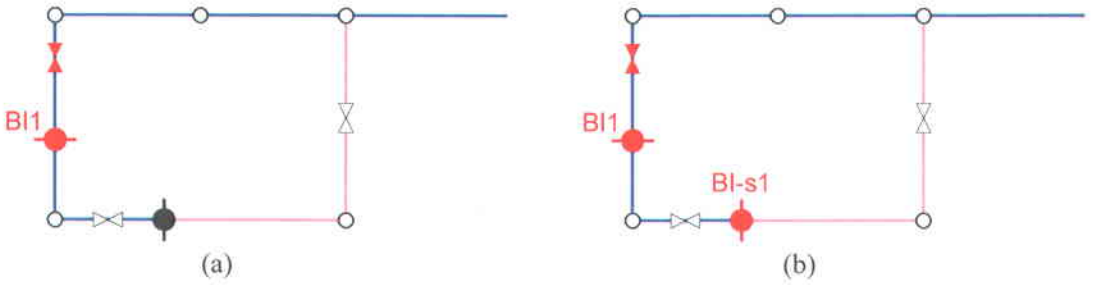
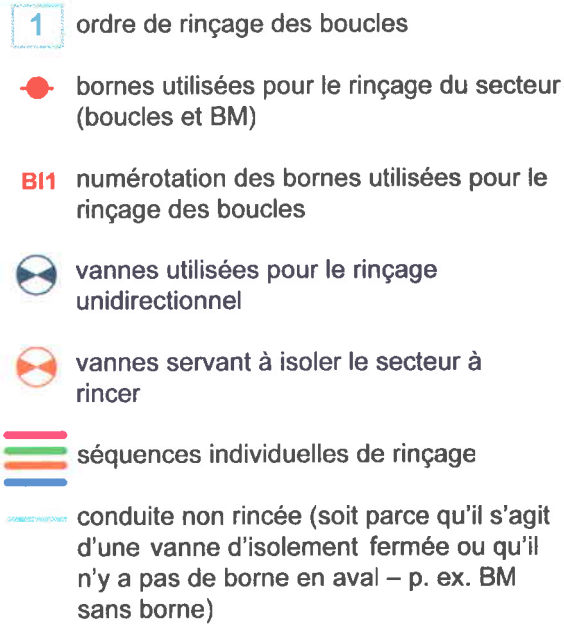


Figure A4.10 : Illustration d'un cas où une séquence de RUD est scindée, suite à l'application de la règle 5c.1-i-ESSAI 2. En (a), la séquence initialement prévue utilise la borne BI1 et la vanne de transition en rouge. Les conduites en bleu ont un diamètre de 150 mm (6 po) et celles en rose ont un diamètre de 250 mm (10 po). Suite à la validation hydraulique, la vitesse dans les conduites de 250 mm s'avère inférieure au critère de vitesse de 1 m/s. En (b), la séquence initiale est alors scindée. Deux séquences sont créées, utilisant d'abord la borne supplémentaire BI-s1 et ensuite la borne BI1, prévue au départ. À noter que sur ces figures, les vannes blanches sont ouvertes.

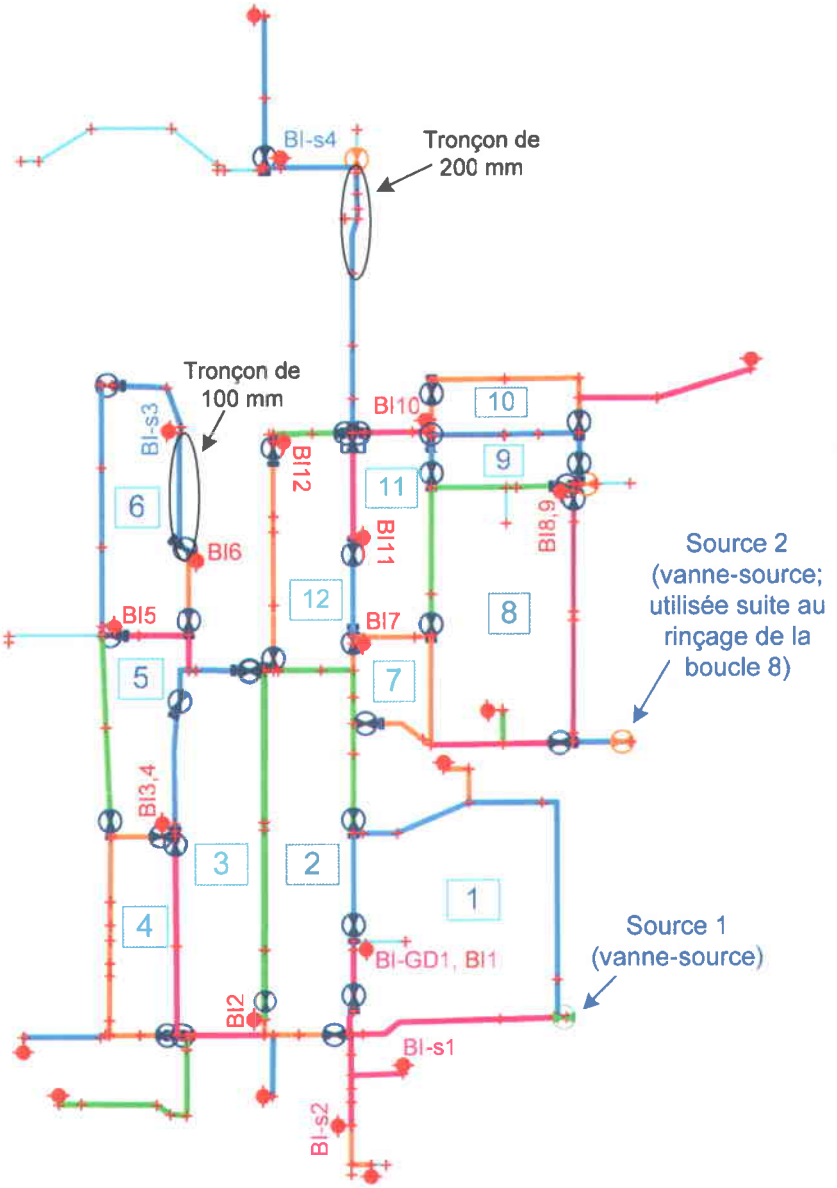
ANNEXE 5

Figures présentant les résultats du rinçage de secteurs précédemment isolés

Légende



VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 31



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : adjacence à la vanne-source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 4 : rinçage par la même borne que la boucle 3 (3a.1)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 7 : pas de conduites partagées avec la boucle 6, mais une boucle voisine se trouve adjacente à la seconde vanne-source, dont l'utilisation est ici requise (3a.2-ii)

Boucle 8 : cette boucle avait déjà été retenue lors de la sélection de la boucle 7 (3a.1)
Boucle 9 : rinçage par la même borne que la boucle 8 (3a.1)
Boucle 10 : conduites partagées avec la boucle 9 et boucle partiellement isolée (3a.2-i-CAS 1)
Boucle 11 : un nœud partagé avec la boucle 10 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 12 : conduites partagées avec la boucle 11 (dernière boucle à rincer, 3a.2-i)

Justifications du choix des bornes, selon les règles de la procédure de RUD :

BI-GD1 : 1re séquence, grand diamètre (410 mm / 16 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-i
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b.8-i
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI7 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i)
BI8 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI9 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b.8-i
BI10 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI11 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI12 : règles 3b.2 à 3b.7-i

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) La borne notée BI-GD1 sert au rinçage d'une séquence de grand diamètre. La couleur de son étiquette est la même que celle de la séquence qu'elle permet de rincer.

2) Les bornes BI-s1 et BI-s2 sont des bornes supplémentaires pour l'atteinte du critère de vitesse dans la séquence de grand diamètre (règle 5c.1-ii; la couleur des étiquettes BI-s est la même que celle de la séquence à laquelle elles se rapportent).

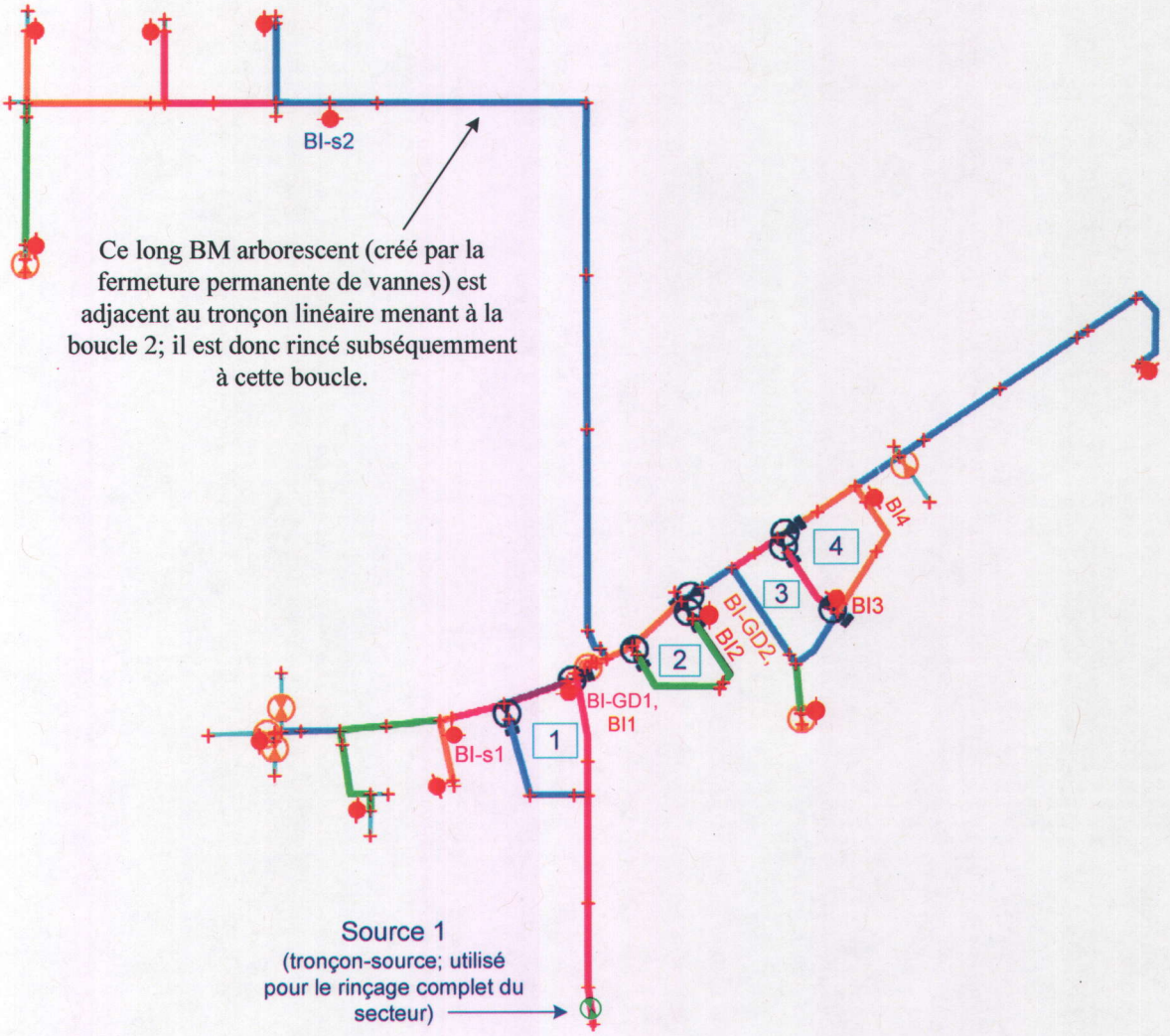
3) La borne BI-s3 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse dans une séquence contenant un tronçon de 100 mm (4 po). Sans nécessiter la manipulation des vannes supplémentaires, la séquence prévue à l'origine est scindée en 2, utilisant en alternance les bornes BI-s3 et BI6 (règle 5c.1-i-ESSAI 2).

4) La borne BI-s4 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse, en raison de la présence d'un tronçon de 200 mm (8 po), qui entrecoupe le BM dont les autres conduites sont de 150 mm (6 po). La séquence de rinçage du BM prévue à l'origine est scindée en 2, utilisant en alternance les bornes BI-s4 et la borne du BM (règle 5c.1-i-ESSAI 2). La vanne sur le BM est fermée pour le rinçage de la première séquence, afin d'éviter l'occurrence de pressions négatives aux nœuds se trouvant en aval de la borne BI-s4.

5) Le tronçon de couleur violette appartient à la fois à la séquence rose pour le rinçage de la boucle 8 et à la séquence de changement de source (utilisant la borne BI8).

6) D'après les indications données ci-haut, la boucle 7 est rincée en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9ii). Les bornes et vannes situées sur cette boucle ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2-3b.7.

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 112



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes:

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucles 2 et 3 : tronçon linéaire menant à une boucle en retrait non rincée (3a.2-ii)
Boucle 4 : partage des conduites avec la boucle 3 (dernière boucle à rincer, 3a.2-i)

BI-GD1 : séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI-GD2 : séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-i
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii CAS 2)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

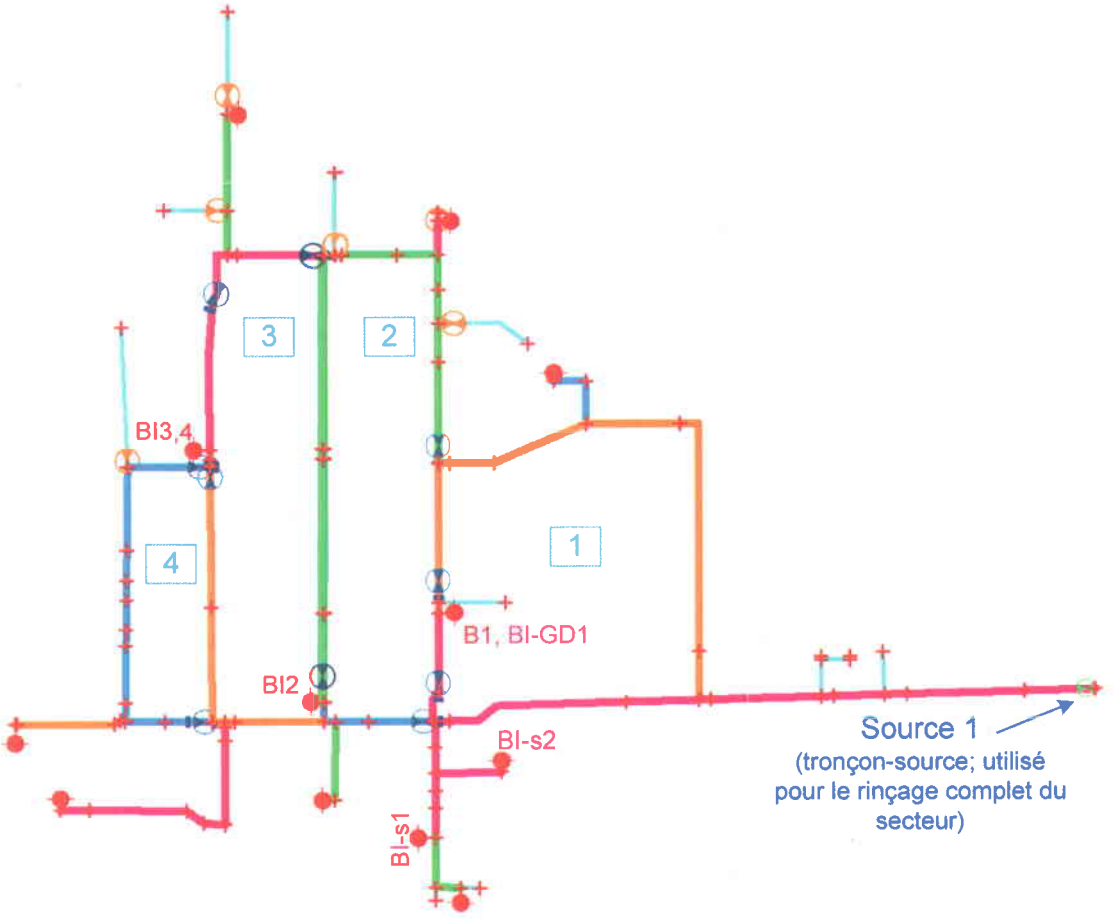
1) Les bornes BI-s1 et BI-s2 sont des bornes supplémentaires pour l'atteinte du critère de vitesse dans les séquences de grand diamètre (règle 5c.1-ii; la couleur des étiquettes BI-s est la même que celle de la séquence à laquelle elles se rapportent). Plus spécifiquement, la borne BI-s2 sert au rinçage d'une séquence de grand diamètre se trouvant le long d'un BM.

2) Le tronçon de couleur violette est utilisé pour le rinçage de la séquence de grand diamètre (en rose) et pour le rinçage de la séquence suivante sur la boucle 1(une seule séquence, en bleu, sur la boucle). Suite à l'ajout de BI-s1, lors de la validation hydraulique, le tronçon violet devient commun aux deux séquences. Cette situation provient du fait qu'à l'étape 5c de la procédure de RUD, lorsqu'une séquence ne respecte pas le critère minimal de vitesse, une nouvelle stratégie préliminaire n'est pas entièrement définie. Plutôt, des corrections sont recherchées localement (annexe 4).

3) La boucle 4 est rincée en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9ii). Les bornes et vannes situées sur cette boucle ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2-3b.7.

4) Les tronçons linéaires menant aux boucles 2 et 3 sont rincés avec la première séquence de ces boucles, conformément à la procédure de RUD. Dans le cas de la boucle 2, il s'agit d'une séquence de grand diamètre (en orangé). En ce qui concerne la boucle 3, la séquence est représentée en bleu.

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 131



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :
Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : rinçage par la même borne que la boucle 3 (3a.1)

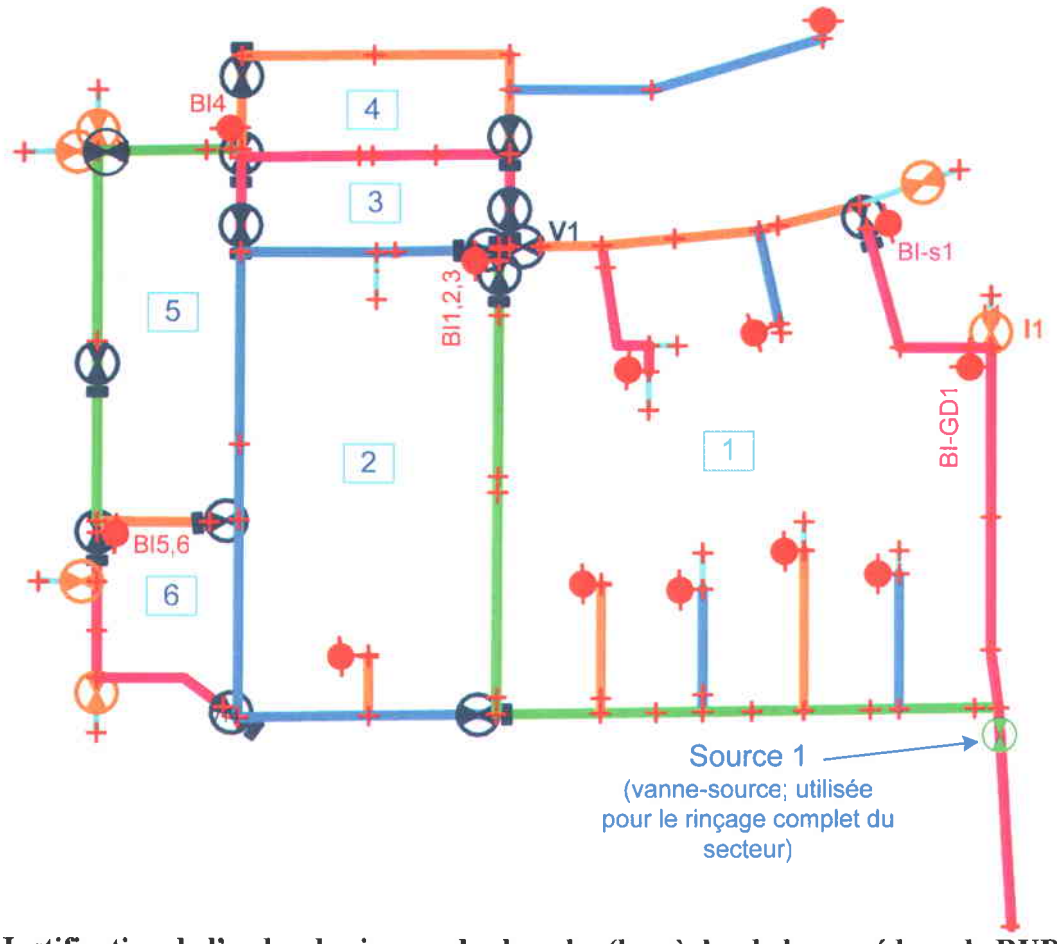
BI-GD1 : 1re séquence, grand diamètre (410 mm / 16 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-i BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b. 8-i

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Les bornes BI-s1 et BI-s2 sont des bornes supplémentaires pour l'atteinte du critère de vitesse dans la séquence de grand diamètre (règle 5c.1-ii).

2) À l'annexe 3, la figure présentant l'isolement de ce même secteur indique la fermeture d'une vanne supplémentaire pour l'isolement de la source primaire. Il est ici supposé que, suite à l'échantillonnage confirmant l'absence de contaminant dans le BM-source, cette vanne a pu être rouverte, afin d'éviter de priver d'eau un secteur important du réseau de Valcourt (section 6.2.2).

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 133 ou 142

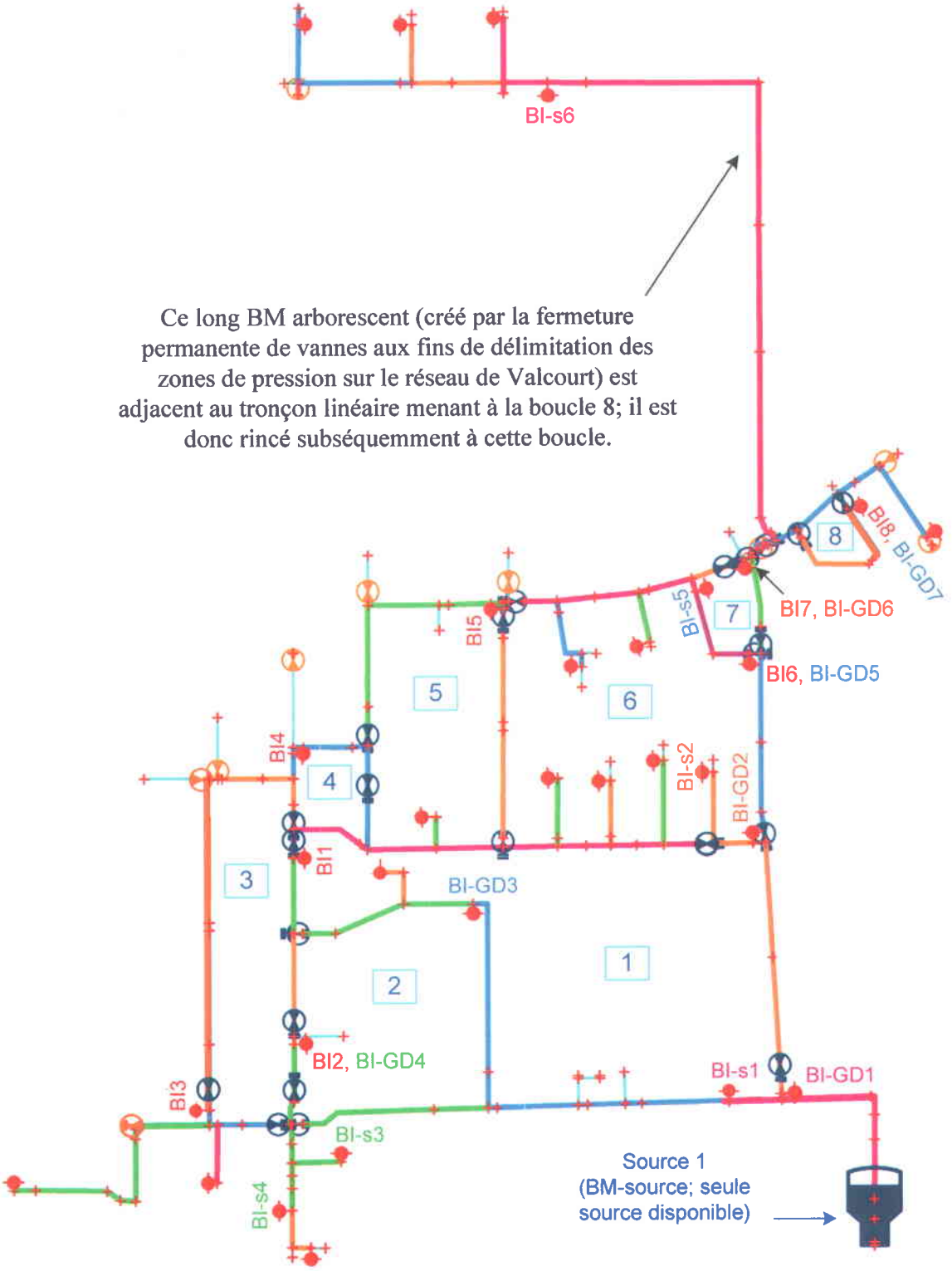


Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :
Boucle 1 : adjacence à la vanne-source 1 (1.2)
Boucle 2 : rinçage par la même borne que la boucle 1 (3a.1)
Boucle 3 : rinçage par la même borne que la boucle 2 (3a.1)
Boucle 4 : partage des conduites avec la boucle 3 et partiellement isolée (3a.2-ii)
Boucle 5 : nœud partagé avec la boucle 4 (3a.1)
Boucle 6 : rinçage par la même borne que la boucle 5 (3a.1)

BI-GD1 : 1re séquence, grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI1 : règles 2,2 à 2.7-ii + 2.8-ii
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b.8-i
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate) + 3b.8-ii
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate) + 3b.8-ii
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i

Note se rapportant au rinçage du secteur :
La borne BI-s1 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse dans la séquence de grand diamètre (première séquence; règle 5c.1-ii).

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 159



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes:

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i CAS 2)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 7 : conduites partagées avec la boucle 6 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 8 : tronçon linéaire menant à une boucle en retrait non rincée (3a.2-ii)

BI-GD1 : 1re séquence pour le rinçage du BM-source, grand diamètre (460 mm / 18 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI-GD2 : 2e séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI-GD3 : 3e séquence de grand diamètre (410 mm / 16 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI-GD4 : 4e séquence de grand diamètre (410 mm / 16 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i
BI-GD5 : 5e séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i
BI-GD6 : 6e séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i
BI-GD7 : 7e séquence de grand diamètre (350 mm / 14 po), règles 3b.2, 3b.3, 3b.6, 3b.7-i

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b,7-i)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI7 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI8 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

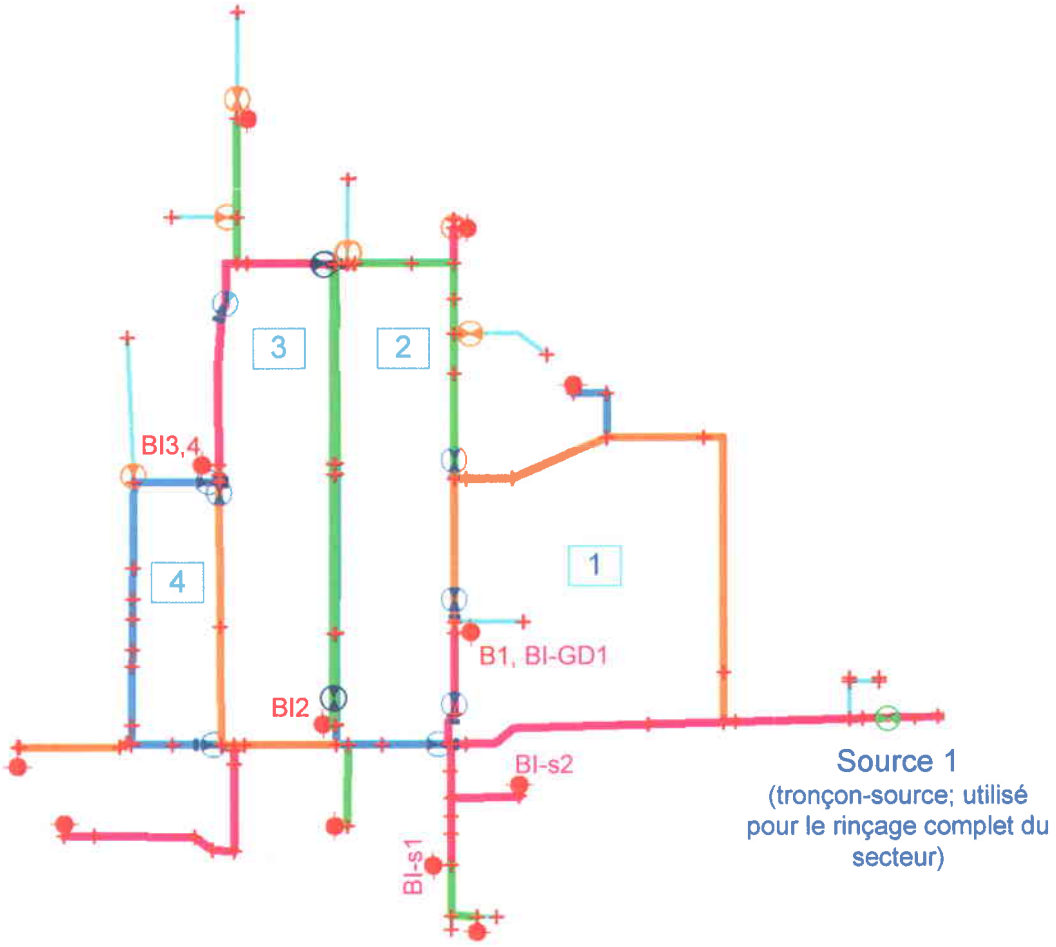
1) Les bornes notées BI-GD servent au rinçage des séquences de grand diamètre. La couleur de leur étiquette est la même que celle de la séquence qu'elles permettent de rincer.

2) Les bornes BI-s1 à BI-s6 sont des bornes supplémentaires pour l'atteinte du critère de vitesse dans les séquences de grand diamètre (règle 5c.1-ii; la couleur des étiquettes BI-s est la même que celle de la séquence à laquelle elles se rapportent). Plus spécifiquement, la borne BI-s6 sert au rinçage d'une séquence de grand diamètre se trouvant le long d'un BM.

3) Le tronçon de couleur violette est utilisé pour le rinçage d'une séquence de grand diamètre (en bleu) et pour le rinçage de la séquence en rose de la boucle 6 (une seule séquence sur la boucle). Suite à l'ajout de BI-s5, lors de la validation hydraulique, le tronçon violet devient commun aux deux séquences. Cette situation provient du fait qu'à l'étape 5c de la procédure de RUD, lorsqu'une séquence ne respecte pas le critère minimal de vitesse, une nouvelle stratégie préliminaire n'est pas entièrement définie. Plutôt, des corrections sont recherchées localement (annexe 4).

4) D'après les indications données à la page précédente, la boucle 4 est rincée en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur cette boucle ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2-3b.7.

VALCOURT, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 375



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

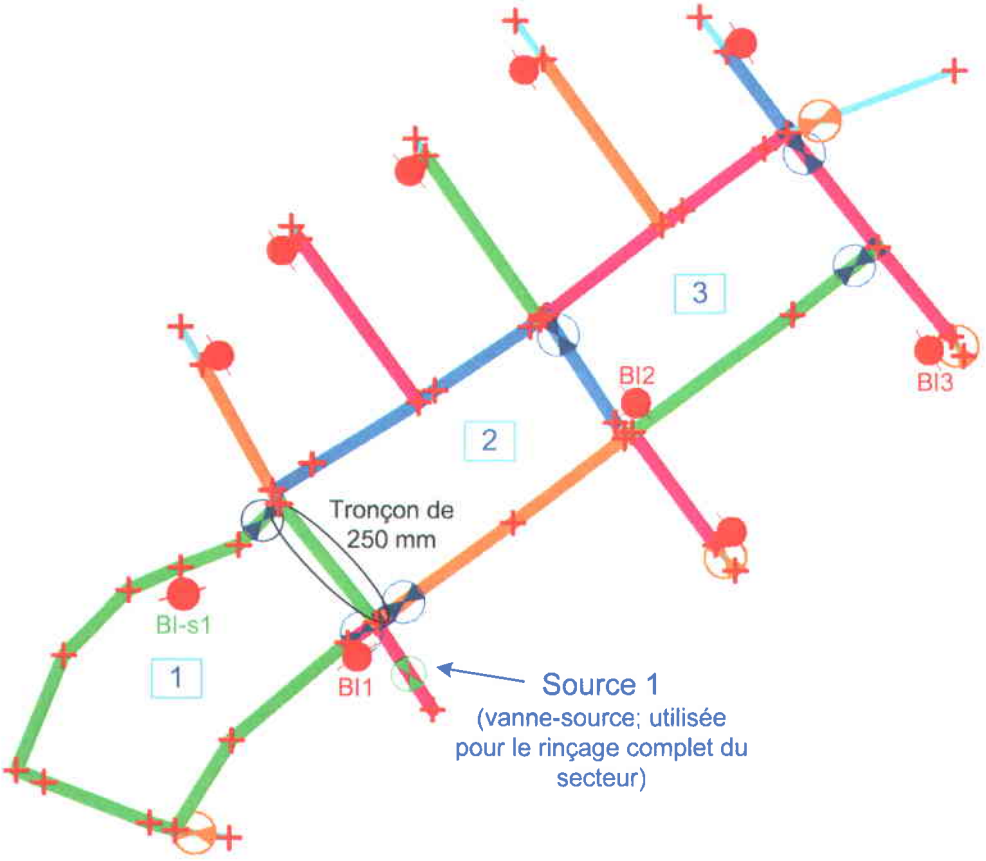
Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : rinçage par la même borne que la boucle 3 (3a.1)

BI-GD1 : 1re séquence, grand diamètre (410 mm / 16 po), règles 2.2, 2.3, 2.6, 2.7-i
BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-i
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b. 8-i

Note se rapportant au rinçage du secteur :

Les bornes BI-s1 et BI-s2 sont des bornes supplémentaires pour l'atteinte du critère de vitesse dans la séquence de grand diamètre (règle 5c.1-ii).

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 030



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la vanne-source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)

BI1 : règles 22. à 2.7-i
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7i + 3b.8-iii (CAS 1)
BI3 : règle 3b.9-i (3b.3 à 3b.7-i+ 3b.8-iii-CAS 1)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

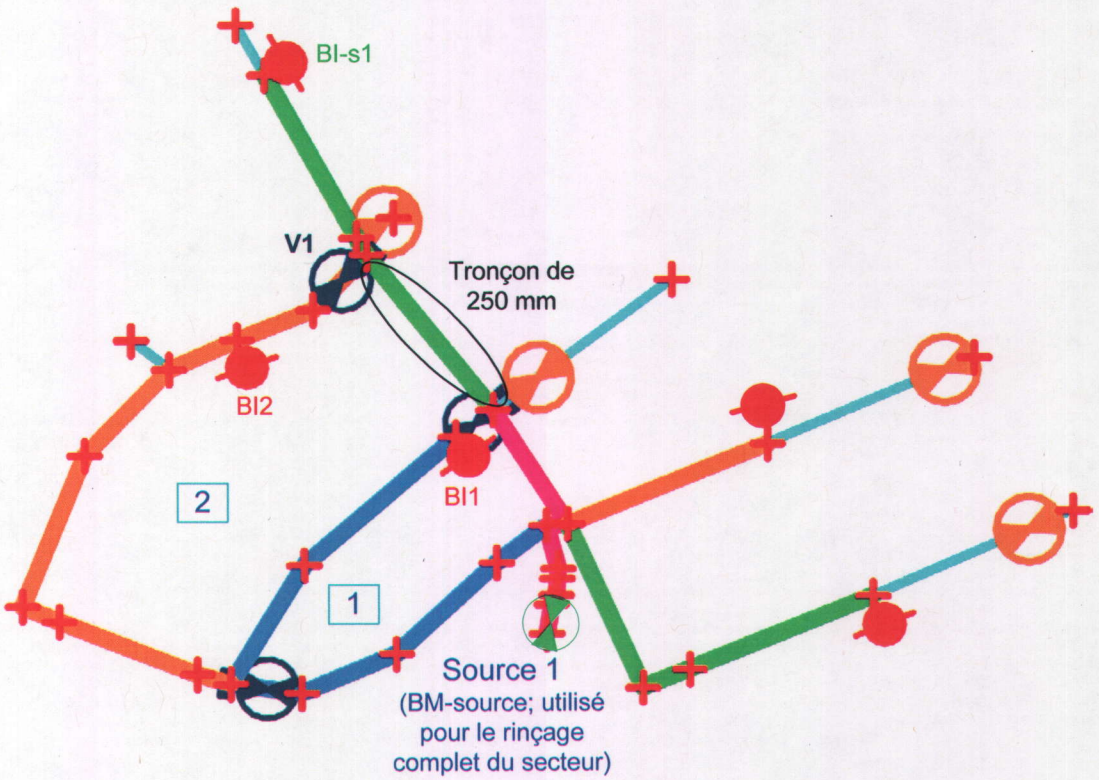
1) La vanne-source 1, est adjacente aux boucles 1 et 2, étant située à l'intersection de ces deux boucles. L'une ou l'autre pourrait être sélectionnée en tant que première candidate au rinçage. Cependant, conformément à la règle 1.2, la boucle 1 est celle dont le linéaire partagé avec des boucles voisines à rincer est minimal (i.e. celle qui se trouve le plus en « périphérie » du secteur à rincer).

2) Les bornes et vannes se trouvant sur la boucle 3 ne permettent pas de créer deux séquences unidirectionnelles sur cette boucle, tout en respectant les règles 3b.2 à 3b.7. Une borne d'un BM adjacent est alors sélectionnée (règle 3b.9i). Trois BM étant candidats à cette fin, la

borne sélectionnée est celle qui permet la meilleure répartition de la résistance hydraulique parmi les deux séquences (règle 3b.8-iii-CAS1), en plus de respecter les règles 3b.3 à 3b.7i.

3) La borne BI-s1 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse en raison de la présence d'un tronçon de 250 mm (10 po). La séquence (verte) le long de laquelle elle se trouve est alors scindée : sans nécessiter la manipulation de vannes supplémentaires, une première séquence est rincée par BI-s1 et une seconde par BI1, prévue au départ (règle 5c.1-i-ESSAI 2).

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 033



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la source 1(1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)

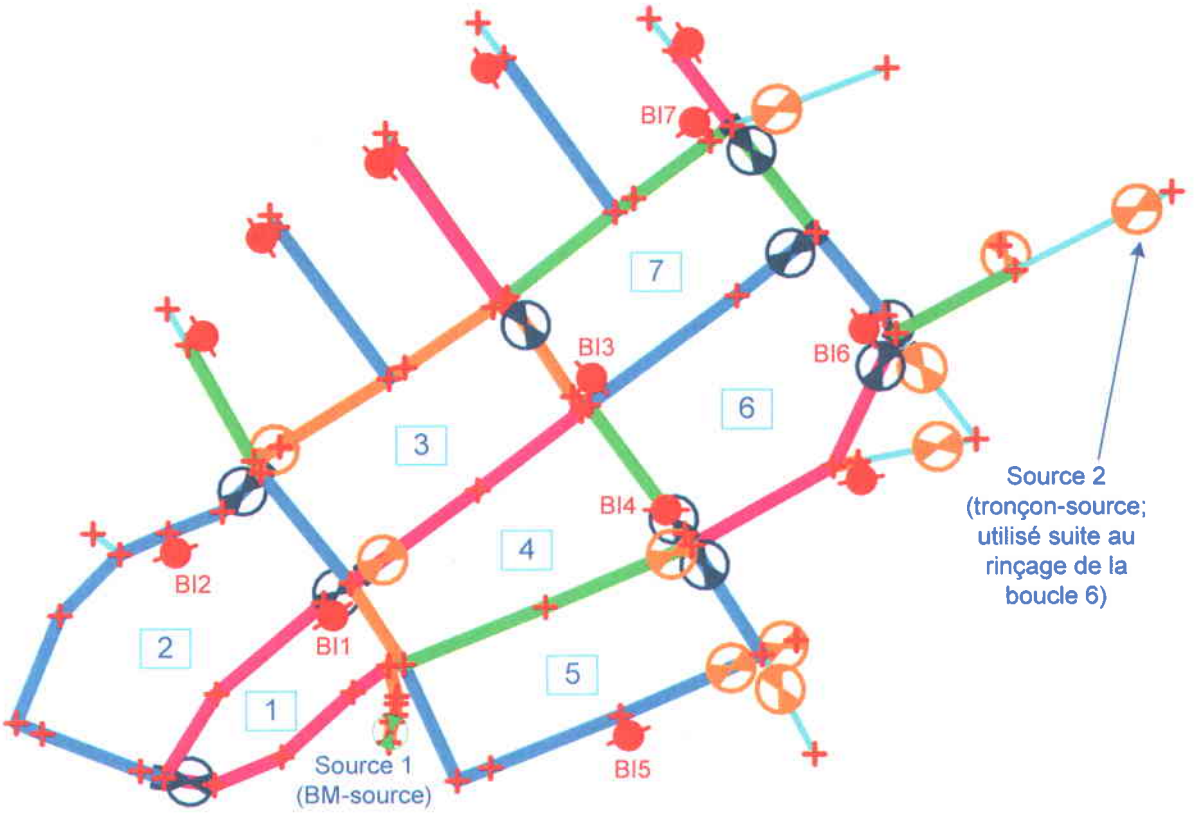
BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-iii (CAS 2)
BI2 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS2)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) La boucle 2 doit être rincée en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9-ii). Les vannes et bornes situées sur cette boucle ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2 à 3b.7.

2) La borne BI-s1 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse en raison de la présence d'un tronçon de 250 mm (10 po) sur la boucle 2. La séquence verte est rincée d'abord, en conservant la vanne V1 fermée (règle 5c.1-i-ESSAI 2; la vanne V1 devait être fermée pour le rinçage de la boucle 1 afin de respecter la règle 5a.2-ii). Par la suite, V1 est ouverte et le reste de la boucle est rincé en deux séquences simultanées par BI2, tel que prévu au départ.

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 039



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 et boucle partiellement isolée (3a.2-i-CAS 1)
Boucle 6 : un nœud partagé avec la boucle 5 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 7 : conduites partagées avec la boucle 6 (seule candidate, 3a.2-i)

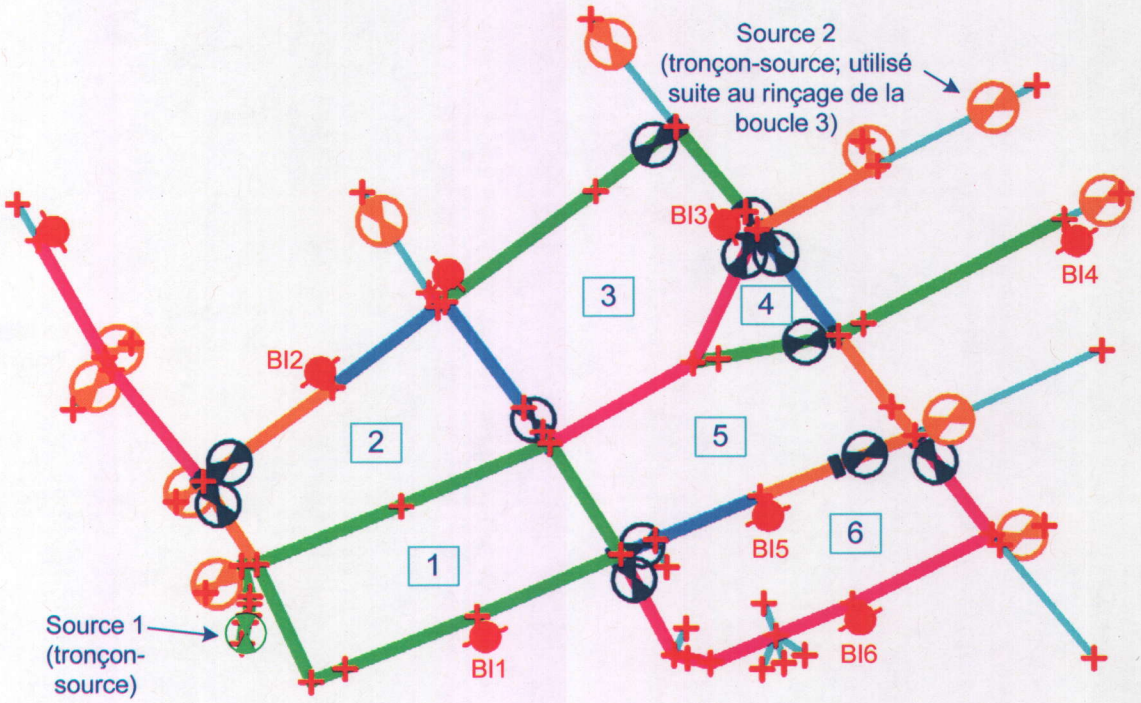
BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-iii (CAS 2)
BI2 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 1)
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS2)
BI5 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS1)
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI7 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS2)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Les boucles 2, 4, 5 et 7 doivent être rincées, chacune, en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règle 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur ces boucles ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 3b.2-3b.7.

2) Dans le cas présent, le changement de source est utile au rinçage d'une seule boucle, soit la boucle 7, laquelle représente une faible proportion du secteur. Ce cas est unique parmi ceux qui ont été analysés dans le cadre de la présente thèse. Le changement de source demeure utile au rinçage du tronçon-source.

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 046



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

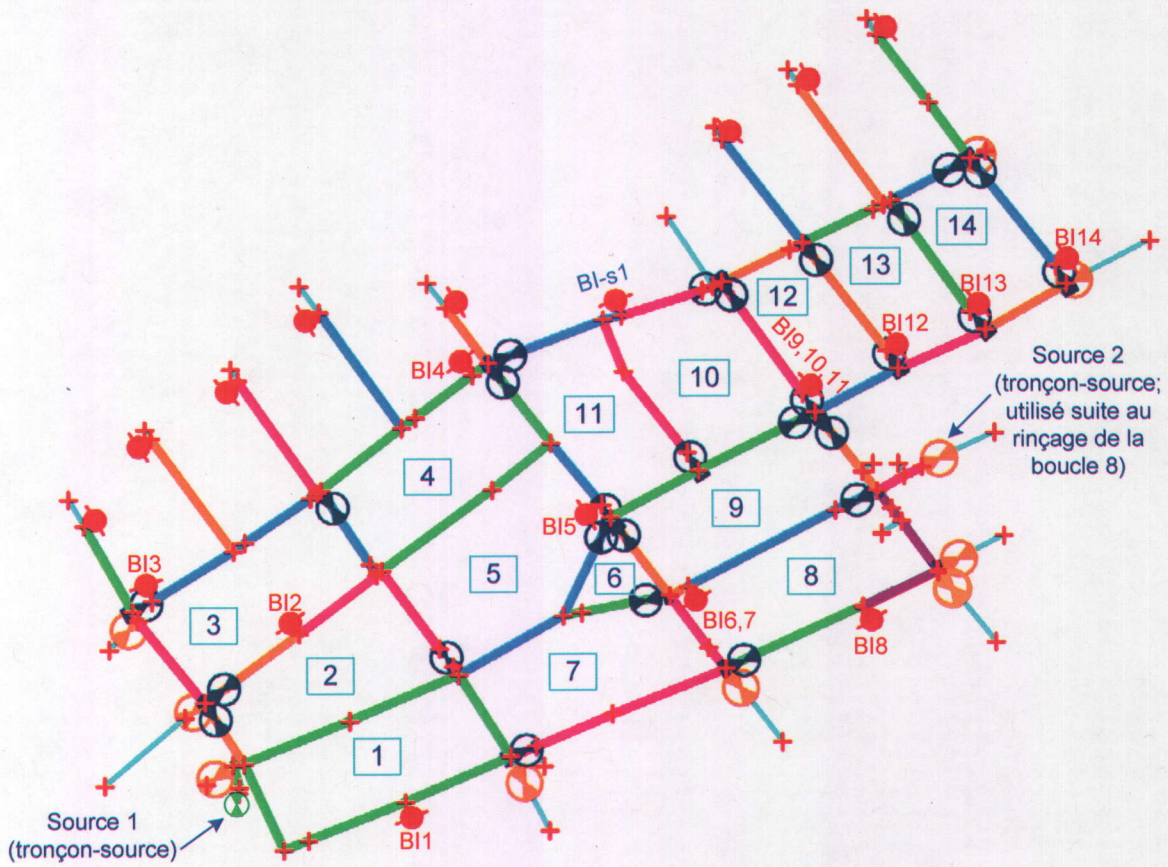
Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 (seule candidate, 3a.2-i)

BI1 : règle 2.9-ii (2.2, 2.5-2.7-i + 2.8-iii-CAS2)
BI2 : règles 3b.2à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI4 : règle 3b.9-i (3b.3 à 3b.7-i; seule candidate)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI6 : règle 3b.9-ii (3b.2, 2b.5 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS 1)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Le tronçon-source 1 est adjacent aux boucles 1 et 2, étant situé à l'intersection de ces deux boucles. L'une ou l'autre pourrait être sélectionnée en tant que première candidate au rinçage. Cependant, conformément à la règle 1.2, la boucle 1 est celle dont le linéaire partagé avec des boucles voisines à rincer est minimal (i.e. celle qui se trouve le plus en « périphérie » du secteur à rincer).
2) Les boucles 1 et 6 doivent être rincées, chacune, en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règles 2.9-ii et 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur ces boucles ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 2.2-2.7 (respectivement 3b.2-3b.7).

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 048



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 7 : rinçage par la même borne que la boucle 6 (3a.1)
Boucle 8 : conduites partagées avec la boucle 7 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 9 : conduites partagées avec la boucle 8 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 10 : rinçage par la même borne que la boucle 9 (3a.1)
Boucle 11 : conduites partagées avec la boucle 10 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 12 : % de linéaire partagé avec des boucles rincées précédemment (3a.2-ii)
Boucle 13 : conduites partagées avec la boucle 12 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 14 : conduites partagées avec la boucle 13 (seule candidate, 3a.2-i)

Justifications du choix des bornes, selon les règles de la procédure de RUD :

BI1 : règle 2.9-ii (2.2, 2.5 à 2.7-i + 2.8-iii-CAS 2)
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 7-i + 3b.8-iii-CAS1)
BI5 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 7-i + 3b.8-iii-CAS2)
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI7 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI8 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI9 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI10 : règles 3b.2 à 3b.7i + 3b.8-i
BI11 : règle 3b.9-iii (3b.3 à 3b.7-i)
BI12 : règles 3b.2 à 3b.7i (seule candidate)
BI13 : règles 3b.2 à 3b.7i (seule candidate)
BI14 : règles 3b.2 à 3b.7i (seule candidate)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Le tronçon-source 1 est adjacent aux boucles 1 et 2, étant situé à l'intersection de ces deux boucles. L'une ou l'autre pourrait être sélectionnée en tant que première candidate au rinçage. Cependant, conformément à la règle 1.2, la boucle 1 est celle dont le linéaire partagé avec des boucles voisines à rincer est minimal (i.e. celle qui se trouve le plus en « périphérie » du secteur à rincer).

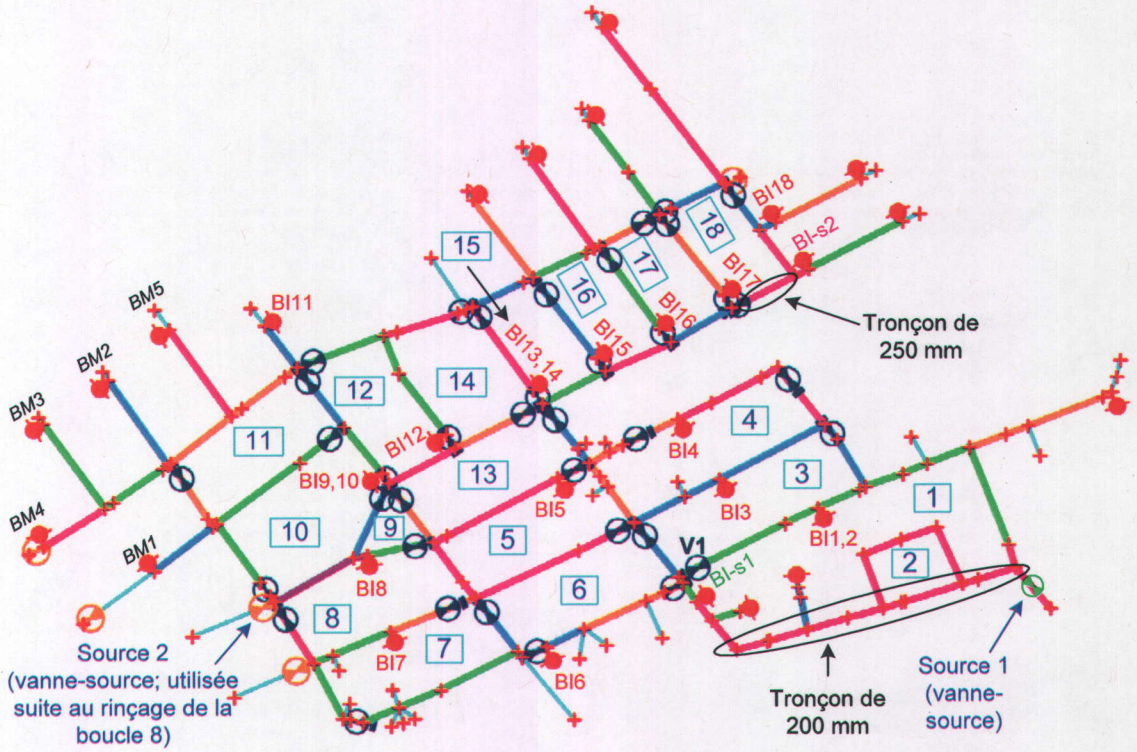
2) Le rinçage de la boucle 11 (séquence unique), pour lequel aucune borne ne peut être identifiée en respectant les règles 3b.2 à 3b.7, est intégré à celui de la boucle 10 (règle 3b.9-iii).

3) L'intégration du rinçage de la boucle 11 à celui de la boucle 10 engendre des vitesses inférieures à 1 m/s. La borne BI-s1 est alors utilisée et les séquences sont scindées (règle 5c.1-i-ESSAI 2) : sans nécessiter la manipulation de vannes supplémentaires, une première séquence est rincée par BI-s1, et une seconde par BI9,10,11, prévue au départ.

4) Le tronçon de couleur violette appartient à la fois à la séquence bleue pour le rinçage de la boucle 8 et à la séquence de changement de source (annexe 4). BI8 est donc utilisée pour le rinçage de la boucle 8 et pour la séquence de changement de source.

5) Les boucles 1, 4 et 5 sont rincées, chacune, en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règles 2.9-ii et 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur ces boucles ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 2.2-2.7 (respectivement 3b.2-3b.7).

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 057



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 6 : conduites partagées avec la boucle 5 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 7 : conduites partagées avec la boucle 6 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 8 : conduites partagées avec la boucle 7 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 9 : conduites partagées avec la boucle 8 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 10 : rinçage par la même borne que la boucle 9 (3a.1)
Boucle 11 : conduites partagées avec la boucle 10 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 12 : conduites partagées avec la boucle 11 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 13 : conduites partagées avec la boucle 12 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 14 : rinçage par la même borne que la boucle 13 (3a.1)
Boucle 15 : conduites partagées avec la boucle 14 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 16 : conduites partagées avec la boucle 15 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 17 : conduites partagées avec la boucle 16 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 18 : conduites partagées avec la boucle 17 (seule candidate, 3a.2-i)

Justifications du choix des bornes, selon les règles de la procédure de RUD :

BI1 : règle 2.9-ii (2.2, 2.5 à 2.7-iii; seule candidate)
BI2 : règle 3b.9-iii (3b.3 à 3b.7-i)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI4 : règle 3b.9-ii (3b.2, 3b.5 à 3b.7-i)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI7 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI8 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI9 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI10 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI11 : règle 3b.9-i (3b.3 à 3b.7-i + 3b.8-iii-CAS 1)
BI12 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)
BI13 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-ii
BI14 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI15, 16, 17 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seules candidates)
BI18 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-iii (CAS 2)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) Les boucles 1 et 3 sont rincées, chacune, en deux séquences unidirectionnelles simultanées (règles 2.9-ii et 3b.9-ii). Les bornes et vannes situées sur ces boucles ne permettent pas, *a priori*, le respect des règles 2.2-2.7 (respectivement 3b.2-3b.7).

2) Le rinçage de la boucle 2 (séquence unique), pour lequel aucune borne ne peut être identifiée en respectant les règles 3b.2 à 3b.7, est intégré à celui de la boucle 1 (règle 3b.9-iii).

3) L'intégration du rinçage de la boucle 2 à celui de la boucle 1 engendre des vitesses inférieures à 1 m/s, en raison de la présence d'un tronçon de 200 mm (8 po). La séquence rose le long de laquelle se trouve le tronçon est alors scindée (règle 5c.1-i-ESSAI 2) : nécessitant la manipulation de la vanne V1 (non prévue à l'origine), une première séquence est rincée par BI-s1, ensuite les séquences simultanées sont rincées par BI1,2, prévue au départ.

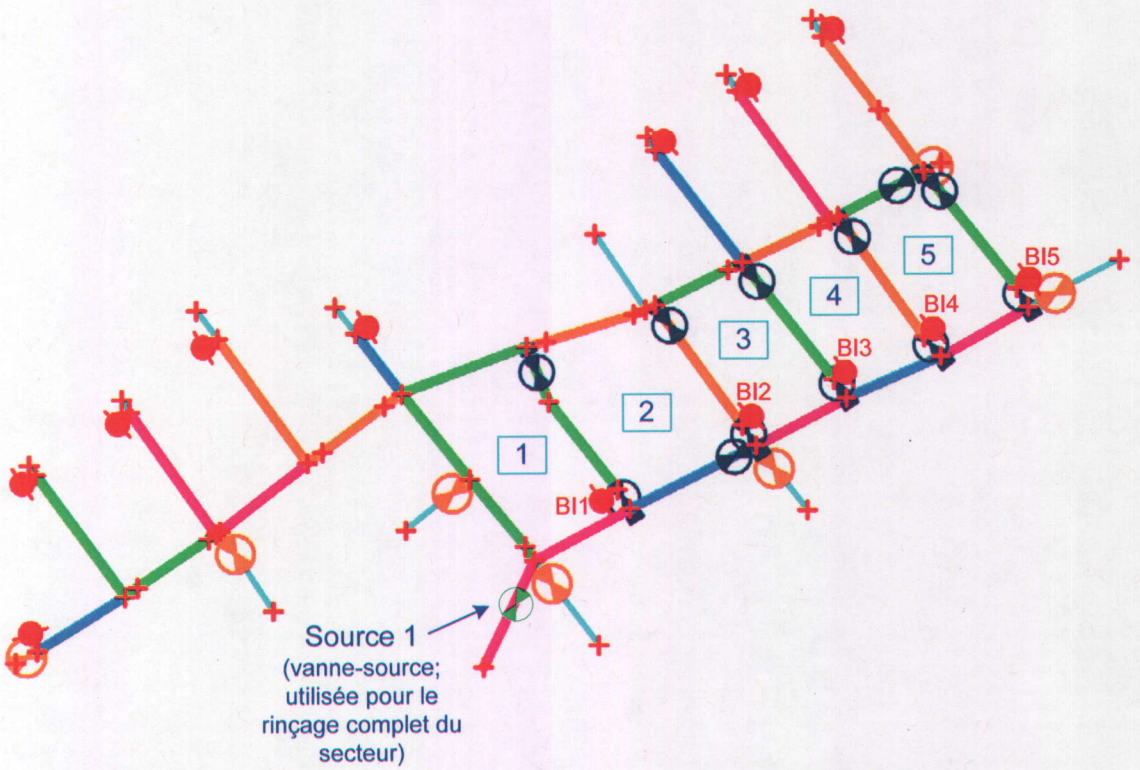
4) La borne BI-s2 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse en raison de la présence d'un tronçon de 250 mm (10 po). Elle est ouverte de façon simultanée avec la borne BI18, prévue au départ (règle 5c.1-i-ESSAI 1).

5) Le tronçon de couleur violette appartient à la fois à la séquence rose pour le rinçage de la boucle 8 et à la séquence de changement de source (annexe 4). BI8 est donc utilisée pour le rinçage de la boucle 8 et pour la séquence de changement de source.

6) Les bornes et vannes se trouvant sur la boucle 11 ne permettent pas de créer deux séquences unidirectionnelles sur cette boucle, tout en respectant les règles 3b.2 à 3b.7. Une borne d'un BM adjacent est alors sélectionnée (règle 3b.9-i). Deux BM étant candidats à cette fin, la borne sélectionnée est celle qui permet la meilleure répartition de la résistance hydraulique parmi les deux séquences (règle 3b.8-iii-CAS 1), en plus de respecter les règles 3b.3-3b.7-i.

7) Les indications BM1 à BM5 donnent l'ordre dans lequel les BM adjacents à la boucle 11 sont rincés. Conformément à la règle 5b.3-i, ils sont rincés suite à la séquence orange à laquelle ils sont adjacents.

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 060

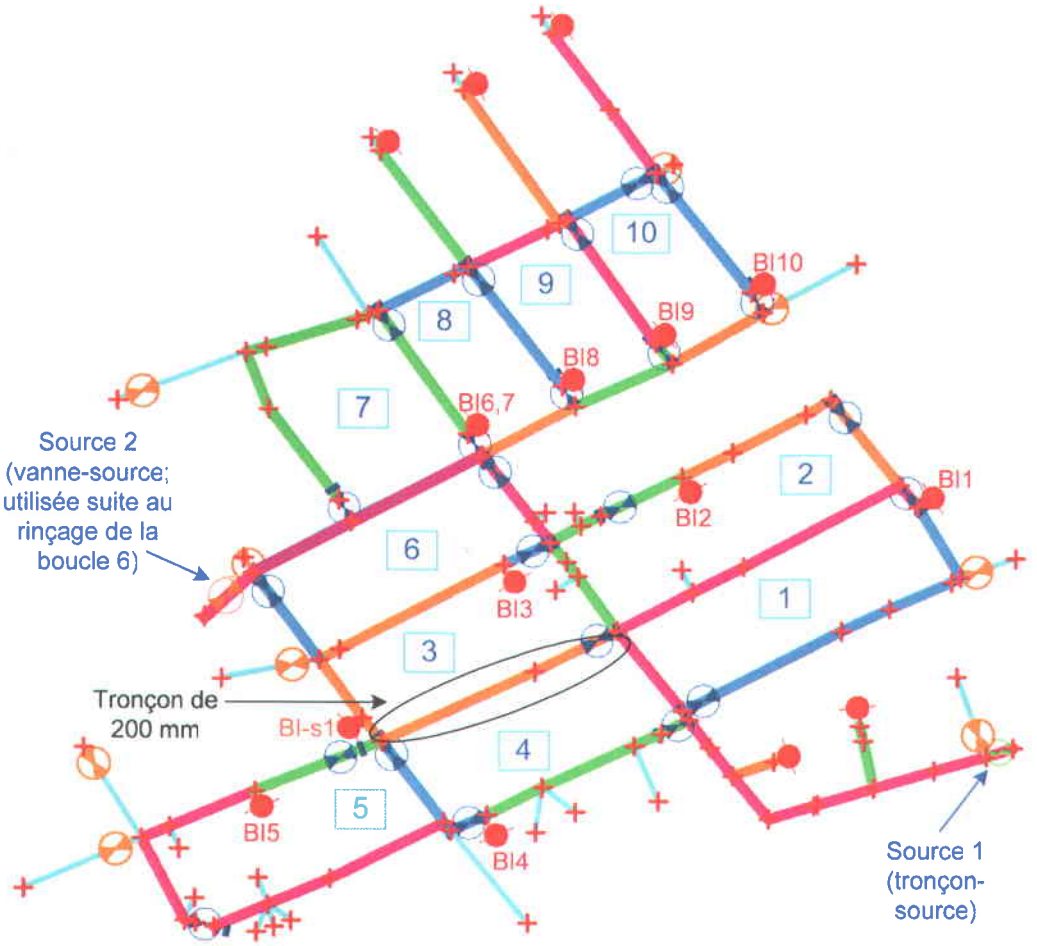


Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) et du choix des bornes :

Boucle 1 : adjacence à la source 1 (1.2)
Boucle 2 : partage des conduites avec la boucle 1 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 3 : partage des conduites avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : partage des conduites avec la boucle 3 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 5 : partage des conduites avec la boucle 4 (seule candidate, 3a.2-i)

BI1 : règles 2.2 à 2.7-i + 2.8-iii (CAS 2)
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)

TERRASSE-VAUDREUIL, 1RE DÉTECTION AU DÉTECTEUR 201



Justification de l'ordre de rinçage des boucles (les règles de la procédure de RUD qui s'appliquent sont indiquées entre parenthèses) :

Boucle 1 : partage des conduites avec la boucle sur laquelle se trouve le tronçon-source (1.2; annexe 4)
Boucle 2 : conduites partagées avec la boucle 1 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 3 : conduites partagées avec la boucle 2 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 4 : conduites partagées avec la boucle 3 et % de linéaire rincé précédemment (3a.2-i-CAS 2)
Boucle 5 : conduites partagées avec la boucle 4 et boucle partiellement isolée (3a.2-i-CAS 1)
Boucle 6 : % de linéaire partagé avec des boucles rincées précédemment (3a.2-ii)
Boucle 7 : rinçage par la même borne que la boucle 6 (3a.1)
Boucle 8 : conduites partagées avec la boucle 7 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 9 : conduites partagées avec la boucle 8 (seule candidate, 3a.2-i)
Boucle 10 : conduites partagées avec la boucle 9 (seule candidate, 3a.2-i)

Justifications du choix des bornes, selon les règles de la procédure de RUD :

BI1 : règles 2.2 à 2.7-iii (seule candidate)
BI2 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI3 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI4 : règles 3b.2 à 3b.7-i
BI5 : règles 3b.2 à 3b.7-ii (seule candidate)
BI6 : règles 3b.2 à 3b.7-ii + 3b.8-ii
BI7 : règles 3b.2 à 3b.7-i + 3b.8-i
BI8 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI9 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)
BI10 : règles 3b.2 à 3b.7-i (seule candidate)

Notes se rapportant au rinçage du secteur :

1) La borne BI-s1 est une borne supplémentaire pour l'atteinte du critère de vitesse en raison de la présence d'un tronçon de 200 mm (8 po). La séquence (orangée) le long de laquelle elle se trouve est alors scindée : sans nécessiter la manipulation de vannes supplémentaires, une première séquence est rincée par BI-s1, et une seconde par BI3, prévue au départ (règle 5c.1-i-ESSAI 2).

2) Le tronçon de couleur violette appartient à la fois à la séquence bleue pour le rinçage de la boucle 6 et à la séquence de changement de source (annexe 4). BI6,7 est donc utilisée pour le rinçage de la boucle 6 et pour la séquence de changement de source.