POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Impact du changement de source d'approvisionnement sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution
Auteur: Author:	Philippe Goyer-Desrosiers
Date:	2016
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Goyer-Desrosiers, P. (2016). Impact du changement de source d'approvisionnement sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2420/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2420/
Directeurs de recherche: Advisors:	Michèle Prévost
Programme: Program:	Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

IMPACT DU CHANGEMENT DE SOURCE D'APPROVISIONNEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU DANS LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

PHILIPPE GOYER-DESROSIERS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

DÉCEMBRE 2016

© Philippe Goyer-Desrosiers, 2016.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

IMPACT DU CHANGEMENT DE SOURCE D'APPROVISIONNEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU DANS LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

présenté par : GOYER-DESROSIERS Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BARBEAU Benoit, Ph. D., président

Mme PRÉVOST Michèle, Ph. D., membre et directrice de recherche

Mme BESNER Marie-Claude, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de recherche Michèle Prévost, professeure et titulaire de la Chaire industrielle CRNSG en Eau Potable, qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce projet de recherche. Je lui en serai éternellement reconnaissant. J'ai été impressionné par son grand cœur, son expertise, son intelligence, son énergie débordante, son positivisme face à une charge de travail colossale et surtout son souci du détail. Merci d'avoir cru en moi.

Je dois également remercier son associée de recherche Elise Deshommes qui m'a guidé durant le projet. J'ai appris énormément à ses côtés grâce à sa rétroaction sur chacun de mes travaux. Julien Durand et moi sommes très chanceux d'avoir pu compter sur elle. Je tiens à remercier Yves Fontaine pour les échantillonnages du projet. Je garderai un bon souvenir des campagnes d'échantillonnage avec lui et de nos discussions dans le camion sur ses enfants et les films à venir de l'univers Star Wars.

Je tiens à remercier Christianne Cyrenne, chef de division à la Ville de Montréal, pour le suivi de mes demandes durant le projet. Merci à André Marcotte, chargé des communications à la Ville, pour son aide lors de l'installation des montages d'appareils dans les bâtiments. Merci aussi aux agents techniques Jaouad Rmili et Guillaume Gingras. Ils étaient toujours présents pour déverrouiller les portes des bâtiments à échantillonner et me fournir des informations sur les travaux. Merci également à Marie Maurel de *VEOLIA WATER* pour son aide en lien avec le traitement des données des sondes Kapta^{tm}. Merci à Laurent Laroche de la division de l'expertise technique pour l'envoi des données d'usines. Merci également aux contremaîtres des usines de la Ville. Je souhaite remercier Mireille Blais pour les analyses ICP des métaux. C'était toujours un plaisir de passer la voir au laboratoire. Merci à Evelyne Doré pour ses conseils sur la préparation des échantillons pour les analyses XRD. Merci à Jean-Philippe Masse du Centre de Caractérisation Microscopique des Matériaux (CM)^2 pour les analyses par XRD. Je tiens à remercier Laura Razafinjanahary, secrétaire de Michèle, qui a facilité mon intégration dans l'équipe de la *CICEP*.

Finalement, je remercie le reste du personnel de la *CICEP* et du *CREDEAU*. Je salue également les étudiants qui liraient ce mémoire. Bon courage ! Votre travail est important.

RÉSUMÉ

Introduction. Les épisodes d'eau rouge sont le résultat de perturbations des dépôts de corrosion suite à des périodes de stagnation, des procédures de rinçage ou des changements de pression et de changements de vitesse dans les systèmes de distribution. Ils représentent une cause fréquente de plaintes des consommateurs. Des épisodes d'eau rouge ont aussi été rapportés suite à des changements de source d'eau potable puisqu'il y a des modifications des caractéristiques de l'eau qui entraînent des instabilités au niveau des dépôts de corrosion. Considérant leur occurrence sporadique et localisée, et les méthodes de suivi ponctuelles pratiquées par les municipalités, de tels épisodes sont difficiles à détecter et à prévenir. Compte tenu des inquiétudes croissantes sur l'impact potentiel de relargage de biofilm et de métaux, dont certains toxiques accumulés dans les dépôts de corrosion, il est important de comprendre les causes de ces événements pour les prévenir et en déterminer l'importance. Les principaux objectifs de ce projet étaient de (i) mesurer l'impact du changement de source d'approvisionnement sur la qualité de l'eau en utilisant le suivi en continu et le suivi ponctuel hebdomadaire, (ii) comparer les avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel et (iii) déterminer la composition des dépôts de corrosion de conduites du secteur.

Méthodologie. Cinq lieux d'échantillonnage ont été sélectionnés dans un réseau de distribution d'eau potable ayant des problèmes récurrents d'eau rouge depuis une dizaine d'années. Le réseau de distribution devait subir un changement de source d'approvisionnement pour améliorer la qualité de l'eau alimentant le secteur. L'eau distribuée par l'usine A présente des changements saisonniers de la qualité de l'eau (alcalinité totale, dureté et COT). Le changement d'alimentation vers l'usine B permet d'alimenter le réseau avec une qualité d'eau plus stable et moins corrosive (principalement l'alcalinité totale). Plusieurs appareils de suivi en continu, y compris les sondes multiparamètres Kapta^{tm} 3000-AC4, ont été utilisées pour mesurer la conductivité, le chlore actif (HOCl), le pH, la température et la turbidité pendant plus de 3 mois avant le changement de source. Le suivi a été poursuivi durant plus de 3 mois après le passage à l'alimentation vers l'usine B. En parallèle du suivi en continu, des campagnes d'échantillonnages ponctuels ont été effectuées périodiquement (n = 27) pour évaluer la turbidité, le pH, la conductivité, la température, le chlore résiduel libre, l'oxygène dissous, le fer total et dissous, le manganèse total et dissous et le potentiel redox aux points de suivi.

Résultats. Le suivi en continu de la conductivité et du pH a clairement montré la transition de l'alimentation en eau de l'usine A vers l'usine B (160-180 à 300-321 µS/cm et 7,0-7,4 à 7,8-7,9 unités de pH). Ces deux paramètres étaient les meilleurs indicateurs du changement de source. Après le changement de source d'approvisionnement, les concentrations de chlore résiduel libre ont varié plus ou moins selon le site considéré. Ces variations reflètent les nouveaux temps de séjour de l'eau de chaque site après le changement de configuration hydraulique du secteur. Les premiers épisodes d'eau rouge observés après le changement de source aux trois points de suivi sont modérés (turbidité < 10 UTN), causés par le changement de configuration hydraulique et concentrés pendant la première semaine après la manipulation des vannes (6 au 13 juin). Puis, d'autres épisodes ont été observés du 13 juillet au 29 juillet, de forte intensité (turbidité jusqu'à 32 UTN), correspondant à l'augmentation de température de l'eau dans le réseau entre 20,0 et 23,4°C à des sites où le temps de séjour de l'eau avait augmenté. Le réseau de distribution à l'étude s'est apparemment stabilisé progressivement deux mois et demi après le changement, ce qui coïncide avec la diminution de la température de l'eau du réseau sous 20,0°C à la fin du mois de septembre. Aussi, le changement de configuration hydraulique causé par le changement de source d'approvisionnement est associé à une augmentation des bris de conduites durant le mois de juin 2016. En effet, comparativement au pic historique de bris dans le réseau de distribution d'eau pour le même mois, 4 bris supplémentaires ont été occasionnés. De plus, il y a eu 5 bris situés dans la zone du changement de source. Il y a eu 12 plaintes de citoyens le jour du changement de source d'approvisionnement.

Les mesures du suivi en continu sont bien corrélées à celles du suivi ponctuel effectué avec des méthodes de mesure de référence pour la conductivité, le pH et la température. Cependant, les mesures du suivi en continu de la turbidité diffèrent significativement de celles obtenues par suivi ponctuel, potentiellement en raison de problèmes de correspondance temporelle des échantillons. Par contre, contrairement au suivi ponctuel, le suivi en continu a permis de déterminer le nombre exact d'épisodes de turbidité élevée correspondant aux épisodes d'eau rouge, la valeur du pic maximum et la durée des événements. Dans le cadre du projet, 36 épisodes de turbidité dépassant 5 UTN ont été identifiés avec le suivi en continu (1 épisode en suivi ponctuel). De ces 36 épisodes, 42% des épisodes de turbidité ont duré moins de 20 minutes et 64% moins de 2 heures. Considérant que le temps de réaction aux plaintes des consommateurs en réseau est en général supérieur à 2 heures, l'épisode risque d'être terminé avant l'intervention des exploitants. Une mesure en continu

de la turbidité est grandement préférable pour détecter les augmentations de turbidité avant l'arrivée de plaintes et comprendre les tendances dans le réseau pour améliorer les interventions. Aussi, malgré la consistance des données de suivi ponctuel et continu pour le chlore libre, la conductivité, le pH et la température, seul le suivi en continu permettait de détecter des variations journalières et transitoires de ces paramètres. Finalement, l'analyse de la composition des dépôts de corrosion prélevés dans les conduites de fonte du réseau étudié a révélé la présence de goethite (α-FeO(OH)), de lépidocrocite (γ-FeO(OH)), de magnétite (Fe_3O_4) et de maghémite (γ-Fe_2O_3). De tels dépôts sont potentiellement relargués lors du changement de source.

Conclusions. Le suivi en continu de la concentration de chlore résiduel, du pH, de la température et de la turbidité a permis d'identifier l'amplitude et la durée des impacts à court et moyen terme du changement de source d'approvisionnement. Le suivi de la turbidité, effectué par un turbidimètre classique en dérivation, a été très informatif et le potentiel de ce paramètre pour le suivi des épisodes d'eau rouge apparaît élevé. Combiné à la mesure de chlore actif, le suivi de la turbidité permettrait d'identifier plusieurs phénomènes pouvant affecter la qualité de l'eau du réseau (travaux, pression négative, bris, intrusion et long temps de séjour). Les résultats suggèrent que le suivi en continu est mieux adapté pour quantifier l'ampleur et la durée des épisodes de pertes de chlore résiduel, d'eau rouge et de turbidité. Les mesures de qualité ont été effectuées en dérivation, ce qui a éliminé la possibilité de suivi en continu par la sonde de mesure de pression à haute résolution temporelle. Il serait préférable d'utiliser des sondes en insertion de manière à éviter l'influence des entrées de service sur la qualité. Actuellement, il n'existe pas de sondes autonomes en insertion permettant de mesurer la turbidité ou le pH. L'utilisation des sondes en continu pour la mesure du chlore actif est possible que si des vitesses d'écoulement de plus de 0,03 m/s sont présentes. Le potentiel de suivi en continu de la génération de sondes Kapta testées est limité dans les secteurs du réseau à faible vitesse (p. ex. culs-de-sac). Or, c'est à ces sites que la qualité de l'eau est la plus critique. Pour établir un lien entre la turbidité et la consommation du secteur, un débitmètre magnétique pourrait également être installé sur la conduite. Compte tenu du nombre de sites conformes aux exigences d'installation du manufacturier en termes d'inclinaison de dégagement, l'installation de sondes Kapta^{tm} par insertion n'est envisageable que dans les chambres de vannes du réseau qui ont déjà des appareils de télémétrie (minimalement le pH et la turbidité).

ABSTRACT

Introduction. Red water events can result from the disruption and release of iron scale following flushing procedures or changes in pressure, velocities and stagnation patterns in distribution systems. Red water events are the most frequent reason for consumer complaints. Red water events are also related to water quality changes that lead to instabilities in corrosion deposits. Such episodes are difficult to detect and prevent. Considering the growing concerns over the transport of biofilm and toxic metals accumulated in scales, it is important to understand the causes of these events to improve water quality. The main objectives of this project were to (i) measure the impact of the change of water supply using on-line monitoring and on-site sampling (ii) compare the advantages of the on-line monitoring in relation to the on-site sampling and (iii) determine the composition of corrosion deposits from the pipes of the sector.

Methodology. 5 monitoring sites were selected in a distribution system scheduled to change water supplied from plant A with seasonal changes in water quality (total alkalinity, hardness and TOC) to plant B with stable water quality (mainly total alkalinity). The water distribution system was subject to red water complaints (+10 years). On-line sensors, including the Kapta^{tm} 3000-AC4, were used to monitor conductivity, active chlorine (HOCl), pH, temperature and turbidity during more than 3 months before the change of water source. Monitoring continued over 3 months after the switch to plant B using on-line sensors and sampling each week. Sampling at each site evaluated turbidity, pH, conductivity, temperature, chlorine residual, dissolved oxygen, iron, manganese and ORP (n=27).

Results. The on-line monitoring of conductivity and pH clearly revealed the transition from plant A to plant B (160-180 to 300-321 µS/cm and 7.0-7.4 to 7.8-7.9 pH units). These two parameters were the best indicators of the change of water source. After the change of water supply, the concentrations of free residual chlorine varied more or less depending on the site considered. These variations reflect the new water residence time at each site after the change of hydraulic configuration in the area. The red water events after the change of water source are moderate (<10 NTU), caused by the change of hydraulic configuration and concentrated during the first week after handling valves (June 6 to June 13). Then, they are concentrated from July 13 to July 29, with high intensity (up to 32 NTU) and seem favored by the increase in water temperature between 20.0 and 23.4 °C and the stagnation of water in the pipe.

The water distribution system quickly stabilizes two and half months after the change of water source, coinciding with the decrease in water temperature (< 20°C) at the end of September. In addition, the change of hydraulic configuration caused an increase in pipe breaks during June (the month following the water change). Indeed, compared to the historical peak of breakage in the water distribution system for the same month, there were 4 additional breaks. There were 5 breaks in the sector that is part of the study. In addition, there have been 12 citizen complaints on the day of the change of water source.

Measurements of the on-site sampling are consistent with those of the on-line monitoring for conductivity, [free chlorine residual], pH and temperature. However, there is a significant difference between measures of on-line monitoring and on-site sampling for turbidity due to rapid changes of this parameter over time. Only the on-line monitoring could determine the exact amount of red water and high turbidity events, the value of the maximum peak and the duration of the events. During the project, there were 36 events of turbidity exceeding 5 NTU (1 event with the on-site sampling). Of these 36 episodes, 42% of turbidity episodes lasted less than 20 minutes and 64% of turbidity episodes lasted less than 2 hours. Considering the time required to go to the site and do the on-site samplings (over 2 hours), sampling is unnecessary for most esthetic complaints. Therefore, the related reaction time in response to a complaint is critical since the episode may be finished already. On-line measurements of turbidity is highly preferable to detect turbidity events before the complaints and to improve interventions. Finally, only the on-line monitoring can detect transient events affecting the parameters (free chlorine residual, conductivity, pH, temperature and turbidity). The composition of the corrosion deposits of pipes is determined by X-ray diffraction (XRD). The presence in the deposits of goethite (α-FeO (OH)), lepidocrocite (γ-FeO (OH)), magnetite (Fe_3O_4) and maghemite (γ-Fe_2O_3) is confirmed. Deposits containing these crystalline phases are potentially leached during the change of water source.

Relevance: The on-line monitoring of chlorine residual, pH, temperature and turbidity can identify short and medium-term impacts of the supply source of change. The monitoring of the turbidity, carried out by a conventional turbidimeter in bypass, was very informative and the potential of this parameter for the follow-up of red water events appears high. Combined with the measurement of active chlorine, turbidity monitoring would identify several phenomena that could affect the water quality of the distribution system (construction works, negative pressure, pipe breaks, contamination and water residence time). It would be preferable to use insertion probes to avoid

the influence of service line pipes on water quality. The measurement of active chlorine is only possible if the velocity is higher than 0.03 m/s. Due to the change in hydraulic configuration, deterioration of the water quality (low concentration of free chlorine and increase in turbidity) is expected in the new dead ends of the water distribution system. It is at these sites that water quality is the most critical. A magnetic flow meter must also be installed. Due to the installation requirements, the Kapta^{tm} probe should be installed in valve chambers that already have telemetry devices (minimally pH and turbidity).

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES X

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XX

LISTE DES ANNEXES XXI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4

2.1 Éclosions de maladies d'origine hydrique au Canada et aux É.-U. 4

2.2 Détérioration de la qualité de l'eau potable en réseau 6

2.3 Corrosion du fer et enjeux pour le réseau 10

2.4 Occurrence des épisodes d'eau rouge dans les réseaux en fonte grise non revêtue ou d'acier galvanisé 15

2.5 Changement de source d'eau potable 20

2.6 Utilisation de sondes de suivi en continu pour le suivi de la qualité de l'eau en réseau 21

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE 24

3.1 Objectif général du projet 24

3.2 Objectifs spécifiques du projet 24

3.3 Hypothèse de recherche 25

3.4 Justification de l'originalité 25

CHAPITRE 4 MATÉRIEL ET MÉTHODES 26

4.1 Présentation du secteur à l'étude 26

4.2 Description du secteur pilote 27

4.3 Description du secteur lors du changement complet d'alimentation 30

4.4 Mesure de la conductivité, du chlore actif, de température et de pression par la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 de Veolia Water 32

4.5 Calcul des indices d'agressivité, de Langelier et de Ryznar de l'eau distribuée pour l'année 2015 34

4.6 Calcul du carbone inorganique dissous (DIC) 35

4.7 Représentativité des mesures du suivi en continu 36

4.8 Suivi de 4 sites du secteur pilote 38

4.9 Suivi de 5 sites lors du changement de source d'approvisionnement 44

4.10 Analyse hydrodynamique de l'écoulement dans le réseau 51

4.11 Étude des bris de conduite dans la zone du changement de source 52

4.12 Analyse des dépôts de corrosion du réseau 52

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION 54

5.1 Comparaison des caractéristiques de l'eau distribuée en 2015 des usines A et B 54

5.2 Résultats du suivi du secteur pilote 58

5.3 Résultats du suivi lors du changement complet d'alimentation du 7 juin 2016 63

5.4 Impact du changement de source sur le nombre de bris de conduites dans le secteur 104

5.5 Analyse des dépôts de corrosion du réseau de distribution 108

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 112

BIBLIOGRAPHIE 117

ANNEXES 123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Nombres d'éclosions, de cas de maladies, d'hospitalisations et de décès causés par les déficiences du réseau de distribution aux États-Unis de 1971 à 1998 (Craun & Calderon, 2001).....5

Tableau 2.2 : Nombre d'éclosions en fonction du type de déficience du réseau de distribution public aux États-Unis de 1971 à 1998 (Craun & Calderon, 2001) 5

Tableau 2.3 : Exigences du règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) aux extrémités du réseau (Gouvernement du Québec, 2011) 7

Tableau 2.4 : Suivi du pH et de la turbidité de l'eau potable du réseau de distribution d'une municipalité desservant plus de 5 000 personnes (Gouvernement du Québec, 2011).....8

Tableau 2.5 : Paramètres esthétiques liés aux plaintes des consommateurs (Health Canada, 2014) 8

Tableau 2.6 : Paramètres et indices de qualité d'eau recommandés pour limiter la corrosion du fer 11

Tableau 2.7 : Réactions liées au relargage de fer dans l'eau (Sarin et al., 2004) 12

Tableau 2.8 : Composition des dépôts de corrosion (McNeill & Edwards, 2001) 15

Tableau 2.9 : Proposition de définition de l'eau rouge à partir des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Health Canada, 2004).....16

Tableau 2.10 : Description du suivi en continu et du suivi ponctuel de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution (Besner, 2013).....22

Tableau 4.1 : Dates de début et de fin des suivis du projet 27

Tableau 4.2 : Détails des sites de suivi du secteur pilote 29

Tableau 4.3 : Détails des 5 sites de suivi lors du changement complet d'alimentation 31

Tableau 4.4 : Types de bâtiment, caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 4 points de suivi.....40

Tableau 4.5 : Suivi en continu - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils de suivi en continu en fonction du composé.....42

Tableau 4.6 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Protocole d'échantillonnage 43

Tableau 4.7 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils en fonction du paramètre 44

Tableau 4.8 : Types de bâtiments, caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 5 points de suivi lors du changement de source d'approvisionnement.....46

Tableau 4.9 : Suivi en continu - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils de suivi en continu en fonction du paramètre 48

Tableau 4.10 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Protocole d'échantillonnage 49

Tableau 4.11 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils en fonction du composé 50

Tableau 4.12 : Concentration médiane C_0 selon l'usine de production d'eau potable.....51

Tableau 4.13 : [Chlore résiduel médian] aux points de suivi et à l'usine (mg Cl_2 équiv./L).....52

Tableau 5.1 : Comparaison des caractéristiques des eaux distribuées en 2015 par les usines A et B 56

Tableau 5.2 : Résultats du calcul du nombre de montages requis dans le secteur pour un suivi général de la qualité de l'eau dans la zone du changement de source d'approvisionnement 66

Tableau 5.3 : Résultats du calcul du rayon d'influence du point de suivi selon la recommandation de 20 ou 30 km de conduites par montage de Veolia.....67

Tableau 5.4 : Bilan des impacts du changement de source aux points de suivi.....90

Tableau 5.5 : Nombre et durée des épisodes d'eau rouge (turbidité >5 UTN) aux points de suivi subissant le changement de source entre le 14 mars 2016 et le 27 septembre 2016. 91

Tableau 5.6 : Comparaison des avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel hebdomadaire 104

Tableau 5.7 : Comparaison des pourcentages de bris en 2016 et de l'historique (2002 à 2015) en fonction du diamètre de la conduite pour les mois de juin à septembre 107

Tableau 5.8 : Caractéristiques des conduites analysées par XRD.....109

Tableau 6.1 : Proposition pour le suivi de la turbidité en réseau 115

Tableau B.1 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge à l'Hôtel de Ville 125

Tableau B.2 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge à l'école 126

Tableau B.3 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge au Parc 127

Tableau C.1 : Date et heure des échantillonnages ponctuels 128

Tableau C.2 : Concentration chlore libre en fonction du point de suivi et de la date 129

Tableau C.3 : Conductivité en fonction du point de suivi et de la date 130

Tableau C.4 : Température en fonction du point de suivi et de la date 131

Tableau C.5 : Concentration de manganèse dissous en fonction du point de suivi et de la date . 132

Tableau C.6 : Concentration de manganèse total en fonction du point de suivi et de la date 133

Tableau C.7 : Concentration de fer dissous en fonction du point de suivi et de la date 134

Tableau C.8 : Concentration de fer total en fonction du point de suivi et de la date 135

Tableau C.9 : Oxygène dissous en fonction du point de suivi et de la date 136

Tableau C.10 : Chlore total en fonction du point de suivi et de la date 137

Tableau C.11 : pH en fonction du point de suivi et de la date 138

Tableau C.12 : Turbidité en fonction du point de suivi et de la date 139

Tableau E.1 : Noms des échantillons des 5 analyses XRD 144

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Nombre d'éclosions dans les systèmes de distribution d'eau potable publics aux États-Unis entre 1971 et 1998 en fonction de la cause déterminée par l'enquête (Craun & Calderon, 2001).....4

Figure 2.2 : Répartition des plaintes du réseau *Montréal* (X0008084) de 2012 à 2015 (adapté des bilans du Service de l'eau de la Ville de Montréal).....9

Figure 2.3 : Répartition des plaintes esthétiques du réseau *Montréal* (X0008084) de 2012 à 2015 (adapté des bilans du Service de l'eau de la Ville de Montréal).....10

Figure 2.4 : Représentation des couches d'un dépôt de corrosion (Zhang et al., 2014).....13

Figure 2.5 : Schéma de la structure du tubercule d'une conduite en fonte (Sontheimer et al., 1981).....14

Figure 4.1 : Localisation de la zone du changement de source d'approvisionnement et des usines A et B.....26

Figure 4.2 : Position du secteur pilote et des points de suivi par rapport aux usines A et B.....27

Figure 4.3 : Position de la zone du changement de source et des points de suivi par rapport aux usines A et B.....30

Figure 4.4 : Sonde Kapta 3000-AC4 et boîtier GSM.....33

Figure 4.5 : Capture d'écran de la simulation RTW avec les caractéristiques moyennes.....35

Figure 4.6 : Équation du calcul du DIC de l'outil de calcul (Schock, 1990).....36

Figure 4.7 : Carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source et leur rayon d'influence (1 montage par 30 km de conduites).....37

Figure 4.8 : Croquis de l'ordre de travail de la Ville.....39

Figure 4.9 : Montage installé aux 4 points de suivi.....40

Figure 4.10 : Positionnement des points de suivi à l'intérieur et l'extérieur du secteur pilote.....41

Figure 4.11 : Positionnement des points de suivi à l'intérieur et l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement.....45

Figure 4.12 : Montage installé aux 5 points de suivi du secteur 47

Figure 4.13 : Positions des conduites des rues Mc Vey et Red Cross dans la zone du changement complet d'alimentation 53

Figure 5.1 : Variations saisonnières de l'alcalinité totale à l'eau distribuée de l'usine A en fonction de l'année (2007 à 2010) 54

Figure 5.2 : Variation de la conductivité à la Clinique en fonction de la source d'eau potable de mars à juin 2015 59

Figure 5.3 : Turbidité mesurée aux 4 points de suivi durant toute la période du suivi 60

Figure 5.4 : Concentration de fer total en fonction du temps et du point de suivi 62

Figure 5.5 : Carte de la zone et des vannes manipulées 63

Figure 5.6 : Localisation des plaintes du 7 juin 2016 (journée de la manipulation des vannes)....64

Figure 5.7 : Opération de fermeture des vannes de la Station de pompage 64

Figure 5.8 : Ouverture manuelle des vannes de rues.....65

Figure 5.9 : Carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source et leur rayon d'influence (1 montage par 30 km de conduites).....68

Figure 5.10 : Impact du changement de source d'approvisionnement sur la conductivité le 7 juin 2016.....71

Figure 5.11 : Variation de la conductivité mesurée par la sonde Kapta^{tm} à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau avant et après manipulation des vannes 72

Figure 5.12 : Variation de la conductivité mesurée par la sonde Kapta^{tm} au Parc en fonction dominance du mélange de sources d'eau avant et après manipulation des vannes.....73

Figure 5.13 : Comparaison des mesures de conductivité des sondes et de l'échantillonnage ponctuel durant le mois de septembre.....74

Figure 5.14 : Variation du pH à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 75

Figure 5.15 : Variation du pH à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 76

Figure 5.16 : Variation du pH au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 76

Figure 5.17 : Variation temporelle du chlore résiduel libre durant le période complète du suivi..78

Figure 5.18 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 79

Figure 5.19 : Variation des temps de séjour estimés à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 79

Figure 5.20 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 80

Figure 5.21 : Variation des temps de séjour estimés à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 81

Figure 5.22 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 82

Figure 5.23 : Variation des temps de séjour estimés au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau.....82

Figure 5.24 : Temps de séjour et positions des points de suivi par rapport aux entrées d'eau.....83

Figure 5.25 : Impact du changement de source sur la turbidité à la l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc.....85

Figure 5.26 : Variation du détail de la turbidité à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau.....86

Figure 5.27 : Variation du détail de la turbidité à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 86

Figure 5.28 : Variation du détail de la turbidité au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau 87

Figure 5.29 : Impact du changement de source et de la saison sur la température à l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc (température > 20°C dans la zone foncée du 13 juillet au 26 septembre) .89

Figure 5.30 : Turbidité élevée durant les 36h après la manipulation des vannes.....93

Figure 5.31 : Chute du chlore résiduel libre équivalent pendant les premières heures après la manipulation des vannes 94

Figure 5.32 : Relation linéaire entre le fer total et la turbidité aux points de suivi (n=80) 95

Figure 5.33 : Concentration d'oxygène dissous aux points de suivi en fonction du temps.....96

Figure 5.34 : Comparaison des mesures en continu (n = 577) et ponctuelles (n= 2) durant le changement d'alimentation 97

Figure 5.35 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la conductivité (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4) (n = 60 paires de valeurs) 98

Figure 5.36 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la température (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4) (n = 68 paires de valeurs).....99

Figure 5.37 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu du pH (sonde de pH Hach) (n = 82 paires de valeurs).....100

Figure 5.38 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la concentration de chlore résiduel libre (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 et sonde de pH Hach) (n = 78 paires de valeurs).....101

Figure 5.39 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la turbidité (n = 78 paires de valeurs) 102

Figure 5.40 : Localisation des bris sur le réseau secondaire des mois de juin et juillet à l'intérieur et à l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement 105

Figure 5.41 : Comparaison des bris après le changement de source en 2016 par rapport à l'historique de la Ville pour les mois de juin à septembre 106

Figure 5.42 : Renversement des pressions de la zone du changement de source 108

Figure D.1 : Dépôts de la conduite Mc Vey en fonte grise.....140

Figure D.2 : Détail d'un dépôt de la conduite Mc Vey en fonte grise 141

Figure D.3 : Dépôts de la conduite Red Cross en fonte 250 Delavaud.....142

Figure D.4 : Détail d'un dépôt de la conduite Red Cross en fonte 250 Delavaud 143

Figure E.1 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe1 145

Figure E.2 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe2 146

Figure E.3: Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe3 147

Figure E.4 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe4 149

Figure E.5 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe5 150

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

^{o}C	Degré Celsius
CICEP	Chaire industrielle CRNSG en Eau Potable
COT	Carbone organique total
DIC	Carbone inorganique dissous
HOCl	Acide hypochloreux
ICI	Industries, commerces et institutions
ICP	Spectrométrie à plasma à couplage inductif
OCl^-	Ion hypochlorite
pKa	Constante d'équilibre
PVC	Polychlorure de vinyle
RQEP	Règlement sur la Qualité de l'eau Potable
THM	Trihalométhanes
UCV	Unité de couleur vraie
UDF	Unidirectional flushing : rinçage unidirectionnel
UTN	Unité de turbidité néphélométrique
XRD	Diffractométrie de rayons X

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Fiche de la sonde Kapta 3000-AC4 123

Annexe B : Détails des épisodes d'eau rouge aux points subissant le changement de source 125

Annexe C : Mesures du suivi ponctuel lors du changement complet d'alimentation 128

Annexe D : Photographies des dépôts de corrosion des conduites Mc Vey et Red Cross 140

Annexe E : Résultats des analyses XRD 144

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les épisodes d'eau rouge sont liés à la corrosion des conduites et la déstabilisation des dépôts de fer suite à des procédures de rinçage ou des changements hydrauliques dans le réseau de distribution (Zhang et al., 2014). Ils représentent plus du tiers des plaintes des consommateurs et minent la confiance du client envers la qualité de l'eau du robinet et du service d'eau (Vreeburg, J. H. G. & Boxall, 2007). Des changements de source d'approvisionnement en eau ont aussi été reliés au relargage massif de dépôts dans les conduites tel que démontré par la crise majeure à Flint (MI) (Hanna-Attisha, LaChance, Sadler, & Champney Schnepp, 2016). Considérant la possibilité de relargage du biofilm et de métaux toxiques accumulés dans les dépôts suite à ces événements, il est important de comprendre la cause de ces épisodes pour améliorer la qualité de l'eau potable distribuée.

Un réseau de distribution d'eau potable avec des problèmes récurrents d'eau rouge depuis une dizaine d'années a été étudié. Ces épisodes sont causés par le relargage de dépôts de corrosion découlant des variations importantes d'alcalinité totale et de pH de l'eau distribuée. Les épisodes d'eau rouge sont problématiques puisque la couleur de l'eau est associée à la majorité des plaintes esthétiques. L'eau potable provient de l'usine A et la prise d'eau brute est située sur la Rive-Nord du fleuve Saint-Laurent entre le lac Saint-Louis et les rapides de Lachine. Il s'agit d'une position défavorable pour la stabilité de ses caractéristiques chimiques. De plus, le traitement à l'usine ne permet pas d'augmenter l'alcalinité totale et le pH suffisamment. Les variations de l'alcalinité totale à l'eau brute se manifestent donc également à l'eau distribuée du réseau. L'apport de la rivière des Outaouais à la prise d'eau brute provoque une dégradation de la qualité de l'eau brute qui se manifeste par la réduction de l'alcalinité totale et du pH et par une augmentation du carbone organique total (COT) et de la turbidité. Chaque année, l'apport de la rivière des Outaouais est maximal durant la période de mars à avril. Cet apport diminue progressivement jusqu'au minimum se produisant à la mi-juin. À ce moment, la qualité de l'eau est majoritairement influencée par le fleuve Saint-Laurent et se compare à l'eau brute des autres usines du territoire. La prise d'eau brute présente aussi des problèmes saisonniers de contamination en azote ammoniacal (NH_4) et plusieurs lacunes de conception et de sécurité selon des rapports d'ingénierie. Le poste de pompage qui alimente le réseau de distribution étudié dans le cadre du projet nécessite également des travaux.

Pour sécuriser l'alimentation en eau du secteur et améliorer la qualité de l'eau distribuée aux citoyens, la Ville a décidé d'alimenter un secteur du réseau de distribution par l'usine B à partir du 7 juin 2016. Cette usine va fournir au réseau une eau ayant une alcalinité totale stable à l'année (min=80, moy=92 et max=101 mg/L $CaCO_3$) et un pH plus élevé qui va diminuer le potentiel de corrosion du réseau (min=7,4, moy=7,95 et max=8,2). Cependant, le changement de source d'approvisionnement peut occasionner des problèmes transitoires de qualité d'eau. C'est pourquoi cette étude a été entreprise pour étudier les changements de qualité avec la nouvelle source d'eau et les changements de configuration hydraulique.

Dans les municipalités, le suivi de la qualité de l'eau distribuée est traditionnellement réalisé par des mesures ponctuelles sur le réseau. Les points de suivi sont sélectionnés par l'exploitant en tenant compte des obligations réglementaires et de ses connaissances du réseau (McDougle, Monsorez, Maurel, & Lemoine, 2012). Une nouvelle approche de suivi de la qualité de l'eau en réseau est proposée depuis 2009. Celle-ci repose sur l'utilisation des données produites par des sondes de suivi en temps réel communicantes, sans fil et nécessitant peu de maintenance (McDougle et al., 2012). Avec cette approche, les connaissances sur le réseau de distribution sont décuplées. Face à une problématique de qualité d'eau, la réponse de l'exploitant est efficace et cible précisément la zone où la qualité de l'eau varie (McDougle et al., 2012). Les avantages du suivi en continu de la qualité de l'eau ont été peu testés à l'échelle du réseau par manque de technologie fiable et peu coûteuse (Aisopou, Stoianov, & Graham, 2012). L'objectif principal du projet est d'analyser les impacts du changement de source d'approvisionnement sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution avec un suivi en continu (appareils de suivi en temps réel, dont la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4). L'originalité du projet est justifiée par l'utilisation de sondes de suivi en continu pour analyser la qualité de l'eau pendant un changement de source d'eau potable dans un réseau chloré du Canada. Le projet se déroule en deux phases.

- La première phase est une courte étude d'un secteur pilote où des vannes sont manipulées pour évaluer l'impact du changement de source dans une zone délimitée par quelques rues. La qualité de l'eau est étudiée avec quatre montages d'appareils de suivi en continu dans des bâtiments publics du 23 mars 2015 au 22 juin 2015. Les paramètres clés de la qualité de l'eau mesurés en continu sont la conductivité, la concentration de chlore actif, la température et la turbidité.

- La deuxième phase est l'étude du changement complet d'alimentation avec cinq montages d'appareils de suivi en continu dans des bâtiments publics. Deux de ces montages ont été installés à deux points du réseau ne subissant pas le changement et reflétant chacun l'usine A ou l'usine B. Les trois autres montages ont été installés à des points qui subissent le changement de source d'approvisionnement. La durée du suivi est de 3 mois avant le changement d'usine du 7 juin 2016 et de 3,5 mois après (début = 24 février 2016 ; fin = 29 septembre 2016). Le montage est modifié pour mesurer également le pH.

Parallèlement à ce projet, trois autres suivis de la qualité suite à l'implantation temporaire de secteurs de contrôle de pression ont été effectués dans les arrondissements Pointe-aux-Trembles, Pierrefonds-Roxboro et Sud-Ouest. Ces suivis ont fait l'objet de rapports distincts livrés à la Ville de Montréal en lien avec le suivi à court terme de la qualité de l'eau potable lors de la sectorisation d'une partie du réseau d'aqueduc. Les rapports suivants ont été produits :

1. *Sectorisation d'une partie du réseau d'aqueduc de l'arrondissement Sud-Ouest secteur RSO-1 de la Ville de Montréal : suivi à court terme de la qualité de l'eau potable*
2. *Sectorisation d'une partie du réseau d'aqueduc de l'arrondissement Pointe-aux-Trembles de la Ville de Montréal : suivi à court terme de la qualité de l'eau potable (secteur RPR-2)*
3. *Sectorisation d'une partie du réseau d'aqueduc de l'arrondissement Pierrefonds-Roxboro de la Ville de Montréal : suivi à court terme de la qualité de l'eau potable (secteur RFR-2)*

Le chapitre 2 présente une revue de la littérature sur les causes de détérioration de la qualité de l'eau potable dans les réseaux d'aqueduc, la corrosion du fer, les épisodes d'eau rouge et le suivi en continu. Le chapitre 3 présente les objectifs et les hypothèses de recherche du projet. Le chapitre 4 présente le matériel et les méthodes utilisées. Le chapitre 5 présente les résultats du projet. Il y a d'abord la comparaison des caractéristiques de l'eau distribuée en 2015 des usines A et B, les résultats du suivi du secteur pilote et les résultats du suivi lors du changement complet d'alimentation du 7 juin 2016. Le chapitre 5 présente aussi l'impact du changement de source sur le nombre de bris de conduites et les résultats de l'analyse des dépôts de corrosion du réseau de distribution. Pour finir, le chapitre 6 présente les conclusions et les recommandations du projet.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Éclosions de maladies d'origine hydrique au Canada et aux É.-U.

De 1974 à 2001, 288 éclosions de maladies d'origine hydrique, dont 99 associées aux systèmes publics d'eau (34% des éclosions) ont été répertoriées au Canada (Schuster et al., 2005). Les éclosions sont expliquées par les conditions météorologiques, la proximité de populations animales, le mauvais fonctionnement du système de traitement à l'usine et les carences dans les pratiques de traitement ou d'entretien (Schuster et al., 2005).

La détérioration de la qualité de l'eau suite à une déficience du système de distribution d'eau peut être suffisante pour poser de sérieux risques pour la santé (Craun et al., 2010; Craun & Calderon, 2001; Ercumen, Gruber, & Colford, 2014; Lee, E. J. & Schwab, 2005). La Figure 2.1 présente le nombre d'éclosions dans les systèmes de distribution d'eau potable publics américains de 1971 et 1998 en fonction de la cause probable déterminée par l'enquête. La troisième cause la plus importante est la déficience du système de distribution et représente 18,3% (113 éclosions) du nombre total d'éclosions (619 éclosions) (Craun & Calderon, 2001). Ainsi, le maintien de la qualité de l'eau, les conditions hydrauliques du réseau de distribution et la surveillance sont critiques dans la gestion du risque d'épidémies hydriques.

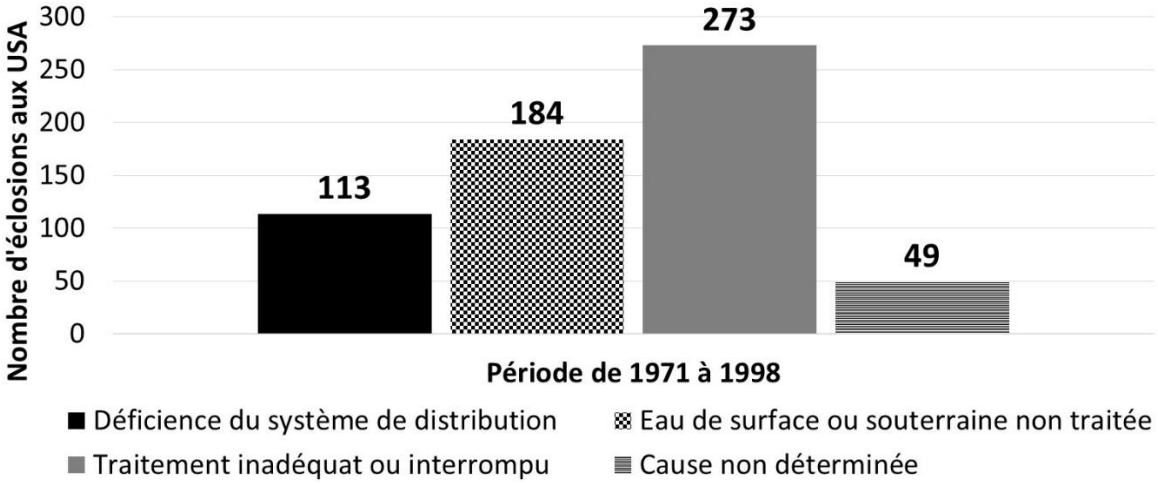


Figure 2.1 : Nombre d'éclosions dans les systèmes de distribution d'eau potable publics aux États-Unis entre 1971 et 1998 en fonction de la cause déterminée par l'enquête (Craun & Calderon, 2001)

Le Tableau 2.1 et le Tableau 2.2 détaillent des éclosions de maladies hydriques reliées à des déficiences sur le réseau de distribution répertoriées aux États-Unis entre 1971 et 1998. Parmi ces éclosions, la majeure partie (53,1%) est attribuée à des pressions négatives et raccordements croisés (Tableau 2.2). De plus, on note que la troisième cause identifiée pour ces éclosions est le relargage de dépôts de corrosion dans le réseau de distribution (11,5%). En plus de ces déficiences, le phénomène de recroissance des micro-organismes dans le réseau de distribution est toujours possible dans les zones à risque (Desjardins, Jutras, & Prévost, 1997). Les gestionnaires des réseaux de distribution doivent tenir compte de ces zones lors de l'élaboration du plan de maintenance du réseau de distribution.

Tableau 2.1 : Nombres d'éclosions, de cas de maladies, d'hospitalisations et de décès causés par les déficiences du réseau de distribution aux États-Unis de 1971 à 1998 (Craun & Calderon, 2001)

Période	**Nombre d'éclosions**	**Nombre de cas de maladies**	**Nombre d'hospitalisations**	**Nombre de décès**
1971 à 1998	113	21 058	498	13

Tableau 2.2 : Nombre d'éclosions en fonction du type de déficience du réseau de distribution public aux États-Unis de 1971 à 1998 (Craun & Calderon, 2001)

Type de déficience du réseau de distribution public	**Nombre d'éclosions**	**%**
Intrusion de contaminants lors de pressions négatives ou une surpression à travers les raccordements croisés	60	53,1
Relargage de dépôts de corrosion	13	11,5
Bris ou fuites de conduites principales	10	8,8
Contamination des réservoirs	15	13,3
Contamination durant des travaux de construction/réparation	6	5,3
Contamination de la tuyauterie du consommateur	8	7,1
Séparation inadéquate des conduites d'eau potable et d'eaux usées	1	0,9
Total	**113**	**100**

2.2 Détérioration de la qualité de l'eau potable en réseau

2.2.1 Zones à risque du réseau de distribution

Le réseau de distribution d'eau a plusieurs zones critiques pour la qualité de l'eau. Les culs-de-sac, les extrémités du réseau, les points critiques de pression, les conduites à faible vitesse ou ayant un temps de séjour élevé constituent des zones à risque. Le temps de séjour de l'eau est également un indicateur utile de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution (Machell & Boxall, 2014). Le matériau des conduites a aussi un impact sur la recroissance des micro-organismes dans le réseau. En effet, le polychlorure de vinyle (PVC) et les conduites de ciment soutiennent moins la recroissance bactérienne que les conduites métalliques (Prévost, Laurent, Servais, & Joret, 2005).

2.2.1.1 Culs-de-sac physiques et hydrauliques sur le réseau

La qualité de l'eau dans les culs-de-sac peut s'avérer problématique puisque les temps de séjour peuvent être de plus de 400 heures pour une demande de journée minimale ou moyenne dépendamment de la consommation associée (United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2002). De plus, la concentration de désinfectant résiduel est faible (<0,2 mg Cl_2/L) et les conditions de corrosion peuvent stimuler la recroissance bactérienne (Barbeau, Gauthier, Julienne, & Carrière, 2005; Carter, Lee, Buchberger, Rossman, & Rice, 1997). Le nombre de culs-de-sac est souvent élevé, ce qui rend le suivi difficile. Par exemple, plus de 1000 culs-de-sac ont été estimés dans le réseau de distribution de la Ville de Montréal comptant 3600 km de conduites secondaires (Barbeau et al., 2005).

2.2.2 Changements hydrauliques dans le réseau

Les changements hydrauliques (vitesse, pression et temps de séjour) peuvent détériorer la qualité de l'eau potable du réseau de distribution (Aisopou et al., 2012). Pour assurer une gestion de la qualité de l'eau dans les culs-de-sac en extrémité du réseau, le règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) a plusieurs exigences.

2.2.3 Exigences réglementaires aux extrémités du réseau

La qualité de l'eau se détériore dans les extrémités du réseau puisque l'eau a un temps de séjour élevé (Simard, Pelletier, & Rodriguez, 2011). Les extrémités du réseau sont aussi à risque pour les

concentrations élevées de trihalométhanes (THM) soupçonnées cancérigènes (Domínguez-Tello, Arias-Borrego, García-Barrera, & Gómez-Ariza, 2015). Le taux formation de THM augmente en fonction de la concentration de chlore et d'acide humique, de la température, du pH et de la concentration en ions bromure (Amy, Chadik, & Chowdhury, 1987; Health Canada, 2006; Stevens, Slocum, Seeger, & Robeck, 1976). Le choix des points d'échantillonnage en extrémité du réseau est déterminé par le gestionnaire de l'installation de distribution d'eau potable. Pour assurer la qualité de l'eau aux extrémités du réseau, le règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) exige d'échantillonner les paramètres du Tableau 2.3. Pour le contrôle des caractéristiques bactériologiques, au moins 50% des échantillons sont prélevés aux extrémités du réseau. À noter que toutes les substances organiques doivent être échantillonnées en extrémité du réseau à l'exception des acides haloacétiques (Gouvernement du Québec, 2011).

Tableau 2.3 : Exigences du règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) aux extrémités du réseau (Gouvernement du Québec, 2011)

Paramètres	**Norme RQEP**	**Unité**	**Nombre minimum d'échantillons par an**	**Remarque**
Caractéristiques bactériologiques				
Coliformes totaux	> 90% absence	N/A	Selon la taille de la population desservie	Le nombre minimal d'échantillons à prélever par mois est déterminé par la taille de la population desservie (voir tableau correspondant). Les échantillons sont prélevés dans des endroits représentatifs du réseau dont, 50% aux extrémités du réseau. Il faut aussi mesurer le chlore résiduel libre
Coliformes fécaux ou *Escherichia coli*	<1 ou absence	Pre ou ABS/100 mL		
Substances organiques				
Trihalométhanes totaux (THM)	< 80	µg/L	Selon la taille de la population desservie	Le nombre minimal d'échantillons à prélever par mois est déterminé par la taille de la population desservie par le réseau. Il faut identifier la concentration maximale obtenue durant le trimestre et calculer la moyenne des valeurs maximales obtenues pour 4 trimestres consécutifs
Pesticides et autres substances organiques	Voir les tableaux des pesticides et substances organiques du RQEP	µg/L	4	Au moins un échantillon au cours de chacun des trimestres commençant respectivement les 1er janvier, 1er avril, 1er juillet et 1er octobre de chaque année, avec un intervalle minimal de 2 mois entre les prélèvements

2.2.4 Paramètres de qualité de l'eau du réseau de distribution visés par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP)

Le Tableau 2.4 présente le suivi du pH et de la turbidité de l'eau potable du réseau de distribution.

Tableau 2.4 : Suivi du pH et de la turbidité de l'eau potable du réseau de distribution d'une municipalité desservant plus de 5 000 personnes (Gouvernement du Québec, 2011)

Paramètres	Norme applicable du RQEP	Unité	Nombre minimal d'échantillons par an	Remarque
pH	6,5 à 8,5	N/A	4	Important pour les systèmes alimentés par une eau de surface. Il faut prendre l'échantillon au centre du réseau
Caractéristique physique				
Turbidité	≤ 5	UTN	12	Au moins 1 échantillon par mois à un point représentatif de la qualité de l'eau du réseau

Ces normes vont guider l'analyse des mesures de pH et de turbidité.

2.2.5 Paramètres esthétiques ou organoleptiques

Les paramètres esthétiques non normés ne sont pas à négliger puisqu'ils affectent la perception de la qualité de l'eau potable par les consommateurs (Health Canada, 2014). Le Tableau 2.5 présente un résumé des paramètres esthétiques reliés aux plaintes de consommateurs.

Tableau 2.5 : Paramètres esthétiques liés aux plaintes des consommateurs (Health Canada, 2014)

Paramètres esthétiques liés aux plaintes	Recommandations de Santé Canada (2014)	Causes dans les sources d'eau potable (avant traitement)
Couleur	≤ 15 U.C.V.	La couleur provient de la matière organique, les métaux d'origine naturelle et les déchets industriels
Goût	Dépourvue d'un goût désagréable	Issu de sources biologiques ou industrielles; relié à la présence de chlorure, cuivre, fer et manganèse (taches sur la lessive et les accessoires de plomberie), matières dissoutes totales, sodium, sulfates, sulfure et zinc
Odeur	Dépourvue d'une odeur désagréable	Issu de sources biologiques ou industrielles; relié à la présence de 1,2-Dichlorobenzène, 1,4-Dichlorobenzène, 2,4-Dichlorophénol, Éther de méthyle et de tert-butyle (MTBE), Pentachlorophénol, Sulfure, Tétrachloro-2,3,4,6 phénol et Trichloro-2,4,6 phénol; odeur de chlore à proximité de l'usine
Particules	Turbidité ≤ 1 UTN à l'entrée du réseau	**Exception : la turbidité est réglementée par le RQEP en réseau (un échantillon par mois représentatif du réseau ≤ 5 UTN)** Matières inorganiques : argile, limon, précipités métalliques. Matières organiques : débris végétaux et animaux décomposés et microorganismes

Les consommateurs peuvent juger l'eau inacceptable lorsque la turbidité devient visible (> 5 UTN) (Health Canada, 2014). La turbidité excessive dans le réseau de distribution est souvent associée à des goûts et des odeurs inacceptables (Health Canada, 2014). En lien avec l'eau colorée et le goût, les concentrations de fer total et de manganèse total devraient demeurer inférieures à 0,3 mg/L et 0,05 mg/L respectivement (Health Canada, 2014). Les paramètres affectant les goûts et odeurs sont détaillés dans le document *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* de Santé Canada.

La Figure 2.2 présente la répartition des plaintes du réseau *Montréal* de 2012 à 2015 en fonction du type de plaintes. Deux types de plaintes sont notés, les plaintes esthétiques et les plaintes relatives à des inquiétudes sur la santé (perçues, mais non démontrées). Ce réseau dessert environ 1 570 655 personnes et est alimenté par les usines Atwater et Charles-J.-Des Baillets.

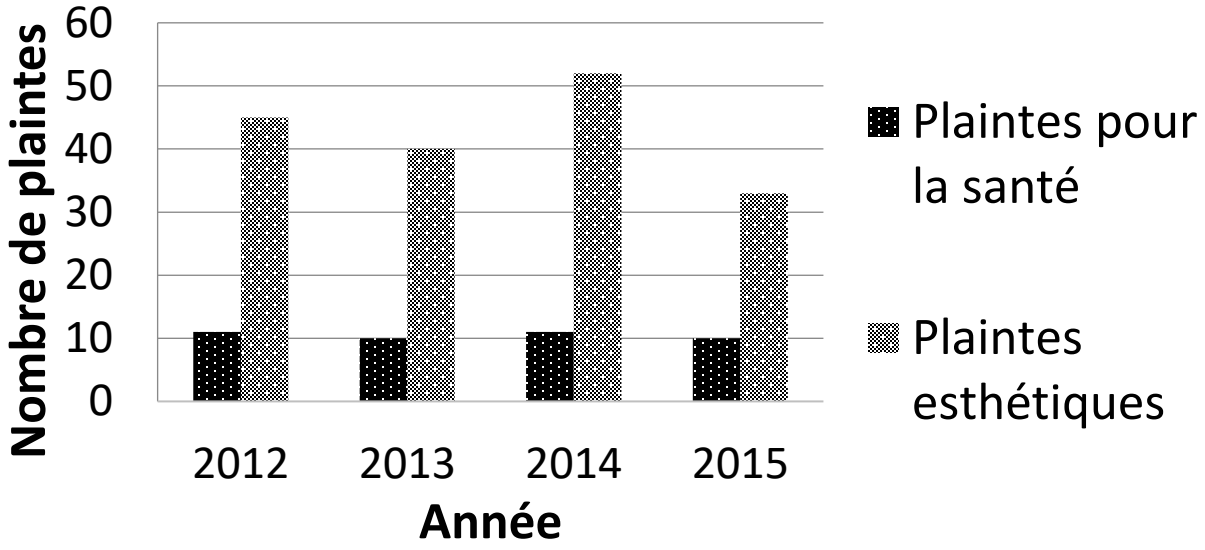


Figure 2.2 : Répartition des plaintes du réseau *Montréal* (X0008084) de 2012 à 2015 (adapté des bilans du Service de l'eau de la Ville de Montréal)

On note que 73 à 83% des plaintes sont liées à l'aspect esthétique de l'eau (Figure 2.2). L'aspect esthétique de l'eau est donc perçu par les consommateurs comme un renseignement sur la potabilité de l'eau. La Figure 2.3 présente la répartition des plaintes esthétiques du réseau *Montréal* de 2012 à 2015.

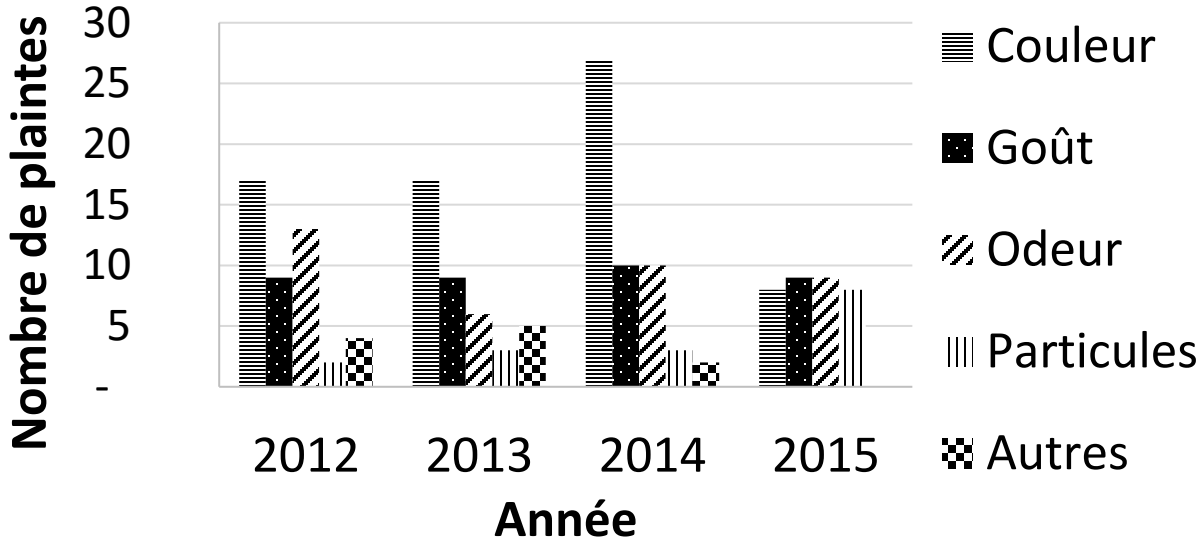


Figure 2.3 : Répartition des plaintes esthétiques du réseau *Montréal* (X0008084) de 2012 à 2015 (adapté des bilans du Service de l'eau de la Ville de Montréal)

Parmi les plaintes esthétiques, 24% à 52% des plaintes sont liées à la couleur de l'eau potable (Figure 2.3). La coloration rouge ou jaune de l'eau est souvent expliquée par la corrosion des conduites du réseau de distribution et le relargage subséquent de dépôts de fer. La concentration de fer total dans l'eau n'est pas reliée à des enjeux de santé (Health Canada, 2014). Elle peut néanmoins causer des plaintes par les consommateurs et des taches sur les tissus au lavage.

2.3 Corrosion du fer et enjeux pour le réseau

2.3.1 Facteurs influençant la corrosion du fer

La corrosion du fer dans les réseaux de distribution est un phénomène complexe. Les principales sources de fer dans les réseaux de distribution sont les conduites de fonte, de fonte ductile, de fer et d'acier galvanisés (Santé Canada, 2009). Le fer peut être libéré directement à partir des matériaux à base de fer ou par les tubercules de rouille formés par la corrosion (Santé Canada, 2009).

Pour protéger un réseau de distribution de la corrosion, il est recommandé de maintenir l'alcalinité totale et la dureté calcique entre 40 et 80 mg $CaCO_3$/L (Schock, 1990). Différents indices ont été développés pour quantifier le potentiel de corrosivité. L'indice de Larson (LR) quantifie le caractère corrosif de l'eau pour les métaux en fonction de l'alcalinité totale et des concentrations de sulfates ($SO4^{2-}$) et de chlorures (Cl^-) (Zhang et al., 2014). Il y a un risque de corrosion des

métaux lorsque l'indice dépasse 0,5 et la corrosion est importante lorsqu'il dépasse 1 (Larson & Skold, 1958; Zhang et al., 2014).

$$\text{Indice de Larson } (LR) = \frac{2\,[SO_4{}^{2-}]+[Cl^-]}{[HCO_3{}^-]} \text{ où les concentrations sont en mol/L}$$

D'autres indices ont été proposés, dont l'indice d'agressivité, l'indice de Ryznar, l'indice modifié de Larson, et plusieurs autres paramètres comme les nitrates, la force ionique, le contenu en silice et le temps de résidence de l'eau peuvent être considérés (McNeill & Edwards, 2001). Le Tableau 2.6 présente certains paramètres de qualité d'eau et les indices recommandés pour limiter la corrosion du fer.

Tableau 2.6 : Paramètres et indices de qualité d'eau recommandés pour limiter la corrosion du fer

Paramètre	**Valeur recommandée (référence)**
Alcalinité totale et dureté calcique	Entre 40 et 80 mg $CaCO_3$/L (Schock, 1990)
Indice de Langelier	> 0 (Selon l'outil RTW)
Indice de Larson (LR)	< 0,5 (Selon l'outil RTW)
pH	Idéalement entre 7,5 à 8,0 Norme RQEP entre 6,5 à 8,5 (Gouvernement du Québec, 2011; Schock, 1990)
Indice de précipitation	4 à 10 mg $CaCO_3$ /L (Selon l'outil RTW)

2.3.2 Concentrations de fer dans l'eau

La corrosion forme aussi des « tubercules » qui sont des accumulations de dépôts de corrosion à la surface de la conduite. La formation des tubercules est le résultat de la corrosion de l'intérieur de la conduite suite à la réduction de l'oxygène (Sarin, Snoeyink, Lytle, & Kriven, 2004). Ces tubercules peuvent relarguer du fer dissous ou particulaire. Le Tableau 2.7 présente les réactions pouvant occasionner ce relargage.

Tableau 2.7 : Réactions liées au relargage de fer dans l'eau (Sarin et al., 2004)

#	Description de la réaction
1	Diffusion de particules de Fe(III) dans l'eau à la suite de l'oxydation du Fe(II) contenu dans les pores des dépôts
2	La stagnation de l'eau fait diminuer la concentration d'oxydants* à proximité du dépôt, ce qui permet aux ions ferreux de diffuser dans l'eau
3	Lors de la reprise de l'écoulement, il y a plus d'oxydants* disponibles sur la surface du dépôt et cela réduit le relargage de fer dans l'eau puisqu'une partie de l'ion ferreux se précipite à l'intérieur du dépôt
4	Quand l'ion ferreux rencontre un oxydant* dans l'eau du réseau (comme l'oxygène), il devient une particule qui se fixe sur la surface d'un dépôt ou se retrouve dans le robinet du consommateur

*Oxydants = oxygène dissous et chlore libre

2.3.3 Mesures ponctuelles des concentrations de métaux dans l'eau

Les concentrations en fer de l'eau peuvent être utilisées efficacement comme un indicateur de la qualité de l'eau et du rejet de particules dans l'eau (Husband, P. S. & Boxall, 2011). Selon le *Guide de bonnes pratiques d'exploitation des installations de distribution d'eau potable*, le choix des points pour un échantillonnage terrain doit être guidé par les principes suivants :

- Choisir des points où des problèmes de qualité peuvent survenir et réviser régulièrement les choix
- Prendre en considération certaines périodes critiques qui peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau, notamment la fonte des neiges, les fortes pluies, les périodes de sécheresse (Ministère du Développement durable, 2016).

2.3.3.1 Composition des dépôts de corrosion

La composition et la structure des dépôts dépendent du type de métal de la conduite et des caractéristiques chimiques de l'eau en contact avec la surface (Sarin et al., 2004). La Figure 2.4 présente les trois couches qui caractérisent les dépôts de corrosion.

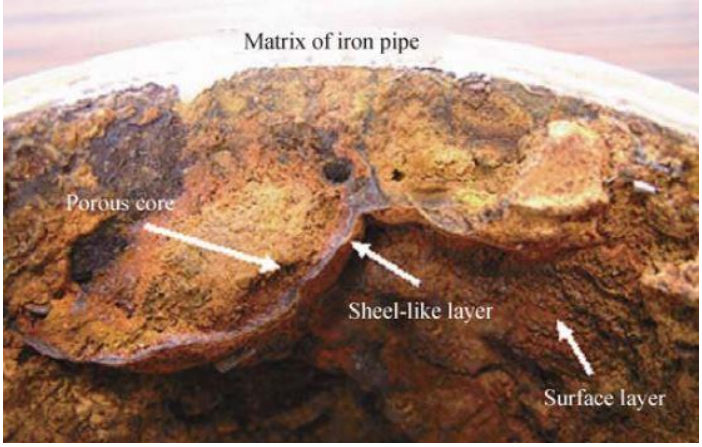


Figure 2.4 : Représentation des couches d'un dépôt de corrosion (Zhang et al., 2014).

La couche en surface en contact avec l'eau contient les particules de sédiment. Une couche en forme de coquille dure empêche l'eau de pénétrer dans la dernière couche qui est le noyau poreux. La couche en forme de coquille est majoritairement composée de magnétite (Fe_3O_4 à pH élevé) ou de goethite (α-FeOOH à pH faible) selon la valeur du pH (Zhang et al., 2014). Le noyau poreux est constitué de composés de Fer (II) comme la sidérite ($FeCO_3$) (Sontheimer, Kolle, & Snoeyink, 1981; Zhang et al., 2014). Les dépôts de corrosion contribuent à augmenter les concentrations de fer dans l'eau sous forme dissoute ou solide (détachement de fragments de dépôt selon sa dureté, son adhérence, la vitesse de l'eau et les changements de température) (McNeill & Edwards, 2001). La structure des dépôts est complexe, elle se modifie dans le temps et de nombreux composés solides peuvent être présents (McNeill & Edwards, 2001). La Figure 2.5 présente un exemple de schéma de la structure du tubercule d'une conduite en fonte.

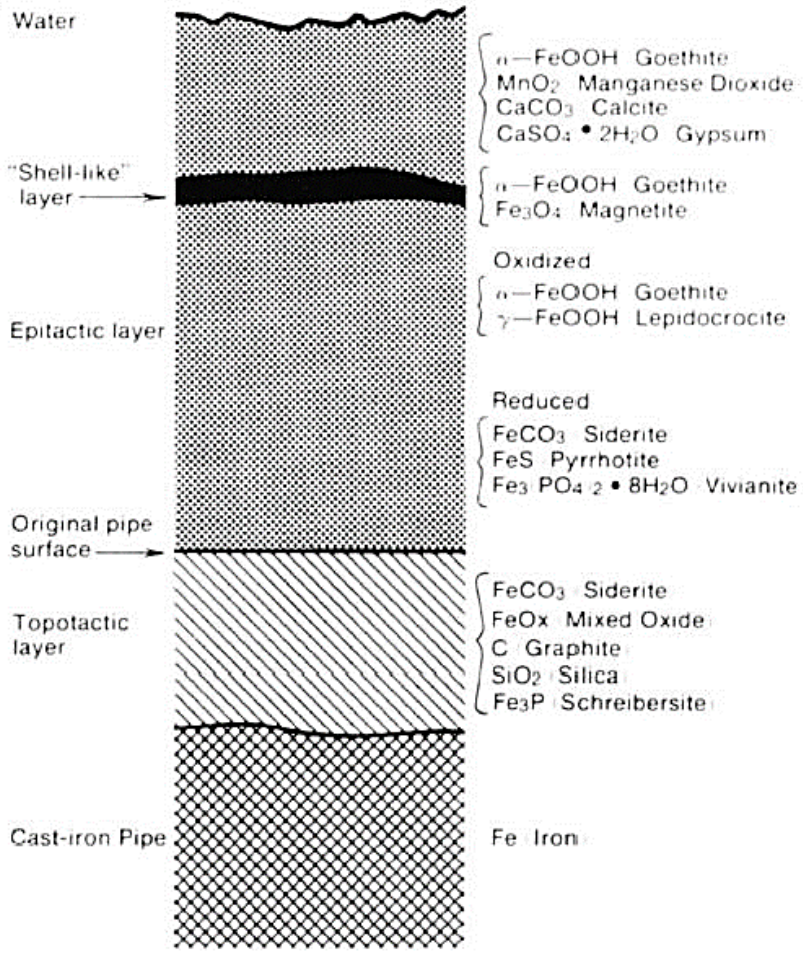


Figure 2.5 : Schéma de la structure du tubercule d'une conduite en fonte (Sontheimer et al., 1981)

Du haut vers le bas, cet exemple montre la couche en surface orangée majoritairement formée de goethite (α-FeO(OH)). Sous cette couche, une couche plus solide (coquille) formée de dépôts bruns composés de goethite (α-FeO(OH)) et de magnétite (Fe_3O_4) est généralement présente. Sous cette coquille, on retrouve diverses strates de dépôts de fer, notamment une poreuse formée de goethite (α-FeO(OH)) et de lépidocrocite (γ-FeO(OH)), et une couche de sidérite ($FeCO_3$) et d'autres oxydes de fer sur la surface de l'intérieur de la conduite en fonte. La maghémite (γ-Fe_2O_3) n'est pas présente sur la Figure 2.5, mais sa présence dans la structure générale des dépôts est confirmée par d'autres chercheurs (Sarin, Clement, Snoeyink, & Kriven, 2003). Le Tableau 2.8 présente un résumé de la composition des dépôts de corrosion.

Tableau 2.8 : Composition des dépôts de corrosion (McNeill & Edwards, 2001)

Name	Chemical Formula	Iron Oxidation State
Ferrous hydroxide	$Fe(OH)_2$	II
Ferric hydroxide	$Fe(OH)_3$	III
Wustite	FeO	II
Goethite	α-FeOOH	III
Akaganeite	β-FeOOH	III
Lepidocrosite	γ-FeOOH	III
Hematite	α-Fe_2O_3	III
Maghemite	γ-Fe_2O_3	III
Magnetite	Fe_3O_4 ($FeO \cdot Fe_2O_3$)	II and III
Ferric oxyhydroxide	$FeO_x(OH)_{3-2x}$	III
Siderite	$FeCO_3$	II
Iron hydroxycarbonate	$Fe_x(OH)_y(CO_3)_z$	III
"Green rust"	$Fe(III)_{x1}Fe(II)_{x2}(OH)_y(CO_3,SO_4)_z$	II and III
Vivianite	$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	II
Strengite	$FePO_4$	III
Schrebersite	Fe_4P	Not known

Ce tableau montre que les compositions sont complexes. Plus la conduite est vieille, plus la structure de ses dépôts est complexe (Clement et al., 2002). Pour déterminer les phases présentes dans la composition des dépôts de corrosion, des analyses par diffractométrie de rayons X (XRD) ou spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP Aqua Regia) sont utiles.

2.4 Occurrence des épisodes d'eau rouge dans les réseaux en fonte grise non revêtue ou d'acier galvanisé

La déstabilisation des dépôts de corrosion entraîne le relargage de fer ferrique ou ferreux augmentant la turbidité et la couleur de l'eau distribuée (Sarin et al., 2004). Cette déstabilisation peut être causée par des disruptions physiques (travaux, bris, etc.) ou un changement de la qualité. Durant un épisode d'eau rouge, l'eau au robinet du consommateur contient typiquement une concentration de fer total dépassant plusieurs fois la recommandation esthétique de 0,3 mg/L de Santé Canada. Le relargage de fer provient typiquement de la corrosion des conduites de fonte grise non revêtue ou de conduites galvanisées et de la dissolution des dépôts dans l'eau (Sarin et al., 2003). La concentration de fer dans l'eau dépend des caractéristiques des dépôts, des paramètres physico-chimiques de l'eau et des changements hydrauliques (Clement et al., 2002). La coloration

rougeâtre ou jaunâtre de l'eau potable est mesurable en termes de couleur apparente, de turbidité et de concentration en fer. L'étude de données de turbidité a démontré que l'accumulation de dépôts sur les parois du réseau dépend du mécanisme de corrosion des conduites métalliques et des raccords et de l'accumulation générale de matériaux provenant de l'eau distribuée (Husband, S. & Boxall, 2010). La problématique d'eau colorée dans le réseau de distribution est causée par la qualité de l'eau, mais les niveaux de turbidité des différents épisodes (moyens et élevés) sont dominés par les changements hydrauliques (Husband, P. S. & Boxall, 2011). Le Tableau 2.9 présente une proposition de définition de l'eau rouge à partir des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada.

Tableau 2.9 : Proposition de définition de l'eau rouge à partir des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Health Canada, 2004)

Paramètre	**Seuil**	**Unité**
Couleur	> 15	UCV (unité de couleur vraie)
Fer total	> 0,3	mg/L
Turbidité	> 5	UTN (unité de turbidité néphélométrique)

2.4.1 Influence des paramètres physico-chimiques de l'eau sur les épisodes d'eau rouge

2.4.1.1 Alcalinité totale et pH à l'eau traitée

Dans les réseaux en fonte grise non revêtue, un relargage accru de fer dans l'eau est souvent associé à une variation de pH, une diminution de l'alcalinité totale ou une augmentation de la concentration des solides dissous (Benjamin, Sontheimer, & Leroy, 1996). Selon un modèle statistique basé sur deux années complètes de suivi d'un secteur pilote, une alcalinité totale de plus de 80 mg/L $CaCO_3$ permet de diminuer l'occurrence d'épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005). Pour diminuer les plaintes d'eau rouge, d'autres chercheurs recommandent de maintenir l'alcalinité stable et au-dessus de 60 mg/L $CaCO_3$ (McNeill & Edwards, 2001). Le relargage de fer dans l'eau est aussi lié aux variations d'alcalinité totale de l'eau. Dans la zone de pH 7,6 à 9,5, une augmentation de l'alcalinité de 10 à 60 mg/L $CaCO_3$ a engendré une diminution du relargage de fer dans l'eau (Sarin et al., 2003).

2.4.1.2 Concentrations de chlorures, de sulfates, de sodium, d'oxygène dissous et de chlore résiduel libre

L'augmentation de la concentration des chlorures, des sulfates, du sodium et de l'oxygène dissous de la source favorise l'occurrence et l'ampleur des épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005). La concentration de sulfates peut aussi causer des épisodes d'eau rouge à cause de son effet sur la corrosion des métaux. Cela se reflète sur l'indice de Larson (0,5 à plus de 1) (Geldreich, 1996; Larson & Skold, 1958; Li et al., 2010). De plus, une faible concentration de chlore résiduel dans l'eau (≤ 0,2 mg Cl_2/L) peut aussi accentuer le problème d'eau rouge puisque des conditions plus réductrices seront présentes à la surface des conduites lesquelles peuvent favoriser l'apparition de fer dissous (Imran et al., 2005; Li et al., 2010).

2.4.1.3 Ajout d'orthophosphates à l'usine de production d'eau potable

Les orthophosphates réduisent le relargage de fer dans l'eau, car ils réagissent à la surface de la conduite et produisent des phosphates insolubles dans l'eau. Par exemple, l'ajout de 3 mg/L PO_4^- d'orthophosphates à l'usine de production d'eau potable a permis de réduire le relargage de fer dans l'eau de 0,10 à 0,15 mg/L après environ 8 mois de traitement (Sarin et al., 2003).

2.4.1.4 Influence de la température sur les épisodes d'eau rouge

L'augmentation de la température accentue la problématique d'eau rouge (Li et al., 2010; McNeill & Edwards, 2001). Des études utilisant des pilotes démontrent également une corrélation entre les pics de turbidité, les concentrations de métaux et les changements de température (McNeill & Edwards, 2001). Les variations de température influencent la cinétique des réactions d'oxydoréduction, la thermodynamique de formation et de dissolution des dépôts de corrosion, la viscosité de l'eau, la solubilité de l'oxygène dissous, etc. L'augmentation de la corrosion avec la température a été validée lors de la variation saisonnière de 16,8 à 27,0 °C dans un réseau de distribution (Imran et al., 2005).

2.4.1.5 Influence du temps de séjour sur les épisodes d'eau rouge

Les problèmes d'eau rouge peuvent être le résultat de cycles de périodes d'écoulement et de stagnation dans la conduite (Benjamin et al., 1996). Pendant la période de stagnation, la teneur en oxygène dissous et en chlore résiduel libre diminue entraînant la présence de conditions réductrices

et la dominance de fer ferreux (Fe^{2+}) dans l'eau (Benjamin et al., 1996). La concentration de fer dans l'eau augmente donc pendant les périodes de stagnation (McNeill & Edwards, 2001). Lorsqu'il y a une demande d'eau, de l'eau fraîche ayant des concentrations plus élevées d'oxygène dissous et de chlore est acheminée vers ce secteur. Le fer ferreux est oxydé en fer ferrique, ce qui cause l'eau rouge. Cette problématique est plus récurrente dans les réseaux corrodés connectés à de grands bâtiments avec des politiques de réduction d'eau. La turbidité est à la hausse lors de la stagnation durant la nuit, puis il y a une chute de la turbidité durant les heures de forte consommation (Slaats et al., 2003; Smith et al., 1999; Vreeburg, J. H. G. & Boxall, 2007).

2.4.2 Recroissance des microorganismes causée par les épisodes d'eau rouge

Les microorganismes peuvent se développer sous forme de biofilms à la surface des conduites dans les réseaux de distribution malgré la faible présence d'éléments nutritifs et le maintien d'une concentration résiduelle de désinfectant (Berry, Xi, & Raskin, 2006; Geldreich, 1996; Laurent et al., 2005; Li et al., 2010; Prévost et al., 2005; Rompré, Prévost, Coallier, Brisebois, & Lavoie, 2000). La présence de dépôts est un facteur jugé plus important pour le contrôle du biofilm que le contrôle du carbone organique biodégradable ou le maintien d'un résiduel de chlore. En effet, les dépôts de corrosion offrent des sites d'attachement à l'abri des désinfectants en plus de procurer l'accès à des matières organiques adsorbées sur les oxydes et hydroxydes de fer. La faible présence de bactéries réductrices de sulfates (SRB) et réductrices de fer dans les échantillons d'eau rouge suggère que la corrosion microbienne n'est pas un facteur majeur menant à l'eau rouge (Li et al., 2010). Pendant les épisodes d'eau rouge, la concentration importante de fer dans l'eau et la diminution du chlore résiduel libre créent des conditions favorables à la croissance des bactéries dans le réseau de distribution (Li et al., 2010).

2.4.3 Stratégie pour diminuer l'occurrence des épisodes d'eau rouge

2.4.3.1 Augmentation de l'alcalinité totale et du pH à l'eau traitée

L'augmentation de l'alcalinité totale et du pH à l'eau traitée permet de réduire l'occurrence des épisodes d'eau rouge dans le réseau de distribution (Zhang et al., 2014). Certains composés comme la chaux ($Ca(OH)_2$) et le bicarbonate de calcium (Na_2CO_3) peuvent augmenter à la fois le pH et l'alcalinité. Certains auteurs ont montré que l'ajustement de l'alcalinité est plus efficace pour limiter les épisodes d'eau rouge que l'augmentation du pH (Imran et al., 2005).

2.4.3.2 Dosage d'inhibiteurs de corrosion à l'eau traitée

L'ajout d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphates permet de diminuer l'occurrence des épisodes d'eau rouge. Il s'agit d'une solution coûteuse qui ne peut être considérée qu'à long terme pour corriger un problème d'eau rouge. Lors d'essais en laboratoire, l'ajout de 1,5 mg/L d'orthophosphate-P, de tripolyphosphate-P et d'hexametaphosphate-P a permis d'obtenir des réductions du relargage de fer de 68%, 83% et 87%, respectivement après 15 jours (Zhang et al., 2014). De plus, il faut environ 3 jours pour obtenir une réduction de 50% du relargage de fer dans l'eau pour chacun des inhibiteurs de corrosion testés (Zhang et al., 2014).

2.4.3.3 Nettoyage de section du réseau par rinçage unidirectionnel de conduites (UDF)

Le nettoyage par rinçage unidirectionnel de conduites (UDF) est utile pour un problème localisé et peu récurrent. Pour nettoyer une section du réseau de distribution, des vannes sont fermées pour concentrer l'écoulement dans une seule direction vers la borne-fontaine ouverte qui rejette l'eau vers l'égout pluvial.

Selon le *Guide de bonnes pratiques d'exploitation des installations de distribution d'eau potable*, les principes d'un programme de rinçage sont les suivants :

- Rinçage unidirectionnel annuel des conduites de diamètre inférieur à 350 mm (14 pouces).
- Atteindre une vitesse de rinçage d'au minimum 0,8 m/s et idéalement de 1,5 m/s. Pour les conduites en fonte, il est important d'atteindre des vitesses élevées.
- Maintenir la pression dans le secteur au-dessus de 140 kPa (20 psi) (Ministère du Développement durable, 2016).

Pour être efficace, la vitesse de purge doit être d'environ 1,5 m/s (Vreeburg, J. H. G. & Boxall, 2007). Il y a une variabilité importante entre la qualité de l'eau de culs-de-sac d'un même réseau ayant subi une purge (Barbeau et al., 2005). En général, la procédure de purge du réseau est déterminée par le service d'eau de la municipalité en fonction des problématiques du réseau, des expériences passées, des contraintes de coûts et des plaintes des consommateurs (Barbeau et al., 2005).

2.4.3.4 Bouclage des extrémités du réseau ou purges

- Le bouclage des extrémités du réseau permet d'éliminer la présence de culs-de-sac.

- Lorsque l’eau présente des problèmes de qualité récurrents, il est possible d’effectuer des purges fréquentes aux extrémités du réseau (Ministère du Développement durable, 2016).

2.4.3.5 Effectuer un changement de source d’approvisionnement

Pour contrôler les secteurs problématiques, il est possible de changer de source d’approvisionnement pour l’eau traitée la moins susceptible de créer une problématique d’eau rouge. En effet, il est important d’éviter les changements de source brusque et surtout si les sources d’eau ont des caractéristiques significativement différentes (alcalinité totale, pH, chlorure, sulfates, sodium, oxygène dissous, calcium, indice de Larson et indice de Langelier). Cette stratégie a été utilisée en 2008 dans un réseau de Beijing (Chine) et les dépôts se sont stabilisés après 90 jours. Dans ce cas, l’origine du problème d’eau colorée était la différence importante de la concentration de sulfates des sources d’eau A et B (47 mg/L versus environ 200 mg/L). La concentration de sulfates de l’usine B a déstabilisé de façon importante les dépôts de corrosion sur les parois des conduites du réseau. De plus, l’indice de Larson de la source d’eau B était compris entre 1,70 et 1,95, alors que celui de la source A était de 0,51. Il s’agit de valeurs qui dépassent largement le seuil de corrosion importante de 1 (Zhang et al., 2014).

2.5 Changement de source d’eau potable

De plus en plus de villes utilisent plus d’une source d’eau pour un même réseau de distribution (Zhang et al., 2014). Le changement de source vers une source d’eau brute moins corrosive se reflèterait dans la qualité de l’eau distribuée. Le changement de source peut donc servir à corriger une problématique généralisée de corrosion ou d’eau rouge. Il peut aussi servir à augmenter la résilience de l’approvisionnement en eau en ajoutant la possibilité d’être approvisionné par un réseau voisin.

Parmi les changements négatifs, le relargage massif de dépôts de corrosion dans les conduites (eau rouge, biofilm et métaux toxiques, dont le plomb) peut engendrer des plaintes pour la santé et l’esthétisme. Le changement de source d’eau potable peut occasionner des épisodes d’eau rouge à cause de la perturbation de l'équilibre chimique des dépôts du réseau de distribution (Geldreich, 1996; Li et al., 2010). Le changement de source risque aussi de modifier la configuration hydraulique du réseau, ce qui engendre de nouveaux culs-de-sac, des déplacements de dépôts, le

changement des temps de séjour et des bris potentiels de conduites. Pour analyser les impacts, un suivi en continu des paramètres clés de la qualité de l'eau est idéal.

2.6 Utilisation de sondes de suivi en continu pour le suivi de la qualité de l'eau en réseau

La détection des épisodes de contamination est essentielle à la sécurité de l'approvisionnement en eau potable et la gestion des risques pour la santé (Yang, Haught, & Goodrich, 2009). Comme le réseau de distribution est jugé vulnérable aux actes terroristes, le développement des sondes de suivi en continu s'est accentué (Hall et al., 2007). L'installation des sondes en insertion dans la conduite du réseau permet de mesurer les paramètres de la qualité de l'eau du réseau et d'éliminer l'effet possible de la tuyauterie du bâtiment. Par rapport à une installation en dérivation de l'entrée de service, l'installation en insertion permet aussi de mesurer la pression dans le réseau. Il est nécessaire également d'avoir des sondes sans ajout de réactifs pour limiter l'entretien et qui ne dérivent pas dans le temps. Avant l'année 2005, un obstacle majeur à l'acquisition de données sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution était le manque de technologie fiable et à faible coût (achat, opération et maintenance) (Aisopou et al., 2012). De nos jours, plusieurs technologies performantes sont disponibles sur le marché.

2.6.1 Avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel

Le Tableau 2.10 présente les descriptions des différents types de suivi de la qualité de l'eau.

Tableau 2.10 : Description du suivi en continu et du suivi ponctuel de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution (Besner, 2013)

Paramètre	**Suivi en continu**	**Suivi ponctuel**
Description	Des appareils installés sur le réseau mesurent les paramètres clés de la qualité de l'eau selon le pas de temps de l'appareil	Un employé du service d'eau vérifie la qualité de l'eau potable (échantillons et mesures des paramètres clés avec des instruments portatifs)
Fréquence	Mesures selon le pas de temps de l'appareil en continu	Mesures lors des plaintes et en fonction des exigences de la réglementation
Avantages du suivi en continu	• Une meilleure compréhension des phénomènes physiques et chimiques pouvant affecter la qualité de l'eau dans les conduites • Un support aux décisions opérationnelles • La détection des événements de contamination (Besner, 2013)	

Le suivi ponctuel est la pratique la plus répandue malgré son incapacité à détecter les événements transitoires. En effet, la probabilité pour l'employé d'être présent au moment de l'événement transitoire est faible. Lors de plaintes, la redondance des plaintes ou une mesure dépassant les normes permet de conclure qu'il y a un problème. Avec le suivi en continu, un événement transitoire peut être documenté, ce qui permet d'agir rapidement pour corriger la situation. Les données en temps réel de ces sondes pourraient être combinées à un modèle de distribution sur un logiciel, ce qui pourrait révolutionner la connaissance du réseau de distribution (Vreeburg, J. & van den Boomen, 2002). Plusieurs études expérimentales soulignent la nécessité d'une surveillance continue de la qualité de l'eau (Aisopou et al., 2012; Vreeburg, J. H. G. & Boxall, 2007; Yang et al., 2009). Elles démontrent aussi que de nombreuses technologies ne parviennent pas à satisfaire le critère de fiabilité. Plusieurs recherches ont démontré que les sondes multiparamétriques en insertion de type Intellisonde^{tm} (chlore libre et total, conductivité, débit, pH, potentiel d'oxydoréduction, pression, température et turbidité) nécessitent des calibrations fréquentes (Aisopou et al., 2012; Besner, 2013). Cette sonde est fiable pour la mesure de température et de conductivité, mais peu fiable pour les paramètres importants comme le chlore, le pH et la turbidité

(Besner, 2013). Le développement d’autres technologies est donc justifié pour répondre aux besoins des municipalités de façon fiable (Besner, 2013).

Les sondes paramétriques Kapta^{tm} 3000-AC4 sont de type « en insertion », la génération actuelle de capteurs capables de mesurer la conductivité, le chlore actif (HOCl), la température et la pression sans ajout de réactifs. Les sondes ont été testées à l'exposition universelle de Shanghai en 2010, au stade Wembley lors des Jeux olympiques de Londres en 2012, dans le cadre du projet SECUR'EAU organisé par la Commission Européenne et dans quelques réseaux de distribution européens (Veolia Water Solutions & Technologies, 2014).

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

3.1 Objectif général du projet

L'objectif général du projet était d'analyser l'impact du changement de source d'approvisionnement sur la qualité de l'eau dans le réseau de distribution en utilisant des appareils de suivi en temps réel.

3.2 Objectifs spécifiques du projet

- Identifier les impacts et les indicateurs du changement de source sur la qualité de l'eau.
- Vérifier si le choix des paramètres de suivi, le nombre de points de suivi choisi et leur positionnement sont adéquats pour dresser un portrait de la qualité de l'eau potable de la zone du changement de source d'approvisionnement.
- Résumer les mesures du suivi en continu nécessaires pour dresser un bilan des impacts du changement de source d'approvisionnement de juin 2016. Déterminer aussi les variations de temps de séjour.
- Évaluer les avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel pour caractériser le nombre, la durée et l'intensité des épisodes d'eau rouge.
- Déterminer l'impact de l'opération de manipulation des vannes sur la turbidité et la concentration de chlore résiduel libre équivalent dans l'eau du secteur.
- Comparer les résultats du suivi en continu (mesures des appareils de suivi en continu) et du suivi ponctuel (mesure sur le terrain par le technicien).
- Évaluer l'impact du changement de source sur le nombre de bris de conduites du réseau de la municipalité.
- Déterminer la composition des dépôts de corrosion de conduites du secteur.

3.3 Hypothèse de recherche

- Un suivi en continu de la qualité de l'eau potable à cinq points du réseau d'aqueduc de 77,12 km de conduites permet de mesurer les changements transitoires de la qualité de l'eau potable dans le réseau.
- Les échantillonnages ponctuels même fréquents ne permettent pas de détecter des épisodes d'eau rouge.
- Le changement de source vers une source d'eau ayant une qualité d'eau plus stable et moins corrosive diminue les épisodes d'eau rouge.

3.4 Justification de l'originalité

L'originalité de ce travail consiste en l'utilisation d'une nouvelle génération de sondes autonome de suivi en continu pour analyser la qualité de l'eau pour quantifier les impacts d'un changement de source d'eau potable dans un réseau chloré du Canada. À l'exception d'une installation de sondes Kapta^{tm} dans la région de Boston, les sondes n'ont pas été testées en Amérique du Nord. Elles sont surtout installées dans les réseaux européens. Par rapport aux technologies existantes, ces sondes communicantes sont innovantes puisqu'elles permettent de mesurer en continu la conductivité, la concentration de chlore actif, la température et la pression sans aucune maintenance pendant une année complète.

CHAPITRE 4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1 Présentation du secteur à l'étude

La zone à l'étude importe son eau potable de l'usine A. Une problématique d'eau rouge dans ce secteur a été observée depuis une dizaine d'années. Le secteur qui a subi le changement de source compte 77,12 km de conduites (principales et secondaires). Le réseau est majoritairement constitué de conduites en fonte grise (58%) et en fonte ductile (34%). Les autres matériaux cumulent 8% (béton armé, béton précontraint, chlorure de polyvinyle, cuivre, fer galvanisé, fonte, fonte ductile et fonte grise). À partir du 7 juin 2016, l'alimentation en eau a été assurée par l'usine B. La Figure 4.1 présente la position de la zone du changement de source d'approvisionnement par rapport aux usines A et B.

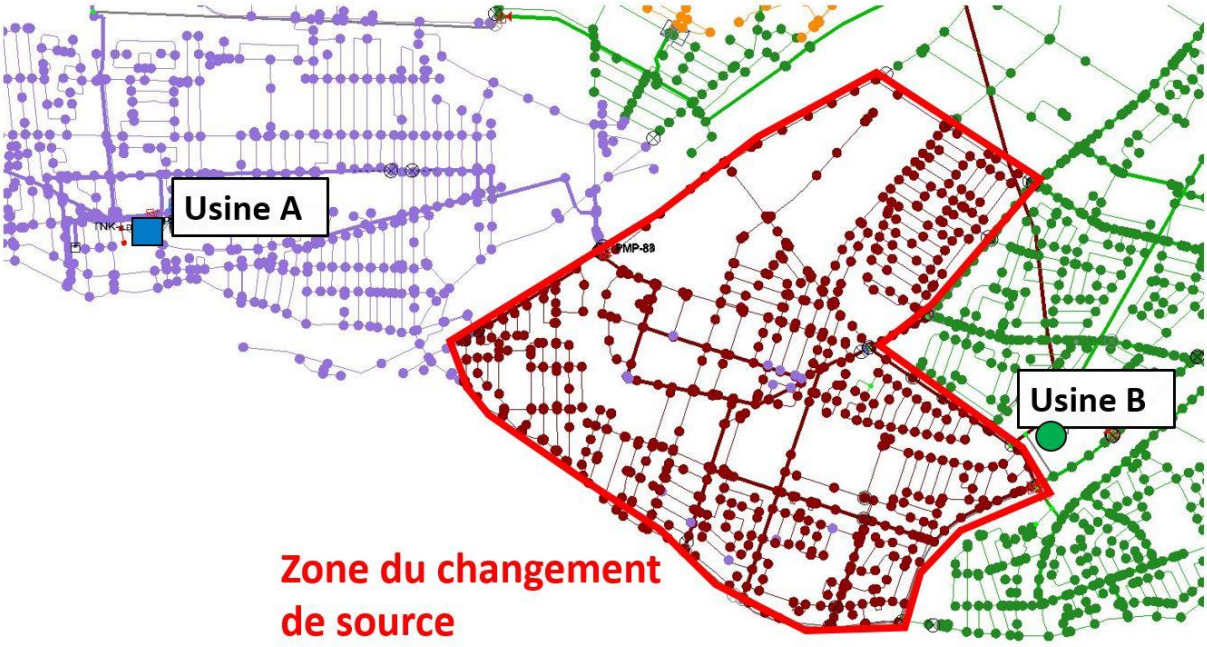


Figure 4.1 : Localisation de la zone du changement de source d'approvisionnement et des usines A et B

Les impacts du changement de source sont étudiés par deux suivis, soit le secteur pilote et le changement complet d'alimentation. Le Tableau 4.1 présente les dates de début et de fin des suivis du projet. De plus, le tableau précise les dates des manipulations des vannes provoquant le changement de source.

Tableau 4.1 : Dates de début et de fin des suivis du projet

Type de suivi	**Date de début du suivi**	**Date de fin du suivi**	**Date du changement de source**
Secteur pilote	23 mars 2015	22 juin 2015	14 avril 2015
Changement complet d'alimentation	24 février 2016	29 septembre 2016	7 juin 2016

4.2 Description du secteur pilote

Le changement de source d'approvisionnement peut occasionner des problèmes de qualité de l'eau. Pour cette raison, le changement de source d'approvisionnement est étudié par un projet pilote à partir de mars 2015. Le secteur pilote compte 1,8 km de conduites secondaires dans une zone majoritairement résidentielle. La Figure 4.2 présente la position du secteur pilote et des points de suivi par rapport aux usines A et B.

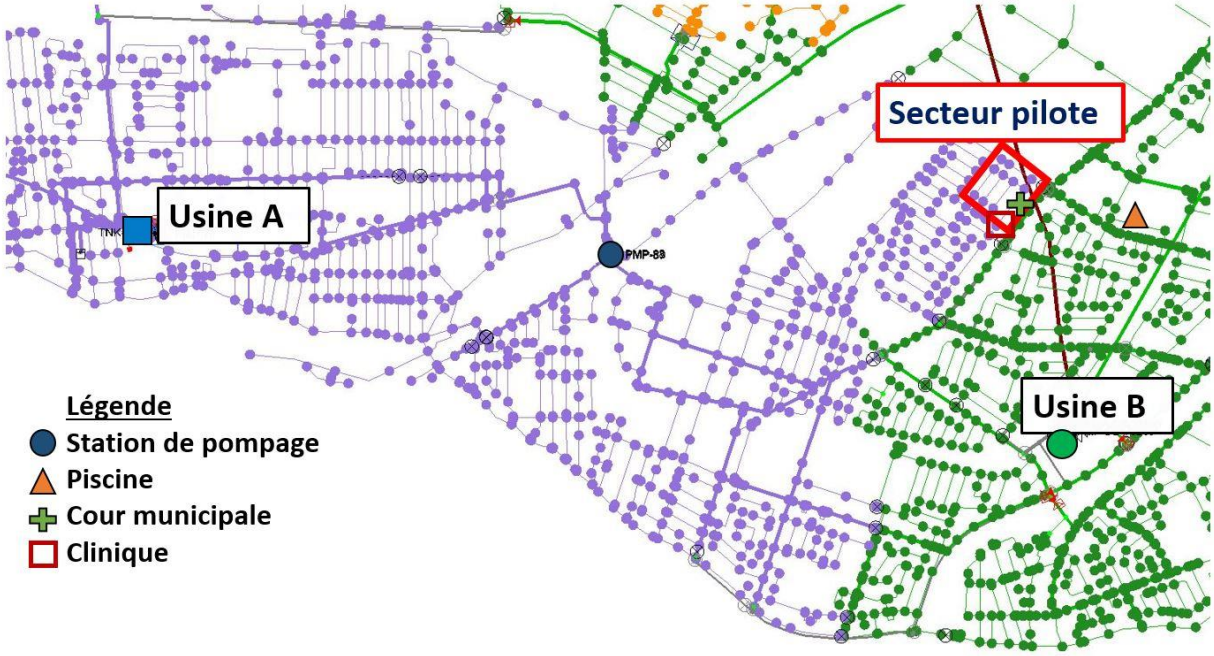
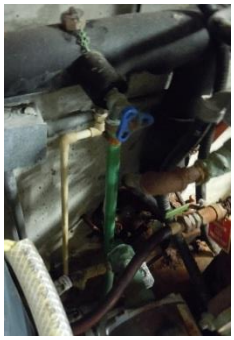


Figure 4.2 : Position du secteur pilote et des points de suivi par rapport aux usines A et B

Deux sites de suivi situés dans le pilote ont subi le changement de source (Cour municipale et Clinique) et deux sites à l'extérieur (Station de pompage et Piscine). Le suivi a débuté le 23 mars 2015 et s'est terminé le 22 juin 2015. Le changement de source dans le secteur pilote a eu lieu le 14 avril 2015. Le Tableau 4.2 présente les détails des sites de suivi du secteur pilote.

Tableau 4.2 : Détails des sites de suivi du secteur pilote

Sites de suivi	**Interne/externe**	**Photo du branchement du montage**
Station de pompage (Sonde au niveau du sol en dérivation)	Externe – Alimenté par l'usine A	
Piscine (Sonde au sous-sol en dérivation)	Externe – Alimenté par l'usine B	
Cour municipale (Sonde au 3ème étage en dérivation)	Interne- Alimenté par un mélange des deux usines, car il y a deux entrées de service	
Clinique (Sonde au 2ème étage en dérivation)	Interne – Secteur pilote où il y aura le changement de source (usine A, puis usine B)	

4.3 Description du secteur lors du changement complet d'alimentation

Pour étudier la qualité de l'eau pendant le changement complet d'alimentation, 5 sites de suivi sont choisis. La zone du réseau de distribution à l'étude compte un total de 77,12 km de conduites (principales et secondaires). La Figure 4.3 présente la position de la zone du changement de source et des points de suivi par rapport aux usines A et B.

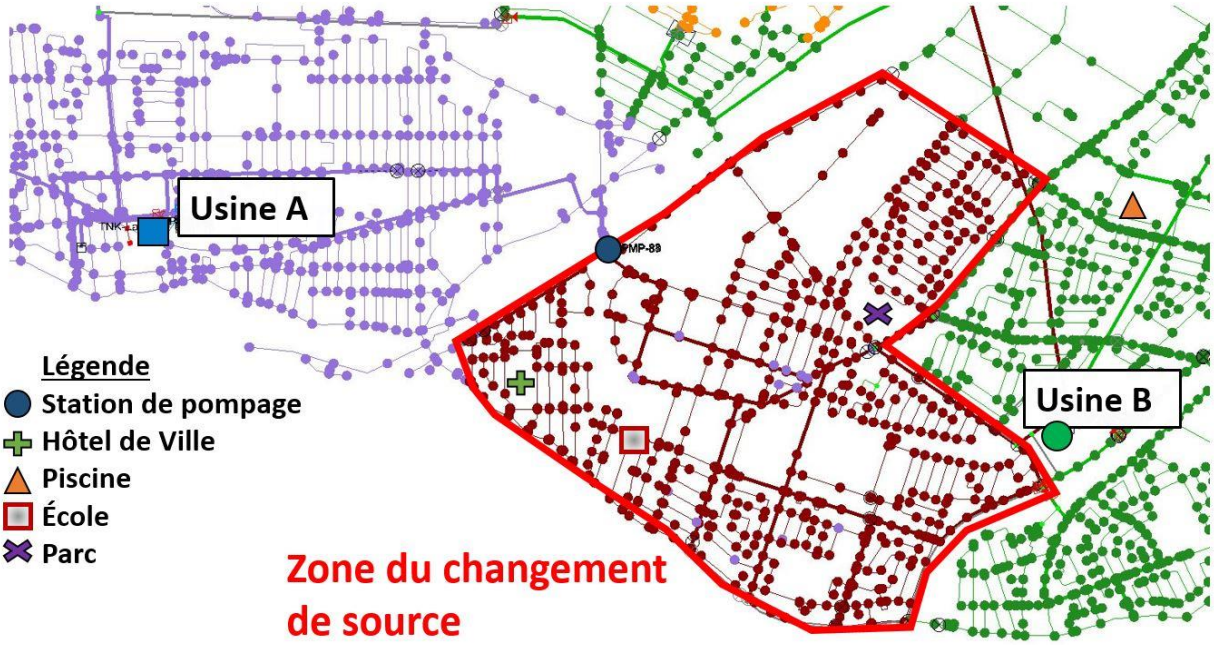


Figure 4.3 : Position de la zone du changement de source et des points de suivi par rapport aux usines A et B

Trois sites sont situés dans la zone du changement de source (l'Hôtel de Ville, l'école et le Parc) et deux sites à l'extérieur (Station de pompage et Piscine). Le suivi a débuté le 24 février 2016 et s'est terminé le 29 septembre 2016. Le changement de source dans la zone a lieu le 7 juin 2016. Le Tableau 4.3 présente les détails des 5 sites de suivi lors du changement complet d'alimentation.

Tableau 4.3 : Détails des 5 sites de suivi lors du changement complet d'alimentation

Sites de suivi	**Interne/externe**	**Photo du branchement du montage**
Station de pompage (Sonde au niveau du sol en dérivation)	Externe – Alimenté par l'usine A	
Hôtel de Ville (Sonde au rez-de-chaussée en dérivation)	Interne - changement de source (usine A, puis usine B)	
Piscine (Sonde au sous-sol en dérivation)	Externe – Alimenté par l'usine B	
École (Sonde au sous-sol en dérivation)	Interne - changement de source (usine A, puis usine B)	
Parc (Sonde au rez-de-chaussée en dérivation)	Interne - changement de source (usine A, puis usine B)	

4.4 Mesure de la conductivité, du chlore actif, de température et de pression par la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 de Veolia Water

4.4.1 Nombre de sondes requis et positionnement des Kapta^{tm} 3000-AC4 en réseau

Pour un suivi général de la qualité de l'eau, le fabricant recommande une distance linéaire de conduite entre les sondes de 20 à 30 km et de placer les sondes à des emplacements stratégiques du réseau comme la sortie des réservoirs ou des postes de pompage, les canalisations desservant des zones populeuses, les extrémités du réseau et les clients sensibles. Le placement des sondes peut être réalisé à l'aide d'un algorithme d'optimisation sur un logiciel. Parmi les contraintes d'installation, la vitesse d'écoulement dans la conduite doit être comprise en 0,03 et 1,5 m/s (Veolia Water Solutions & Technologies, 2013). La vitesse d'écoulement requise empêche donc l'utilisation de la Kapta^{tm} dans les culs-de-sac du réseau de distribution. Il faut également percer la conduite pour installer la sonde avec un angle de 30 à 45° selon les indications du fabricant (Veolia Water Solutions & Technologies, 2013). Pour une utilisation en Amérique du Nord, un adaptateur adapté au diamètre et au matériau de la conduite doit être installé. De plus, l'emplacement de la sonde doit avoir une réception du signal suffisante. Il est possible d'ajouter un amplificateur de signal ou utiliser des regards en composites.

4.4.2 Fonctionnement de la sonde KAPTA^{tm} 3000-AC4

La Figure 4.4 présente la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 et le boîtier GSM contenant la batterie.

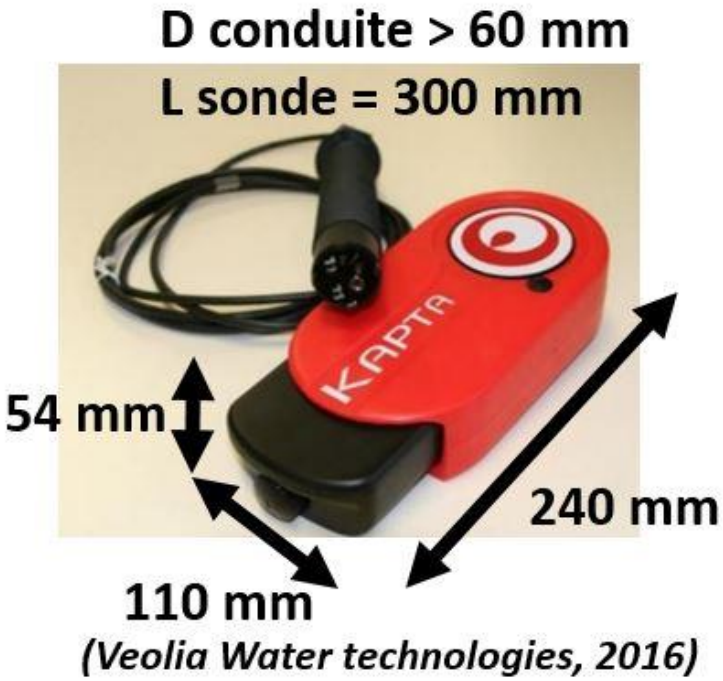


Figure 4.4 : Sonde Kapta 3000-AC4 et boîtier GSM

La sonde prend une mesure aux 10 secondes. Selon le mode de fonctionnement choisi (turbo ou normal) et pour chaque paramètre, la sonde enregistre la moyenne de 30 mesures prises chaque 5 minutes (mode turbo) ou la moyenne de 360 mesures prises chaque heure (mode normal) (Veolia Water Solutions & Technologies, 2013). Les données sont stockées dans le boîtier GSM et envoyées par SMS selon l'intervalle de temps fixé par l'exploitant (15 minutes à 24 heures) (Veolia Water Solutions & Technologies, 2013). Le boîtier de réception KaptaLink^{tm} reçoit les SMS contenant les données et les place dans des fichiers (type .csv). Comme les données sont envoyées par SMS, le boîtier doit avoir une carte SIM et un abonnement valide à un service de téléphonie.

4.4.3 Calcul du chlore résiduel libre à partir du chlore actif, de la température et du pH de l'eau

Il est possible de calculer le chlore résiduel libre à partir des données de sondes de chlore actif en corrigeant les lectures avec des mesures simultanées de température, concentration de chlore actif et pH de l'eau (Beriet, De Coulon, & Lemoine, 2013). Dans un réseau où le pH varie peu, la mesure en continu du pH n'est pas nécessaire. Si le pH varie à l'eau traitée et distribuée, il faut combiner la sonde Kapta^{tm} à un appareil mesurant le pH et s'assurer que les appareils prennent des mesures

avec le même pas de temps. Le pH de l'eau doit être compris entre 6,5 à 9,0 et il faut une maintenance mensuelle de la sonde de pH pour atteindre la précision nécessaire de 0,01 unité de pH (Beriet et al., 2013). En négligeant l'intensité du courant, l'équation simplifiée suivante est obtenue.

$$[Chlore\ libre\ résiduel]_{\frac{mg}{L}} = [Chlore\ actif]_{\frac{mg}{L}} \times \left(1 + 10^{(pH - pKa)}\right)$$

[Chlore actif] = Concentration de chlore actif en mg/L
pH = pH de l'eau en contact avec l'électrode
pKa = 3000/T - 10,0686 + 0,0253 × T (Morris, 1966)
T = Température en degré Kelvin

4.5 Calcul des indices d'agressivité, de Langelier et de Ryznar de l'eau distribuée pour l'année 2015

Le calcul des indices a été effectué avec le modèle RTW développé par Tetra Tech, et vise à confirmer la tendance corrosive de l'eau de l'usine A (données moyennes de l'année 2015). Les données requises sur l'eau brute proviennent du service de l'eau de la municipalité et des contremaîtres des usines A et B. La température moyenne (posée identique à l'usine B), la concentration en solides totaux dissous (posée à 0,67% de la valeur de la conductivité moyenne) et les concentrations de Cl^- et de SO_4 (posées identiques à usine B) de l'usine A sont posées, car ces valeurs ne sont pas mesurées à l'usine A. La Figure 4.5 présente un exemple de simulation avec l'outil RTW.

The RTW Model Ver. 4.0 ID: **Usine A**

STEP 1: Enter initial water characteristics.

Measured TDS	105	mg/L
Measured temperature	6,1	deg C
Measured pH	7,13	
Measured alk, as CaCO3	41	mg/L
Measured Ca, as CaCO3	54	mg/L
Measured Cl	27	mg/L
Measured SO4	24	mg/L

For CT and TTHM functions enter current:

Treated water pH		
Chlorine residual		mg/L
Chlorine or hypochlorite dose as chlorine equivalent		mg/L

STEP 2: Enter amount of each chemical to be added (expressed as 100% chemical). Press Ctrl+C to select chemicals for this list.

Alum 50% solution	38,2	mg/L
Caustic soda	9,8	mg/L
Chlorine gas	2,6	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L
Ctrl+C to add to list	0	mg/L

STEP 3: Adjust at Step 2 until interim water characteristics meet your criteria.

Theoretical interim water characteristics			Desired	Theoretical interim water characteristics			Desired
Interim alkalinity	40	mg/L	> 40 mg/L	Interim pH	7,10		6.8-9.3
Interim Ca, as CaCO3	54	mg/L	> 40 mg/L	Precipitation potential	-17,92	mg/L	4-10 mg/L
Alk/(Cl+SO4)	0,7		> 5.0	Langelier index	-1,50		>0

Press PAGE DOWN for additional initial, interim and final water characteristics if desired.

Calculated initial water characteristics

Initial acidity	58	mg/L
Initial Ca sat, as CaCO3	1564	mg/L
Initial DIC, as CaCO3	99	mg/L

Theoretical interim water characteristics

Interim acidity	59	mg/L
Interim Ca sat, as CaCO3	1696	mg/L
Ryznar index	10,10	
Interim DIC, as CaCO3	99	mg/L
Aggressiveness Index	10,44	

Theoretical final water characteristics after CaCO3 precipitation

Final alkalinity	N/A	mg/L
Final Ca	N/A	mg/L
Final acidity	N/A	mg/L
Final pH	N/A	
Final DIC, as CaCO3	N/A	mg/L

Press PAGE UP to review measured initial water characteristics, chemical addition quantities and additional

Figure 4.5 : Capture d'écran de la simulation RTW avec les caractéristiques moyennes

4.6 Calcul du carbone inorganique dissous (DIC)

Le carbone inorganique dissous (DIC) est calculé à partir d'un outil de calcul Excel développé par Mike R. Schock (United States Environmental Protection Agency). Pour réaliser le calcul, il faut entrer la température, la concentration de solides totaux dissous (TDS), le pH et l'alcalinité totale de l'eau. L'outil de calcul utilise l'équation générale présentée à la Figure 4.6.

$$\mathrm{DIC} = \left[1 + \frac{K_2'}{[\mathrm{H}^+]} + \frac{[\mathrm{H}^+]}{K_1'}\right]\left[\frac{\text{Total alkalinity} - \frac{K_w'}{[\mathrm{H}^+]} + [\mathrm{H}^+]}{1 + \frac{2 \cdot K_2'}{[\mathrm{H}^+]}}\right] \cdot 12{,}011$$

Figure 4.6 : Équation du calcul du DIC de l'outil de calcul (Schock, 1990)

Le DIC (mg C/L) est obtenu à partir de l'alcalinité totale (eq/L) et de la concentration $[H^+]$ (mol/L). D'autres équations sont utilisées pour tenir compte de l'effet de la température et de la concentration de solides totaux dissous.

4.7 Représentativité des mesures du suivi en continu

4.7.1 Vérification du nombre de points de suivi

Le nombre de montages minimal requis de 3 a été calculé à partir de la longueur totale du réseau subissant le changement de source (77,12 km), en utilisant les recommandations du fabricant de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 (un montage de sondes à tous les 20 à 30 kilomètres linéaires de réseau).

4.7.2 Vérification de la position des points de suivi

Les montages d'appareils de suivi en continu sont installés en dérivation de l'entrée de service et non sur le réseau en insertion. La municipalité n'a pas donné l'autorisation de percer les conduites pour installer les sondes en insertion. De ce fait, l'effet de la tuyauterie du bâtiment peut affecter les mesures des paramètres de la qualité de l'eau et la mesure de pression est également perdue. Le positionnement a été fait selon la disponibilité de bâtiments publics chauffés à l'année et ayant un drain et une prise électrique à proximité de la conduite d'entrée d'eau. Le positionnement vise aussi à couvrir l'ensemble de la zone pour étudier les points ayant des temps de séjour élevés. Une autre contrainte était d'obtenir l'accord des directions de chacun des bâtiments pour l'installation des montages. Finalement, les montages ont été répartis pour couvrir le territoire subissant le changement en calculant le rayon couvert par chaque montage selon les étapes suivantes :

1. Évaluer la longueur du réseau de distribution (L= 77,12 km)
2. Estimer la surface de la zone subissant le changement avec Google Maps (A= 6,46 km^2)

3. Estimer le nombre de km de conduites par km^2 (N = L/A = 11,95 km/km^2)
4. Calculer le rayon d'influence selon 20/N = π x r^2 ou 30/N π x r^2
5. Positionner les points de suivi sur une carte et leur rayon d'influence
6. Juger si le positionnement est adéquat selon la surface couverte de la zone subissant le changement ou si les points sont trop près l'un de l'autre.

La Figure 4.7 présente la carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source d'eau potable.

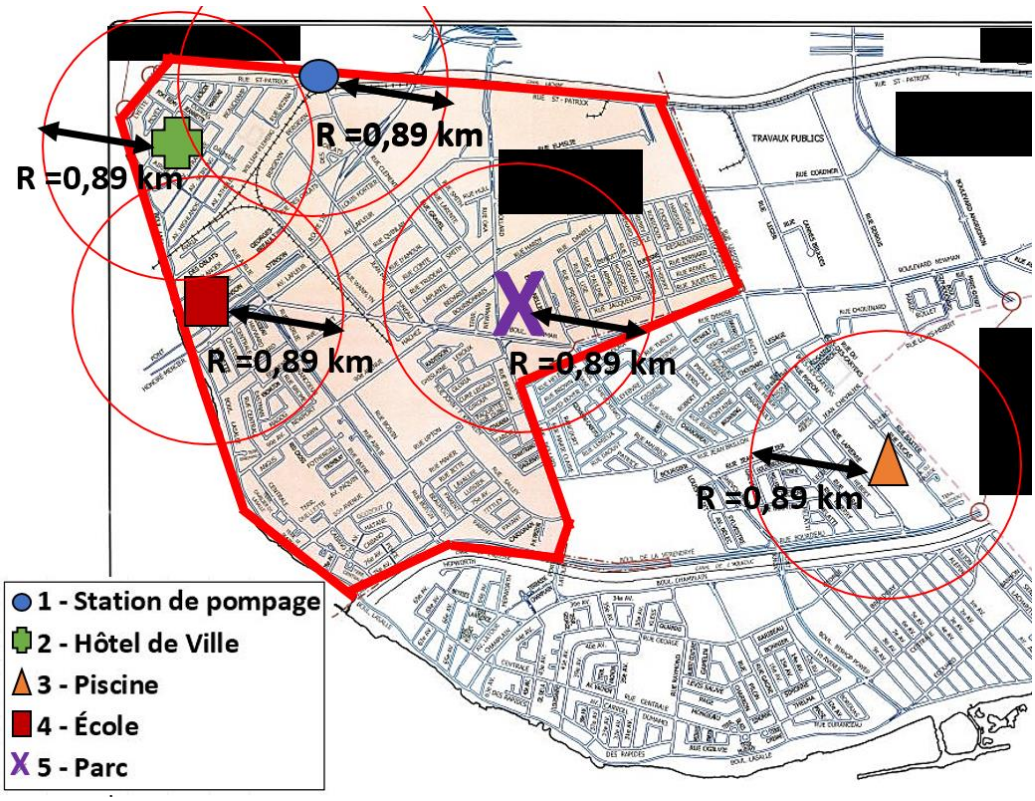


Figure 4.7 : Carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source et leur rayon d'influence (1 montage par 30 km de conduites)

4.7.3 Vérification des différences entre l'eau de l'entrée de service et celle de la conduite du réseau

Selon les recommandations du manufacturier, la vitesse de l'eau doit varier de 0,03 à 1,5 m/s pour un fonctionnement optimal de la sonde Kapta^{tm}. Plusieurs vérifications du débit des montages ont

été effectuées sur le terrain et ont démontré que la vitesse moyenne des points de suivi se situait dans cette gamme (min = 0,11 ; moyenne = 0,13 m/s et max = 0,15 m/s).

4.8 Suivi de 4 sites du secteur pilote

Un rapport interne de la municipalité partenaire souligne que les caractéristiques des eaux produites par les usines A et B sont significativement différentes. Ce rapport recommande donc une analyse préalable de l'impact du changement de source sur la qualité de l'eau dans un secteur pilote de quelques rues. Le choix du secteur pilote est fait par le service de l'eau selon les critères suivants :

- Minimiser le nombre de vannes à manipuler
- Minimiser le nombre de clients commerciaux
- Minimiser le nombre de culs-de-sac créés
- Éviter d'inclure des clients industriels dans les secteurs pilotes (baisse de pression)
- Minimiser le temps de séjour de l'eau distribuée dans les nouveaux culs-de-sac
- Assurer le maintien des débits d'incendie requis.

Deux secteurs pilotes sont proposés, mais un seul permet de maintenir les débits d'incendie requis. La Figure 4.8 présente le plan de l'ordre de travail de la Ville.

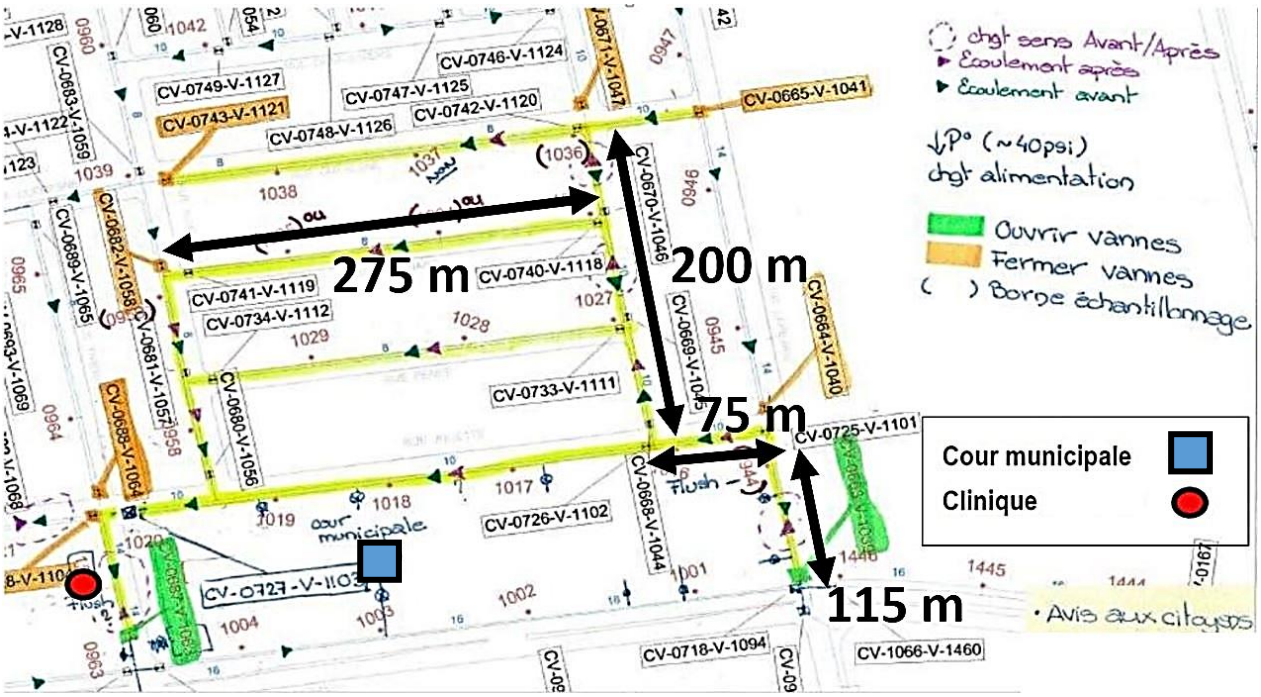


Figure 4.8 : Croquis de l'ordre de travail de la Ville

Cette figure présente les dimensions du secteur pilote retenu. Le secteur pilote a été étudié du 23 mars 2015 au 22 juin 2015 (3 mois). Le changement de source dans le secteur pilote s'est produit le 14 avril 2015. Le secteur pilote sert à étudier les impacts sur la qualité de l'eau. Certains impacts sont étudiés en considérant le changement de configuration hydraulique dans le secteur pilote. L'isolement du secteur pilote nécessite l'ouverture de deux vannes et la fermeture de sept vannes. Le croquis présente aussi les sens d'écoulement avant et après le changement de source. Le Tableau 4.4 présente les types de bâtiments et les caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 4 points de suivi lors du suivi du secteur pilote.

Tableau 4.4 : Types de bâtiment, caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 4 points de suivi

Paramètre	Station de pompage	Cour municipale	Piscine	Clinique
Type de bâtiment	Poste de surpression	Institution	Institution	Commerce
Usine	Usine A	Usine A et Usine B	Usine B	Changement (A, puis B)
Diamètre entrée de service	N/A	2 entrées de service de 3"	3"	3"
Matériaux entrée de service	Information indisponible			
Diamètre conduite de rue	10"	Newman : 16" & Juliette 10"	8"	14"
Matériaux conduite de rue	Fonte ductile	Fonte grise	Fonte grise	Fonte grise

La Station de pompage et la Piscine sont les points de comparaison avec les usines A et B. La Clinique est le seul point subissant le changement de source étant donné que la Cour municipale compte deux entrées de service. Cette information était inconnue lors du choix des points de suivi.

4.8.1 Montage installé aux 4 points de suivi

Le montage installé aux 4 points de suivi est présenté à la Figure 4.9.

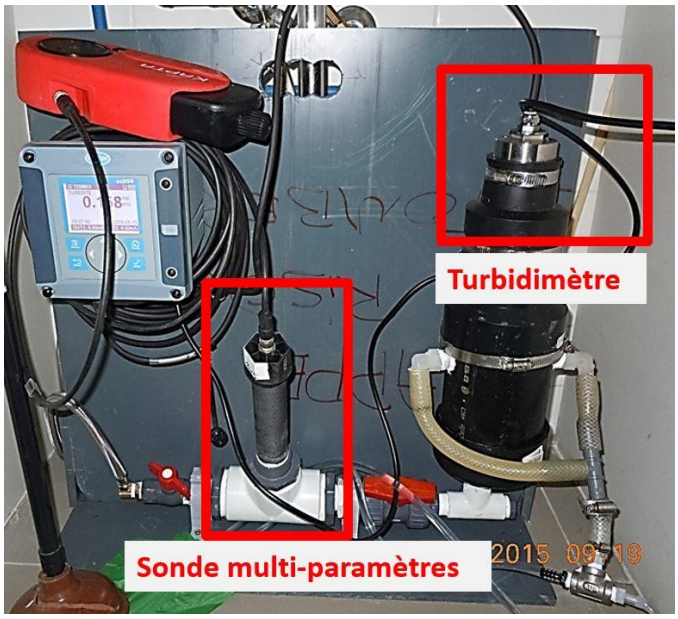


Figure 4.9 : Montage installé aux 4 points de suivi

Le montage est installé en dérivation de l'entrée de service à l'intérieur du bâtiment. À la sortie du montage, une conduite rejette l'eau dans le drain de plancher. Le montage compte une sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 et un turbidimètre Hach (modèle Solitax ou 1720E).

4.8.2 Suivi en continu de 4 sites du secteur pilote

La Figure 4.10 présente le positionnement des points de suivi du secteur pilote et à l'extérieur par rapport aux usines A et B.

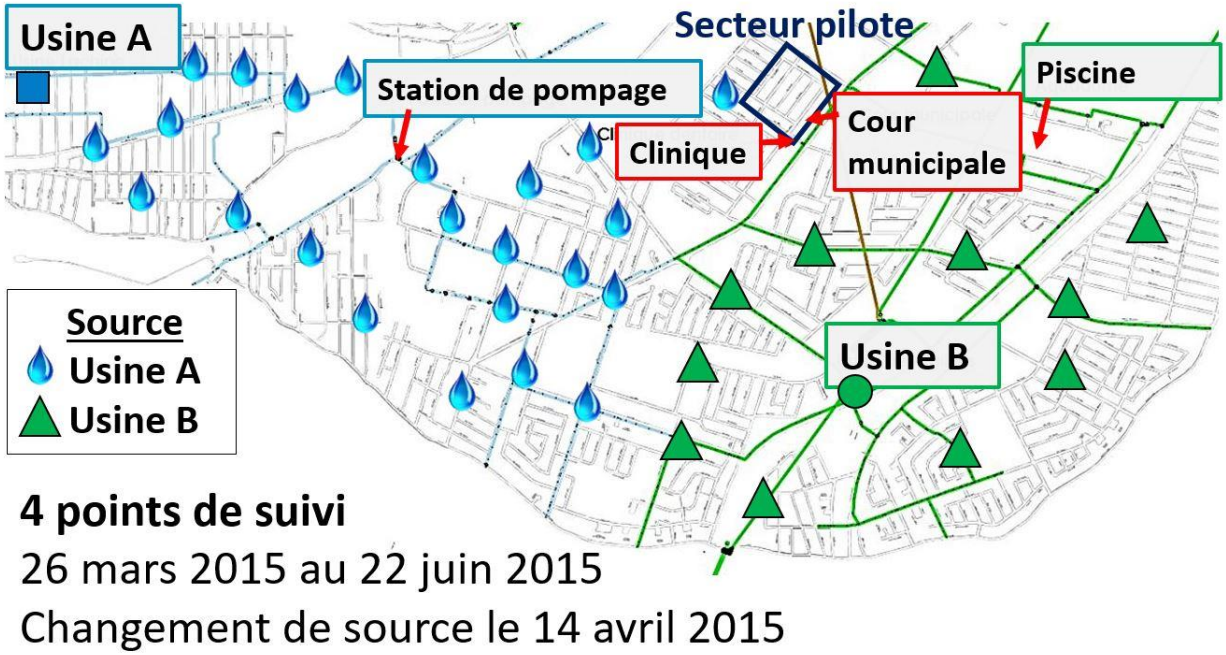


Figure 4.10 : Positionnement des points de suivi à l'intérieur et l'extérieur du secteur pilote

Le suivi en continu du chlore actif (HOCl), de la conductivité et de la température est réalisé par des sondes multiparamètres Kapta^{tm} 3000-AC4 de *Veolia Water Technologies*. Chaque intervalle de cinq minutes, la sonde enregistre la moyenne de 30 mesures prises (mode turbo). Il est possible de télécharger les fichiers à partir d'un protocole de transfert FTP et de traiter les résultats avec Microsoft Excel. La mesure de turbidité est réalisée par le turbidimètre Hach (modèle Solitax ou 1720E). Le Tableau 4.5 présente un résumé de la méthodologie, le matériel, la limite de détection et la précision des appareils de suivi en continu utilisés selon le paramètre.

Tableau 4.5 : Suivi en continu - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils de suivi en continu en fonction du composé

Paramètre	Méthodologie	Matériel	Limite de détection	Précision appareil
Conductivité	Brevet US 20120145561 A1 (Beriet et al., 2013)	Sonde Kapta^{tm} 3000-AC4	50 à 1000 µS/cm	± 5 µS/cm ; ± 5%
Chlore actif (HOCl)			Entre 0,01 et 2,0 mg/L	± 0,03 mg/L ; ± 5%
Température			Entre 0 et 40°C	± 1,2°C
Turbidité (Station de pompage et piscine)	Standard Methods 2130B, USEPA 180.1, Méthode Hach 8195	Turbidimètre Hach 1720E modèle 2976800	0,001 à 100 UTN	Plage 0 à 10 UTN : Maximum de ±2% ou ±0.020 NTU Plage 10 à 40 UTN : ±5% Plage 40 à 100 UTN : ±10%
Turbidité (Cour municipale et Clinique)	DIN EN ISO 7027	Turbidimètre Hach Solitax modèle 2983700	0,001 à 4000 UTN	Calibré : Maximum de 1% ou ±0,001 UTN Non calibré : Maximum de 5% ou 0,01 UTN

4.8.3 Suivi ponctuel hebdomadaire de 4 sites du pilote

Les échantillonnages ponctuels ont lieu aux mêmes sites que le suivi en continu. L'eau est prise au drain à la sortie du montage. Le pH, la température, le chlore libre, le chlore total et la conductivité sont mesurés directement sur le terrain à l'aide d'instruments portatifs (pH, température, chlore libre et conductivité) selon le manuel de Standard Methods (American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF), 2012) (Tableau 4.7). Les échantillons de fer et manganèse total sont prélevés dans des tubes de 50 mL de polypropylène acidifiés à 50% HNO_3 avant leur analyse par ICP/AES. Des duplicatas d'échantillons ont aussi été prélevés et filtrés sur site à 0,45 µm pour évaluer la fraction dissoute des deux métaux. Les échantillons prélevés sont maintenus au froid (4°C) dans des

glacières jusqu'au moment des analyses et sont analysés au laboratoire avec la méthode 3120B (ICP/AES) de l'APHA. Le Tableau 4.6 présente le protocole d'échantillonnage du suivi ponctuel du secteur pilote.

Tableau 4.6 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Protocole d'échantillonnage

Durée	**Fréquence**	**Laboratoire**	**Sur site**
6 semaines avant le changement de source	1 fois par semaine	Fer et manganèse total et dissous	pH, température, conductivité, turbidité, oxygène dissous, potentiel redox et chlore libre et total
9 semaines après le changement de source			
3 semaines après réouverture			

Le Tableau 4.7 présente la méthodologie du suivi ponctuel du secteur pilote, le matériel, la limite de détection et la précision des appareils en fonction du paramètre mesuré.

Tableau 4.7 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils en fonction du paramètre

Paramètre	Méthodologie	Matériel	Limite de détection	Précision appareil
Chlore libre/total	APHA, 4500-Cl G	Spectrophotomètre Hach DR2800	Méthode : 0,07 mg/l Cl^- Chlore libre : 0,02 à 10,0 mg/L Chlore total : 2 µg/L à 10,0 mg/L	±1,5 nm dans la zone de 340 à 900 nm
Conductivité	APHA, 2510B	Hach HQ40d	0,01 µS/cm à 200 mS/cm	± 0,5% dans la plage (1 µS/cm - 200 mS/cm)
Température	-	Hach HQ40d	-10 à 110 °C	± 0,3 °C
pH	APHA, 4500-H + B	Hach HQ40d	±0,1 pH pour la méthode	± 0,002 pH
Turbidité	APHA 2130B	Hach 2100Q	0 to 1000 NTU Pour 0 à 1 UTN : Reporter au 0,05 près. Pour 1 à 10 UTN : Reporter au 0,1 près.	± 2 % de la mesure
Manganèse (total/dissous)	APHA, 3120B (ICP)	iCAP série 6000 de Thermo Fisher alimenté par un nébuliseur ultrasonique CETAC 5000 AT^+	Méthode : 0,002 à 50 mg/l Mn Limite inférieure de l'appareil : 0,0001 mg/L Mn	Le coefficient de variation entre les deux séries d'analyse varie de 1 à 5%
Fer (total/dissous)	APHA, 3120B (ICP)		Méthode : 0,007 à 100 mg/l Fe Limite inférieure de l'appareil : 0,002 mg/L Fe	Le coefficient de variation entre les deux séries d'analyse varie de 1 à 10%

4.9 Suivi de 5 sites lors du changement de source d'approvisionnement

La Figure 4.11 présente le positionnement des points de suivi à l'intérieur et l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement.

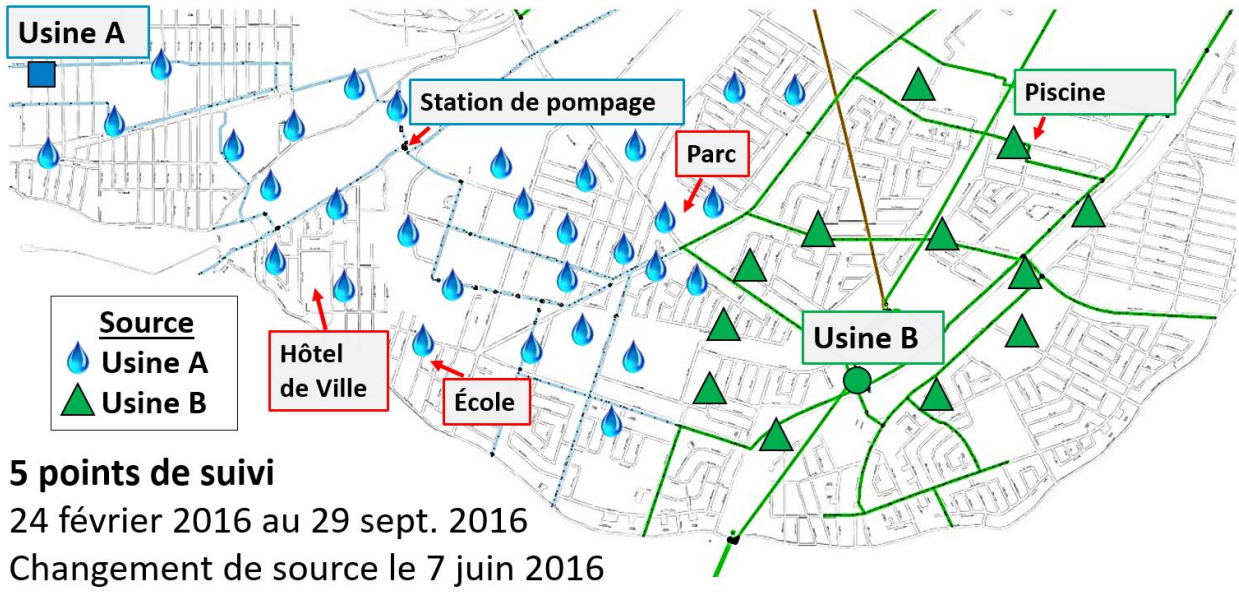


Figure 4.11 : Positionnement des points de suivi à l'intérieur et l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement

Les points ont été étudiés du 24 février 2016 au 29 septembre 2016 (3 mois avant et 3,5 mois après). Le changement de source dans la zone s'est produit lors de la manipulation des vannes du 7 juin 2016. 3 points de suivi subissent le changement de source (l'Hôtel de Ville, l'école et le Parc). Le Tableau 4.8 présente les types de bâtiments, les caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 5 points de suivi lors du changement de source d'approvisionnement.

Tableau 4.8 : Types de bâtiments, caractéristiques des entrées de service et des conduites de rue des 5 points de suivi lors du changement de source d'approvisionnement

Paramètre	**Station de pompage**	**Hôtel de Ville**	**Piscine**	**École**	**Parc**
Type de bâtiment	Poste de surpression	Institution	Institution	Institution	Institution
Usine	Usine A	Changement (A, puis B)	Usine B	Changement (A, puis B)	Changement (A, puis B)
Diamètre entrée de service	N/A	4"	3"	3"	3"
Matériaux entrée de service	Information indisponible				
Diamètre conduite de rue	10"	6"	8"	6"	8"
Matériaux conduite de rue	Fonte ductile	Fonte 250 Delavaud	Fonte grise	Fonte Classe C	Fonte ductile

La Station de pompage et la Piscine sont les points de comparaison avec les usines A et B. L'Hôtel de Ville, l'école et le Parc sont les points de suivi qui subissent le changement de source d'approvisionnement.

4.9.1 Présentation du montage installé aux 5 points de suivi

La Figure 4.12 présente le montage installé aux 5 points de suivi du secteur.

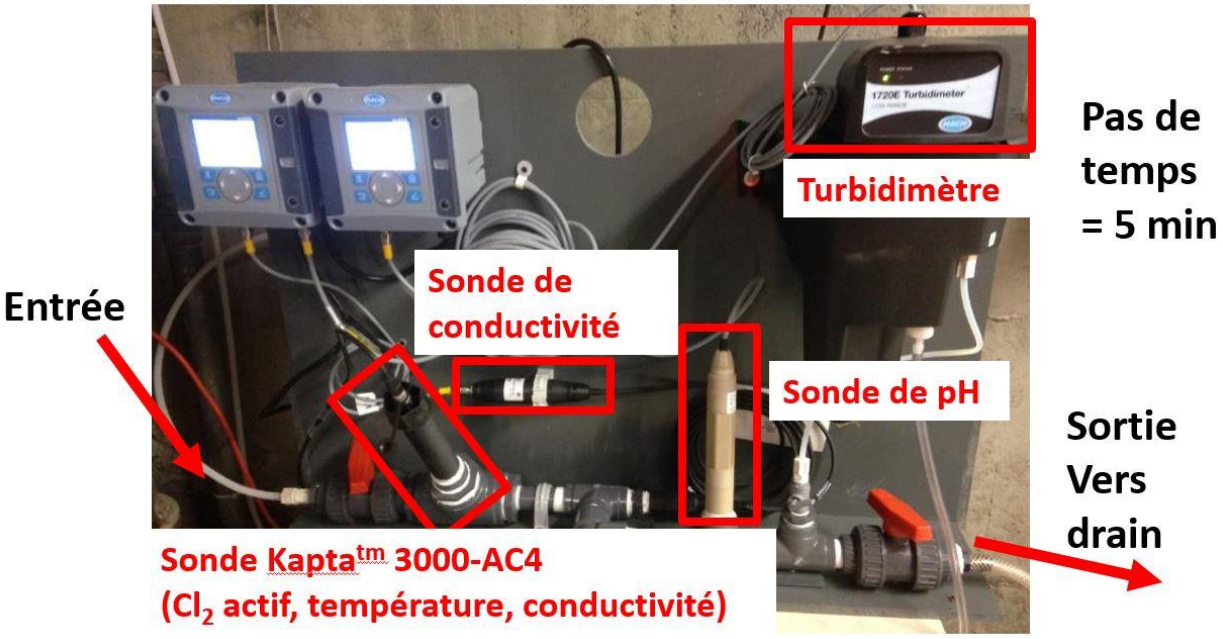


Figure 4.12 : Montage installé aux 5 points de suivi du secteur

Le montage est installé en dérivation de la conduite d'entrée de service dans chacun des bâtiments. De ce fait, la pression mesurée par la sonde Kapta^{tm} n'est pas considérée, car elle est différente de la pression dans la conduite du réseau en face du bâtiment. Le montage compte une sonde Kapta^{tm} 3000-AC4, une sonde de conductivité Hach et un turbidimètre Hach (modèle Solitax ou 1720E). La sonde de conductivité Hach est installée pour réaliser une comparaison supplémentaire de la conductivité mesurée par la sonde Kapta^{tm}.

4.9.2 Suivi en continu de 5 sites de la zone du changement de source

Le suivi en continu du chlore actif (HOCl), de la conductivité et de la température est réalisé par des sondes multiparamètres en ligne Kapta^{tm} 3000-AC4 de Veolia Water. Chaque intervalle de cinq minutes, la sonde enregistre la moyenne des 30 mesures prises (mode turbo). Il est possible de télécharger les fichiers à partir d'un protocole de transfert FTP et de traiter les résultats avec Microsoft Excel. Le Tableau 4.9 présente la méthodologie du suivi en continu, le matériel, la limite de détection et la précision des appareils en fonction du paramètre mesuré.

Tableau 4.9 : Suivi en continu - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils de suivi en continu en fonction du paramètre

Paramètre	Méthodologie	Matériel	Limite de détection	Précision appareil
Conductivité	Brevet US 20120145561 A1 (Beriet et al., 2013)	Sonde Kapta^{tm} 3000-AC4	50 à 1000 µS/cm	± 5 µS/cm ; ± 5%
Chlore actif (HOCl)		Sonde Kapta^{tm} 3000-AC4	Entre 0,01 et 2,0 mg/L	± 0,03 mg/L ; ± 5%
Température		Sonde Kapta^{tm} 3000-AC4	Entre 0 et 40°C	± 1,2°C
Conductivité (Sonde)	Hach	Sonde Hach 3400-SC modèle D3433E8	0,057 à 20 000 µS/cm	± 0,01%
pH	Brevet U.S. Patent Numéro 6395158B1	Sonde Hach pHD-SC modèle DPD1P1	0 à 14,0	± 0,02 pH ± 0,5°C
Turbidité (Parc et école)	Standard Methods 2130B, USEPA 180.1, Hach Method 8195	Turbidimètre Hach 1720E modèle 2976800	0,001 à 100 UTN	Plage 0 à 10 UTN : Maximum de ±2% ou ±0.020 NTU Plage 10 à 40 UTN : ±5% Plage 40 à 100 UTN : ±10%
Turbidité (Station de pompage, piscine et hôtel de Ville)	DIN EN ISO 7027	Turbidimètre Hach Solitax modèle 2983700	0,001 à 4000 UTN	Calibré : Maximum de 1% ou ±0,001 UTN Non calibré : Maximum de 5% ou 0,01 UTN

4.9.3 Suivi ponctuel hebdomadaire de 5 sites de la zone du changement de source

Les échantillonnages ponctuels ont lieu aux mêmes sites que le suivi en continu. L'eau est prise au drain à la sortie du montage. Le Tableau 4.10 présente le protocole d'échantillonnage du suivi ponctuel lors du changement complet d'alimentation.

Tableau 4.10 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Protocole d'échantillonnage

Durée	**Fréquence**	**Laboratoire**	**Sur site**
8 semaines avant le changement de source	1 fois par semaine Exception : 3 fois la semaine du changement de source	Fer et manganèse total et dissous	pH, température, conductivité, turbidité, oxygène dissous et chlore libre et total
13 semaines après le changement de source			

Un épisode d'eau rouge sera considéré si la turbidité de l'eau potable dépasse 5 UTN pendant 5 minutes et plus ou si la concentration de fer total dépasse 300 µg/L. Le Tableau 4.11 présente la méthodologie du suivi ponctuel lors du changement complet d'alimentation, le matériel, la limite de détection et la précision des appareils en fonction du paramètre mesuré.

Tableau 4.11 : Suivi ponctuel hebdomadaire - Méthodologie, matériel, limite de détection et précision des appareils en fonction du composé

Paramètre	**Méthodologie**	**Matériel**	**Limite de détection**	**Précision appareil**
Chlore libre/total	APHA, 4500-Cl G	Spectrophotomètre Hach DR2800	Méthode : 0,07 mg/l Cl^- Chlore libre : 0,02 à 10,0 mg/L Chlore total : 2 µg/L à 10,0 mg/L	±1,5 nm dans la zone de 340 à 900 nm
Conductivité	APHA, 2510B	Hach HQ40d	0,01 µS/cm à 200 mS/cm	± 0,5% dans la plage (1 µS/cm - 200 mS/cm)
Température	-	Hach HQ40d	-10 à 110 °C	± 0,3 °C
pH	APHA, 4500-H + B	Hach HQ40d	±0,1 pH pour la méthode	± 0,002 pH
Turbidité	APHA 2130B	Hach 2100Q	0 to 1000 NTU Selon la méthode : Pour 0 à 1 UTN : Reporter au 0,05 près. Pour 1 à 10 UTN : Reporter au 0,1 près.	± 2 % de la mesure
Manganèse (total/dissous)	APHA, 3120B (ICP)	iCAP série 6000 de Thermo Fisher alimenté par un nébuliseur ultrasonique CETAC 5000 AT^+	Méthode : 0,002 à 50 mg/l Mn Limite inférieure de l'appareil : 0,0001 mg/L Mn	Le coefficient de variation entre les deux séries d'analyse varie de 1 à 5%
Fer (total/dissous)	APHA, 3120B (ICP)		Méthode : 0,007 à 100 mg/l Fe Limite inférieure de l'appareil : 0,002 mg/L Fe	Le coefficient de variation entre les deux séries d'analyse varie de 1 à 10%

4.10 Analyse hydrodynamique de l'écoulement dans le réseau

4.10.1 Approximation des temps de séjour de l'eau potable des conduites aux points de suivi (simulation de la décroissance du chlore résiduel libre)

La simulation de la décroissance du chlore résiduel libre permet d'approximer les temps de séjour aux points de suivi avant et après le changement de source d'approvisionnement. Le modèle de décroissance utilisé est le suivant : $C(t) = C_0 e^{-kt}$

t = temps en jours

C(t) = Concentration de chlore libre résiduel au temps t en mg Cl_2/L

C_0 = Concentration médiane de chlore libre résiduel à la sortie de l'usine en mg Cl_2/L. La valeur est calculée à partir des valeurs quotidiennes à l'eau distribuée du 1er mars au 30 septembre 2016.

k_b = 0,35 d^{-1} (hypothèse du coefficient des conditions de l'eau dans les conduites de Montréal estimé par mesures au laboratoire de la CICEP)

k_w = 0,03 m/d (conduite de diamètre 6 à 10 pouces). Hypothèse du coefficient de la surface des conduites de Montréal. Ce coefficient dépend du matériau de la conduite, de ses caractéristiques et du degré de corrosion.

$$k = k_b + k_w = 1{,}14\ d^{-1} \text{ ou } 0{,}05\ h^{-1}$$

Tableau 4.12 : Concentration médiane C_0 selon l'usine de production d'eau potable

Usine	Concentration médiane C_0 (mg Cl_2/L)
Usine A mars à mai	1,05
Usine B mai à juin	1,18
Usine B juin à septembre	1,18

Le Tableau 4.13 présente les concentrations médianes de chlore résiduel aux points de suivi et à l'usine utilisées pour simuler la décroissance du chlore résiduel libre médiane aux points de suivi.

Tableau 4.13 : [Chlore résiduel médian] aux points de suivi et à l'usine (mg Cl_2 équiv./L)

Point de suivi	**Avant : [Cl_2 résiduel]**	**Après : [Cl_2 résiduel]**	**Avant : [Cl_2 résiduel] à l'usine**	**Après : [Cl_2 résiduel] à l'usine**
Piscine (usine B)	0,17	0,13	1,18	1,18
École	0,77	0,75	1,05	1,18
Hôtel de Ville	0,66	0,42	1,05	1,18
Parc	0,66	1,17	1,05	1,18
Station de pompage (usine A)	0,77	N/A	1,05	N/A

4.11 Étude des bris de conduite dans la zone du changement de source

L'historique des bris de conduites secondaires entre 2002 et 2016 a été fourni par les services techniques de la municipalité.

4.12 Analyse des dépôts de corrosion du réseau

Les dépôts de corrosion ont été collectés sur deux conduites de fonte du réseau de distribution étudié. La Figure 4.13 présente les positions des conduites des rues Mc Vey et Red Cross situées dans la zone du changement de source d'approvisionnement.

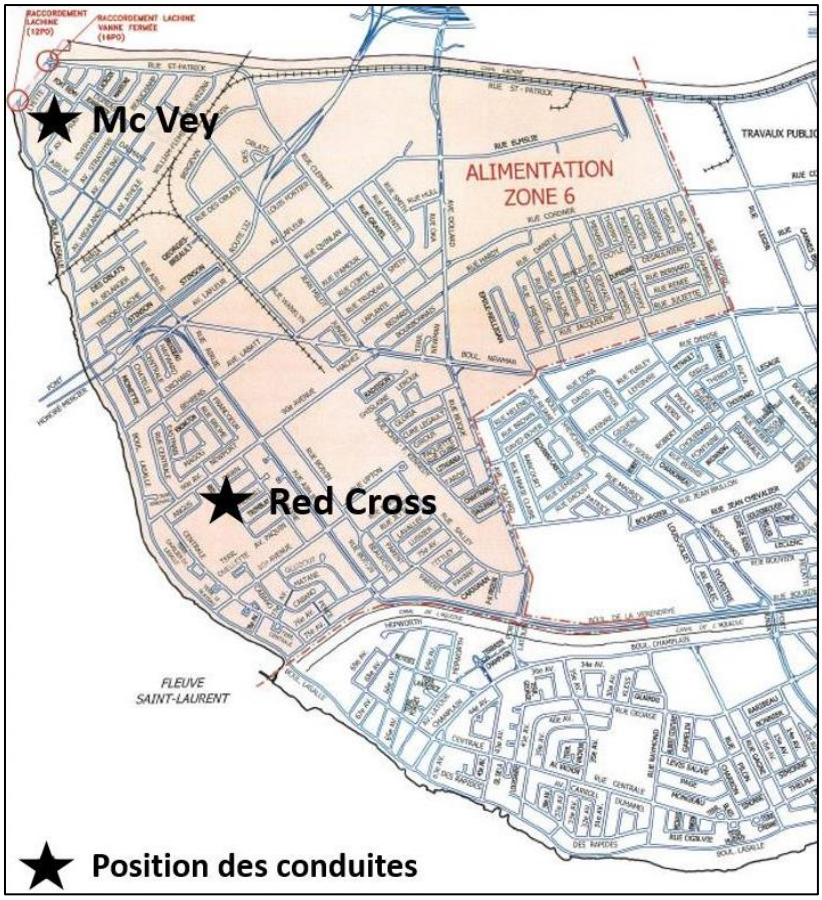


Figure 4.13 : Positions des conduites des rues Mc Vey et Red Cross dans la zone du changement complet d'alimentation

Les dépôts ont été analysés par diffraction aux rayons X (XRD) avec un appareil Philips X'PERT avec un tube de cuivre pour l'émission des rayons X et pour une durée de 2 heures par échantillon (total de 5 échantillons). Des photographies des dépôts sont disponibles à l'annexe D. Les résultats détaillés des analyses XRD sont disponibles à l'annexe E.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 Comparaison des caractéristiques de l'eau distribuée en 2015 des usines A et B

5.1.1.1 Problématique de variation d'alcalinité totale à l'eau distribuée de l'usine A

L'apport de la rivière des Outaouais à la prise d'eau brute de l'usine A, située dans le Lac Saint-Louis sur la Rive-Nord du fleuve Saint-Laurent, fait diminuer l'alcalinité totale à l'eau brute et l'eau distribuée de l'usine A suite à la fonte des neiges chaque année. L'apport varie selon le débit qui est modifié par les barrages en amont de la prise d'eau. La Figure 5.1 présente les variations saisonnières de l'alcalinité totale à l'eau distribuée de l'usine A.

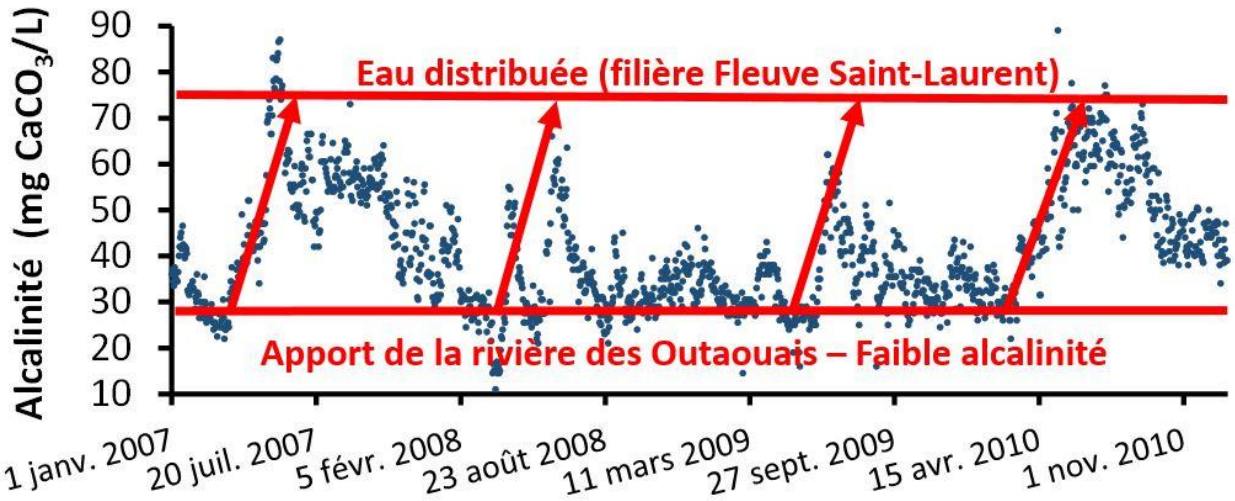


Figure 5.1 : Variations saisonnières de l'alcalinité totale à l'eau distribuée de l'usine A en fonction de l'année (2007 à 2010)

Le niveau minimum de l'alcalinité totale (environ 28 mg $CaCO_3$/L) est atteint chaque année durant les mois de mars ou avril. Par la suite, l'alcalinité totale augmente pour atteindre le pic maximum vers la fin du mois de juin (environ 75 mg $CaCO_3$/L). À ce moment, l'apport de la rivière des Outaouais est minimal et la qualité de l'eau est similaire à celle des autres usines s'approvisionnant dans le Fleuve Saint-Laurent (dont l'usine B). Le réseau reçoit donc déjà une eau similaire à l'usine B sur une base saisonnière. Les variations saisonnières d'alcalinité totale et les faibles alcalinités favorisant la corrosion du fer sont observées sur cette figure. Les données historiques disponibles

ne permettent pas de déterminer la corrélation entre les épisodes d'eau rouge et les faibles alcalinités. Elles sont potentiellement reliées aux épisodes d'eau rouge dans les conduites corrodées du secteur (Imran et al., 2005). En alimentant le secteur par l'usine B, il n'y aura plus de changement saisonnier des caractéristiques de l'eau potable. L'eau potable distribuée après le changement aura une alcalinité plus élevée (environ 92 mg $CaCO_3$/L) et stable durant les changements de saisons (données de 2015 du Service de l'eau de la Ville de Montréal).

De juillet à fin septembre, l'alcalinité totale diminue de 75 à 28 mg $CaCO_3$/L pour une température moyenne de l'eau à 20°C. Les événements d'eau rouge et les plaintes de citoyens plus fréquentes durant cette période pourraient être expliqués par la température chaude de l'eau accompagnant le changement saisonnier de la qualité de l'eau (Imran et al., 2005). Cette observation ne peut être validée par les suivis en continu réalisés dans le cadre du projet (pilote et changement complet d'alimentation) de par l'absence de mesures de turbidité et de fer de juillet à septembre avant le changement d'alimentation. De ce fait, l'analyse sera effectuée sur la base du nombre de plaintes avant et après changement de source d'alimentation pour la même période.

5.1.1.2 Synthèse des caractéristiques de l'eau distribuée des usines A et B

Le Tableau 5.1 présente une comparaison des caractéristiques de l'eau distribuée en 2015 des usines A et B (données de 2015 du Service de l'eau de la Ville de Montréal).

Tableau 5.1 : Comparaison des caractéristiques des eaux distribuées en 2015 par les usines A et B

Paramètres	**EAU DISTRIBUÉE USINE A**			**EAU DISTRIBUÉE USINE B**			**Remarque**
	Min	**Moy**	**Max**	**Min**	**Moy**	**Max**	
Alcalinité totale (mg $CaCO_3$/L)	30	41	65	80	92	101	Usine B : Alcalinité totale stable et plus grande que 80 mg $CaCO_3$/L
Conductivité (µS/cm)	95	161	203	234	314	353	Max Usine A < Min Usine B : Traceur source
Carbone organique total (COT) (mg/L)	1,77	2,62	4,25	1,51	2,01	2,66	Avantage Usine B : moins de COT
DIC (mg $CaCO_3$/L)		97			187		Estimé selon l'alcalinité totale
Dureté totale (mg $CaCO_3$/L)	15	54	99	107	116	132	Usine B : Dureté stable
pH	6,90	7,13	7,30	7,40	7,95	8,20	Avantage Usine B : Idéalement entre 7,5 à 8,0
Indice d'agressivité		10,4*		11,5	12	12,3	Usine A : eau agressive (<12) Usine B: non agressive (> 12)
Indice de Langelier		-1,5*		-0,87	-0,37	0,24	Usine A : eau à tendance corrosive et inférieure à -1
Indice de Ryznar		10,1*		7,8	8,8	9,4	8,5 et + : corrosion importante Entre 7,5 à 8,5 : corrosion sévère
Température (°C)	1,0	6,1	23,0	0,0	6,1	21,0	Température moy Usine A posée, car non mesurée en continu
Turbidité (UTN)	0,1	0,16	0,28	0,15	0,24	0,54	< 1 UTN pour les deux usines

*Résultat simulation RTW (Indice de l'usine A non calculé par la municipalité). Il y a trop d'information manquante pour réaliser les autres simulations (minimum et maximum)

Un objectif du projet est d'évaluer les impacts à court et moyen terme du changement de source. Le calcul des indices d'agressivité de Langelier et de Ryznar vise à confirmer la nature corrosive de l'eau distribuée de l'usine A. Comme plusieurs valeurs sont posées, il faut s'attarder aux tendances des valeurs plutôt qu'aux valeurs exactes (tendance vers une eau plus ou moins corrosive). Les résultats du Tableau 5.1 permettent de confirmer les bienfaits potentiels du changement de source d'approvisionnement suivants :

- L'alcalinité totale sera plus stable et plus grande que 80 mg $CaCO_3$/L, ce qui devrait diminuer le nombre d'épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005).
- Le pH de l'usine B est presque totalement dans la zone de pH idéal (7,5 à 8,0) pour limiter la corrosion du fer (Gouvernement du Québec, 2011; Schock, 1990). Les indices d'agressivité, de Langelier et de Ryznar confirment que l'eau de l'usine B serait moins

corrosive pour le réseau que l'eau distribuée par l'usine A. La corrosion des conduites entraîne des coûts d'entretien, la détérioration de la qualité de l'eau, la réduction de la qualité du service, des pertes d'eau par les fuites et la perturbation des activités du quotidien des citoyens durant les travaux (Kleiner & Rajani, 2001). En limitant la corrosion, la durée de vie des infrastructures du système de distribution sera potentiellement prolongée. Il s'agit d'un bienfait important puisque le réseau de distribution est l'élément le plus coûteux d'un système d'approvisionnement en eau potable (Kleiner & Rajani, 2001).

Il existe un certain débat sur les valeurs minimales d'alcalinité permettant de minimiser la corrosion du fer et les mécanismes d'action de l'alcalinité sur la corrosion du fer sont encore peu compris. Une alcalinité totale stable et supérieure à 80 mg $CaCO_3$/L a été recommandée pour limiter la corrosion du réseau et les épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005; Schock, 1990). L'augmentation de l'alcalinité favorise la formation de certaines formes de dépôts au détriment d'autres formes plus solubles comme la sidérite ($FeCO_3$). Pourtant, de nombreux réseaux sans problèmes d'eaux rouges sont exploités avec des alcalinités beaucoup plus faibles. L'alcalinité totale moyenne de l'usine A est de 41 mg $CaCO_3$/L et varie de 28 à 75 mg $CaCO_3$/L de par les changements saisonniers à la source observés précédemment (écart-type de 14). En comparaison, l'alcalinité totale moyenne de l'usine B est de 92 mg $CaCO_3$/L et varie très peu (écart-type de 4). L'usine B présente donc une qualité d'eau plus stable et le changement de source pourrait potentiellement diminuer les épisodes d'eau rouge dans le secteur. Le carbone inorganique dissous (DIC) varie entre 93 (rivière des Outaouais) à 187 mg $CaCO_3$/L (fleuve Saint-Laurent), soit environ 11 à 22 mg C/L.

Une composition optimale de l'eau potable a été identifiée par Schock et al. (1990), soit un DIC d'environ 24 mg C/L, un pH de 8 et une alcalinité totale de 100 mg $CaCO_3$/L pour assurer un effet tampon sur le pH suffisant (Schock, 1990). Lors du passage à l'usine B, le DIC, l'alcalinité totale et le pH s'approcheront de cette composition optimale de l'eau potable. Cependant, l'augmentation de l'alcalinité totale (41 à 92 mg $CaCO_3$/L) lors du changement d'usine pourrait causer une augmentation de la corrosion des conduites en cuivre (Health Canada, 2014). Cependant, cet impact est négligeable puisqu'il est mitigé par le changement de pH de 7,13 à 7,95. En effet, le pH est le principal facteur affectant la corrosion du cuivre et une augmentation de pH entre 7,0 et 8,0 peut

faire diminuer significativement la concentration de cuivre dans l'eau (Edwards, Schock, & Meyer, 1996).

Pour la corrosion du fer, la littérature recommande un pH dans la zone idéale de 7,5 à 8,0 au Québec (Gouvernement du Québec, 2011; Schock, 1990). La norme du pH dans le RQEP sera modifiée sous peu suite aux recommandations révisées de Santé Canada (Santé Canada, 2016). Le pH moyen de l'usine A est de 7,25 avec un écart-type de 0,18. Le pH moyen de l'usine B est de 8,02 avec un écart-type de 0,16. Le pH moyen de l'usine B est partiellement dans cette zone de pH idéal, ce qui limite la corrosion du fer.

5.2 Résultats du suivi du secteur pilote

Pour anticiper les impacts du changement complet d'alimentation de juin 2016, un secteur pilote a été étudié du 23 mars 2015 au 22 juin 2015 (3 mois). Dans le secteur pilote, un point de suivi a subi le changement de source durant cette période (la Clinique). Le propriétaire de la Clinique a déposé des plaintes récurrentes d'eau colorée à la municipalité. Un autre point de suivi (la Cour municipale) compte deux entrées de service et reçoit un mélange d'eaux des usines (information inconnue lors du choix des points de suivi, mais révélée par la conductivité). Les deux autres points reflètent respectivement la source d'eau de l'usine A (Station de pompage) et la source d'eau de l'usine B (Piscine). Les sites de la Cour municipale et de la Clinique ont été abandonnés lors du suivi du changement complet d'alimentation de 2016, soit parce qu'ils ne reflètent pas le secteur, soit par refus de la part du citoyen pour poursuivre le suivi.

5.2.1 Résultats du suivi en continu du secteur pilote

5.2.1.1 Qualité typique de l'eau dans le secteur pilote

La Figure 5.2 présente l'impact de changement de source d'eau sur la conductivité au point de suivi du secteur pilote subissant le changement de source (la Clinique).

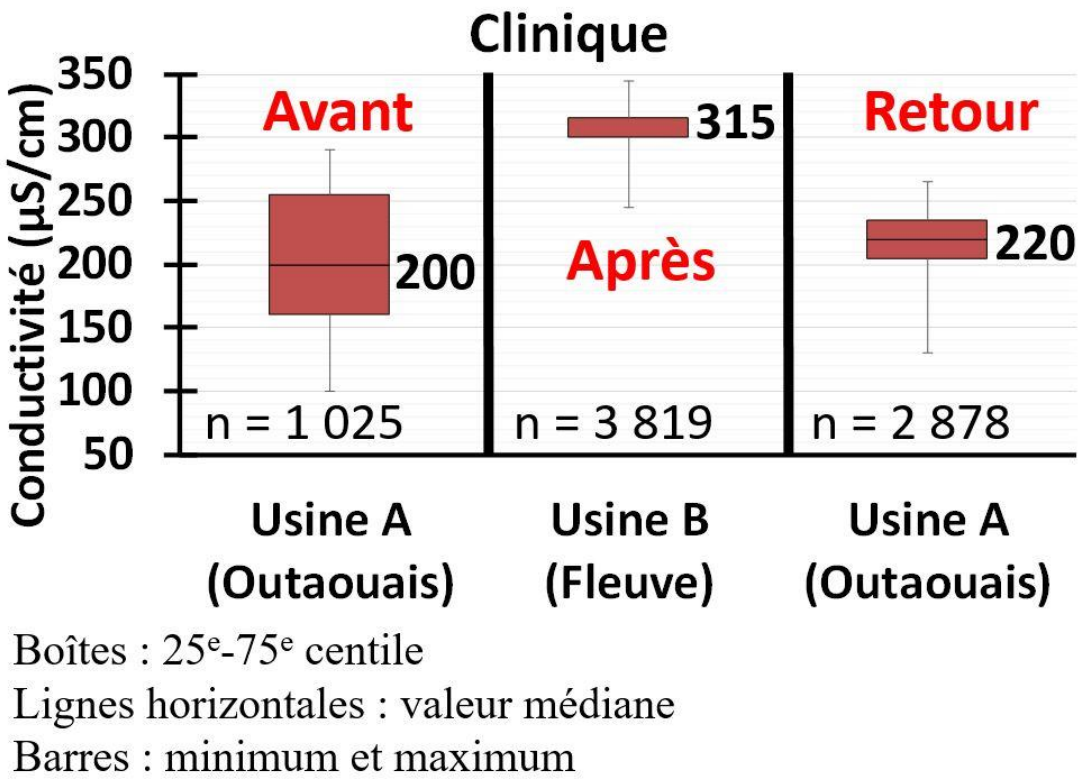


Figure 5.2 : Variation de la conductivité à la Clinique en fonction de la source d'eau potable de mars à juin 2015

Lorsque le secteur pilote est alimenté par l'usine B, la médiane de la Clinique augmente de 200 à 315 µS/cm. Lorsque le secteur retourne à l'alimentation par l'usine A, la conductivité diminue à 220 µS/cm. À la Station de pompage (site alimenté par l'usine A et ne subissant pas le changement de source), la médiane passe de 270 µS/cm à 205 µS/cm, puis à 200 µS/cm pour les mêmes périodes. Le changement de source étudié à la Clinique est marqué par la hausse de conductivité reflétant l'eau plus minéralisée distribuée par l'usine B (fleuve Saint-Laurent).

5.2.1.2 Détérioration de la qualité de l'eau dans le secteur pilote

L'entrée de service peut affecter de façon significative la qualité de l'eau (Prévost, Rompré, Baribeau, Coallier, & Lafrance, 1997). Le temps de séjour de l'eau, les matériaux des conduites, les conditions d'écoulement et la température de l'eau dans l'entrée de service peuvent différer des conditions du réseau de distribution (Prévost et al., 1997). Dans le cadre du projet, une détérioration de la qualité de l'eau dans l'entrée de service est observée à la Clinique.

Les résultats du suivi en continu de la turbidité sont étudiés pour vérifier si les plaintes récurrentes d'eau rouge à la Clinique sont causées par le réseau de distribution ou par l'entrée de service au site de suivi. Le suivi ponctuel ciblé réalisé par la municipalité dans le passé n'a jamais permis de détecter la problématique d'eau colorée à ce point. La Figure 5.3 présente le suivi de la turbidité aux points de suivi de mars à juin 2015.

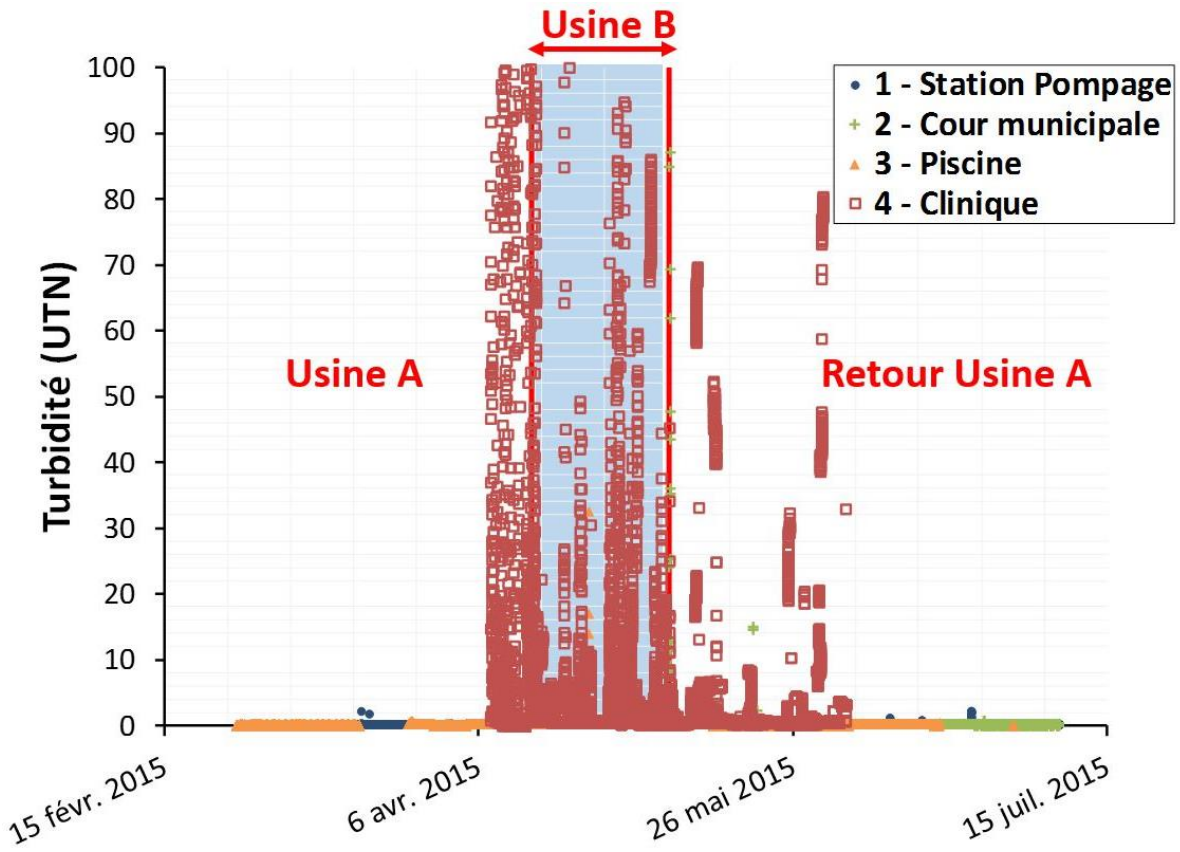


Figure 5.3 : Turbidité mesurée aux 4 points de suivi durant toute la période du suivi

Le suivi de la turbidité à la Clinique débute le 7 avril 2015. Les pics de turbidité ne se répètent pas selon un patron régulier et le niveau de turbidité peut demeurer supérieur à 5 UTN jusqu'à 4,8 jours. La turbidité est élevée à la Clinique avant et après changement de source (min=0,1 UTN ; moyenne=4,7 UTN ; médiane=0,5 UTN ; max=100 UTN et écart-type=13 UTN) par rapport aux autres points de suivi. Les valeurs médianes aux autres points de suivi sont nettement inférieures au seuil de visibilité de 5 UTN (0,03 à 0,46 UTN) et présentent peu de variabilité (écarts-types de 0,03 à 1,4 UTN). Enfin, à l'exception des épisodes causés par la manipulation de vannes ou les travaux, il n'y a pas eu d'épisode d'eau colorée à la Cour municipale (autre point de suivi dans le secteur pilote). Le problème à la Clinique persiste, et ce, peu importe la source. D'après les résultats

du suivi en continu, le problème d'eau rouge à la Clinique pourrait être causé par un problème interne dans le bâtiment et non par l'eau distribuée par la Ville (p. ex. dégradation d'une conduite interne dans le bâtiment ou dans la portion de son entrée de service). Cette hypothèse est appuyée par l'absence de plaintes dans les bâtiments voisins de la Clinique pendant l'alimentation par l'usine B. La corrosion galvanique, induite par le contact de conduites composées de métaux différents dans un milieu conducteur (différentiel de potentiel), est une explication possible de la dégradation (Schock, 1990). Pour confirmer cette explication, il faudrait connaître les matériaux de l'entrée de service de la Clinique. En accord avec les valeurs de turbidité élevées mesurées à la Clinique, la concentration de chlore actif est également faible pendant la durée complète du suivi (médiane variant de 0,03 à 0,10 mg HOCl/L) et indique une demande en chlore élevée.

Lors du changement complet d'alimentation du 7 juin 2016, le changement de configuration hydraulique du secteur devrait potentiellement diminuer le temps de séjour. En effet, la Clinique est située à 1,4 km linéaire de conduites du Parc où le temps de séjour médian diminue de 9,6 heures et le chlore résiduel libre augmente de 0,66 à 1,17 mg Cl_2/L après le changement de source. La concentration de chlore résiduel libre devrait augmenter au-dessus de 0,2 mg Cl_2/L. Le changement de source va potentiellement améliorer la qualité de l'eau potable à la Clinique.

5.2.2 Résultat du suivi ponctuel hebdomadaire du secteur pilote

La Figure 5.4 présente la concentration de fer total en fonction du temps et du point de suivi.

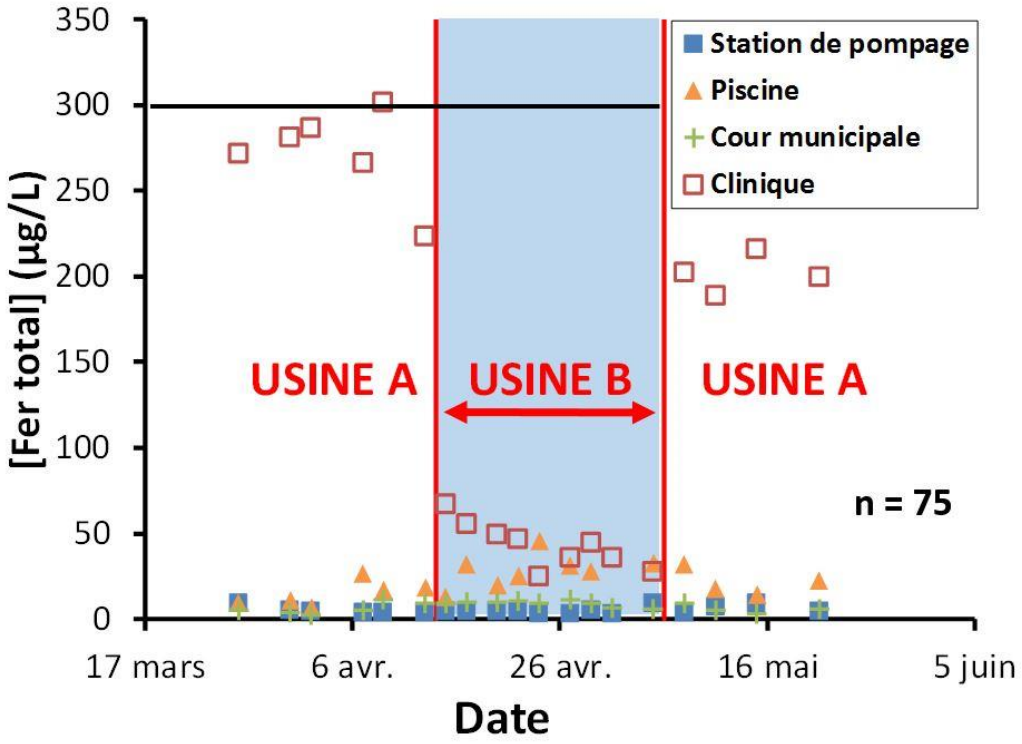


Figure 5.4 : Concentration de fer total en fonction du temps et du point de suivi

La concentration de fer total est élevée à la Clinique lorsque l'usine A alimente le secteur (189 à 302 µg/L). En effet, la concentration de fer total à la Clinique est 5 fois plus élevée qu'à la Station de pompage (entrée du secteur). La concentration de fer total du 9 avril dépasse la recommandation esthétique de 300 µg/L de Santé Canada. Les autres points de suivi montrent des teneurs en fer inférieures à 45 µg/L pour l'ensemble des mesures.

Lorsque l'usine B alimente la Clinique, la concentration de fer total diminue et varie entre 25 et 67 µg/L. La diminution à la Clinique est expliquée par le changement de configuration hydraulique dans le secteur (diminution du temps de séjour qui fait doubler la concentration médiane de chlore résiduel libre) ou par l'impact de l'entrée de service. Le croquis du secteur pilote (Figure 4.8) montre que la conduite alimentant la Clinique est devenue une des deux entrées d'eau du secteur pilote après la manipulation des vannes. Le niveau de fer total plus élevé à la Clinique (usine B) qu'à la Piscine (usine B en tout temps) pourrait être expliqué par le temps de séjour et le changement du sens d'écoulement, du débit et de la vitesse (déstabilisation de dépôts de corrosion).

L'absence de modélisation hydraulique du secteur pilote ne permet pas de quantifier cette variation de temps de séjour, de débit et de vitesse.

5.3 Résultats du suivi lors du changement complet d'alimentation du 7 juin 2016

5.3.1 Observations lors du changement de source (7 juin 2016)

La Figure 5.5 présente le détail de l'opération de manipulation des vannes effectuée par les employés de la Ville le 7 juin 2016.

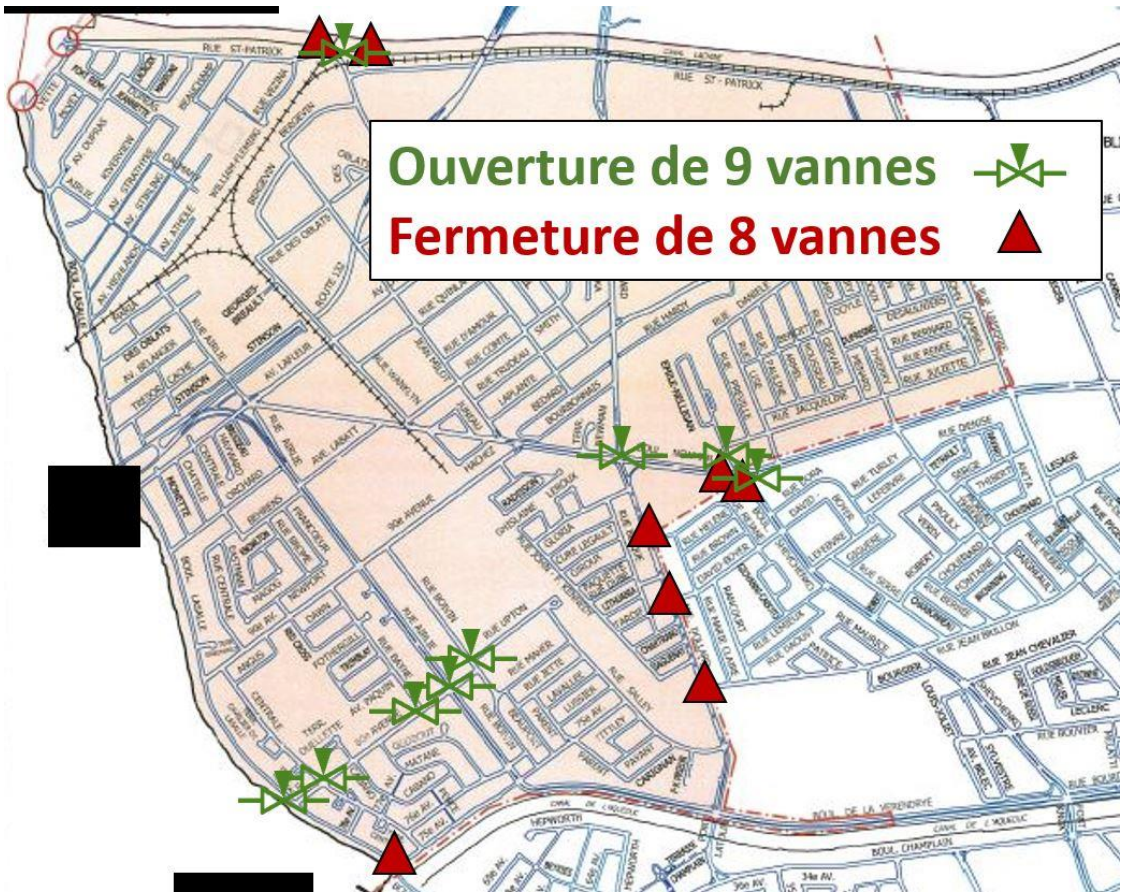


Figure 5.5 : Carte de la zone et des vannes manipulées

L'opération consistait à fermer 8 vannes et à arrêter les pompes de la Station de pompage (Figure 5.7). Ensuite, 9 vannes ont été ouvertes pour alimenter le secteur avec l'usine B (Figure 5.8). Les manipulations d'ouverture et de fermeture ont eu lieu entre 6h00 et 14h00 le 7 juin 2016. La station de pompage est fermée entre 12h30 et 13h. À partir de 14h, l'opération est terminée et l'eau de

l'usine B alimente la totalité du secteur. Le même jour, il y a eu 12 plaintes par les citoyens de la zone du changement de source d'approvisionnement. La localisation des plaintes est présentée à la Figure 5.6. Toutes les plaintes sont situées dans la zone du changement de source d'approvisionnement.

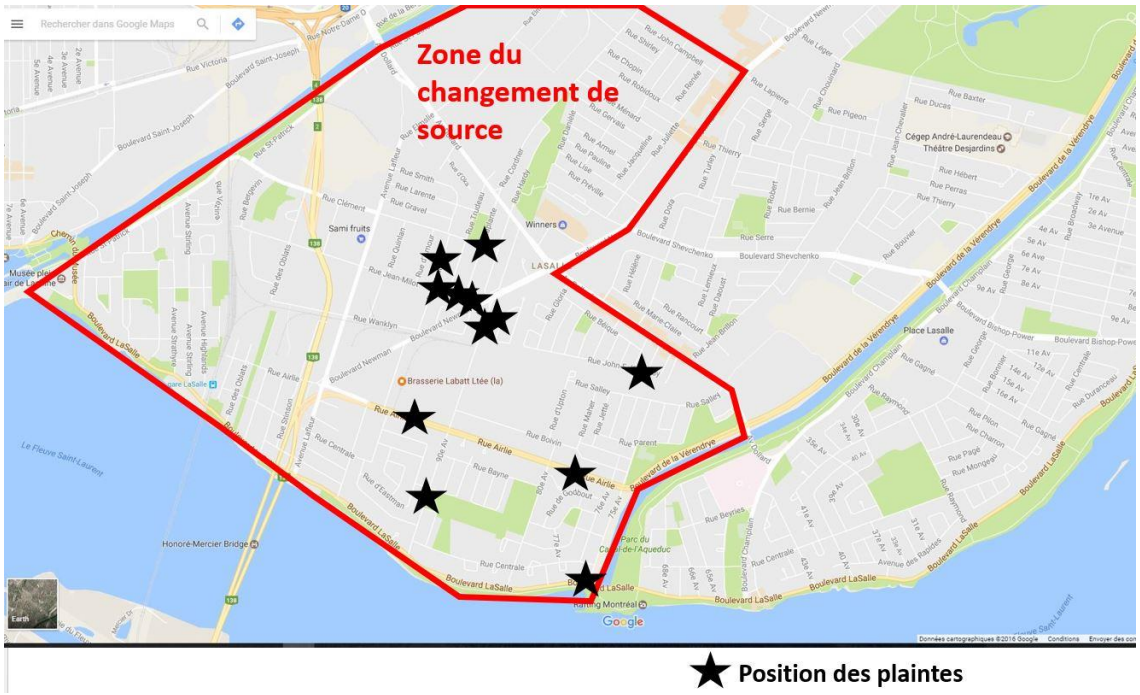


Figure 5.6 : Localisation des plaintes du 7 juin 2016 (journée de la manipulation des vannes)

Figure 5.7 : Opération de fermeture des vannes de la Station de pompage

Figure 5.8 : Ouverture manuelle des vannes de rues

5.3.2 Représentativité des mesures du suivi en continu par rapport à la qualité de l'eau dans l'ensemble de la zone

Un objectif du projet vise à vérifier si le choix des paramètres de suivi, le nombre de points de suivi choisis et leur positionnement sont adéquats pour dresser un portrait de la qualité de l'eau potable de la zone du changement de source d'approvisionnement.

5.3.2.1 Validation du choix des paramètres de suivi en continu

Pour le suivi en continu de la qualité de l'eau en réseau, certains chercheurs recommandent le suivi de la conductivité, de la concentration de chlore libre, de la concentration d'oxygène dissous, du pH et de la turbidité (Banna et al., 2013). La concentration d'oxygène dissous influence les conditions physiques, chimiques et bactériennes de l'eau (Banna et al., 2013).

En lien avec les sources possibles de contamination dans le réseau, le suivi en continu du carbone organique total (COT) et du potentiel redox (ORP) est également recommandé en plus du chlore libre (Hall et al., 2007). Le suivi en continu des variations de chlore résiduel libre peut servir d'indice de contamination en réseau pour la plupart des contaminants possibles (eaux usées, aldicarbe, ferricyanure de potassium, glyphosate, malathion, nicotine et trioxyde d'arsenic) (Hall et al., 2007). Les autres paramètres importants sont la couleur et la concentration d'ammoniac dans l'eau (Lee, A. et al., 2012). Les débitmètres ne sont pas installés, car les propriétaires des bâtiments

s'opposaient au retrait de l'isolant sur la conduite. Les concentrations de COT, d'ammoniac et l'ORP ne sont pas mesurées en continu à cause des contraintes du projet. La mesure en continu de l'ORP aurait été utile pour étudier le mécanisme de corrosion. Le suivi en continu des épisodes d'eau rouge est donc seulement réalisé par le suivi de la turbidité (>5 UTN).

5.3.2.2 Vérification du nombre de points de suivi requis

Les mesures en continu aux points de suivi renseignent sur la qualité de l'eau dans l'entrée de service. Ces conduites ne sont qu'un échantillon du nombre total de conduites dans la zone subissant le changement de source. Veolia Water, le fabricant de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4, recommande d'installer un montage de sondes à tous les 20 à 30 kilomètres linéaires de réseau au minimum. Il s'agit d'une règle de l'art pour assurer un suivi fiable. Le Tableau 5.2 présente les résultats du calcul du nombre de montages requis dans le secteur pour un suivi général de la qualité de l'eau dans la zone du changement de source d'approvisionnement.

Tableau 5.2 : Résultats du calcul du nombre de montages requis dans le secteur pour un suivi général de la qualité de l'eau dans la zone du changement de source d'approvisionnement

Paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Longueur du réseau de la zone du changement de source	77,12	Km	Déterminé à partir des données de la municipalité
Nombre de sondes/km linéaire de conduites	1/20 ou 1/30	Sonde/km	Recommandation de Veolia 1 sonde par 20 à 30 km
Nombre de montages de sondes requis	3 ou 4	Montages	3 ou 4 montages pour l'ensemble de la zone du changement de source

Selon les calculs présentés au Tableau 5.2, il faut minimalement 3 à 4 montages dans la zone pour avoir un bon portrait de la qualité de l'eau du secteur. Dans ce projet, trois montages ont été installés à des sites subissant le changement de source dans le secteur étudié. Aussi, deux montages ont été installés à deux points alimentés respectivement par l'usine A (dans le secteur étudié) et l'usine B (à l'extérieur du secteur), et ne subissant pas le changement. Le montage installé au site ne subissant pas le changement et alimenté par l'usine A (station de pompage) est retiré juste avant le

changement pour raisons techniques. Ainsi, à l'intérieur du secteur subissant le changement, 4 montages étaient en fonction pour la période avant le changement de source, et 3 montages après le changement de source.

5.3.2.3 Vérification du positionnement des points de suivi

Le positionnement des points de suivi est fait selon (i) la disponibilité de bâtiments publics chauffés à l'année (ii) la présence d'un drain et une prise électrique (pour le turbidimètre) à proximité de l'entrée d'eau, et (iii) l'accord des gestionnaires des bâtiments. De plus, les points de suivi sont répartis pour couvrir le territoire subissant le changement. À noter que pour obtenir un positionnement idéal, l'utilisation d'un logiciel comme TEVA-SPOT en complément aux calculs de rayon d'influence aurait été bénéfique pour déterminer les conduites où il est attendu d'avoir une mauvaise qualité d'eau en tenant compte de la demande, de la configuration hydraulique et des points possibles de contamination (Storey, van der Gaag, & Burns, 2011). Pour ce type d'évaluation, la densité de population par secteur et les clients à risque comme les hôpitaux doivent être pris en compte. Le Tableau 5.3 présente les résultats du calcul du rayon d'influence estimé du point de suivi selon la recommandation de 20 ou 30 km de conduites par montage de Veolia.

Tableau 5.3 : Résultats du calcul du rayon d'influence du point de suivi selon la recommandation de 20 ou 30 km de conduites par montage de Veolia

Paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Longueur du réseau de la zone subissant le changement	77,12	Km	Déterminé à partir des données de la municipalité
Surface de la zone subissant le changement	6,46	km^2	Estimé avec Google Maps
Nombre de km de conduites par km^2 (N)	11,95	km/km^2	$20/N = A = \pi \times r^2$ ou $30/N = A = \pi \times r^2$
Rayon d'influence pour une sonde/20 km de conduites	0,73	Km	Isoler r dans $A = \pi \times r^2$ Cela aidera à placer les points de suivi et leur rayon d'influence
Rayon d'influence pour une sonde/30 km de conduites	0,89	Km	

La Figure 5.9 présente la carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source et leur rayon d'influence.

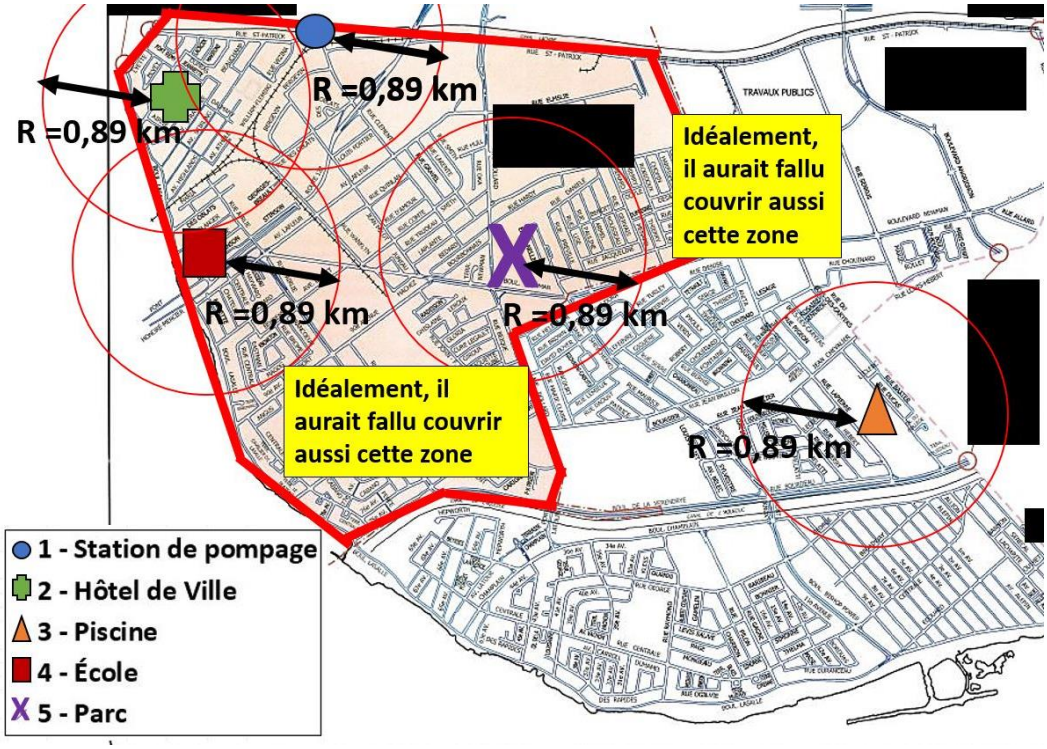


Figure 5.9 : Carte du positionnement des montages dans la zone du changement de source et leur rayon d'influence (1 montage par 30 km de conduites)

Même avec une analyse simpliste, la figure montre que deux zones de rues ne sont pas couvertes par le rayon d'influence des montages (2,0 km^2 soit environ 24 km de conduites d'eau potable). Idéalement, il aurait fallu positionner les montages dans la zone du changement de source d'approvisionnement en considérant l'hydraulique du réseau et les clients à risque (hôpitaux et écoles).

5.3.2.4 Vérification des différences entre l'eau de l'entrée de service et celle de la conduite du réseau

Comme le suivi est temporaire, les conduites du réseau n'ont pas été percées pour insérer les sondes Kapta^{tm} à la demande de la municipalité. Les montages étaient par conséquent installés en dérivation de l'entrée de service. De ce fait, il est important de vérifier s'il y a des différences entre les caractéristiques de l'eau de l'entrée de service et celle de la conduite d'eau du réseau de distribution en face du bâtiment.

5.3.2.5 Vérification du critère de vitesse de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4

La sonde Kapta^{tm} a un critère de vitesse de l'eau de 0,03 à 1,5 m/s. Plusieurs vérifications sur le terrain ont démontré que la vitesse satisfait la contrainte (min = 0,11 m/s ; moyenne = 0,13 m/s et max = 0,15 m/s). Pour y arriver, le volume rejeté dans le drain pendant une minute est mesuré et la vitesse est calculée à partir du diamètre des conduites du montage. Cet exercice est réalisé à 3 reprises à chacun des 5 points de suivi.

5.3.2.6 Vérification de l'absence d'effet de la tuyauterie de l'entrée de service sur la qualité de l'eau du point de suivi

Si la tuyauterie de l'entrée de service affectait la qualité de l'eau potable, cet effet aurait été visible en permanence sur les figures de turbidité aux points de suivi. En effet, l'effet de la tuyauterie était visible en permanence à la Clinique lors du suivi du pilote de 2015 (médiane variant de 0,47 à 4,65 UTN). Aux points de suivi du changement de source de 2016, la turbidité médiane varie entre 0,07 à 0,59 UTN. Les faibles niveaux de turbidité (<1 UTN) indiquent que la tuyauterie de l'entrée de service n'a pas affecté la qualité de l'eau. Il est possible de conclure que la qualité de l'eau mesurée aux montages des points de suivi est représentative de la qualité de l'eau dans la conduite du réseau de distribution. Pour évaluer plus en détail l'interférence possible des bâtiments, l'installation d'un débitmètre sur l'entrée de service serait désirable pour évaluer l'utilisation d'eau par le bâtiment et l'ampleur des temps de stagnation pouvant avoir un effet sur la turbidité et la qualité de l'eau. Dans le cadre du projet, les débitmètres ne sont pas installés puisque les propriétaires des bâtiments s'opposaient au retrait de l'isolant sur la conduite.

5.3.3 Résultats du suivi en continu lors du changement complet d'alimentation

5.3.3.1 Présentation des points de suivi

Parmi les points de suivi, les points Hôtel de Ville, école et Parc subissent le changement de source d'eau, tandis que le point Piscine est alimenté continuellement par l'usine B à l'extérieur du secteur. Un cinquième point de suivi (Station de Pompage) est alimenté continuellement par l'usine A, et retiré le 6 juin 2016 juste avant le changement pour prévenir les bris possibles du montage pendant la fermeture de la station de pompage. Par la suite, ce montage n'est pas installé dans le secteur puisqu'il est utilisé par un autre projet de la Chaire Industrielle CRSNG en Eau Potable. Le suivi

du secteur est du 24 février au 29 septembre 2016. Dans cette section, l'objectif est de résumer les mesures du suivi en continu pour dresser un bilan des impacts du changement de source d'approvisionnement de juin 2016.

5.3.3.2 Séparation des résultats du suivi en continu selon des périodes

Pour les besoins de l'analyse, les données ont été séparées en 3 périodes reflétant (i) le changement saisonnier de la qualité de l'eau à l'usine A avant le changement de source et (ii) le changement de la source d'approvisionnement pour l'usine B. Le changement saisonnier de l'eau distribuée par l'usine A a été fixé au seuil de 40 mg $CaCO_3$/L puisque ce dernier représente un critère qui favorise la corrosion du fer (Schock, 1990). Ainsi, 3 périodes sont à distinguer :

1) 24 février au 25 mai 2016 : période avant le changement durant laquelle le secteur est alimenté par l'usine A et sous influence de l'eau de l'Outaouais (alcalinité totale < 40 mg $CaCO_3$/L)
2) 26 mai au 7 juin 2016 : période avant le changement durant laquelle le secteur est alimenté par l'usine A et sous influence de l'eau du Fleuve (alcalinité totale > 40 mg $CaCO_3$/L). Cette période inclut la manipulation des vannes (7 juin à 14h).
3) 7 juin au 29 septembre 2016 : période après le changement durant laquelle le secteur est alimenté par l'usine B (alcalinité totale : 92 mg $CaCO_3$/L).

5.3.3.3 Impact du changement de source sur la conductivité à l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc

La conductivité n'est pas un paramètre règlementé. Selon les règles de l'art, la conductivité devrait être entre 10 et 1000 µS/cm, car l'eau représente un risque pour la santé lorsqu'elle est déminéralisée (< 10 µS/cm) et elle devient un indice de pollution lorsque la conductivité dépasse 1000 µS/cm (Chapman, 1996). La Figure Figure 5.10 montre l'impact du changement de source d'approvisionnement sur la conductivité le 7 juin 2016.

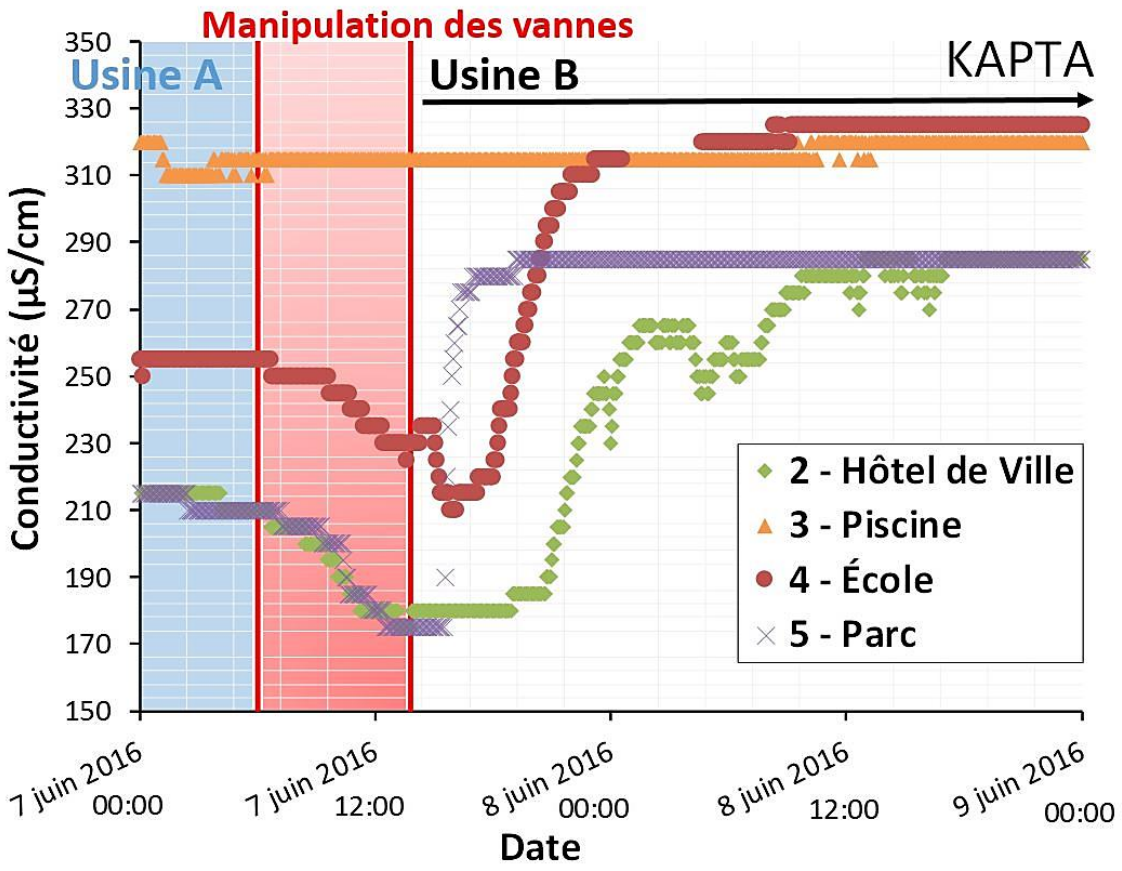


Figure 5.10 : Impact du changement de source d'approvisionnement sur la conductivité le 7 juin 2016

Cette figure montre que le changement de source s'est fait en moins de 12 heures à l'Hôtel de Ville, l'école et le Parc (transition vers un niveau plus élevé de conductivité). La Figure 5.11 (Hôtel de Ville) et la Figure 5.12 (Parc) présentent la conductivité de l'eau mesurée par la sonde Kapta^{tm} pour l'ensemble de la période de suivi aux points subissant le changement de source.

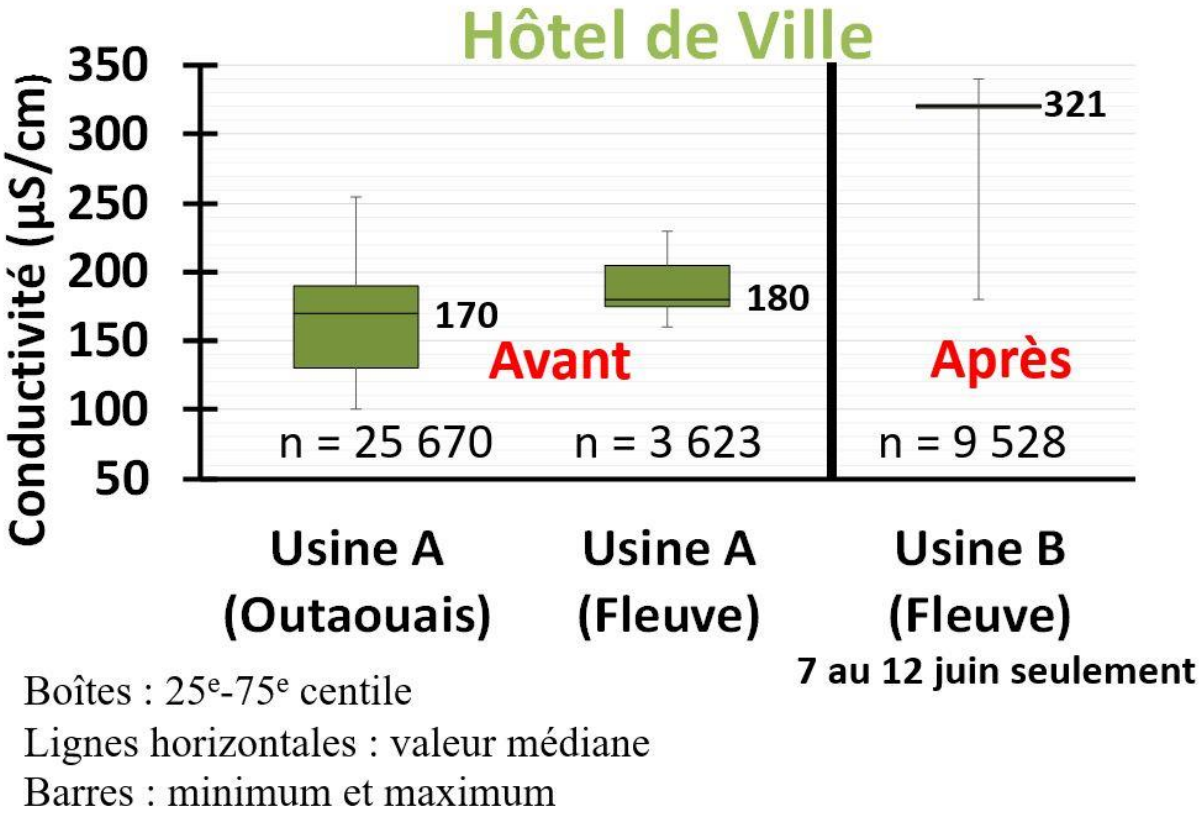
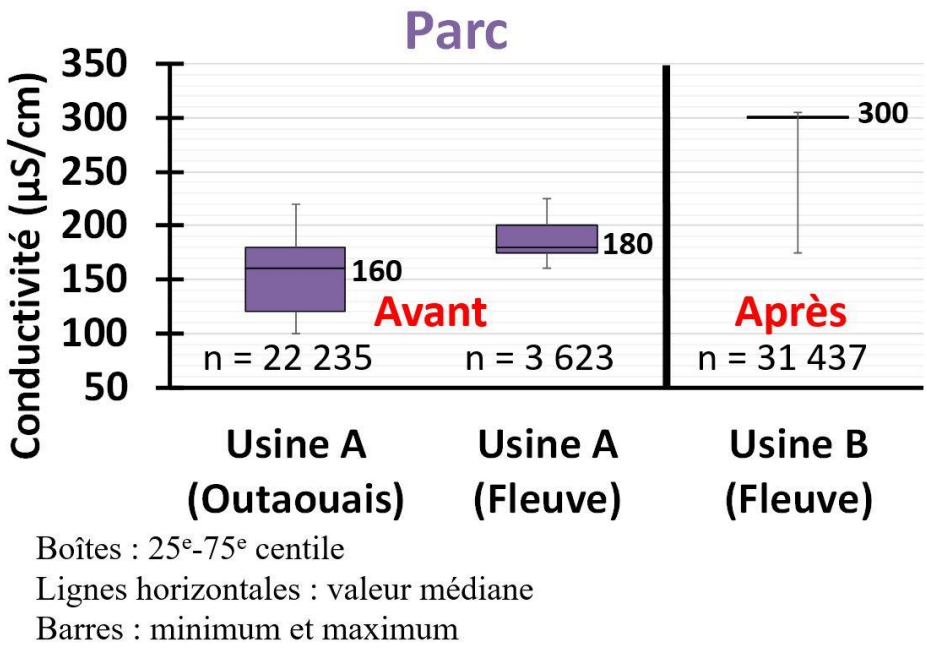


Figure 5.11 : Variation de la conductivité mesurée par la sonde Kapta^{tm} à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau avant et après manipulation des vannes

Note : un bris de l'appareil de mesure de conductivité entre le 12 juin et le 31 août 2016 explique le moins grand nombre de mesures dans la période post-changement pour ce point (n = 9 528). La faible quantité de mesures après le changement de source à l'Hôtel de Ville explique la différence avec le Parc (321 vs 300 µS/cm).



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.12 : Variation de la conductivité mesurée par la sonde Kapta^{tm} au Parc en fonction dominance du mélange de sources d'eau avant et après manipulation des vannes

À l'Hôtel de Ville et au Parc, la valeur médiane de la conductivité augmente de 160-180 µS/cm avant changement à 300-321 µS/cm après changement. En particulier, la valeur médiane augmente de +141 µS/cm pour l'Hôtel de Ville (Figure 5.11) et de +120 µS/cm au Parc (Figure 5.12). Il s'agit d'augmentations similaires à celle de 115 µS/cm à la Clinique pendant le suivi du secteur pilote. Les valeurs de conductivité à l'école (médiane avant 200-215 µS/cm ; médiane après 335 µS/cm) sont plus élevées que les autres points de suivi pour les trois périodes (médiane avant 160-180 µS/cm ; médiane après 300-321 µS/cm). Pour la même source d'eau, il est anormal d'avoir des différences de conductivité d'environ 25 à 30 µS/cm. La comparaison des résultats collectés par la sonde Kapta avec (i) les lectures de la sonde de conductivité installée en série sur le montage et (ii) les mesures hebdomadaires de conductivité indiquent que la sonde Kapta^{tm} à l'école était mal installée ou calibrée par le manufacturier pour la conductivité. La Figure 5.13 présente la comparaison des mesures de conductivité des sondes et de l'échantillonnage ponctuel durant le mois de septembre.

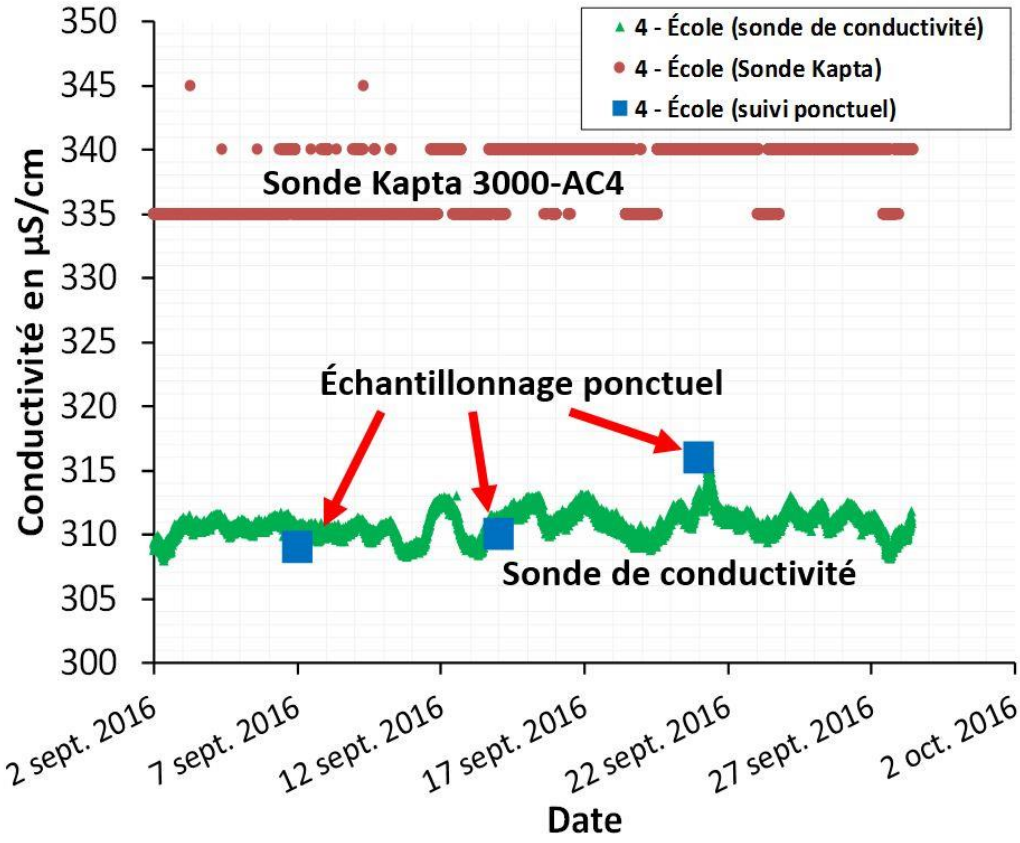


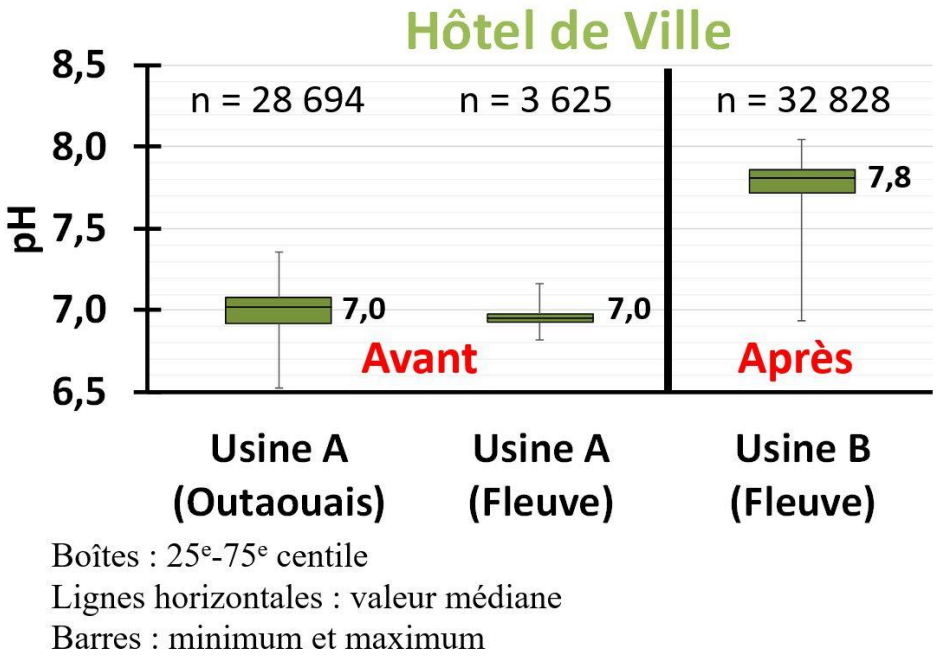
Figure 5.13 : Comparaison des mesures de conductivité des sondes et de l'échantillonnage ponctuel durant le mois de septembre

Cette figure montre que la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 surestimait la conductivité d'environ 30 µS/cm à l'école. À ce point de suivi, la sonde de conductivité est jugée plus exacte que la sonde Kapta^{tm} puisque les mesures sont validées par les échantillonnages ponctuels.

Aux points de référence pour l'usine A (station de pompage) et l'usine B (Piscine), la valeur médiane varie respectivement entre 165-180 µS/cm et 320-325 µS/cm pour l'ensemble du suivi, et varie de façon négligeable entre les périodes de suivi avant et après changement de source d'alimentation (+15 et +5 µS/cm). La variation de 15 µS/cm à la Station de pompage (usine A) est causée par la diminution de l'apport de la rivière des Outaouais à la prise d'eau dû au changement de saison. Lors de l'augmentation d'alcalinité totale de 30 à 52 mg $CaCO_3$/L à l'eau distribuée de l'usine A du 1er janvier au 7 juin 2016, la composition de l'eau devient lentement similaire à l'eau du fleuve Saint-Laurent, ce qui cause une augmentation de la concentration en ions majeurs (calcium, chlorure, magnésium, potassium, sodium et sulfates) et de la conductivité.

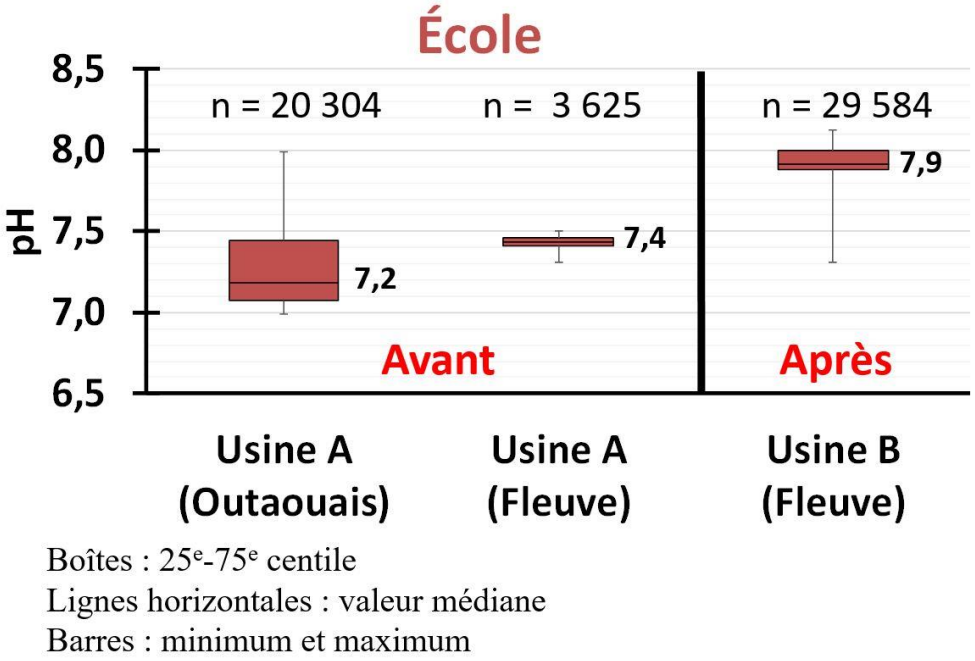
5.3.3.4 Impact du changement de source sur le pH à l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc

La Figure 5.14, la Figure 5.15 et la Figure 5.16 présentent l'impact du changement de source sur le pH de l'eau à l'Hôtel de Ville, l'école et le Parc respectivement.



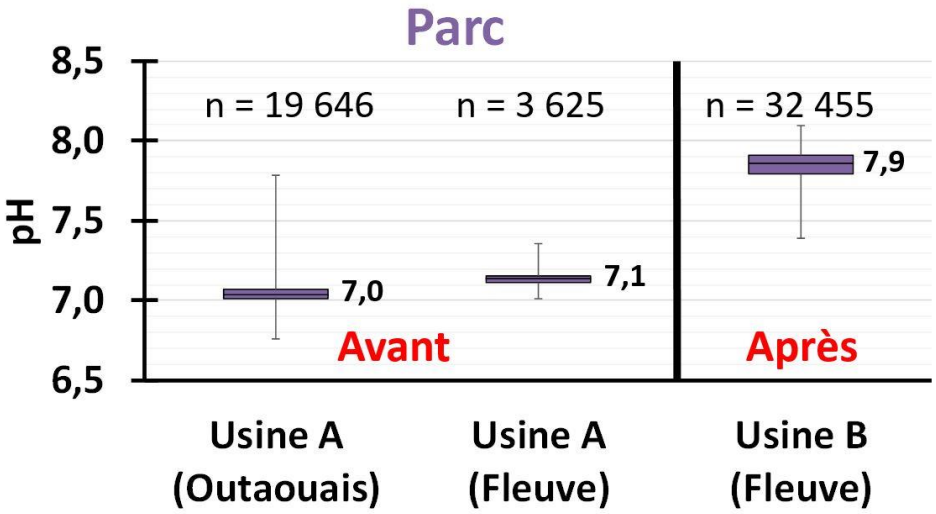
Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.14 : Variation du pH à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.15 : Variation du pH à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.16 : Variation du pH au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

Comparativement à la période avant changement (Outaouais), le pH augmente en valeur médiane de 7,0 à 7,8 (Hôtel de Ville), de 7,2 à 7,9 (école) et 7,0 à 7,9 (Parc) après changement pour l'usine B (Figure 5.14, Figure 5.15 et Figure 5.16). Comme pour la conductivité, le changement de source

aux 3 points de suivi est confirmé par une variation de pH. On remarque aussi que la transition saisonnière de l'Outaouais pour le Fleuve à l'usine A n'est pas observable (contrairement à la conductivité).

Durant l'ensemble de la période de suivi, le pH demeure dans la gamme de 6,5 à 8,5 prescrite par le RQEP (Gouvernement du Québec, 2011). Cependant, le changement de source a amélioré la qualité de l'eau puisque les 25e et 75e centiles du pH aux points de suivi (Hôtel de Ville, école et Parc) sont dans la zone préférentielle du pH de 7,5 à 8,0 après le changement de source (Gouvernement du Québec, 2011; Schock, 1990). La zone idéale de 7,5 à 8,0 permet de limiter la corrosion du fer (Schock, 1990). Les variations de pH n'ont pas un lien significatif sur les épisodes d'eau rouge à court terme selon un modèle statistique (Imran et al., 2005). Cependant, les problèmes d'eau rouge découlent de la corrosion du fer et le fait de limiter la corrosion du réseau constitue un bienfait à long terme. De même que la conductivité, le pH est bon traceur du changement de la source d'eau (pH maximum usine A < pH minimum usine B).

5.3.3.5 Impact du changement de source sur la concentration de chlore résiduel libre et les temps de séjour de l'eau potable des conduites des points de suivi

Dans cette section, les temps de séjour sont approximés à partir des différentes concentrations de chlore résiduel libre aux points de suivi (min, 25e centile, médiane, 75e centile et max), de la concentration initiale à l'usine (médiane des valeurs journalières avant et après) et à partir des valeurs de k_b (0,35d^{-1}) et k_w (0,03 m/d) du réseau. La Figure 5.17 présente la concentration de chlore résiduel libre aux points de suivi de mars jusqu'à la fin du mois de septembre.

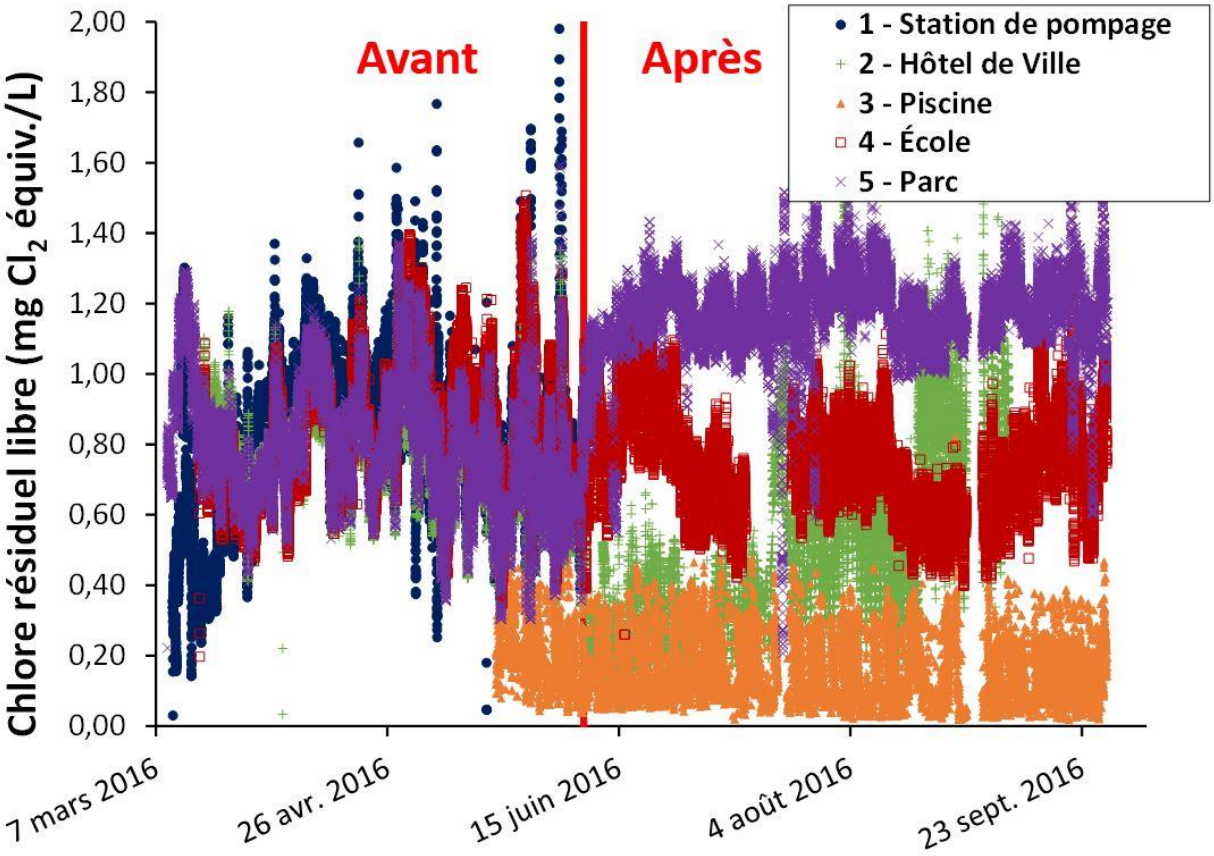
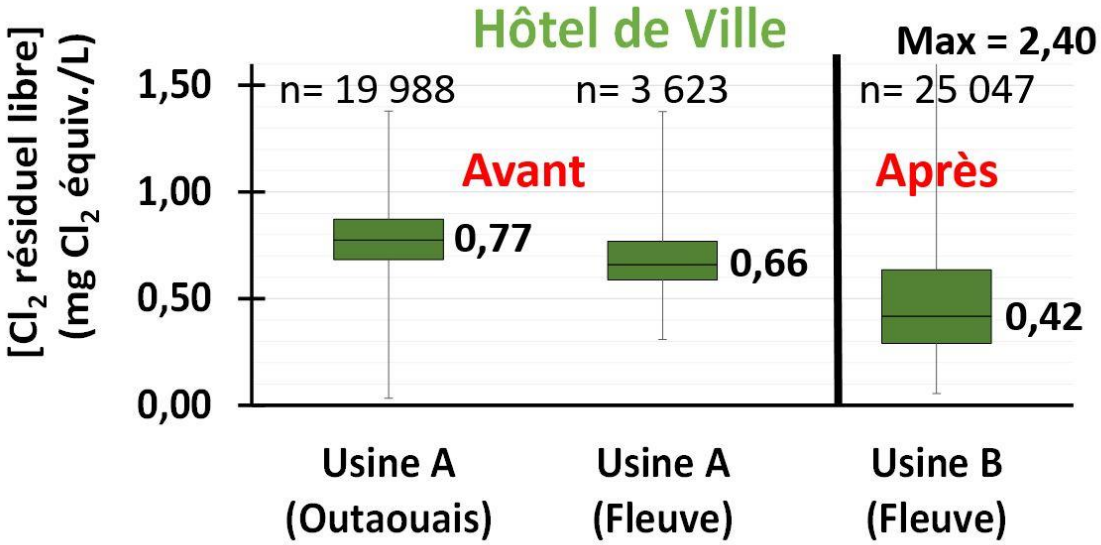


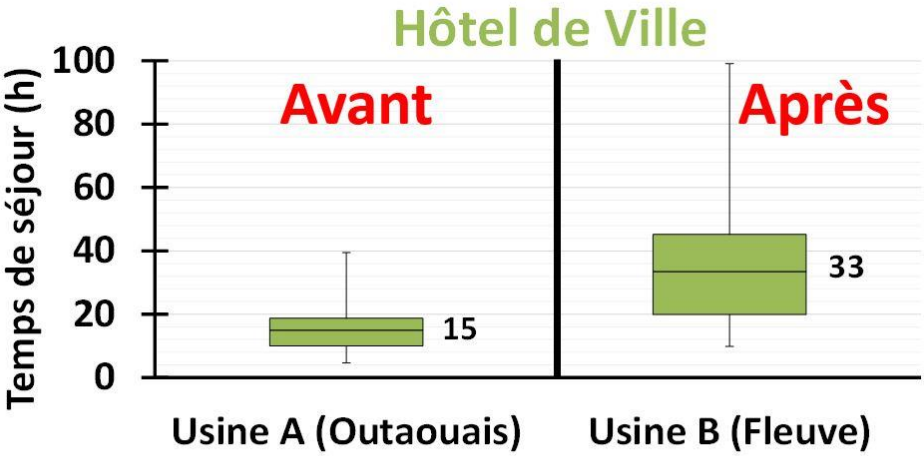
Figure 5.17 : Variation temporelle du chlore résiduel libre durant le période complète du suivi

Cette figure montre qu'il y a des patrons quotidiens de variations de chlore résiduel libre aux points de suivi. La figure montre aussi le nouveau niveau de chlore résiduel libre après le changement de source à l'Hôtel de Ville, l'école et le Parc. La Figure 5.18 et la Figure 5.19 présentent les concentrations de chlore résiduel libre et les temps de séjour à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance de la source d'eau.



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.18 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.19 : Variation des temps de séjour estimés à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

La concentration médiane de chlore résiduel libre équivalent a diminué de 0,77-0,66 à 0,42 mg Cl_2 équiv./L à l'Hôtel de Ville après le changement de source. Après changement de source, le chlore résiduel montre plus de variabilité (25e-75e percentile : 0,29-0,64 mg Cl_2 équiv./L) comparativement à avant (25e-75e percentile : 0,68-0,87 mg Cl_2 équiv./L) (Figure 5.18). Cette diminution est causée par le changement de configuration hydraulique qui a modifié le temps de séjour de l'eau potable à l'Hôtel de Ville (Figure 5.19). En effet, selon les calculs de temps de séjour à partir des valeurs médianes, le temps de séjour est passé de 15 heures à environ 33 heures à l'Hôtel de Ville. La Figure 5.20 et la Figure 5.21 présentent les concentrations de chlore résiduel libre et les temps de séjour à l'école en fonction de la source d'eau.

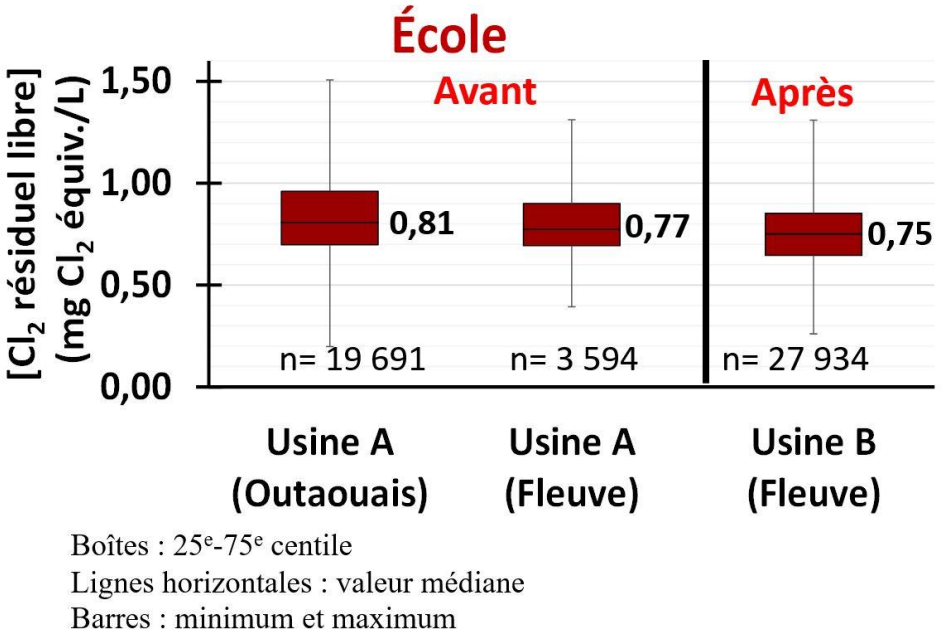


Figure 5.20 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

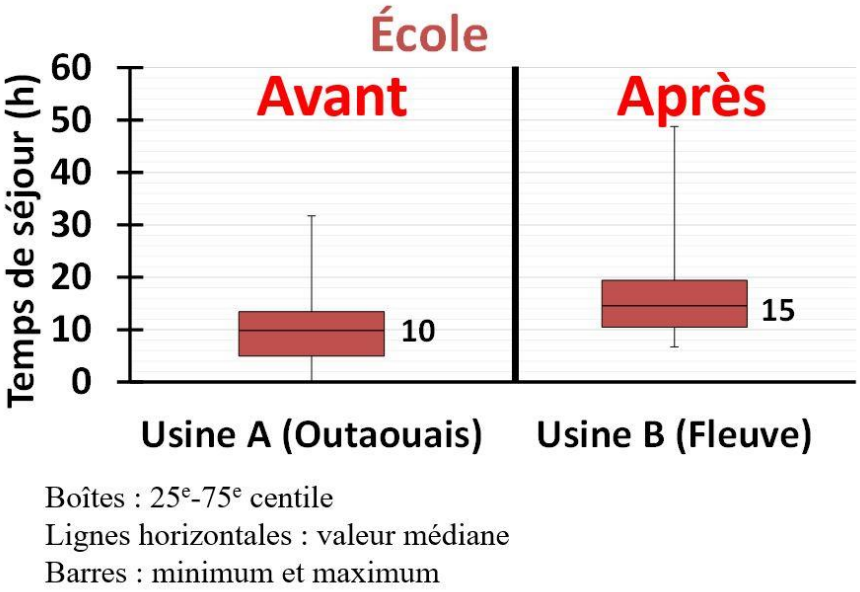
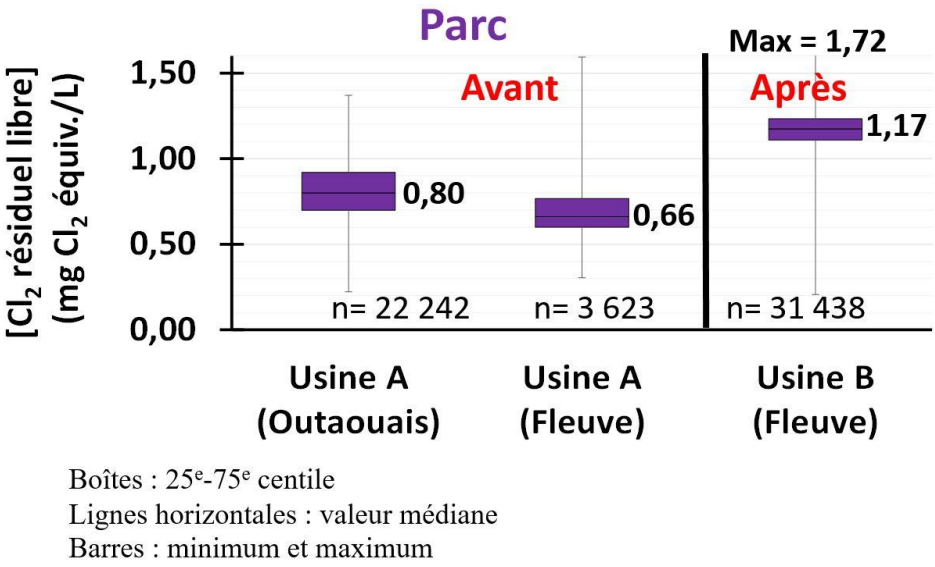


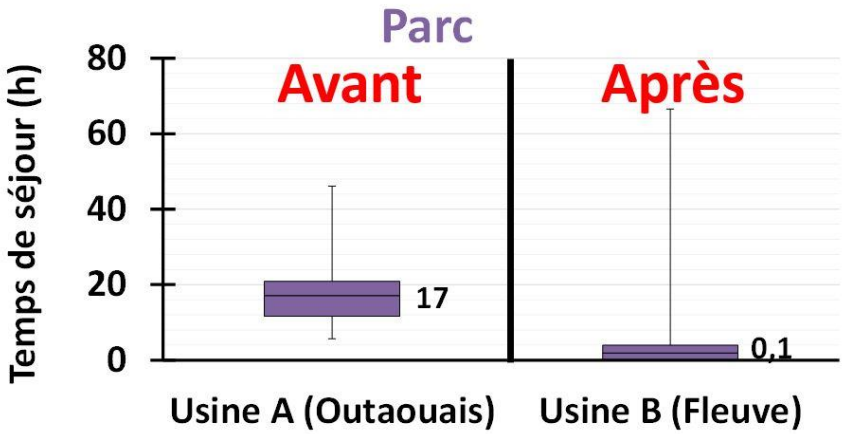
Figure 5.21 : Variation des temps de séjour estimés à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

À l'école (Figure 5.20), la concentration de chlore résiduel libre équivalent est demeurée relativement stable, peu importe la source d'eau, les valeurs médianes variant entre 0,75 et 0,81 mg Cl_2 équiv./L selon les périodes de suivi. Selon les calculs de temps de séjour, le temps de séjour médian a augmenté de 5h. L'augmentation modérée du temps de séjour expliquerait donc la faible diminution de chlore résiduel libre équivalent. La Figure 5.22 et la Figure 5.23 présentent les concentrations de chlore résiduel libre et les temps de séjour au Parc en fonction de la source d'eau.



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.22 : Variation de la concentration de chlore résiduel libre équivalent au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau



Boîtes : 25e-75e centile
Lignes horizontales : valeur médiane
Barres : minimum et maximum

Figure 5.23 : Variation des temps de séjour estimés au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

Au Parc (Figure 5.22), la concentration médiane de chlore résiduel libre équivalent a augmenté de 0,66-0,80 à 1,17 mg Cl_2 équiv./L après le changement de source à cause du changement de

configuration hydraulique et de la proximité de l'entrée d'eau de l'usine B. La Figure 5.24 présente les temps de séjour et les positions des points de suivi par rapport aux entrées d'eau.

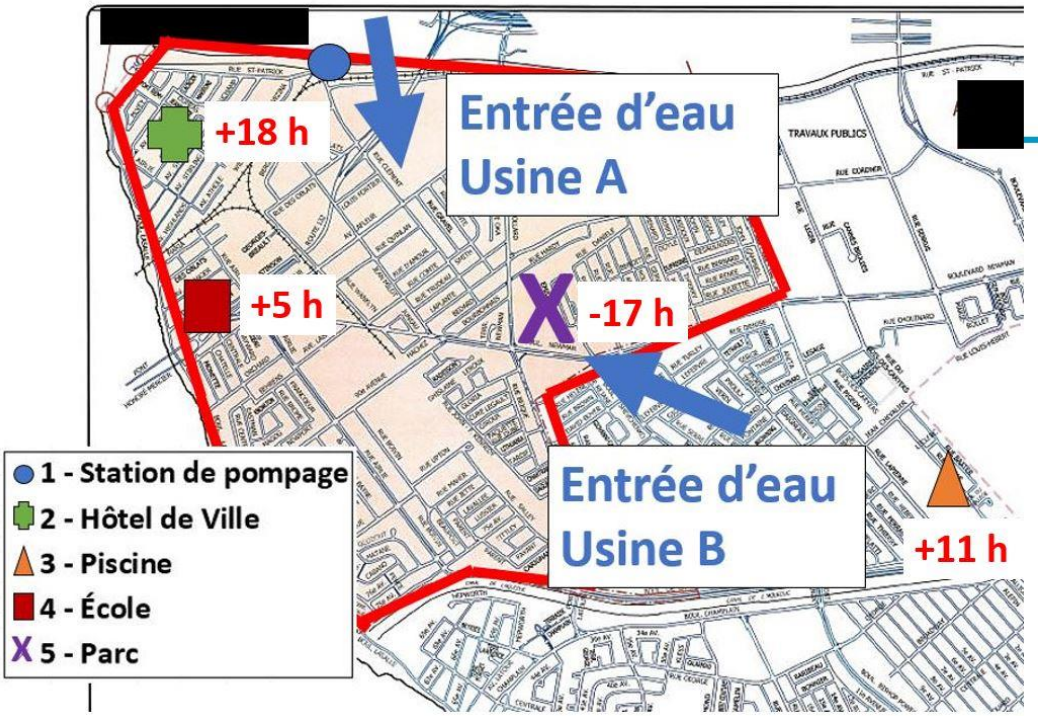


Figure 5.24 : Temps de séjour et positions des points de suivi par rapport aux entrées d'eau

La diminution significative du temps de séjour médian de 17 heures à 0,1 heure au Parc explique l'augmentation de la concentration médiane chlore résiduel libre équivalent. Le faible temps de séjour médian de 0,1 heure ne semble pas bien refléter la réalité. Pour réaliser le calcul, les valeurs des coefficients k_b et k_w sont posées, ce qui ne tient pas compte des matériaux différents du réseau de distribution et de l'effet de la température. De plus, les concentrations initiales de chlore résiduel libre aux usines sont fixées, car les données d'usines obtenues sont journalières. En somme, la méthode utilisée pour le calcul du temps de séjour par la décroissance du chlore est simpliste et ne semble pas donner une réponse réaliste pour les temps de séjour aux points de suivi. Des simulations hydrauliques avec les données manquantes permettraient d'obtenir un meilleur estimé des temps de séjour de l'eau potable aux points de suivi.

Il est intéressant de faire un parallèle entre la qualité de l'eau après le changement de configuration hydraulique du secteur à l'étude et l'effet de la sectorisation sans régulation de pression sur la qualité de l'eau. En effet, la littérature récente sur la sectorisation de sept secteurs pilotes de 2010 à 2015 du réseau de la Ville de Montréal démontre que l'effet de la sectorisation sans régulation

de pression sur la qualité de l'eau se limite aux changements de qualité dans les points à faible écoulement ou à temps de séjour élevé (Dias, 2016). En d'autres mots, les nouveaux culs-de-sac formés à l'intérieur et à l'extérieur du secteur pilote à proximité des vannes d'isolation sont les points où une dégradation de la qualité de l'eau est prévisible (Dias, 2016). Les résultats du suivi après changement complet d'alimentation donnent un portrait général de la qualité de l'eau dans le secteur. Cependant, le suivi réalisé ne donne aucune indication sur la qualité de l'eau dans les nouveaux culs-de-sac. La qualité de l'eau dans les culs-de-sac demeure donc inconnue. Il serait intéressant de réaliser des simulations hydrauliques pour déterminer les temps de séjour et de qualité d'eau dans les nouveaux culs-de-sac du secteur (voir 8 vannes fermées lors de la manipulation des vannes à la Figure 5.5).

5.3.3.6 Impact du changement de source sur la turbidité à l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc

La turbidité élevée peut causer des goûts et des odeurs désagréables pour les consommateurs. Dans le cadre du suivi, la manipulation des vannes et les épisodes d'eau rouge ont causé 36 épisodes de turbidité supérieure à 5 UTN. La Figure 5.25 présente les valeurs de turbidité mesurées en continu avant et après le changement de source aux 3 points subissant le changement de source.

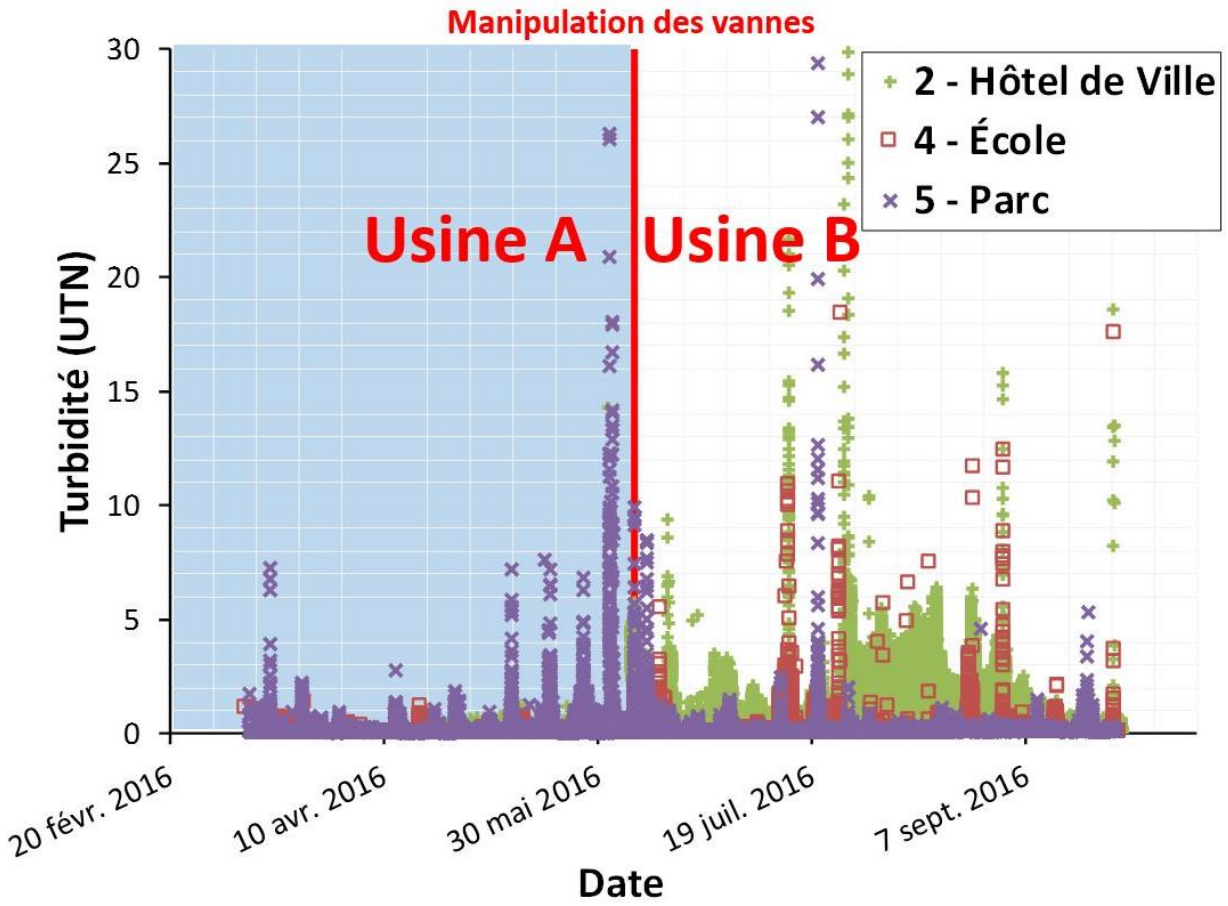


Figure 5.25 : Impact du changement de source sur la turbidité à la l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc

On observe 36 dépassements du seuil de 5 UTN aux points de suivi subissant le changement de source. Les épisodes d'eau rouge sont plus nombreux après le changement de source (26 par rapport à 10) à cause de la déstabilisation des dépôts de corrosion et des sédiments du réseau causée par les changements hydrauliques. À l'Hôtel de Ville, la turbidité semble avoir augmenté après le changement de source à cause de l'augmentation du temps de séjour. À l'école, l'augmentation de la turbidité après le mois de juin pourrait aussi être causée par la stagnation de l'eau dans les conduites à cause de la diminution importante de la demande en eau du bâtiment à la fin de l'année scolaire. La diminution du temps de séjour au Parc causée par le changement de configuration hydraulique a eu un effet positif sur la turbidité à ce point. Les turbidités élevées observées aux mois de juillet et août pourraient aussi être associées à l'augmentation des taux de corrosion causée par l'effet de la température sur les épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005). La Figure 5.26, la Figure 5.27 et la Figure 5.28 détaillent l'impact du changement de source sur la turbidité pour

chacun des sites avant le changement de source (usine A) et après le changement de source (usine B).

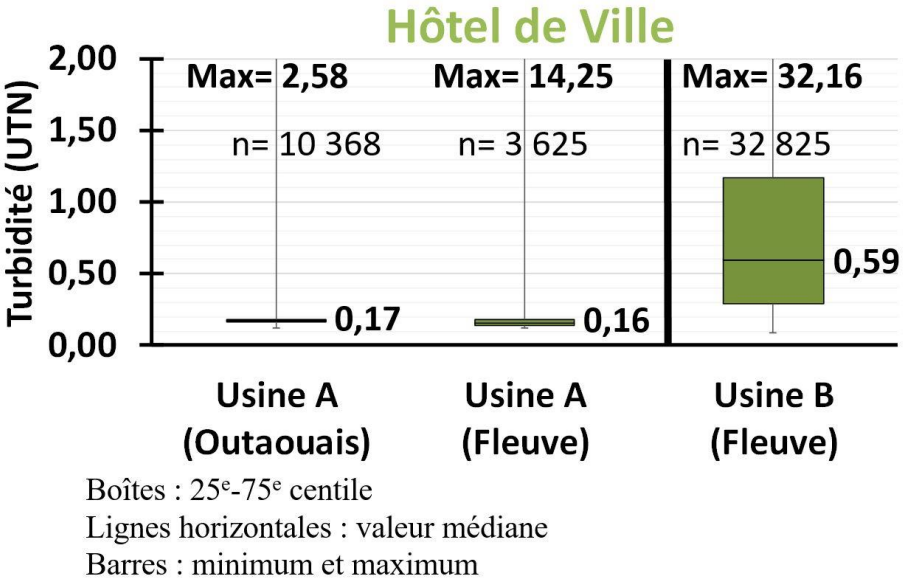


Figure 5.26 : Variation du détail de la turbidité à l'Hôtel de Ville en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

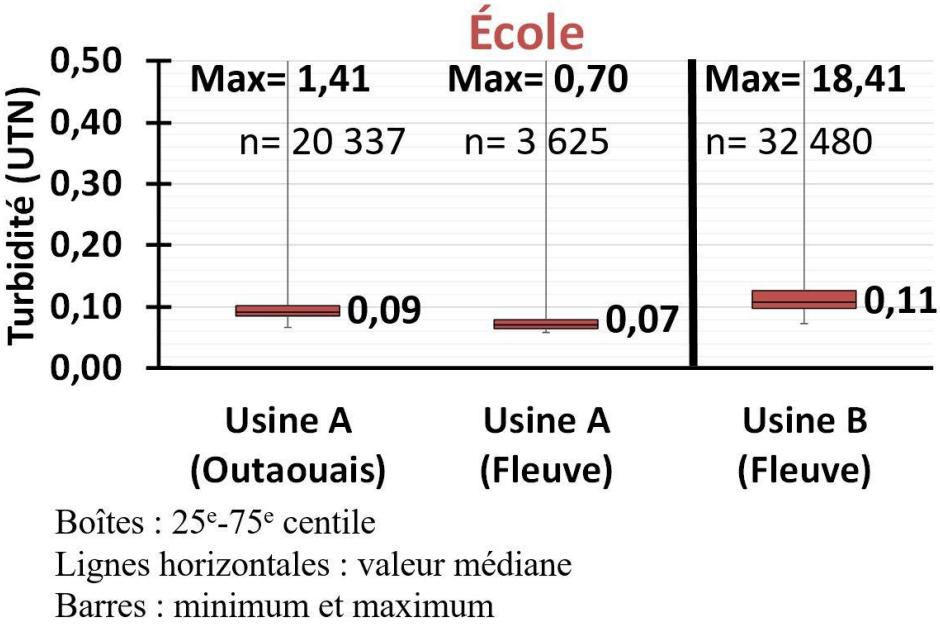


Figure 5.27 : Variation du détail de la turbidité à l'école en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

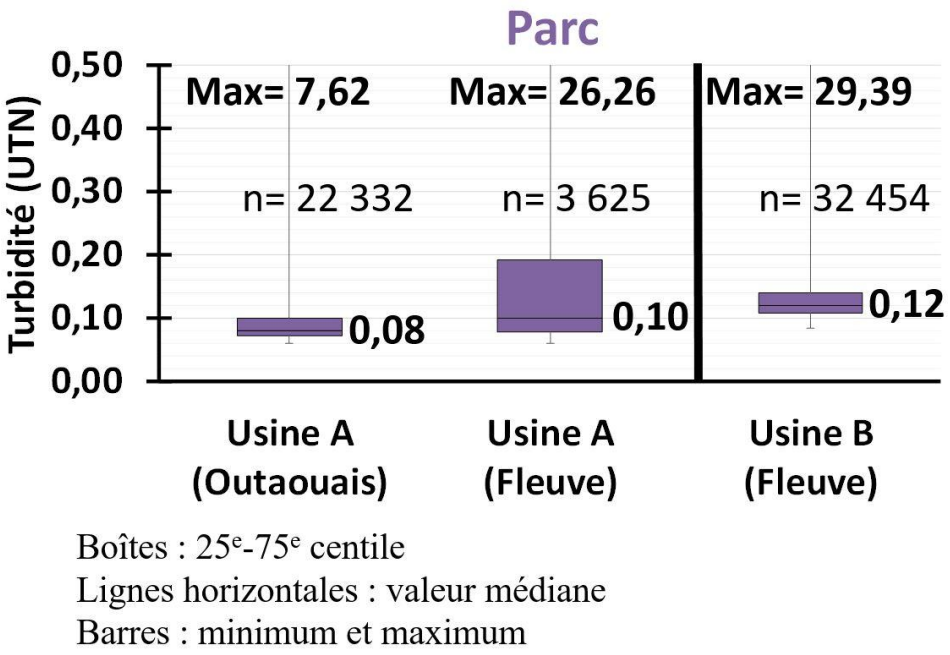


Figure 5.28 : Variation du détail de la turbidité au Parc en fonction de la dominance du mélange de sources d'eau

Pendant l'alimentation par l'usine A, la turbidité dépasse 5 UTN surtout au Parc. Comme ces événements sont courts (Figure 5.25), la turbidité médiane (0,08 à 0,10 UTN) est légèrement affectée par ces épisodes, mais elle demeure faible lors de l'alimentation par l'usine A. L'augmentation de l'alcalinité de 30 à 40 mg $CaCO_3$/L durant la transition de l'Outaouais au fleuve n'a pas affecté la turbidité aux points de suivi. Au contraire, la diminution de l'alcalinité favoriserait les épisodes d'eau rouge et les pics de turbidité (Imran et al., 2005). Pendant l'alimentation par l'usine B, des valeurs plus élevées variant entre 0,08 et 32 UTN (médiane de 0,59 UTN) sont observées à l'Hôtel de Ville, comparativement à 0,07 à 18 UTN (médiane de 0,11 UTN) à l'école et 0,08 à 29 UTN (médiane de 0,12 UTN) au Parc. En effet, la turbidité médiane à l'Hôtel de Ville est environ de 5 fois plus élevée qu'à l'école et au Parc.

Les 7 épisodes d'eau rouge observés après le changement de source aux trois points de suivi durant la période du 7 juin au 13 juillet 2016 sont modérés (< 10 UTN) et varient de 5 minutes jusqu'à un maximum de 7h45. Ils sont vraisemblablement causés par la remise en suspension des dépôts meubles et la déstabilisation des dépôts de corrosion (changement hydraulique et de qualité d'eau) et concentrés pendant la première semaine après la manipulation des vannes. Ils surviennent également durant l'augmentation de la température de l'eau de 14,7 à 20,0°C, ce qui favorise les

épisodes d’eau rouge. Par la suite, 7 épisodes d’eau rouge de forte intensité sont observés notamment pour la période du 13 juillet au 29 juillet (jusqu’à 32 UTN). Ces pics de turbidité semblent favorisés par l’augmentation de température entre 20,0 et 23,4°C et la stagnation de l’eau dans la conduite dans l’entrée de service. Il faut rappeler que la température (>16,8 °C) et le temps de séjour de l’eau dans la conduite sont identifiés comme des facteurs significatifs dans la littérature (Imran et al., 2005; Li et al., 2010). Plusieurs études ont identifié des pics de turbidité et de concentrations de métaux qui sont corrélés aux changements de température (MacQuarrie, Mavinic, & Neden, 1997; McNeill & Edwards, 2001; Smith, Ta, Holt, Delanoue, & Colbourne, 1998). Des études démontrent également une diminution de la concentration de fer dans l’eau et du nombre de plaintes d’épisodes d’eau rouge durant l’hiver (Horsley, Northup, O'Brien, & Harms, 1998; McNeill & Edwards, 2001; Volk, Dundore, Schiermann, & LeChevallier, 2000).

La température semble être la cause la plus probable des 7 épisodes d’eau rouge du 13 au 29 juillet puisque les autres paramètres reliés aux épisodes d’eau rouge de la littérature sont théoriquement stables avec la source d’eau de l’usine B (concentration des chlorures, des sulfates, du sodium, et de l'oxygène dissous). La Figure 5.29 présente l’impact du changement de source et de la saison sur la température à l’Hôtel de Ville, l’école et au Parc.

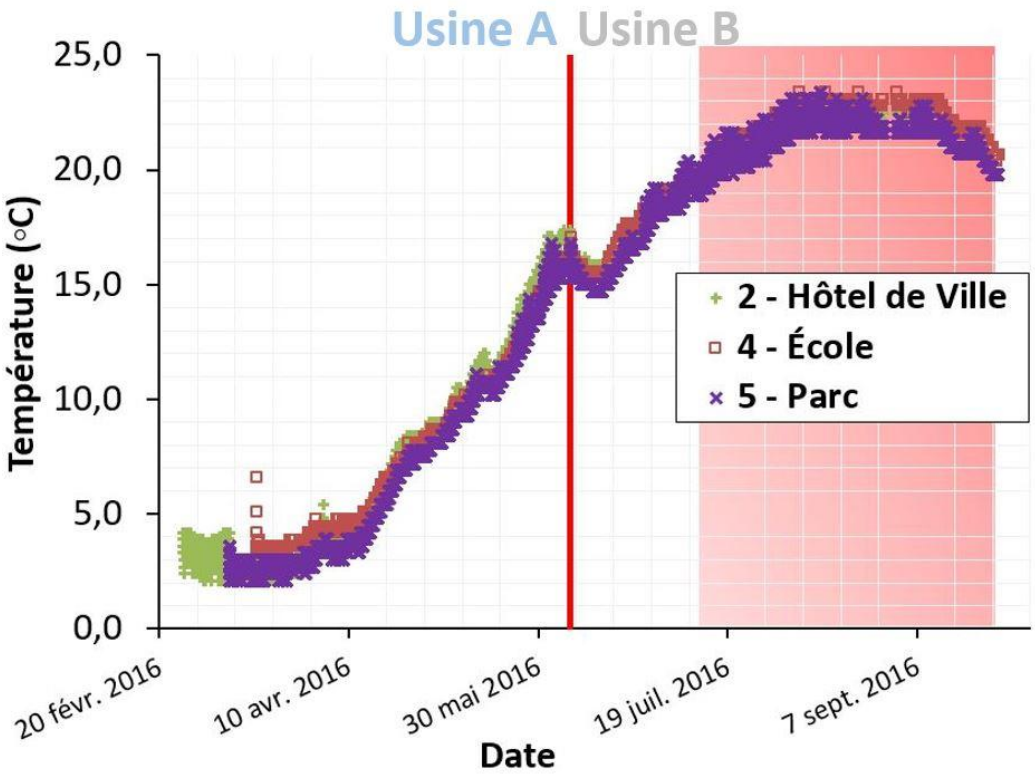


Figure 5.29 : Impact du changement de source et de la saison sur la température à l'Hôtel de Ville, l'école et au Parc (température > 20°C dans la zone foncée du 13 juillet au 26 septembre)

Finalement, à la fin du mois de septembre, la turbidité semble se stabiliser aux points de suivi (Figure 5.25). Néanmoins, il y a encore des pics à cette période à l'Hôtel de Ville. Cette stabilisation progressive concorde avec la diminution progressive de la température sous 20°C (Figure 5.29). La période de stabilisation post-changement de source est d'environ 2 mois et demi et correspond à la diminution de la température à la fin du mois de septembre.

5.3.3.7 Bilan des impacts du changement de source sur la qualité de l'eau (2016)

Le bilan des impacts du changement de source est présenté au Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Bilan des impacts du changement de source aux points de suivi

Paramètre	Impacts aux points subissant le changement de source
Conductivité	• Augmentation de la conductivité médiane aux points de suivi de 160-180 µS/cm avant changement à 300-321 µS/cm après changement
pH	• Augmentation de la médiane de 7,0-7,4 à 7,8-7,9
Chlore résiduel libre	• Diminution de 0,77-0,66 à 0,42 mg Cl_2 équiv./L à l'Hôtel de Ville • Très faible diminution à l'école de 0,77-0,81 à 0,75 mg Cl_2 équiv./L • Augmentation de de 0,66-0,80 à 1,17 mg Cl_2 équiv./L au Parc
Variation des temps de séjour (estimés)	• +18h à l'Hôtel de Ville • -17h au Parc • +5h à l'école
Turbidité	• Augmentation de 0,16-0,17 à 0,59 UTN à l'Hôtel de Ville • Pas d'effet sur la turbidité à l'école • Légère augmentation de 0,08-0,10 à 0,12 UTN au Parc

5.3.3.8 Détérioration de la qualité de l'eau dans la zone du changement de source

L'évaluation des avantages du suivi en continu pour caractériser le nombre, la durée et l'intensité des épisodes d'eau rouge est abordée dans cette section. Le Tableau 5.5 présente le nombre et la durée des épisodes d'eau rouge aux points de suivi subissant le changement de source. Tel que précédemment, le critère de turbidité >5 UTN est utilisé pour qualifier un épisode d'eau rouge.

Tableau 5.5 : Nombre et durée des épisodes d'eau rouge (turbidité >5 UTN) aux points de suivi subissant le changement de source entre le 14 mars 2016 et le 27 septembre 2016.

Point de suivi	Source d'eau potable	Avant/Après changement	Nombre d'épisodes d'eau rouge	Durée moyenne	Écart-type de la durée
École	Usine A (Outaouais)	Avant	0	-	-
	Usine A (Fleuve)	Avant	0	-	-
	Usine B (Fleuve)	Après	8	0 h 09	0 h 12
Hôtel de Ville	Usine A (Outaouais)	Avant	0	-	-
	Usine A (Fleuve)	Avant	2	0 h 10	0 h 07
	Usine B (Fleuve)	Après	15	3 h 57	3 h 18
Parc	Usine A (Outaouais)	Avant	4	0 h 17	0 h 15
	Usine A (Fleuve)	Avant	4	3 h 20	2 h 25
	Usine B (Fleuve)	Après	3	0 h 48	0 h 37

Dix épisodes d'eau rouge ont été observés avant le changement de source au Parc et à l'Hôtel de Ville. Le nombre d'épisodes d'eau rouge augmente à 26 après le changement de source et ces épisodes sont observés à tous les points de suivi. Le Tableau B.1, le Tableau B.2 et le Tableau B.3 présentent le détail des épisodes d'eau rouge à l'Hôtel de Ville, à l'école, et au Parc respectivement à l'annexe B.

Le plus grand nombre d'épisodes d'eau rouge après le changement de source est observé pour l'Hôtel de Ville (15 épisodes de durée moyenne de 4 heures variant de 5 minutes à 10h25 et d'intensité entre 5 et 32 UTN) (Tableau B.1). En effet, le temps de séjour à ce point est le plus élevé (33 heures ; Figure 5.19) et augmente de 18 heures après le changement. Des épisodes d'eau rouge de forte intensité (>10 UTN) sont mesurés du 13 au 27 juillet et correspondent à l'augmentation de la température au-dessus de 20°C (Figure 5.29). À l'école, les épisodes après changement de source sont en majorité de moins de 5 minutes et varient de 6 à 18 UTN (Tableau B.2). Les deux épisodes d'eau rouge les plus longs et intenses (11 À 18 UTN) ont lieu pendant que l'école était fermée (stagnation) et que la température dépassait 20°C. Au Parc, les épisodes d'eau rouge du 1 et 2 juin sont liés aux travaux d'aqueduc permettant le changement de source (Tableau B.3). L'épisode du 7 juin est lié à l'opération de fermeture des vannes. L'épisode d'eau rouge de 29 UTN du 20 juillet semble être causé par l'augmentation de température au-dessus de 20°C et les changements hydrauliques. En somme, les épisodes d'eau rouge du Parc non liés aux travaux varient de 5 min à 1h10 et varient de 7 à 29 UTN.

Les paramètres favorisant l'eau rouge (augmentation de la température, des concentrations de chlorures, des sulfates, du sodium et d'oxygène dissous) sont similaires aux trois points de suivi et ne peuvent pas à eux seuls expliquer le nombre, l'intensité et la durée des épisodes d'eau rouge (Imran et al., 2005). Les conditions locales de corrosion des conduites, les variations de consommation, les changements de temps de séjour et de sens d'écoulement sont potentiellement des facteurs explicatifs.

5.3.4 Qualité de l'eau dans la zone durant le premier jour après la manipulation des vannes

5.3.4.1 Chute du chlore résiduel libre équivalent et turbidité élevée durant le premier 36 heures après la manipulation des vannes

Un autre objectif est de déterminer l'impact de l'opération de manipulation des vannes sur la turbidité et la concentration de chlore résiduel libre équivalent dans l'eau du secteur. La Figure 5.30 présente les valeurs de turbidité aux points de suivi mesurées en continu durant le premier jour après la fin de l'opération de manipulation des vannes du 7 juin 2016.

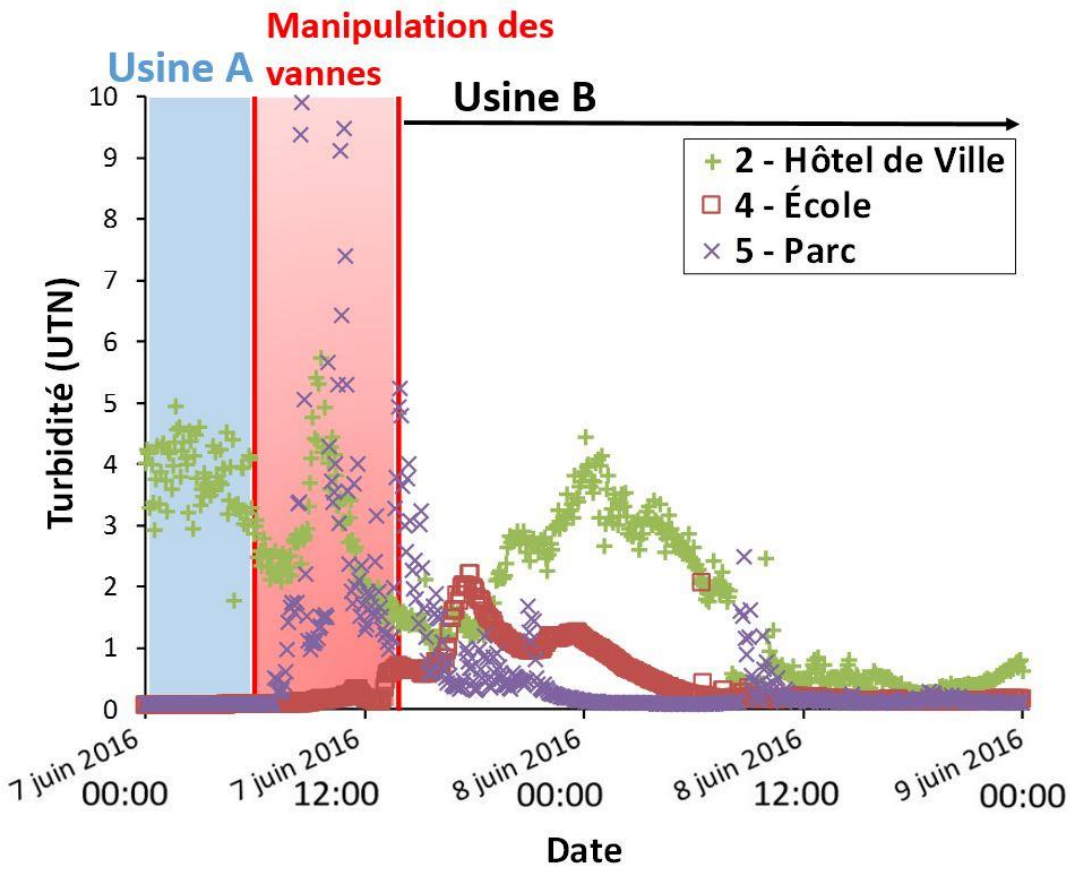


Figure 5.30 : Turbidité élevée durant les 36h après la manipulation des vannes

La turbidité maximum mesurée au Parc est de 9,9 UTN à 8h35. La turbidité maximum mesurée à l'Hôtel de Ville est de 5,7 UTN à 9h35. La turbidité est visible au Parc et à l'Hôtel de Ville puisqu'elle dépasse 5 UTN. La turbidité à l'école augmente à retardement (17h50) et à plus faible intensité (Max de 2,2 UTN). La Figure 5.31 présente la chute du chlore résiduel libre équivalent durant le premier jour après la fin de l'opération de manipulation des vannes du 7 juin 2016.

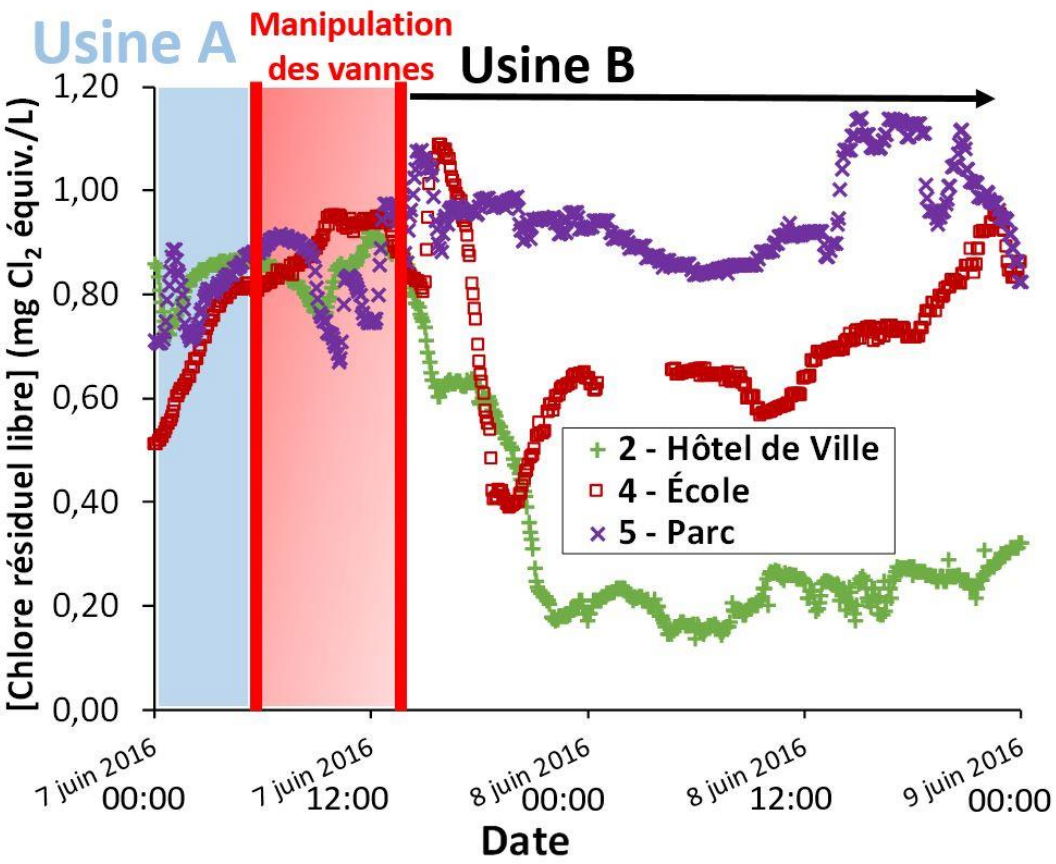


Figure 5.31 : Chute du chlore résiduel libre équivalent pendant les premières heures après la manipulation des vannes

La diminution du chlore résiduel libre équivalent durant les 3 premières heures après la manipulation des vannes est de 0,1 à 0,7 mg Cl_2 équiv./L. Environ 24 heures après la manipulation des vannes, de nouveaux niveaux de chlore résiduel libre équivalent sont atteints selon les nouveaux temps de séjour de l'eau potable.

5.3.5 Résultat du suivi ponctuel hebdomadaire

La Figure 5.32 présente la relation entre le fer total et la turbidité aux 5 points de suivi (mesures ponctuelles).

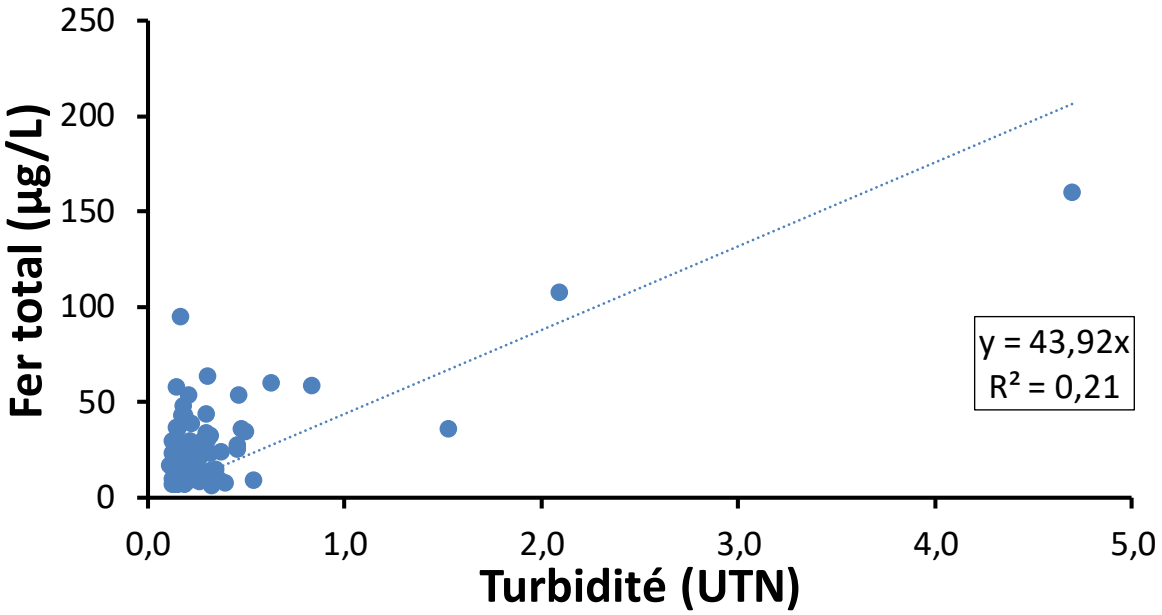


Figure 5.32 : Relation linéaire entre le fer total et la turbidité aux points de suivi (n=80)

Cette figure montre que la concentration de fer total aux points de suivi varie de 6 à 160 µg/L demeurant sous de la recommandation esthétique de 300 µg/L. Le faible coefficient de corrélation (R^2=0,21) souligne que la relation entre les variables n'est pas linéaire (particulièrement sous 1 UTN). Par contre, les points élevés en fer sont aussi élevés en turbidité. Il faudrait étudier la relation entre le fer total et la turbidité lors des pics de turbidité. Après le changement d'alimentation, la concentration médiane de fer total a diminué de 41 à 16 µg/L aux points subissant le changement de source. Pour la même période, la concentration de fer total à la Piscine (Usine B) a diminué de 29 à 18 µg/L. Le changement de configuration hydraulique a eu un impact sur la concentration de fer qui est maintenant uniforme dans le secteur (environ 16 à 18 µg/L). La Figure 5.33 présente la concentration d'oxygène dissous aux points de suivi en fonction du temps.

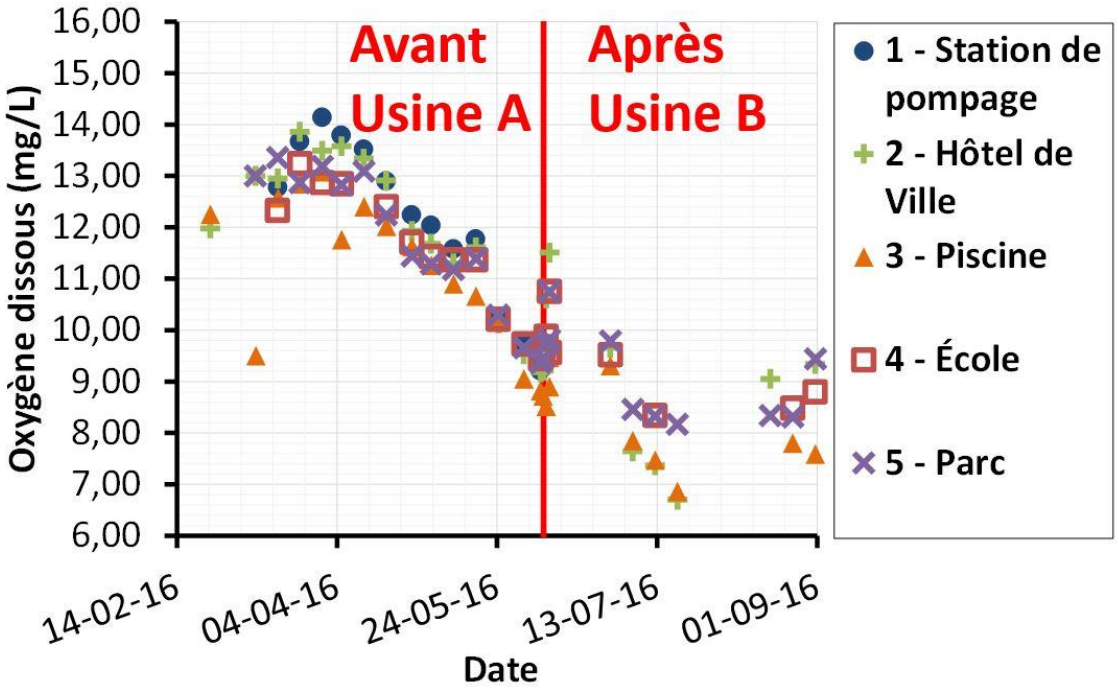


Figure 5.33 : Concentration d'oxygène dissous aux points de suivi en fonction du temps

Cette figure montre que la concentration d'oxygène dissous dans l'eau diminue selon la variation saisonnière de température aux points de suivi. À une date donnée, la concentration d'oxygène dissous dans l'eau est presque la même à tous les points de suivi et demeure à plus de 6 mg/L.

5.3.6 Comparaison du suivi en continu et du suivi ponctuel hebdomadaire

5.3.6.1 Exemple d'événement non détecté avec un suivi ponctuel ciblé

La Figure 5.34 présente un exemple de comparaison des mesures du suivi en continu et du suivi ponctuel.

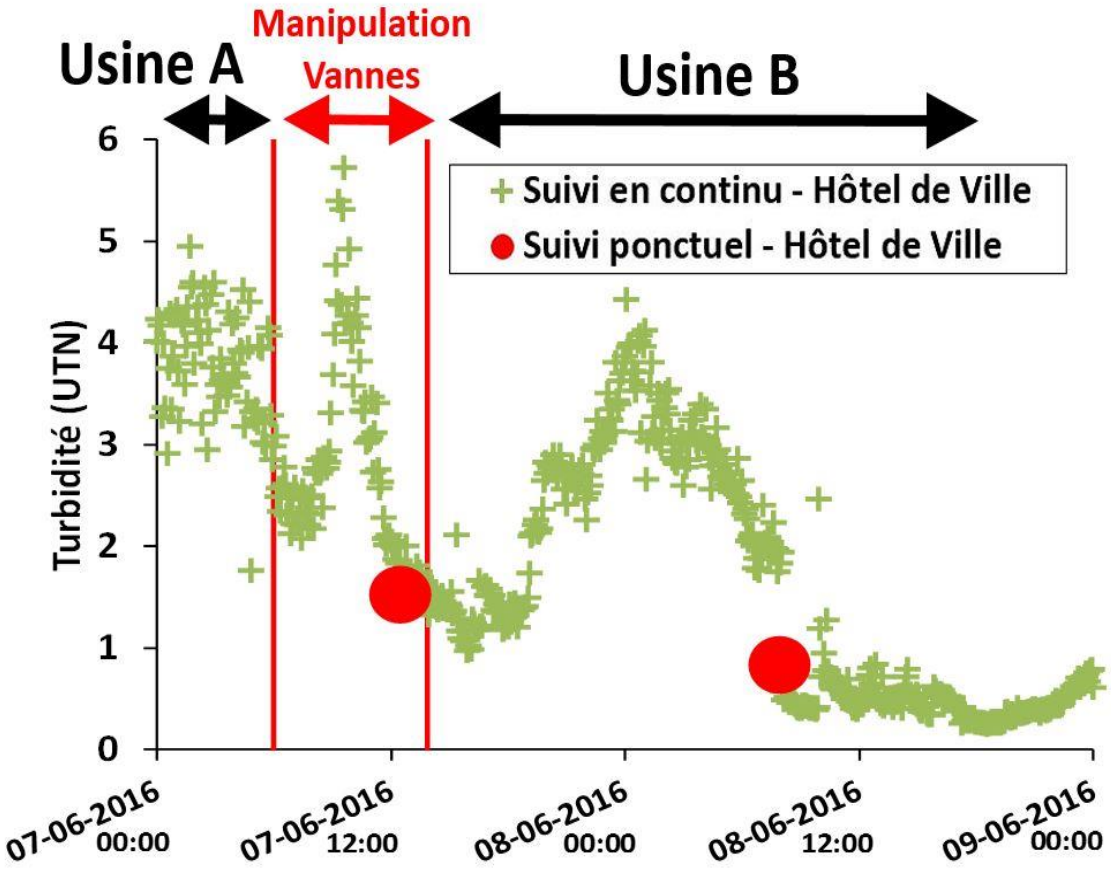


Figure 5.34 : Comparaison des mesures en continu (n = 577) et ponctuelles (n= 2) durant le changement d'alimentation

On observe que les deux mesures de suivi ponctuel ciblé (en moins de 24h) ne permettent pas de détecter l'événement de turbidité élevée. Les mesures du suivi ponctuel sont en dessous de 2 UTN et elles sont identiques aux valeurs du suivi en continu au même moment. En somme, le suivi en continu permet de détecter tous les événements de turbidité élevée, car la probabilité d'être présent au moment du pic est très faible.

5.3.6.2 Synthèse des comparaisons du suivi ponctuel et du suivi en continu en fonction du paramètre mesuré

Les résultats de mesure des appareils de suivi en continu sont comparés avec ceux obtenus par des échantillonnages ponctuels. Ainsi, chaque mesure ponctuelle aux 5 points de suivi a été comparée aux valeurs de suivi en continu au moment de l'échantillonnage ponctuel, pour chacun des

paramètres suivis (chlore résiduel libre, conductivité, pH, température et turbidité). Considérant que la durée d'un échantillonnage ponctuel est d'environ 15 minutes, la moyenne de 3 mesures en continu au moment de l'échantillonnage (pas de temps de 5 minutes) a été appliquée pour la comparaison des deux modes de suivi. La Figure 5.35 présente la régression linéaire des deux modes de suivi pour la conductivité (sans les mesures de la sonde mal calibrée de l'école).

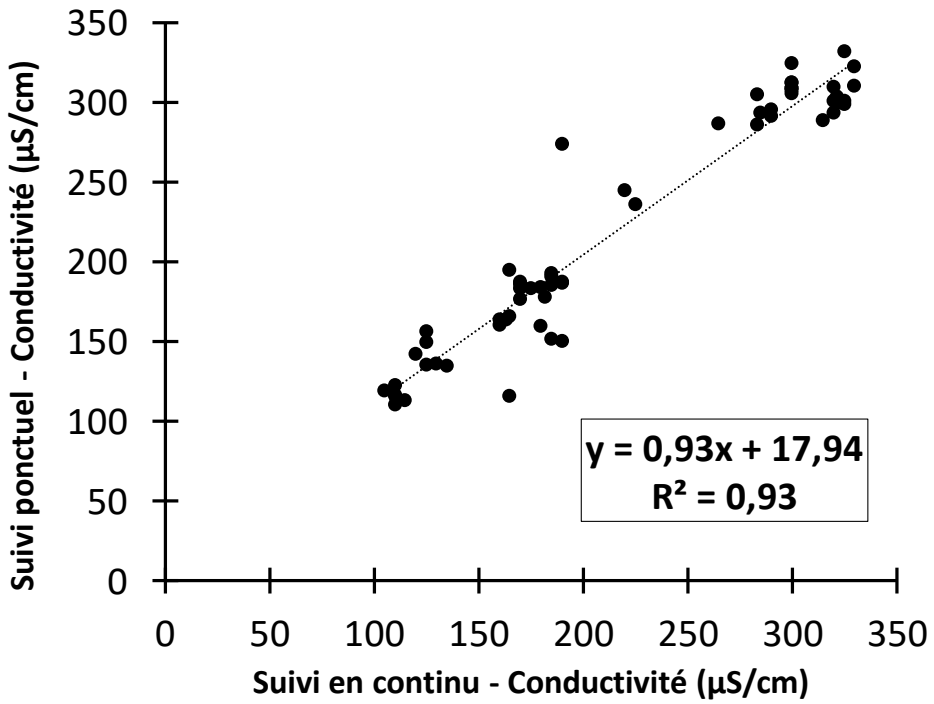


Figure 5.35 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la conductivité (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4) (n = 60 paires de valeurs)

Les mesures de conductivité par échantillonnage ponctuel sont conformes avec les mesures de suivi en continu de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 (R^2 = 0,93). La différence entre les deux modes de suivi est non significative (test de Wilcoxon : ρ = 0,08). Ainsi, les mesures de conductivité apparaissent robustes et peu affectées par le temps et le mode de suivi (ponctuel ou continu). La Figure 5.36 présente la régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la température.

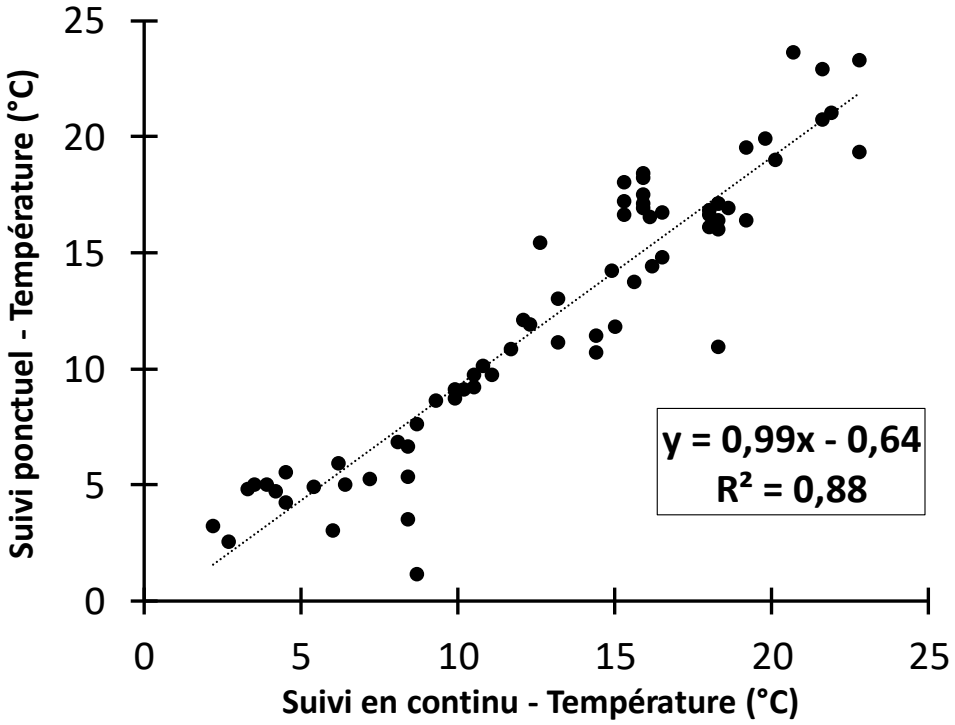


Figure 5.36 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la température (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4) (n = 68 paires de valeurs)

Tel qu'observé pour les mesures de conductivité, les mesures de températures du suivi continu de la Kapta^{tm} 3000-AC4 et du suivi ponctuel en eau chaude et en eau froide sont bien corrélées (R^2 = 0,88), mais significativement différentes (test de Wilcoxon : ρ = 0,003). Les données sont légèrement plus dispersées, le suivi en continu semblant surévaluer la température de quelques valeurs. Il faut considérer que les mesures ponctuelles sont réalisées dans un bécher à l'air libre (mesure du suivi en continu dans la conduite), ce qui affecte la mesure de température. L'écart pourrait aussi être expliqué par l'imprécision de la sonde Kapta^{tm} pour mesurer la température (± 1,2°C). La Figure 5.37 présente la comparaison des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu pour le pH.

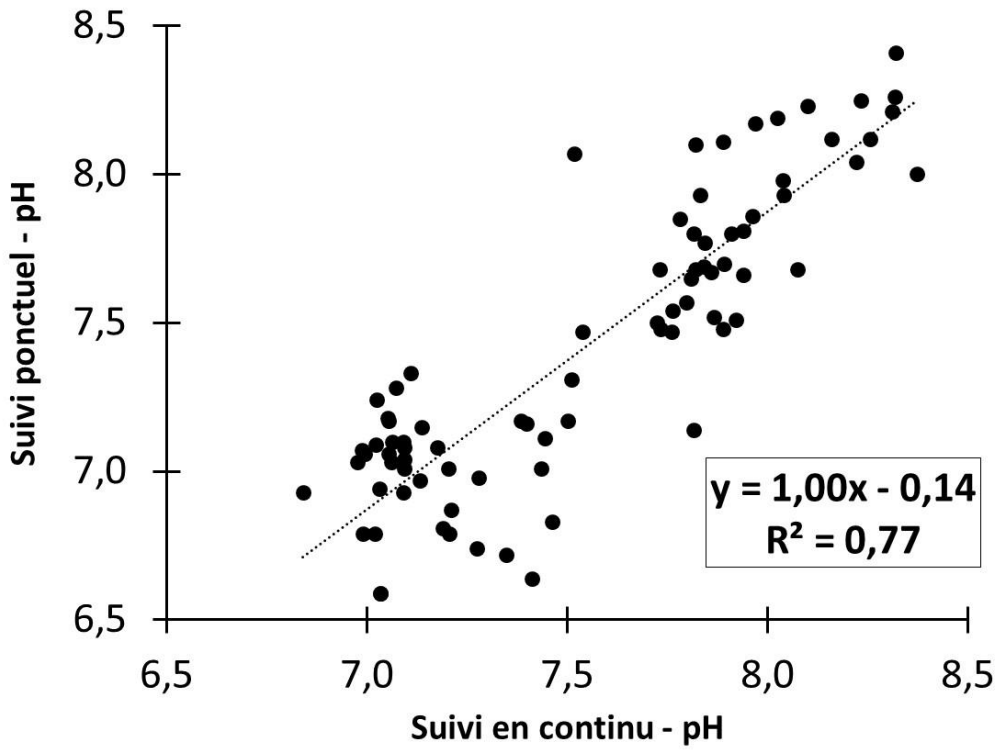


Figure 5.37 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu du pH (sonde de pH Hach) (n = 82 paires de valeurs)

Les mesures de pH par échantillonnage ponctuel sont conformes aux mesures de suivi en continu de la sonde de pH Hach pHD-SC (R^2 = 0,77). Cependant, l'écart entre les deux types de suivi est significatif (test de Wilcoxon ; ρ = 0,000). Les différences s'expliquent en partie par les défis pour l'obtention de mesures stables de pH. En effet, les mesures de pH sont affectées par la température de deux façons. Il y a un effet mécanique causé par un changement sur les propriétés de l'électrode et un effet chimique causé par un changement d'équilibre des solutions (American Public Health Association (APHA) et al., 2012). Aussi, le test de Wilcoxon est affecté par les valeurs extrêmes auxquelles il attribue beaucoup de poids. La sonde de pH du suivi ponctuel nécessite une calibration à l'aide d'étalons (4, 7 et 10) avant chaque échantillonnage. Au niveau de la sonde de suivi en continu de pH, la calibration est mensuelle. Des irrégularités au niveau des calibrations pourraient expliquer les écarts. Ainsi, des différences notables entre le suivi ponctuel et continu pourraient être occasionnées aléatoirement, cependant de façon générale les deux modes de suivi seraient comparables et fiables pour représenter la qualité de l'eau. Finalement, les mesures restent dans la plage de pH prescrite par le RQEP de 6,5 à 8,5 (6,59 à 8,41). La Figure 5.38 présente la régression

linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la concentration de chlore résiduel libre.

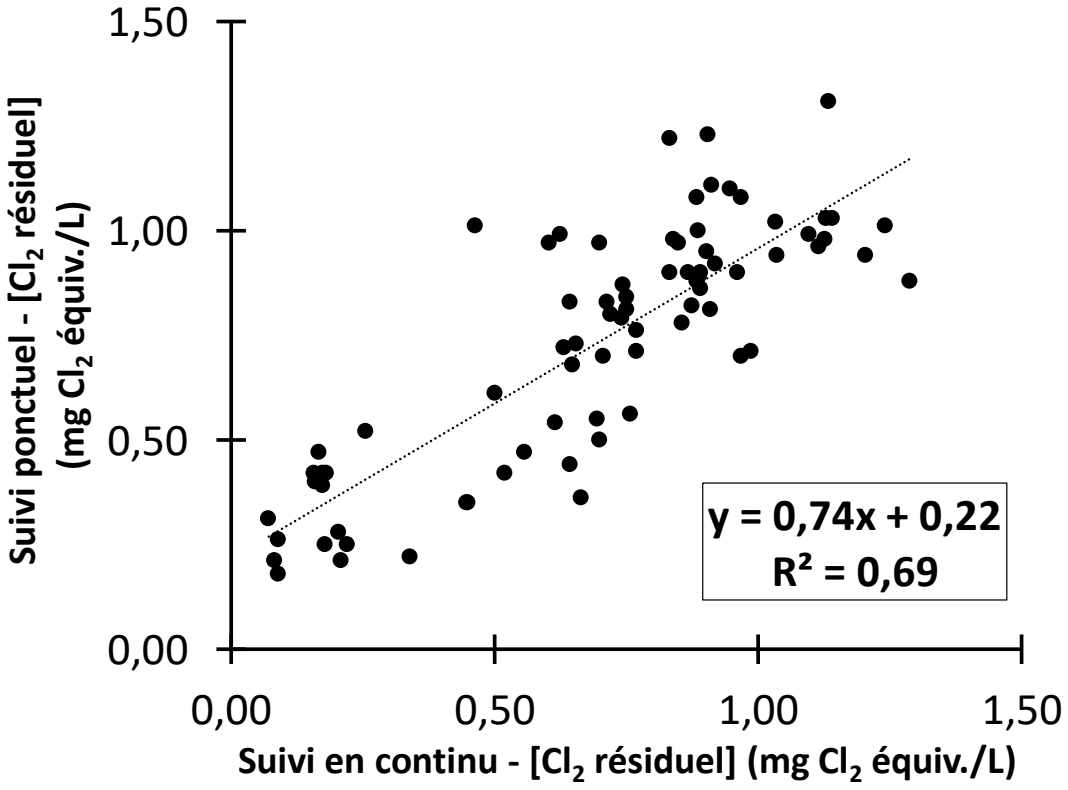


Figure 5.38 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la concentration de chlore résiduel libre (sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 et sonde de pH Hach) (n = 78 paires de valeurs)

Les mesures de concentrations de chlore libre des échantillonnages ponctuels sont conformes avec les concentrations de chlore libre équivalent calculées à partir des mesures de chlore actif et de température de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 et de la sonde de pH Hach pHD-SC (R^2 = 0,69). Les mesures de chlore résiduel libre couvrent de 0,08 à 1,31 mg Cl_2 équiv./L, ce qui est comparable aux conditions du réseau (proximité d'un cul-de-sac ou de l'usine). Aussi, la différence entre les deux modes de suivi est non significative (test de Wilcoxon ; ρ = 0,09) malgré le biais induit par la conversion du chlore actif mesuré par les sondes en chlore résiduel libre. Ainsi, le suivi en continu du chlore résiduel libre effectué dans ce projet permet de déterminer les tendances, mais il est toutefois imprécis. En effet, les différences absolues entre les mesures en continu et ponctuelles de

chlore peuvent être importantes (0,15 ± 0,11 mg Cl_2 équiv./L). La Figure 5.39 présente la régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la turbidité.

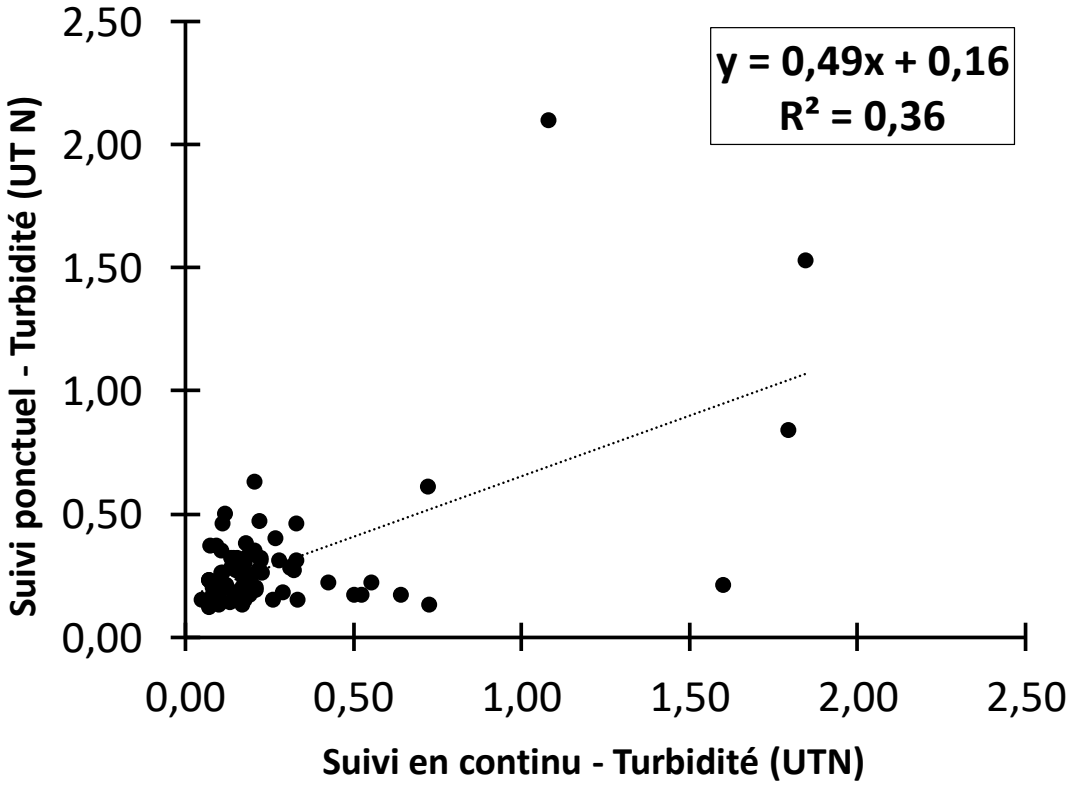


Figure 5.39 : Régression linéaire des mesures du suivi ponctuel et du suivi en continu de la turbidité (n = 78 paires de valeurs)

Contrairement aux autres paramètres de suivi, les lectures de turbidité effectuées par suivi ponctuel sont faiblement corrélées à celles obtenues par suivi en continu avec le turbidimètre Hach (1720E ou Solitax) (R^2 = 0,36) et significativement différentes (test de Wilcoxon ; ρ = 0,002). Les valeurs mesurées se situent généralement en dessous de 1 UTN, voire en dessous de 2 UTN. La calibration des turbidimètres pourrait expliquer en partie les différences, particulièrement pour les turbidités faibles (<1 UTN). Les mesures ponctuelles couvrent seulement une partie des valeurs possibles de turbidité (0 à 32 UTN) du suivi en continu. La mesure de turbidité en continu étant très informative, il apparaît important d'effectuer des travaux additionnels, si possible avec des sondes en continu autonomes pour mieux caractériser l'erreur de mesure en identifier les causes dans la gamme de mesure de 1à 10 UTN. Cette gamme de valeur est plus pertinente pour la compréhension des phénomènes de détérioration de la qualité de l'eau en réseau.

Concrètement, les résultats démontrent que les mesures du suivi en continu sont validées par les mesures ponctuelles (conductivité, pH et température). Les erreurs apparemment modestes de mesure des capteurs de température (± 1,2°C) contribuent significativement aux erreurs sur les autres mesures de la sonde Kapta^{tm} 3000-AC4. Toutefois, la sonde Kapta^{tm} permet de mesurer avec suffisamment de précision la conductivité et la température dans un réseau de distribution. La sonde permet de déterminer les tendances de chlore résiduel libre. Elle ne peut déterminer avec autant de précision la concentration de chlore résiduel libre que la méthode DPD et ne pourrait servir à l'ajustement fin des concentrations de chlore résiduel libre dans le réseau.

Les mesures du suivi ponctuel de la turbidité étaient significativement différentes du suivi en continu avec le turbidimètre Hach (1720E ou Solitax). Les causes de ces erreurs devront être étudiées. Des facteurs comme la prise d'échantillon et les différences de modalité de mesure optique sont à considérer. Toutefois, la cohérence des temps d'échantillonnage apparaît comme particulièrement importante pour le suivi de la turbidité. La durée de l'échantillonnage et de mesure pour les échantillons ponctuels est d'environ 15 minutes ce qui est suffisant pour causer des différences significatives en raison de la dynamique rapide des variations de turbidité.

Malgré ces différences, l'analyse des durées et intensités des pointes de turbidité est hautement informative. Un total de 36 épisodes de turbidité dépassant 5 UTN sont comptabilisés. De ces 36 épisodes, 42% des épisodes de turbidité durent moins de 20 minutes et 64% des épisodes de turbidité durent moins de 2 heures. Considérant que le temps de réaction de l'exploitant de réseau suite à des plaintes est supérieur à 2 heures, cela signifie que la majorité des échantillonnages ponctuels effectués suite à des plaintes sous-estimerait la situation repérée par le consommateur. Pour l'exploitant, le temps de réaction pour une plainte est critique et l'échantillonnage ponctuel apparaît inutile ou peu informatif. Au contraire, une mesure en continu de la turbidité dans les secteurs sujets à des plaintes permettrait de mieux évaluer l'ampleur des épisodes de turbidité élevée.

Finalement, un des aspects critiques reste le choix de l'emplacement de telles sondes de suivi dans le secteur. Seul le suivi en continu peut détecter les événements transitoires affectant les paramètres typiques de la qualité de l'eau et leur variabilité temporelle (chlore résiduel libre, conductivité, pH, température et turbidité).

5.3.6.3 Résumé des avantages du suivi en continu

Le Tableau 5.6 présente une comparaison des avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel hebdomadaire réalisé par le technicien.

Tableau 5.6 : Comparaison des avantages du suivi en continu par rapport au suivi ponctuel hebdomadaire

Paramètre étudié	Détectable ?		Remarque
	Suivi en continu	Suivi ponctuel du technicien	
Variation de la conductivité après le changement de source	Oui	Oui	
Variation du pH après le changement de source	Oui	Oui, mais imprécis	Les tendances sont perceptibles
Variation de la concentration de chlore résiduel libre après le changement de source	Oui	Oui, mais imprécis	Les tendances sont perceptibles
Variation de la turbidité après le changement de source	Oui	Oui, mais très imprécis	
Chute de la concentration de chlore résiduel libre juste après la manipulation des vannes	Oui	Non	Le suivi ponctuel n'a détecté qu'un seul épisode
Turbidité élevée juste après la manipulation des vannes	Oui	Non	
Détection du nombre d'épisodes d'eau rouge	Oui, tous	Non	
Détermination de la durée des épisodes d'eau rouge	Oui, tous	Non	

5.4 Impact du changement de source sur le nombre de bris de conduites dans le secteur

Considérant les impacts potentiels des bris sur la qualité de l'eau (Craun & Calderon, 2001), l'impact du changement de source sur le nombre de bris dans le secteur étudié a été évalué. La Figure 5.41 présente une comparaison du nombre de bris après le changement de source de juin à juillet par rapport aux données de bris historiques. En résumé, le changement de configuration hydraulique et d'alimentation en eau qui a provoqué des changements de pression dans le réseau a généré une augmentation du nombre de bris. Il y a eu 10 bris durant le mois de juin 2016, soit autant que le maximum historique durant l'été (juin à septembre). Comparativement au maximum historique du réseau pour le mois de juin (n=6), 4 bris supplémentaires ont été enregistrés. La

Figure 5.40 présente la localisation des bris sur le réseau secondaire des mois de juin et juillet à l'intérieur et à l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement.

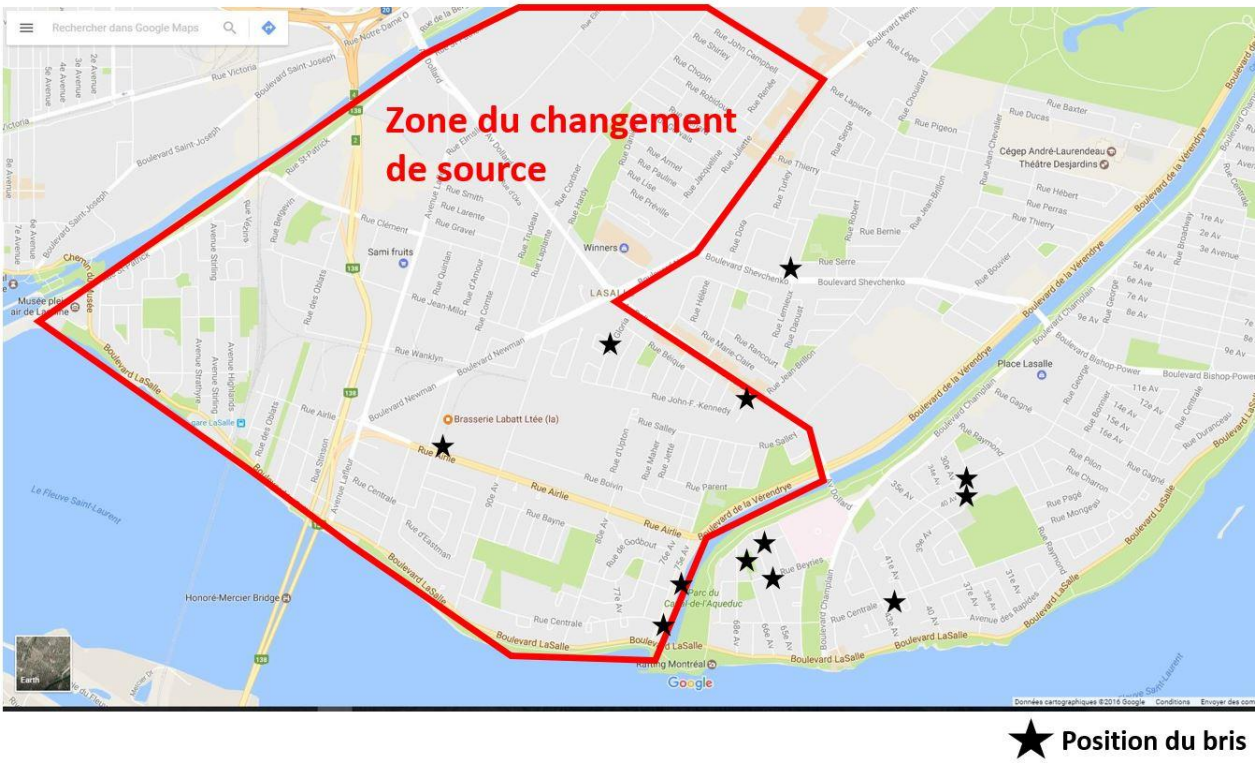


Figure 5.40 : Localisation des bris sur le réseau secondaire des mois de juin et juillet à l'intérieur et à l'extérieur de la zone du changement de source d'approvisionnement

Cette figure montre qu'il y a 5 bris situés dans la zone du changement de source d'approvisionnement.

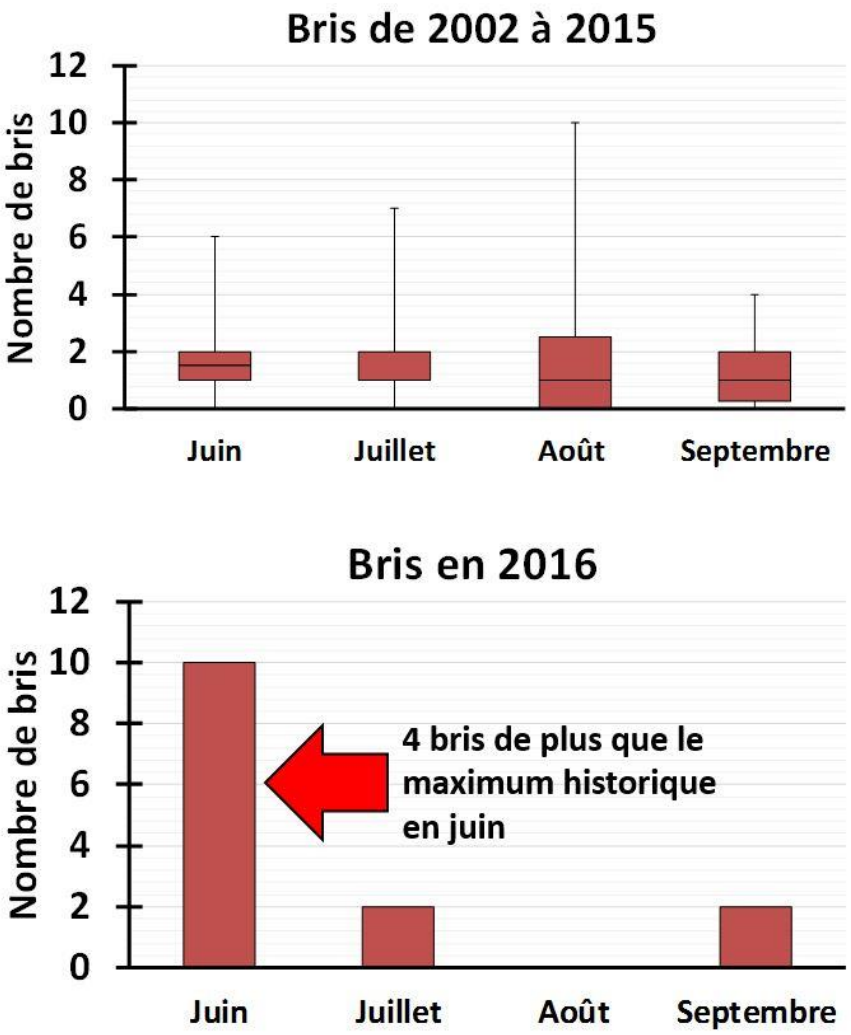


Figure 5.41 : Comparaison des bris après le changement de source en 2016 par rapport à l'historique de la Ville pour les mois de juin à septembre

On remarque que le changement de source du 7 juin 2016 a fait augmenter uniquement le nombre de bris durant le mois de juin et que suite à cela le nombre de bris redevient comparable à l'historique du réseau (environ 2 bris par mois). Le changement de source aurait donc affecté le nombre de bris à court terme, et plus spécifiquement durant le mois du changement de source. Le Tableau 5.7 détaille le pourcentage de bris de conduite en fonction de leur diamètre pour les mois de juin à septembre, entre 2002 et 2015 (historique), et suivant le changement de source d'alimentation du secteur.

Tableau 5.7 : Comparaison des pourcentages de bris en 2016 et de l'historique (2002 à 2015) en fonction du diamètre de la conduite pour les mois de juin à septembre

Diamètre en mm	% des bris (2002 à 2015)	% des bris 2016
102	1%	0%
152	42%	18%
203	44%	68%
254	3%	5%
305	7%	9%
356	3%	0%
406	0%	0%

Dans la période suivant le changement de source, 68% des 22 bris enregistrés sont associés à des conduites de 203 mm (8 pouces). Il est important de mentionner que ces diamètres sont les plus communs. Selon l'historique, les bris de conduites de 203 mm représentent 44% des bris des mois de juin à septembre. Suite au changement de source, le nombre de bris de conduites de 203 mm d'environ +24% en 2016, et diminue de -24% pour les conduites de 152 mm. Les pourcentages de bris en 2016 des autres diamètres sont comparables aux bris historiques. À la fin de l'année, il serait pertinent d'étudier les bris de 2016 plus en détail à l'aide du plan d'intervention de la municipalité.

5.4.1 Explications fournies par le service de l'eau et la Ville

Selon le service de l'eau, le changement de source d'approvisionnement a renversé les secteurs de pressions élevées et de pressions faibles. Avant le changement, l'eau provenait du nord-ouest et les pressions étaient alors plus fortes dans ce secteur. Après le changement, l'eau provient du sud-est. Ce phénomène est illustré par la Figure 5.42 ci-dessous.

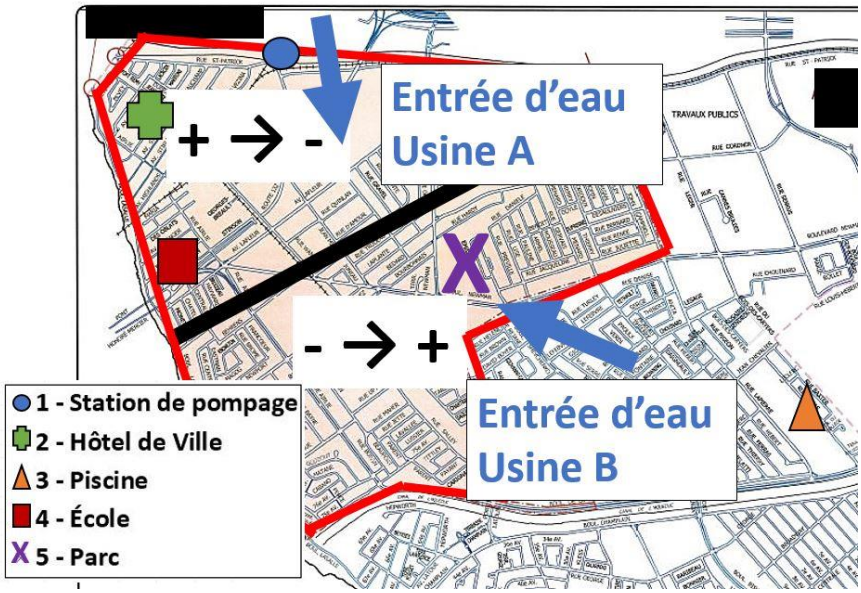


Figure 5.42 : Renversement des pressions de la zone du changement de source

La Figure 5.42 montre que des secteurs qui étaient initialement aux extrémités du réseau se retrouvent à proximité de la sortie des pompes. Ainsi, les conduites qui étaient soumises à des pressions de 2,8 à 3,4 bar (40-50 lb/po²) avant changement sont sollicitées par des pressions de 4,8 à 5,5 bar (70-80 lb/po²) après changement. Ces pressions ne sont pas excessives, mais elles peuvent causer des bris aux conduites déjà fragiles. En somme, le changement de pression dans le secteur a potentiellement contribué à l'augmentation des bris de conduites mesurée en juin 2016. D'autres facteurs pourraient aussi avoir contribué à augmenter les bris, tels que le dysfonctionnement et la réparation de réducteur de pression effectués pendant la période de suivi post-changement de source.

5.5 Analyse des dépôts de corrosion du réseau de distribution

5.5.1 Caractéristiques connues des conduites analysées du réseau

Le Tableau 5.8 présente les caractéristiques des conduites analysées par XRD. Ces conduites ont été récupérées lors de réparations dans la zone du changement de source d'approvisionnement.

Tableau 5.8 : Caractéristiques des conduites analysées par XRD

Paramètre	Conduite de la rue Mc Vey	Conduite de la rue Red Cross
Type de conduite	Conduite de rue	Conduite de rue
Source d'eau	Usine A	Usine A
Diamètre conduite (mm)	200	200
Matériaux	Fonte grise	Fonte 250 Delavaud
Année de mise en service	Inconnue	Inconnue

5.5.2 Résultats de l'analyse par XRD

Le dernier objectif du projet est de déterminer la composition des phases cristallines des dépôts de corrosion de conduites du secteur. Les dépôts des deux conduites ont été analysés par XRD. Les résultats détaillés sont disponibles à l'annexe E.

Les dépôts de la première conduite (fonte grise, rue Mc Vey) contenaient de la goethite (FeO(OH))), de la maghémite (Fe_2O_3) et une faible quantité de lépidocrocite (FeO(OH)). Aussi, la présence d'une faible quantité de magnétite (Fe_3O_4) était suspectée, mais non confirmée (pics aux mêmes positions que maghémite).

Les dépôts de la deuxième conduite (fonte 250 Delavaud, rue Red Cross) étaient de composition très similaire avec la présence de goethite (FeO(OH) et de faibles quantités de maghémite (Fe_2O_3) et de lépidocrocite (FeO(OH)). Aussi, la présence de magnétite en faible quantité (Fe_3O_4) était suspectée (pics aux mêmes positions que maghémite). Les dépôts bruns des rues Mc Vey et Red cross ont des quantités semblables de FeO(OH) (goethite) et FeO(OH) (lépidocrocite). Cependant, la conduite de la rue Red Cross contient une quantité plus élevée de maghémite (Fe_2O_3) (ou magnétite Fe_3O_4) que la conduite de la rue Mc Vey. Les dépôts oranges des rues Mc Vey et Red cross ont des quantités semblables de FeO(OH) (goethite), FeO(OH) (lépidocrocite) et de maghémite (Fe_2O_3) (ou magnétite Fe_3O_4).

Les compositions des dépôts observées sont cohérentes avec la littérature. En effet, la surface des dépôts en contact avec l'eau a une probabilité de présence de goethite (α-FeO(OH)), tandis que la couche dure de dépôts bruns serait plus riche en magnétite (Fe_3O_4) (Sontheimer et al., 1981). Sontheimer ne mentionne pas la présence de maghémite dans ses travaux, alors que les résultats

démontrent que les dépôts ont une probabilité de présence de maghémite (Fe_2O_3) de 70 à 80%. Cependant, cette phase est mentionnée dans la structure générale des dépôts de corrosion par Sarin (Sarin et al., 2003). Aussi, la sidérite ($FeCO_3$) est un constituant des dépôts de corrosion mentionné dans la littérature, mais non observé dans cette étude (Benjamin et al., 1996). La présence de ce composé n'était pas systématiquement retrouvée dans les dépôts (Sarin, Snoeyink, Bebee, Kriven, & Clement, 2001).

Il a été démontré que les formes de dépôts peuvent se transformer rapidement lorsque les conditions locales, notamment le contact avec l'eau et l'air, sont modifiées (Sarin et al., 2001). Dans le cadre de cette étude, les dépôts analysés sont secs et en contact avec l'air ambiant depuis 2 ans. Selon les travaux de Sarin, les dépôts en contact avec l'eau devraient montrer une plus forte présence de formes Fe(II) comparativement à des dépôts secs (Sarin et al., 2001). Cette observation est importante pour la magnétite (1 Fe(II) et 2 Fe(III)) et la sidérite (Fe(II) seulement).

Par rapport aux dépôts secs analysés, les dépôts en contact avec l'eau du réseau avaient potentiellement plus de magnétite (Fe_3O_4). Il y a également une variabilité importante entre les dépôts d'une même conduite, ce qui indique que les compositions sont non uniformes et dépendent des conditions locales de la portion de conduite (Sarin et al., 2001). Dans notre cas, les dépôts des deux conduites ont les mêmes phases cristallines, mais la conduite de la rue Red Cross contient une quantité plus élevée de maghémite (Fe_2O_3) (ou magnétite Fe_3O_4) que la conduite de la rue Mc Vey. Les résultats démontrent aussi que les compositions des dépôts du réseau sont non uniformes.

L'accumulation de dépôts de corrosion est une problématique pour les gestionnaires de réseau de distribution, car cela restreint le débit et affecte la qualité de l'eau distribuée aux consommateurs. La qualité de l'eau est affectée quand les concentrations de fer total dépassent la recommandation esthétique de 300 µg/L puisque cela peut engendrer une coloration rouge et un goût métallique (United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2016). Ces considérations affectent la perception du consommateur de la qualité de son eau du robinet. Les dépôts de corrosion constituent également des habitats pour le biofilm et les microorganismes (Sarin et al., 2001). En lien avec la santé des consommateurs, les dépôts de corrosion peuvent accumuler sur plusieurs décennies des faibles concentrations de substances comme l'arsenic et le radium qui sont libérées lors de changement de qualité de l'eau (Field, Fisher, Valentine, & Kross, 1995; Raven, Jain, &

Loeppert, 1998; Sarin et al., 2001). Ainsi, considérant l’augmentation à court terme des épisodes d’eau rouge observée dans ce projet, une partie de ces dépôts a été relarguée temporairement.

En somme, l'analyse par XRD a permis d'identifier les phases cristallines de dépôts de corrosion de deux conduites du réseau. Ces caractéristiques sont importantes puisque les dépôts affectent la distribution et la qualité de l'eau potable. D'autres recherches doivent être réalisées pour comprendre le lien entre les phases, la dissolution de fer dans l'eau et la dureté du dépôt (Sarin et al., 2001). Ces recherches permettront de limiter les variations des paramètres de qualité de l'eau qui favorisent les épisodes d'eau rouge.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En conclusion, l'objectif général du projet était de déterminer les impacts à court et moyen terme du changement de source d'eau potable sur la qualité de l'eau d'un secteur ayant des épisodes récurrents d'eau rouge. Cet objectif a été atteint par le biais d'évaluation de la qualité de l'eau, d'estimation du potentiel de la corrosivité, d'analyse de dépôts de corrosion et d'un suivi en continu des paramètres de la qualité de l'eau.

La qualité de l'eau des usines A et B a été évaluée en termes de potentiel de corrosion du fer. Cette évaluation a confirmé le potentiel beaucoup plus faible de l'eau produite par l'Usine B. L'évaluation de la qualité de l'eau a aussi révélé que l'alimentation par l'usine A était caractérisée par des variations saisonnières des paramètres physico-chimiques influençant la corrosion du fer, notamment le pH, la dureté calcique et l'alcalinité.

Le suivi de la qualité a mis en évidence des variations à court terme pendant et juste après les changements d'alimentation, et des variations à plus long terme avec le rééquilibre progressif de la qualité de l'eau en fonction des nouvelles conditions hydrauliques. Le changement de source d'alimentation a affecté les valeurs de chlore résiduel libre, de conductivité, de turbidité et de pH. De plus, le changement de source a engendré 12 plaintes le jour de la manipulation des vannes et affecté le nombre de bris durant le mois de juin 2016.

La comparaison des mesures en continu et des mesures ponctuelles de confirmation a clairement démontré que le suivi ponctuel même ciblé ne permet pas de détecter les épisodes transitoires de changement de qualité d'eau. Par exemple, chaque mesure ponctuelle de turbidité n'est qu'une évaluation de la situation à un moment. Une telle mesure ne renseigne pas sur la turbidité maximale, ni le nombre d'épisodes de turbidité élevée et leur durée. Des épisodes d'eau rouge ont été documentés avant et après le changement de source par le suivi en continu de la turbidité. Le suivi ponctuel du projet et celui réalisé dans le passé par la Ville n'ont pas détecté d'épisodes d'eau rouge. Cela souligne l'incapacité du suivi ponctuel à détecter les événements transitoires, même importants. Des épisodes d'eau rouge ont été observés à court terme après le changement de source et avec l'augmentation saisonnière de la température de l'eau (été). La durée des épisodes d'eau rouge (jusqu'à 32 UTN) variait de 5 minutes à 10h25. Par la suite, le réseau s'est stabilisé en septembre avec la diminution de la température sous 20°C. Aussi, il n'y a pas eu de plaintes de citoyens en septembre comparativement aux années précédant le changement (période typiquement

sujette à des plaintes). L'échantillonnage ponctuel du fer n'a pas détecté de concentrations de fer au-delà de la recommandation esthétique de Santé Canada (exception lors de la journée de la manipulation des vannes où une mesure est de 312 µg/L). Cependant, tel qu'observé pour la turbidité, la probabilité de capturer par des échantillonnages ponctuels les événements de concentrations en fer élevées est faible.

L'application des sondes Kapta^{tm} 3000-AC4 a confirmé la grande utilité des mesures de sondes en continu pour la capture des évènements de changement de qualité (conductivité, chlore actif et température). Les sondes ont permis de confirmer les changements de source, préciser les périodes d'instabilité avant l'atteinte des nouvelles conditions d'équilibre et confirmer les variations normales de qualité en exploitation régulière. La comparaison avec des mesures ponctuelles a révélé certaines sources d'erreur qui seront certainement diminuées avec les nouvelles générations de capteurs (faiblesse pour la conversion du chlore actif en chlore libre résiduel). La mesure de pression de la Kapta^{tm} aurait été grandement utile pour bonifier les analyses des événements transitoires, tel que démontré dans les déploiements en Europe. Malheureusement, l'intégration des mesures de pression n'a pas été possible, car les sondes ont été installées en dérivation de l'entrée de service de bâtiments. L'installation en insertion dans les conduites du réseau public est hautement souhaitable, car elle évite de mesurer des valeurs associées à des problèmes de détérioration de la qualité de l'eau dans les entrées de service et les réseaux internes, tel que démontré dans la première partie des travaux. Or, les problèmes locaux de corrosion des matériaux dans les entrées de service et la plomberie des bâtiments ne relèvent pas des municipalités.

L'implantation de la technologie européenne au Québec représente une innovation, mais soulève des défis considérant les infrastructures des réseaux au Québec. Pour installer les sondes en insertion selon les recommandations du fabricant, il faut disposer de sites adéquats au niveau de l'accès et de l'encombrement. Le nombre de sites potentiels dans le réseau étudié était très faible, ce qui implique que des travaux d'ajouts de chambre de vannes sur le réseau secondaire seraient nécessaires. De plus, l'accès à un réseau cellulaire de fiabilité suffisante et de niveau de service adéquat peut être un réel défi. Il serait important que les responsables de l'eau collaborent avec les responsables du développement des réseaux de capteurs envisagé à la Ville de Montréal pour que cette limitation soit solutionnée.

Il y a eu certains dysfonctionnements des cinq sondes, soit un bris à l'Hôtel de Ville (perte d'un capteur de chlore actif et perte de la conductivité) et une dysfonction d'un capteur de conductivité à l'école. Ces dysfonctions ont causé une perte de données pendant le suivi de la période critique à certains sites. La cause de ces dysfonctions n'est pas connue, mais leur présence suggère qu'une validation avant déploiement serait souhaitable à moins d'une garantie et une vérification par le fabricant soient disponibles. Pour un suivi de 5 mois, une sonde sur cinq a subi un bris majeur. À noter, les sondes n'ont pas été testées en conditions d'hiver québécois (température de l'eau < 4°C).

Le déploiement à grande échelle d'appareils de suivi en continu en réseau nécessite l'accès à des sondes multiparamètres fiables, peu coûteuses et qui mesurent tous les paramètres de qualité permettant d'atteindre les objectifs de surveillance. Dans le cas de surveillance d'évènements usuels sur le réseau pouvant mener à des pertes de qualité d'eau, comme des épisodes d'eau rouge, il serait hautement utile d'intégrer les mesures en continu de pH et de turbidité. La sonde Kapta^{tm} 3000-AC4 ne mesure ni le pH, nécessaire à l'estimation du chlore libre résiduel, ni la turbidité, servant d'indicateurs d'intrusion, de remise en suspension de dépôts meubles ou de corrosion.

Recommandations du projet

Les comparaisons entre le suivi en continu et le suivi ponctuel démontrent que l'heure de l'échantillonnage est critique pour déterminer les changements de qualité de l'eau transitoires (Cl_2 résiduel libre et turbidité). Seul le suivi en continu permet d'obtenir le niveau représentatif de turbidité du lieu d'échantillonnage et les mesures ponctuelles apparaissent peu utiles pour évaluer la qualité de l'eau suite à des plaintes. Le suivi en continu de la turbidité s'est avéré particulièrement utile pour caractériser les épisodes d'eau rouge. Le suivi de l'exploitant de réseau pourrait être amélioré en intégrant des mesures en continu de turbidité représentatives de la qualité de l'eau en réseau. Il faudrait installer l'appareil de suivi en continu dans un bâtiment (poste de pompage, chambre de vannes ou bâtiment public) qui est représentatif de la qualité de l'eau du réseau. Le Tableau 6.1 présente une proposition pour le suivi de la turbidité de l'eau en réseau réalisé par l'exploitant de réseau.

Tableau 6.1 : Proposition pour le suivi de la turbidité en réseau

Paramètre	**RQEP (Suivi ponctuel)**	**Proposition pour l'exploitant de réseau (suivi en continu)**	**Remarque**
Turbidité	≥ 12 mesures ponctuelles par an (Gouvernement du Québec, 2011)	90e centile ≤ 5 UTN Médiane ≤ 1 UTN	Pour tenir compte de l'effet possible des travaux/bris sur la turbidité

Dans le cadre de ce projet, la mesure de la turbidité s'est avérée très informative pour détecter les événements transitoires de qualité d'eau. En lien avec les mesures de turbidité (0 à 32 UTN) qui divergent (ponctuel versus suivi en continu), il faudrait réaliser des essais de variation de turbidité sur 10 minutes avec des mesures ponctuelles chaque minute pour déterminer si le turbidimètre en ligne est précis lors de variations rapides de turbidité. L'augmentation de la turbidité peut servir d'indicateur de contamination pour les principaux contaminants possibles en réseau (eaux usées, aldicarbe, malathion, nicotine et trioxyde d'arsenic) (Hall et al., 2007). Pour un suivi simple de la qualité de l'eau en réseau, on pourrait envisager d'installer des turbidimètres dans des bâtiments représentatifs de la qualité de l'eau du réseau ou des chambres spécialement aménagées. De nouvelles technologies de 2016-2017, comme la sonde Kapta^{tm} 3000-OT3 (matière organique, turbidité et température) de Veolia Water et les turbidimètres laser en ligne TU5300 sc et TU5400 sc de Hach, pourraient être considérées pour mesurer la turbidité en réseau avec plus de précision (critère de débit de 100 à 1000 mL/min pour les turbidimètres Hach de la gamme 5000).

Considérant les limites du projet, une étude des sondes Kapta^{tm} 3000-AC4 en insertion dans des chambres de vannes (ou de mesures) ayant déjà des appareils de télémétrie (minimalement des mesures de pH et de turbidité) est recommandée pour mieux évaluer les avantages de ces sondes. L'installation d'un débitmètre magnétique sur la conduite est aussi recommandée pour mieux interpréter les mesures à faible débit. Finalement, l'évaluation des sondes Kapta^{tm} en insertion pendant une année complète est recommandée pour évaluer leur robustesse face aux températures froides de l'hiver (ce qui n'a pas été fait dans le projet).

Ce projet a permis d'obtenir une quantité importante d'informations sur les paramètres clés de la qualité de l'eau potable d'un réseau de distribution soumis à un changement de source. L'effet du changement de source sur la qualité de l'eau dans les culs-de-sac existants et les nouveaux culs-

de-sac du réseau n'a pas été évalué considérant les limites des sondes Kapta^{tm} (vitesse minimale de 0,03 m/s). Finalement, le suivi en continu des paramètres qualité pourrait être jumelé au suivi en continu des pressions (haute résolution temporelle). Cela permettrait d'identifier les causes et les effets des phénomènes pouvant affecter la qualité de l'eau du réseau (travaux d'aqueduc, pression négative, bris, intrusion et long temps de séjour). Le déploiement à grande échelle des sondes Kapta^{tm} en réseau est difficile à envisager pour l'instant dans la municipalité en raison du nombre restreint de sites aptes à une installation conforme aux recommandations du fabricant. Cependant, il pourrait être envisagé en parallèle à la réhabilitation du réseau. Ultimement, cela permettra de réduire les plaintes et d'améliorer la protection du public.

BIBLIOGRAPHIE

Aisopou, A., Stoianov, I., & Graham, N. J. (2012). In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: a quantitative assessment. *Water Research, 46*(1), 235-246. doi:10.1016/j.watres.2011.10.058

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (vol. 5). Washington, D.C.: American Public Health Association.

Amy, G. L., Chadik, P. A., & Chowdhury, Z. K. (1987). Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics. *Journal of the American Water Works Association, 79*(7), 89-97.

Banna, M. H., Imran, S., Francisque, A., Najjaran, H., Sadiq, R., Rodriguez, M., & Hoorfar, M. (2013). Online drinking water quality monitoring: Review on available and emerging technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44*(12), 1370-1421. doi:10.1080/10643389.2013.781936

Barbeau, B., Gauthier, V., Julienne, K., & Carrière, A. (2005). Dead-end flushing of a distribution system: short and long-term effects on water quality. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 54*(6), 371-383.

Benjamin, M. M., Sontheimer, H., & Leroy, P. (1996). Corrosion of iron and steel (Chapter 2). Dans *Internal corrosion of water distribution systems* (p. 29-70). Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation and DVGW-Technologiezentrum Wasser.

Beriet, C., De Coulon, Y., & Lemoine, C. (2013). *Device for measuring the free chloride content of a water*. Google Patents.

Berry, D., Xi, C., & Raskin, L. (2006). Microbial ecology of drinking water distribution systems. *Current Opinion in Biotechnology, 17*(3), 297-302.

Besner, M.-C. (2013). *Validation des sondes multiparamétriques Intellisondes TM pour la mesure de la qualité de l'eau en continu dans le réseau de distribution de la ville de Montréal*. Montréal, QC, Canada: Chaire industrielle CRSNG en traitement et distribution des eaux potables (CICEP), Polytechnique Montréal.

Carter, J. T., Lee, Y., Buchberger, S. G., Rossman, L. A., & Rice, E. W. (1997, November 9-12). *Correlations between travel time and water quality in a deadend loop.* Communication présentée à American Water Works Association-Water Quality Technology Conference Denver, Colorado, É.-U. (p. 17).

Chapman, D. V. (1996). *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring* (Second edition^{e} éd.). Great Britain: E & FN Spon London.

Clement, J., Hayes, M., Sarin, J., Kriven, W. M., Bebee, J., Jim, K., . . . Pierson, G. (2002). *Development of red water control strategies* (Rapport n° 90883). Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation.

Craun, G. F., Brunkard, J. M., Yoder, J. S., Roberts, V. A., Carpenter, J., Wade, T., . . . Roy, S. L. (2010). Causes of outbreaks associated with drinking water in the United States from 1971 to 2006. *Clinical Microbiology Reviews, 23*(3), 507-528.

Craun, G. F., & Calderon, R. L. (2001). Waterborne disease outbreaks caused by distribution system deficiencies. *Journal of the American Water Works Association, 93*(9), 64-75.

Desjardins, R., Jutras, L., & Prévost, M. (1997). Évolution de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution de la ville de Montréal. *Revue des Sciences de l'Eau, 10*(2), 167-184.

Dias, V. C. (2016). *Impact of district meted areas implementation on water quality in a full-scale drinking water distribution system.* (Ph.D., Polytechnique Montréal, Montreal, QC, Canada).

Domínguez-Tello, A., Arias-Borrego, A., García-Barrera, T., & Gómez-Ariza, J. L. (2015). Seasonal and spatial evolution of trihalomethanes in a drinking water distribution system according to the treatment process. *Environmental Monitoring and Assessment, 187*(11), 1-19. doi:10.1007/s10661-015-4885-8

Edwards, M., Schock, M. R., & Meyer, T. E. (1996). Alkalinity, pH, and copper corrosion by-product release. *Journal of the American Water Works Association, 88*(3), 81-94.

Ercumen, A., Gruber, J. S., & Colford, J. M. (2014). Water distribution system deficiencies and gastrointestinal illness: A systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect, 122*(7), 651-660. doi:10.1289/ehp.1306912

Field, R. W., Fisher, E. L., Valentine, R. L., & Kross, B. C. (1995). Radium-bearing pipe scale deposits: implications for national waterborne radon sampling methods. *American Journal of Public Health, 85*(4), 567-570.

Geldreich, E. E. (1996). *Microbial quality of water supply in distribution systems*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Lewis Publishers.

Gouvernement du Québec. (2011). *Règlement sur la qualité de l'eau potable. Loi sur la qualité de l'environnement*. Québec, Canada: Éditeur officiel du Québec 2011

Hall, J., Zaffiro, A. D., Marx, R. B., Kefauver, P. C., K.E., R., Haught, R. C., & Herrmann, J. G. (2007). On-line water quality parameters as indicators of distribution system contamination. *Journal of the American Water Works Association, 99*(1), 66-77.

Hanna-Attisha, M., LaChance, J., Sadler, R. C., & Champney Schnepp, A. (2016). Elevated blood lead levels in children associated with the flint drinking water crisis: A spatial analysis of risk and public health response. *American Journal of Public Health, 106*(2), 283-290. doi:10.2105/AJPH.2015.303003

Health Canada. (2004). *Guidelines for Canadian drinking water quality: supporting documentation. Protozoa: Giardia and Cryptosporidium*. Ottawa, Ontario, Canada: Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water of the Federal-Provincial-Territorial Committee on Health and the Environment.

Health Canada. (2006). *Guidelines for Canadian drinking water quality: guidelines technical document: trihalomethanes*. Ottawa, Ontario, Canada: Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water of the Federal-Procincial-Territorial Committee on Health and the Environment.

Health Canada. (2014). *Guidelines for Canadian drinking water quality: Summary table*. Ottawa, ON, Canada: Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water of the Federal-Provincial-Territorial Committee on Health and the Environment.

Horsley, M. B., Northup, B. W., O'Brien, W. J., & Harms, L. L. (1998, November 1-4, 1998). *Minimizing iron corrosion in lime softened water*. Communication présentée à American Water Works Association-Water Quality Technology Conference San Diego, California, É.-U. (p. 9).

Husband, P. S., & Boxall, J. B. (2011). Asset deterioration and discolouration in water distribution systems. *Water Research, 45*(1), 113-124.

Husband, S., & Boxall, J. B. (2010). Field studies of discoloration in water distribution systems: model verification and practical implications. *Journal of Environmental Engineering, 136*(1), 86-94.

Imran, S. A., Dietz, J. D., Mutoti, G., Taylor, J. S., Randall, A. A., & Cooper, C. D. (2005). Red water release in drinking water distribution systems. *Journal of American Water Works Association, 97*(9), 93-100.

Kleiner, Y., & Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban Water, 3*(3), 131-150.

Larson, T. E., & Skold, R. V. (1958). Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron. *Corrosion, 14*(6), 43-46.

Laurent, P., Besner, M.-C., Servais, P., Gauthier, V., Prévost, M., & Camper, A. (2005). Water quality in drinking water distribution systems (Chapter 5). Dans M. PrévostP. LaurentP. Servais & J. C. Joret (édit.), *Biodegradable organic matter in drinking water treatment and distribution* (1e éd., p. 205-284). Denver, Colorado, USA: American Water Works Association.

Lee, A., Francisque, A., Najjaran, H., Rodriguez, M. J., Hoorfar, M., Imran, S. A., & Sadiq, R. (2012). Online monitoring of drinking water quality in a distribution network: A selection procedure for suitable water quality parameters and sensor devices. *International Journal of System Assurance Engineering and Management, 3*(4), 323-337. doi:10.1007/s13198-012-0133-6

Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health, 3*(2), 109-127.

Li, D., Li, Z., Yu, J., Cao, N., Liu, R., & Yang, M. (2010). Characterization of bacterial community structure in a drinking water distribution system during an occurrence of red water. *Applied and Environmental Microbiology, 76*(21), 7171-7180. doi:10.1128/AEM.00832-10

Machell, J., & Boxall, J. (2014). Modeling and field work to investigate the relationship between age and quality of tap water. *Journal of Water Resources Planning and Management, 140*(9), 04014020. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000383

MacQuarrie, D. M., Mavinic, D. S., & Neden, D. G. (1997). Greater Vancouver water district drinking water corrosion inhibitor testing. *Canadian Journal of Civil Engineering, 24*(1), 34-52.

McDougle, T., Monsorez, A., Maurel, A., & Lemoine, C. (2012). *Smart Sensor network case study for drinking water quality monitoring*.

McNeill, L. S., & Edwards, M. (2001). Iron pipe corrosion in distribution systems. *Journal of American Water Works Association, 93*(7), 88-100.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2016). *Guide de bonnes pratiques d'exploitation des installations de distribution d'eau chaude*. Ville de Québec, QC, Canada: Gouvernement du Québec.

Morris, J. C. (1966). The acid ionization constant of HOCl from 5 to 35°. *The Journal of Physical Chemistry, 70*(12), 3798-3805. doi:10.1021/j100884a007

Prévost, M., Laurent, P., Servais, P., & Joret, J.-C. (2005). *Biodegradable organic matter in drinking water treatment and distribution (First Edition)*. Denver, Colorado, USA: American Water Works Association.

Prévost, M., Rompré, A., Baribeau, H., Coallier, J., & Lafrance, P. (1997). Service lines: their effect on microbiological quality. *Journal of the American Water Works Association, 89*(7), 78-91.

Raven, K. P., Jain, A., & Loeppert, R. H. (1998). Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: Kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. *Environmental Science & Technology, 32*(3), 344-349. doi:10.1021/es970421p

Rompré, A., Prévost, M., Coallier, J., Brisebois, P., & Lavoie, J. (2000). Impacts of implementing a corrosion control strategy on biofilm growth. *Water Science and Technology, 41*(4-5), 287-294.

Santé Canada. (2009). *Document de conseils sur le contrôle de la corrosion dans les réseaux de distribution d'eau potable* (Rapport n° 091131). Ottawa, Ontario, Canada: Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable.

Santé Canada. (2016). *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Document technique. Le pH*. Ottawa, ON, Canada: Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement.

Sarin, P., Clement, J. A., Snoeyink, V. L., & Kriven, W. M. (2003). Iron release from corroded, unlined cast-iron pipe. *Journal of the American Water Works Association, 95*(11), 85-96.

Sarin, P., Snoeyink, V. L., Bebee, J., Kriven, W. M., & Clement, J. A. (2001). Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes. *Water Research, 35*(12), 2961-2969.

Sarin, P., Snoeyink, V. L., Lytle, D. A., & Kriven, W. M. (2004). Iron corrosion scales: Model for scale growth, iron release, and colored water formation. *Journal of Environmental Engineering, 130*(4), 364-373. doi:10.1061/(Asce)0733-9372(2004)130:4(364)

Schock, M. R. (1990). Internal corrosion and deposition control (Chapter 17). Dans *Water quality and treatment. A handbook of community water supplies* (p. 17.11-17.109). New York, NY, USA: American Water Works Association and McGraw-Hill, Inc.

Schuster, C. J., Ellis, A. G., Robertson, W. J., Charron, D. F., Aramini, J. J., Marshall, B. J., & Medeiros, D. T. (2005). Infectious disease outbreaks related to drinking water in Canada, 1974-2001. *Canadian Journal of Public Health, 96*(4), 254-258.

Simard, A., Pelletier, G., & Rodriguez, M. (2011). Water residence time in a distribution system and its impact on disinfectant residuals and trihalomethanes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 60*(6), 375-390.

Slaats, P., Rosenthal, L., Siegers, W., van den Boomen, M., Bueken, R., & Vreeburg, J. (2003). *Processes involved in the generation of discolored water* (Rapport nº 90966F). Denver, Colorado, USA: American Water Works Research Foundation and Kiwa Water Research.

Smith, S. E., Ta, T., Holt, D. M., Delanoue, A., & Colbourne, J. S. (1998, November 1-4, 1998). *Minimising red water in drinking water distribution systems.* Communication présentée à American Water Works Association-Water Quality Technology Conference, San Diego, California, É.-U. (p. 13).

Smith, S. E., Ta, T., Holt, D. M., Delanoue, A., Colbourne, J. S., Chamberlain, A. H. L., & Lloyd, B. J. (1999). A pipeline testing facility for the examination of pipe-wall deposits and red-water events in drinking water. *Water and Environment Journal, 13*(1), 7-15.

Sontheimer, H., Kolle, W., & Snoeyink, V. L. (1981). The siderite model of the formation of corrosion-resistant scales. *Journal of the American Water Works Association, 73*(11), 572-579.

Stevens, A. A., Slocum, C. J., Seeger, D. R., & Robeck, G. G. (1976). Chlorination of organics in drinking water. *Journal of the American Water Works Association, 68*(11), 615-620.

Storey, M. V., van der Gaag, B., & Burns, B. P. (2011). Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research, 45*(2), 741-747. doi:10.1016/j.watres.2010.08.049

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2002). *Effects of water age on distribution system water quality*. Pensylvania, WA, USA:

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2016). Secondary drinking water standards: Guidance for nuisance chemicals.

Veolia Water Solutions & Technologies. (2013). Kapta 3000-AC4. Sonde multi-paramètres en ligne: chlore, conductivité, pression, température (p. 2). Kingston, ON, Canada.

Veolia Water Solutions & Technologies. (2014). Un système de surveillance unique pour assurer la qualité de l′eau lors de grands événements.

Volk, C., Dundore, E., Schiermann, J., & LeChevallier, M. (2000). Practical evaluation of iron corrosion control in a drinking water distribution system. *Water Research, 34*(6), 1967-1974.

Vreeburg, J., & van den Boomen, M. (2002). New concepts for self-cleaning networks and improved water quality. *Water 21, 4*(6), 43-44.

Vreeburg, J. H. G., & Boxall, J. B. (2007). Discolouration in potable water distribution systems: a review. *Water Research, 41*(3), 519-529.

Yang, J. Y., Haught, R. C., & Goodrich, J. A. (2009). Real-time contaminant detection and classification in a drinking water pipe using conventional water quality sensors: Techniques and experimental results. *Journal of Environmental Management, 90*(8), 2494-2506. doi:10.1016/j.jenvman.2009.01.021

Zhang, X., Mi, Z., Wang, Y., Liu, S., Niu, Z., Lu, P., . . . Chen, C. (2014). A red water occurrence in drinking water distribution systems caused by changes in water source in Beijing, China: mechanism analysis and control measures. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *8*(3), 417-426. doi:10.1007/s11783-013-0558-4

ANNEXE A : FICHE DE LA SONDE KAPTA 3000-AC4

KAPTA 3000-AC4

ENDETEC

SONDE MULTI-PARAMETRES EN LIGNE

Chlore, Conductivité, Pression, Température

Applications : Sécurité de l'eau potable

- Contrôle en temps réel et en ligne des paramètres clefs de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution
- Détection après analyse de tout changement de la qualité de l'eau tel que les fuites, la corrosion des tuyaux et les effets d'encrassement biologique
- Optimisation du processus de désinfection

Avantages

- Contrôle en temps réel du réseau d'eau
- Identification en ligne des contaminants de l'eau
- Contrôle efficace de la distribution d'eau

Caractéristiques principales

- Mesure des principales espèces de désinfection
- Aucune interférence avec les Chloramines
- Fonctionnement sans produits chimiques
- Entretien et calibrage annuel
- Installation facile sur le terrain avec insertion directe dans la canalisation en charge en utilisant un collier et une vanne standard
- Fonctionnement sur batterie
- Transmission en temps réel des données de télémétrie à un serveur central

Description générale

La sonde KAPTA™ 3000-AC4, véritable atout pour l'instrumentation de l'eau, a été spécialement développée comme outil pour une meilleure gestion et un meilleur contrôle de la distribution de l'eau potable. La sonde mesure des paramètres clefs de la qualité de l'eau grâce à des technologies innovantes pour la détection du chlore, de la conductivité, de la pression et de la température. Un capteur ampérométrique à trois électrodes est utilisé pour mesurer le chlore actif (HOCl), le capteur de pression est basé sur une puce piézorésistive en silicium et la conductivité est déterminée à l'aide d'une cellule à quatre électrodes. Ces capteurs intégrés nécessitent peu de maintenance et de recalibration et permettent le contrôle en ligne des réseaux de distribution de l'eau potable.

La sonde KAPTA™ 3000-AC4 mesure en continu et stocke les 24 dernières données selon le mode d'acquisition choisi. Un boitier de communication (IP68) interroge la sonde et transfert les données vers un serveur central. L'ensemble des données relevées par la sonde sont alors organisées et directement exploitables dans une interface de visualisation, conviviale pour l'opérateur.

Le design de la sonde KAPTA™ 3000-AC4, son utilisation et son mode de communication ont été pensés de manière à faciliter sa mise en place et son application sur site. Cette solution innovante, moderne et fiable offre une expertise de contrôle en temps réel de la qualité de l'eau distribuée.

Les sondes nouvelle génération KAPTA™ sont les réponses proposées par ENDETEC™ de détection en ligne de contamination de l'eau.
Avec une gamme complète de sondes ampérométriques, la série KAPTA™ offre des solutions uniques de détection environnementale pour la gestion de distribution de l'eau potable.

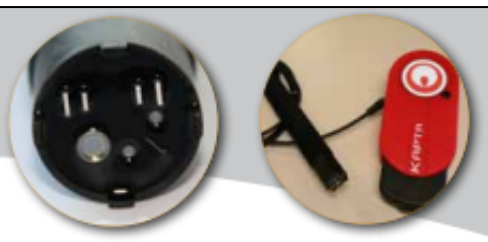
LE CONTROLE DE LA QUALITE DE L'EAU REPENSÉ !

VEOLIA WATER
Solutions & Technologies

KAPTA 3000-AC4

SONDE MULTI-PARAMETRES EN LIGNE

Chlore, Conductivité, Pression, Température



Spécifications de la sonde

Spécifications générales	• Détection du chlore actif (HOCl) • Mesure de la conductivité, de la pression et de la température • Sonde multi-paramètres sans réactifs chimiques • Mesure du chlore actif réel, en ligne et sur site • Sonde compacte et à basse puissance		
Plage d'utilisation	**1. Chlore HOCl (2X)** • HOCl : 0,01 mg/l – 2,0 mg/l • Précision de la mesure : ± 0,03 ppm ; ± 5 % • Résolution en sortie de sonde : 0,01 ppm • Résolution en sortie de communication : 0,01 ppm • Temps de réponse: < 30 s **2. Conductivité** • Plage : 50 – 1000 µScm-1 • Précision de la mesure : ±5 µScm-1 ; ± 5 % • Résolution en sortie de sonde : 1 µScm-1 • Résolution en sortie de communication : 5 µScm-1 **3. Pression** • Plage: 0 – 10 bar (145 psi) • Précision de la mesure à 25°C: ± 50 mbar • Précision de la mesure entre 0-40°C : ± 100 mbar • Résolution en sortie de sonde: 2 mbar • Résolution en sortie de communication : 50 mbar **4. Température** • Plage: 0 – 40°C • Précision de la mesure: ± 1,2°C • Résolution en sortie de sonde : 0,2°C • Résolution en sortie de communication : 0,3°C	Plage de pH	• 5 – 9 • Un pH inférieur à 5 peut endommager la tête du capteur de façon irréversible
		Plage de température d'utilisation	0 – 40 °C
		Pression	0-10 bar, Surpression : 30 bars (435 psi)
		Durée d'utilisation	>1 an
		Débit	Minimal 0,03 m/s Maximal 1,5 m/s (Testé sur 1 an)
		Collecte des données	**1. Mode d'acquisition des données** *Envoi des données par RS232 via le protocole MODBUS™* NORMAL: 1 mesure pondérée/heure TURBO: 1 mesure pondérée toutes les 5 minutes **2. Stockage des données** 24 dernières mesures avec valeur max., moyenne et min. envoyées dans un seul SMS et la dernière mesure **3. Transmission des données GSM** Requête à la sonde: 1 fois les 24 données NORMAL : Ex : 1 fois toutes les 24 heures* TURBO : Ex :1 fois toutes les 2 heures* *(ou toutes les 15 min à 24 heures par pas de 15 min) **4. Transmission des données Radio** Requête à la sonde: 6 fois la dernière mesure Transmission de 12 données (6 lues depuis la sonde toutes les t/6 plus les 6 dernières données lues) TURBO : Ex : 1 fois tous les t=30min** **(ou toutes les t=30 min à t=6 hrs par pas de 30 min)
Alimentation électrique	3,2 -5 V DC ; Alimentation par batterie, Pack batterie de remplacement disponible		
Longueur du câble de la sonde	3 m (spécificités peuvent être satisfaites à la demande)		
Poids de la sonde	410 g		
Dimensions de la sonde	• La sonde a été conçue pour s'adapter directement dans une canalisation de diamètre externe D > 60 mm ou 2" avec un raccord taraudé • Diamètre maximum de la canalisation : DN 300 pour tube en acier ou DN 250 pour tube en PVC/PEHD • Longueur de la sonde KAPTA™ : 300 mm • Diamètre du capteur de la sonde KAPTA™ 35 mm et Filetage 1"1/8 Gaz, BSP cylindrique		
Dimensions du module de communication GSM	L= 110 x H= 240 x D=54 mm	Dimensions du module de communication Radio 868 MHz	L= 80 x H= 160 x D=70 mm

Informations de commande
KAPTA™ 3000-AC4
SONDE MULTI-PARAMETRES EN LIGNE DE L'EAU
Chlore, Conductivité, Pression, Température

ENDETEC est une marque du groupe Veolia Water Solutions & Technologies
Pathogen Detection System, Inc.
Suite 4697, Biosciences Complex, 116 Barrie Street
Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6
Tél: (+1) 613 533 3321 - Fax: (+1) 613 533 3317

NEROXIS SA
Rue Jaquet-Droz 7, CP 216,
CH-2002 Neuchâtel 2, Suisse
Tél: (+41) 32 720 51 51 - Fax: (+41) 32 720 57 12

www.endetec.com or courriel info@endetec.com

VEOLIA WATER
Solutions & Technologies

La description de ce capteur a été soigneusement contrôlée et elle est considérée précise et fiable. Cependant, NEROXIS SA se réserve le droit de réaliser des changements sans préavis sur un produit et sur les spécifications des présentes. NEROXIS SA n'octroie aucune licence ni de qui concerne ses droits de brevet ou les droits de tiers et n'assume aucune responsabilité concernant l'utilisation de licences dans le cadre de brevets de tiers. En outre, NEROXIS SA ne donne aucune garantie concernant le caractère approprié de ce produit à une fin quelconque, et NEROXIS SA n'assume aucune responsabilité découlant de l'application ou de l'utilisation de ce produit et circuit, et rejette en particulier toute responsabilité, notamment sans limitation tout dommage indirect ou consécutif. Tous les paramètres d'utilisation, y compris les paramètres "typiques", doivent être validés pour chaque application du client par les experts techniques du client. © Veolia Water Solutions & Technologies Support / Tous droits réservés. ET-FP-010-02 KAPTA™ 3000-AC4 Fiche technique (v.0).

ANNEXE B : DÉTAILS DES ÉPISODES D'EAU ROUGE AUX POINTS SUBISSANT LE CHANGEMENT DE SOURCE

Tableau B.1 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge à l'Hôtel de Ville

Date de début de l'épisode (jj-m-aa hh:mm)	Source d'eau potable	Durée	Valeur du pic max (UTN)	Moyenne (UTN)	Écart-type (UTN)
1-6-16 9:05	Usine A (Fleuve)	0 h 05	14	14	N/A
7-6-16 9:20	Usine A (Fleuve)	0 h 15	6	5	0,2
15-6-16 8:05	Usine B (Fleuve)	7 h 45	9	7	1
22-6-16 8:10	Usine B (Fleuve)	0 h 05	5	5	N/A
13-7-16 12:10	Usine B (Fleuve)	4 h 15	22	11	4
26-7-16 9:40	Usine B (Fleuve)	5 h 00	23	10	5
27-7-16 8:50	Usine B (Fleuve)	6 h 35	32	14	9
28-7-16 0:50	Usine B (Fleuve)	8 h 00	7	6	0,4
1-8-16 10:10	Usine B (Fleuve)	0 h 20	10	9	2
4-8-16 1:35	Usine B (Fleuve)	3 h 10	5	5	0,1
12-8-16 1:50	Usine B (Fleuve)	1 h 20	6	5	0,2
14-8-16 4:25	Usine B (Fleuve)	0 h 30	5	5	0,0
16-8-16 1:15	Usine B (Fleuve)	0 h 45	6	6	0,3
17-8-16 1:00	Usine B (Fleuve)	4 h 05	6	5	0,3
25-8-16 0:10	Usine B (Fleuve)	10 h 25	6	5	0,3
1-9-16 14:35	Usine B (Fleuve)	6 h 20	16	9	3,6
27-9-16 11:40	Usine B (Fleuve)	0 h 50	19	12	3,1

Tableau B.2 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge à l'école

Date de début de l'épisode (jj-m-aa hh:mm)	Source d'eau potable	Durée	Valeur du pic max (UTN)	Moyenne (UTN)	Écart-type (UTN)
13-6-16 7:55	Usine B (Fleuve)	0 h 05	6	6	N/A
12-7-16 15:55	Usine B (Fleuve)	0 h 05	6	6	N/A
13-7-16 5:00 – école fermée	**Usine B (Fleuve)**	**9 h 15**	**11**	**9**	**2**
25-7-16 8:35 – école fermée	**Usine B (Fleuve)**	**5 h 55**	**18**	**8**	**3**
4-8-16 14:20	Usine B (Fleuve)	0 h 05	6	6	N/A
10-8-16 7:40	Usine B (Fleuve)	0 h 05	7	7	N/A
15-8-16 9:10	Usine B (Fleuve)	0 h 05	8	8	N/A
25-8-16 15:25	Usine B (Fleuve)	0 h 05	11	1	1
1-9-16 15:05	Usine B (Fleuve)	0 h 40	12	8	2
27-9-16 11:50	Usine B (Fleuve)	0 h 05	18	18	N/A

Tableau B.3 : Détails de tous les épisodes d'eau rouge au Parc

Date de début de l'épisode (jj-m-aa hh:mm)	**Source d'eau potable**	**Durée**	**Valeur du pic max (UTN)**	**Moyenne (UTN)**	**Écart-type (UTN)**
14-3-16 11:05	Usine A (Outaouais)	0 h 10	7	7	1
9-5-16 16:50	Usine A (Outaouais)	0 h 40	7	6	1
17-5-16 11:15	Usine A (Outaouais)	0 h 05	8	8	N/A
18-5-16 15:55	Usine A (Outaouais)	0 h 15	7	7	0,4
26-5-16 14:55	Usine A (Fleuve)	0 h 05	7	7	0,4
1-6-16 15:20	Usine A (Fleuve)	4 h 55	26	9	5
2-6-16 8:45	Usine A (Fleuve)	2 h 55	18	11	4
7-6-16 8:30	Usine A (Fleuve)	5 h 25	10	10	2
10-6-16 10:50	Usine B (Fleuve)	1 h 10	8	8	1
20-7-16 7:25	Usine B (Fleuve)	1 h 10	29	29	7
21-9-16 9:25	Usine B (Fleuve)	0 h 05	5	5	N/A

ANNEXE C : MESURES DU SUIVI PONCTUEL LORS DU CHANGEMENT COMPLET D'ALIMENTATION

Tableau C.1 : Date et heure des échantillonnages ponctuels

Date et heure de la mesure				
1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
	2016-02-24 08:30	2016-02-24 10:50		
	2016-03-09 13:30	2016-03-09 15:30		2016-03-09 10:30
2016-03-10 15:35				
2016-03-16 11:15	2016-03-16 10:26	2016-03-16 13:47	2016-03-16 09:30	2016-03-16 10:39
2016-03-23 07:55	2016-03-23 08:20	2016-03-23 11:00	2016-03-23 09:15	2016-03-23 10:10
2016-03-30 08:10	2016-03-30 08:45	2016-03-30 11:10	2016-03-30 09:30	2016-03-30 10:20
2016-04-05 08:00	2016-04-05 08:30	2016-04-05 10:50	2016-04-05 09:15	2016-04-05 09:45
2016-04-12 07:55	2016-04-12 08:30	2016-04-12 10:30		2016-04-12 09:30
2016-04-19 08:00	2016-04-19 08:30	2016-04-19 10:45	2016-04-19 09:20	2016-04-19 10:00
2016-04-27 08:05	2016-04-27 08:40	2016-04-27 10:35	2016-04-27 09:10	2016-04-27 09:55
2016-05-03 08:10	2016-05-03 08:45	2016-05-03 11:10	2016-05-03 09:15	2016-05-03 09:45
2016-05-10 08:00	2016-05-10 08:30	2016-05-10 10:20	2016-05-10 09:00	2016-05-10 09:30
2016-05-17 08:00	2016-05-17 08:30	2016-05-17 10:45	2016-05-17 09:20	2016-05-17 10:00
2016-05-24 07:50	2016-05-24 08:25	2016-05-24 10:40	2016-05-24 09:15	2016-05-24 09:55
2016-06-01 07:45	2016-06-01 08:30	2016-06-01 10:45	2016-06-01 09:30	2016-06-01 10:00
2016-06-06 13:00	2016-06-06 13:30	2016-06-06 15:00	2016-06-06 14:00	2016-06-06 14:30
2016-06-07 11:43	2016-06-07 12:24	2016-06-07 10:22	2016-06-07 11:12	2016-06-07 10:44
	2016-06-08 07:53	2016-06-08 09:03	2016-06-08 08:11	2016-06-08 08:34
	2016-06-09 09:05	2016-06-09 10:19	2016-06-09 09:23	2016-06-09 09:47
	2016-06-09 09:00	2016-06-09 10:20	2016-06-09 09:20	2016-06-09 09:45
	2016-06-28 08:15	2016-06-28 11:15	2016-06-28 10:00	2016-06-28 10:40
	2016-07-05 08:50	2016-07-05 10:20	2016-07-05 09:20	2016-07-05 09:45
	2016-07-12 08:30	2016-07-12 10:40	2016-07-12 09:15	2016-07-12 09:50
	2016-07-19 10:00	2016-07-19 08:55		2016-07-19 08:15
	2016-08-17 09:15			2016-08-17 10:00
		2016-08-24 10:20	2016-08-24 08:50	2016-08-24 09:20
	2016-08-31 09:30	2016-08-31 11:45	2016-08-31 10:30	2016-08-31 11:00
	2016-09-07 10:35	2016-09-07 08:10	2016-09-07 09:25	2016-09-07 08:50
	2016-09-29 12:00			

Tableau C.2 : Concentration chlore libre en fonction du point de suivi et de la date

Date	**Chlore libre selon le point de suivi (mg Cl_2/L)**				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		0,59	0,97		
09-03-16		0,80	0,82		0,79
10-03-16	1,13				
16-03-16	1,01	0,75	0,44	0,94	0,90
23-03-16	0,99	0,92	0,55	0,70	0,85
30-03-16	0,98	0,80	0,67	0,68	0,79
05-04-16	1,00	0,84	0,64	0,55	0,81
12-04-16	1,31	1,10	0,36		1,08
19-04-16	1,08	0,90	0,30	0,89	0,82
27-04-16	0,97	0,95	0,75	0,71	0,90
03-05-16	1,23	0,90	0,40	0,88	0,88
10-05-16	0,86	0,87	0,23	0,70	0,76
17-05-16	0,97	0,73	0,43	0,71	0,72
24-05-16	1,11	0,83	0,47	0,56	0,83
01-06-16	0,97	0,65	0,42	0,35	0,61
06-06-16	0,47	0,64	0,21	0,50	0,54
07-06-16	1,04	0,81	0,42	0,79	1,22
08-06-16		0,25	0,39	0,37	0,78
09-06-16		0,28	0,42	0,46	0,94
15-06-16		0,21	0,39	0,44	1,02
28-06-16		0,18	0,31	0,36	1,01
05-07-16		0,26	0,40		1,03
12-07-16		0,28	0,52	0,40	1,03
19-07-16		0,31	0,31		0,98
17-08-16		0,22			0,96
24-08-16			0,81	0,35	0,99
31-08-16		0,19	0,26	0,35	0,90
07-09-16		0,25	0,38	0,42	0,94
14-09-16		0,37	0,53	0,63	0,99
21-09-16		0,31	0,50	0,48	0,96
29-09-16		0,31			

Tableau C.3 : Conductivité en fonction du point de suivi et de la date

Date	Conductivité selon le point de suivi (µS/cm)				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		191	231		155
09-03-16		160	230		
10-03-16	164				
16-03-16	150	152	256	150	160
23-03-16	274		395	184	265
30-03-16	187	188	343	191	191
05-04-16	178	193	339	181	184
12-04-16	116	166	291		170
19-04-16	161	164	291	166	164
27-04-16	135	136	301	136	136
03-05-16	156	150	293	155	142
10-05-16	111	123	289	123	120
17-05-16	114	117	362	120	116
24-05-16	177	183	299	192	195
01-06-16	186	177	294	187	188
06-06-16	245	243	310	238	236
07-06-16	181	184	289	205	185
08-06-16		287	294	292	294
09-06-16		305	304	295	296
15-06-16		286	300	299	292
28-06-16		307	301	316	309
05-07-16		306	311		313
12-07-16		315	323	320	325
19-07-16		304	301		308
17-08-16		305			313
24-08-16			308	308	306
31-08-16		308	318	317	316
07-09-16		308	332	309	309
14-09-16		310	314	310	346
21-09-16		314	317	316	334
29-09-16		349			

Tableau C.4 : Température en fonction du point de suivi et de la date

Date	Température selon le point de suivi (°C)				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		5,8	9,1		
09-03-16		4,2	9,0		6,0
10-03-16	4,9				
16-03-16	3,6	5,0	8,9	7,6	4,8
23-03-16	3,2	4,7	7,2	5,5	5,5
30-03-16	2,5	4,2	6,9	5,9	5,0
05-04-16	3,0	5,0	7,5	5,9	4,9
12-04-16	3,5	5,3	6,8		5,2
19-04-16	6,6	1,1	8,0	7,6	6,8
27-04-16	8,7	9,1	9,0	9,1	8,6
03-05-16	9,2	9,7	10,1	10,1	9,7
10-05-16	10,7	11,1	10,0	12,1	10,8
17-05-16	10,9	11,8	10,6	11,8	11,4
24-05-16	16,1	14,7	11,9	14,4	13,7
01-06-16	18,8	17,2	13,0	16,7	16,5
06-06-16	18,8	17,9	14,6	17,5	17,2
07-06-16	18,9	18,4	15,4	18,2	18,0
08-06-16		16,9	13,9	17,1	16,6
09-06-16		16,8	14,2	17,1	16,6
15-06-16		16,9	14,8	16,4	16,4
28-06-16		18,7	16,0	19,9	19,5
05-07-16		19,0	17,1		19,0
12-07-16		19,9	19,3	20,9	20,7
19-07-16		21,3	19,3		21,0
17-08-16		22,5			22,8
24-08-16			23,6	23,3	22,9
31-08-16		23,0	21,6	23,6	22,5
07-09-16		22,8	21,4	23,5	22,3
14-09-16		22,7	21,1	23,0	22,1
21-09-16		22,0	20,9	22,2	21,6
29-09-16		21,3			

Tableau C.5 : Concentration de manganèse dissous en fonction du point de suivi et de la date

Date	Concentration du manganèse dissous selon le point de suivi (µg/L)					
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**	**Blanc**
24-02-16						
09-03-16						
10-03-16						
16-03-16						
23-03-16						
30-03-16						
05-04-16						
12-04-16						
19-04-16	2	1	1	1	1	0
27-04-16	2	1	0	1	1	0
03-05-16	2	2	1	1	2	0
10-05-16	3	2	1	2	3	0
17-05-16	2	1	1	1	1	0
24-05-16	1	1	1	1	1	0
01-06-16	1	1	1	1	1	0
06-06-16	1	1	1	1	1	0
07-06-16	1	1	1	1	1	0
08-06-16		1	1	1	0	0
09-06-16		1	1	1	1	
15-06-16		1	0	1	0	0
28-06-16		1	1	0	0	< 0,1
05-07-16		1	1		0	< 0,1
12-07-16		1	1	1	0	0
19-07-16		1	1		1	0
17-08-16		0			0	
24-08-16			0	0	0	0
31-08-16		1	1	0	0	0
07-09-16		0	1	0	0	0
14-09-16		0	1	0	0	< 0,1
21-09-16		0	0	0	0	< 0,1
29-09-16						

Tableau C.6 : Concentration de manganèse total en fonction du point de suivi et de la date

Date	Concentration du manganèse total selon le point de suivi (µg/L)					
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**	**Blanc**
24-02-16						
09-03-16						
10-03-16						
16-03-16						
23-03-16						
30-03-16						
05-04-16						
12-04-16						
19-04-16	4	2	2	3	2	0,2
27-04-16	4	2	1	7	5	0,3
03-05-16	4	2	1	2	2	0,2
10-05-16	6	2	1	2	2	0,3
17-05-16	5	3	2	2	15	0,2
24-05-16	5	2	2	2	7	0,3
01-06-16	22	2	1	2	25	0,0
06-06-16	8	5	2	3	38	0,2
07-06-16	18	62	1	23		0,1
08-06-16		5	1	1	28	0,1
09-06-16		1	1	2	1	
15-06-16		1	1	2	3	0,2
28-06-16		1	1	1	1	0,2
05-07-16		1	1		1	0,2
12-07-16		1	1	1	1	0,1
19-07-16		1	1		0	0,3
17-08-16		1			1	
24-08-16			1	1	1	0,2
31-08-16		1	1	1	6	0,2
07-09-16		1	1	1	1	0,2
14-09-16		1	1	4	1	< 0,1
21-09-16		1	1	1	1	< 0,1
29-09-16						

Tableau C.7 : Concentration de fer dissous en fonction du point de suivi et de la date

Date	Concentration du fer dissous selon le point de suivi (µg/L)					
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**	**Blanc**
24-02-16						
09-03-16						
10-03-16						
16-03-16						
23-03-16						
30-03-16						
05-04-16						
12-04-16						
19-04-16	3	15	20	21	15	< 2
27-04-16	3	18	9	26	19	< 2
03-05-16	3	18	9	18	23	< 2
10-05-16	3	21	11	30	25	< 2
17-05-16	2	23	14	31	23	< 2
24-05-16	3	16	12	22	20	< 2
01-06-16	3	15	14	21	23	< 2
06-06-16	3	13	18	15	22	< 2
07-06-16	18	15	14	24	20	< 2
08-06-16		33	16	25	16	< 2
09-06-16		23	14	20	14	
15-06-16		22	8	19	10	2
28-06-16		11	25	7	4	< 2
05-07-16		11	15		8	< 2
12-07-16		15	14	9	5	< 2
19-07-16		10	13		5	2
17-08-16		5			4	
24-08-16			3	5	4	2
31-08-16		7	7	4	3	2
07-09-16		6	8	4	4	2
14-09-16		6	6	8	4	< 2
21-09-16		5	5	3	6	< 2
29-09-16						

Tableau C.8 : Concentration de fer total en fonction du point de suivi et de la date

Date	Concentration du fer total selon le point de suivi (µg/L)					
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**	**Blanc**
24-02-16						
09-03-16						
10-03-16						
16-03-16						
23-03-16						
30-03-16						
05-04-16						
12-04-16						
19-04-16	6	23	31	57	24	< 2
27-04-16	9	29	14		34	< 2
03-05-16	7	29	20	28	36	< 2
10-05-16	16	29	21	53	43	< 2
17-05-16	6	36	26	42	59	< 2
24-05-16	8	24	27	38	32	< 2
01-06-16	7	21	24	26	63	3
06-06-16	6	21	47	43	94	< 2
07-06-16	159	35	18	53	312	< 2
08-06-16		58	18	33	107	< 2
09-06-16		29	20	27	15	
15-06-16		27	13	25	22	3
28-06-16		14	32	15	6	3
05-07-16		15	29		13	< 2
12-07-16		16	25	16	10	< 2
19-07-16		15	22		8	3
17-08-16		9			7	
24-08-16			16	13	8	2
31-08-16		9	11	34	29	2
07-09-16		9	12	11	14	3
14-09-16		9	8	35	6	< 2
21-09-16		9	8	8	13	< 2
29-09-16						

Tableau C.9 : Oxygène dissous en fonction du point de suivi et de la date

Date	O_2 dissous selon le point de suivi (mg/L)				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		11,98	12,25		
09-03-16		13,00	9,50		13,00
10-03-16					
16-03-16	12,78	12,95	12,57	12,33	13,36
23-03-16	13,67	13,86	12,85	13,24	12,87
30-03-16	14,14	13,49	13,08	12,87	13,19
05-04-16	13,79	13,58	11,76	12,85	12,83
12-04-16	13,52	13,34	12,40		13,09
19-04-16	12,90	12,91	12,02	12,40	12,24
27-04-16	12,24	11,93	11,62	11,71	11,44
03-05-16	12,04	11,68	11,26	11,43	11,29
10-05-16	11,58	11,30	10,90	11,37	11,18
17-05-16	11,77	11,61	10,66	11,37	11,39
24-05-16	10,25	10,13	10,21	10,21	10,29
01-06-16	9,76	9,53	9,05	9,73	9,66
06-06-16	9,21	9,18	8,82	9,44	9,37
07-06-16	9,44	9,21	8,72	9,67	9,45
08-06-16		10,62	8,52	9,88	9,72
09-06-16		9,60	8,90	9,56	9,82
15-06-16		11,51	9,47	10,75	10,75
28-06-16		9,66	9,31	9,52	9,79
05-07-16		7,64	7,85		8,46
12-07-16		7,37	7,47	8,34	8,33
19-07-16		6,70	6,86		8,17
17-08-16		9,05			8,34
24-08-16			7,80	8,48	8,31
31-08-16		9,34	7,59	8,80	9,44
07-09-16		8,42	8,17	8,61	8,65
14-09-16		7,93	7,58	8,32	8,43
21-09-16		8,06	8,65	8,43	8,80
29-09-16		8,50			

Tableau C.10 : Chlore total en fonction du point de suivi et de la date

Date	Chlore total selon le point de suivi (mg Cl_2/L)				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		0,79	1,17		
09-03-16		1,02	1,08		0,97
10-03-16	1,42				
16-03-16	1,23	0,98	0,81	1,14	1,13
23-03-16	1,25	1,16	0,67	0,89	1,13
30-03-16	1,18	0,96	0,87	0,86	0,98
05-04-16	1,20	1,05	0,64	0,88	1,00
12-04-16	1,60	1,36	0,59		1,32
19-04-16	1,34	1,14	0,44	1,01	1,06
27-04-16	1,22	1,18	0,99	0,91	1,12
03-05-16	1,39	1,14	0,57	1,11	1,08
10-05-16	1,00	1,01	0,43	0,89	0,97
17-05-16	1,24	0,91	0,62	0,89	0,89
24-05-16	1,38	1,05	0,65	0,74	0,92
01-06-16	1,26	0,85	0,59	0,53	0,78
06-06-16	0,76	0,86	0,44	0,73	0,75
07-06-16	1,25	1,04	0,60	0,90	1,43
08-06-16		0,44	0,59	0,59	0,96
09-06-16		0,44	0,62	0,64	1,09
15-06-16		0,37	0,58	0,58	1,14
28-06-16		0,36	0,47	0,55	1,16
05-07-16		0,37	0,56		1,15
12-07-16		0,50	0,74	0,53	1,19
19-07-16		0,42	0,45		1,11
17-08-16		0,39			1,20
24-08-16			0,99	0,48	1,12
31-08-16		0,30	0,60	0,49	1,03
07-09-16		0,39	0,50	0,56	1,01
14-09-16		0,53	0,67	0,77	1,05
21-09-16		0,46	0,65	0,64	1,11
29-09-16		0,49			

Tableau C.11 : pH en fonction du point de suivi et de la date

Date	pH selon le point de suivi				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		6,68	8,01		
09-03-16		6,80	8,30		6,60
10-03-16	6,83				
16-03-16	6,59	6,78	8,67	6,72	7,09
23-03-16	6,79	6,93	8,12	7,09	6,94
30-03-16	7,01	7,10	8,04	7,03	7,17
05-04-16	6,87	7,01	8,12	7,10	7,24
12-04-16	6,74	6,96	8,25		7,03
19-04-16	6,81	7,06	8,00	7,17	7,28
27-04-16	6,79	7,18	8,26	6,98	7,07
03-05-16	7,06	7,01	8,21	6,64	7,18
10-05-16	7,04	6,73	8,41	7,11	7,06
17-05-16	6,93	7,34	8,23	7,31	7,33
24-05-16	7,08	7,06	7,68	7,17	7,01
01-06-16	6,59	6,79	7,86	7,01	6,97
06-06-16	6,93	6,94	7,80	7,16	7,15
07-06-16	7,03	6,72	7,69	7,17	7,08
08-06-16		7,24	7,80	7,67	7,85
09-06-16		7,65	8,11	7,81	7,80
15-06-16		7,46	7,48	7,66	7,14
28-06-16		7,47	7,93	7,51	7,54
05-07-16		7,48	7,77		7,57
12-07-16		7,50	7,47	7,70	7,47
19-07-16		7,32	7,69		7,65
17-08-16		7,72			7,68
24-08-16			8,07	7,93	8,10
31-08-16		7,68	7,48	7,70	7,52
07-09-16		7,85	8,19	8,17	7,98
14-09-16		7,98	7,60	7,96	8,03
21-09-16		8,07	8,09	8,11	8,09
29-09-16		8,47			

Tableau C.12 : Turbidité en fonction du point de suivi et de la date

Date	Turbidité selon le point de suivi (UTN)				
	1 - Station de pompage	**2 - Hôtel de Ville**	**3 - Piscine**	**4 - école**	**5 - Parc**
24-02-16		0,31	0,07		
09-03-16		0,19	0,19		0,13
10-03-16	0,14				
16-03-16	0,47	0,58	0,38	0,21	0,51
23-03-16	0,18	0,15	0,61	0,28	0,37
30-03-16	0,11	0,17	0,16	0,18	0,17
05-04-16	0,22	0,18	0,27	0,20	0,26
12-04-16	0,25	0,22	0,59		0,35
19-04-16	0,15	0,13	0,31	0,15	0,15
27-04-16					
03-05-16	0,13	0,13	0,18	0,14	0,16
10-05-16	0,12	0,16	0,20	0,21	0,30
17-05-16	0,15	0,15	0,17	0,18	0,63
24-05-16	0,37	0,38	0,23	0,23	0,32
01-06-16	0,27	0,14	0,27	0,23	0,31
06-06-16	0,33	0,19	0,18	0,19	0,17
07-06-16	4,70	1,53	0,24	0,47	7,36
08-06-16		0,84	0,19	0,30	2,10
09-06-16		0,31	0,27	0,26	
15-06-16		0,46	0,32	0,46	0,32
28-06-16		0,25	0,31	0,20	0,16
05-07-16		0,15	0,22		0,20
12-07-16					
19-07-16		0,26	0,19		0,32
17-08-16		0,13			0,40
24-08-16			0,22	0,18	0,20
31-08-16		0,21	0,17	0,50	0,28
07-09-16			0,17	0,33	0,35
14-09-16		0,22	0,15	0,48	0,19
21-09-16		0,19	0,54	0,22	0,34
29-09-16		0,19			

ANNEXE D : PHOTOGRAPHIES DES DÉPÔTS DE CORROSION DES CONDUITES MC VEY ET RED CROSS

Figure D.1 : Dépôts de la conduite Mc Vey en fonte grise

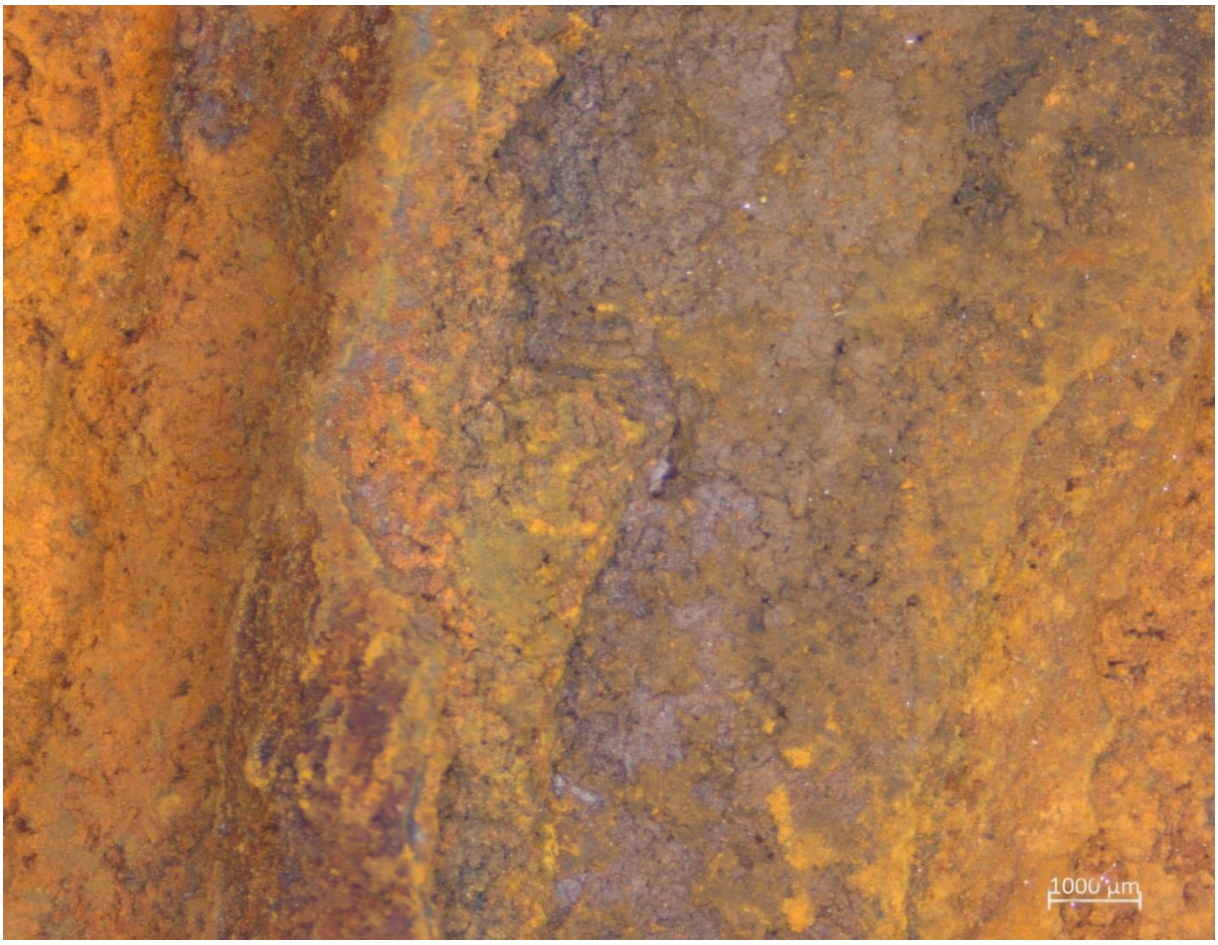


Figure D.2 : Détail d’un dépôt de la conduite Mc Vey en fonte grise

Figure D.3 : Dépôts de la conduite Red Cross en fonte 250 Delavaud

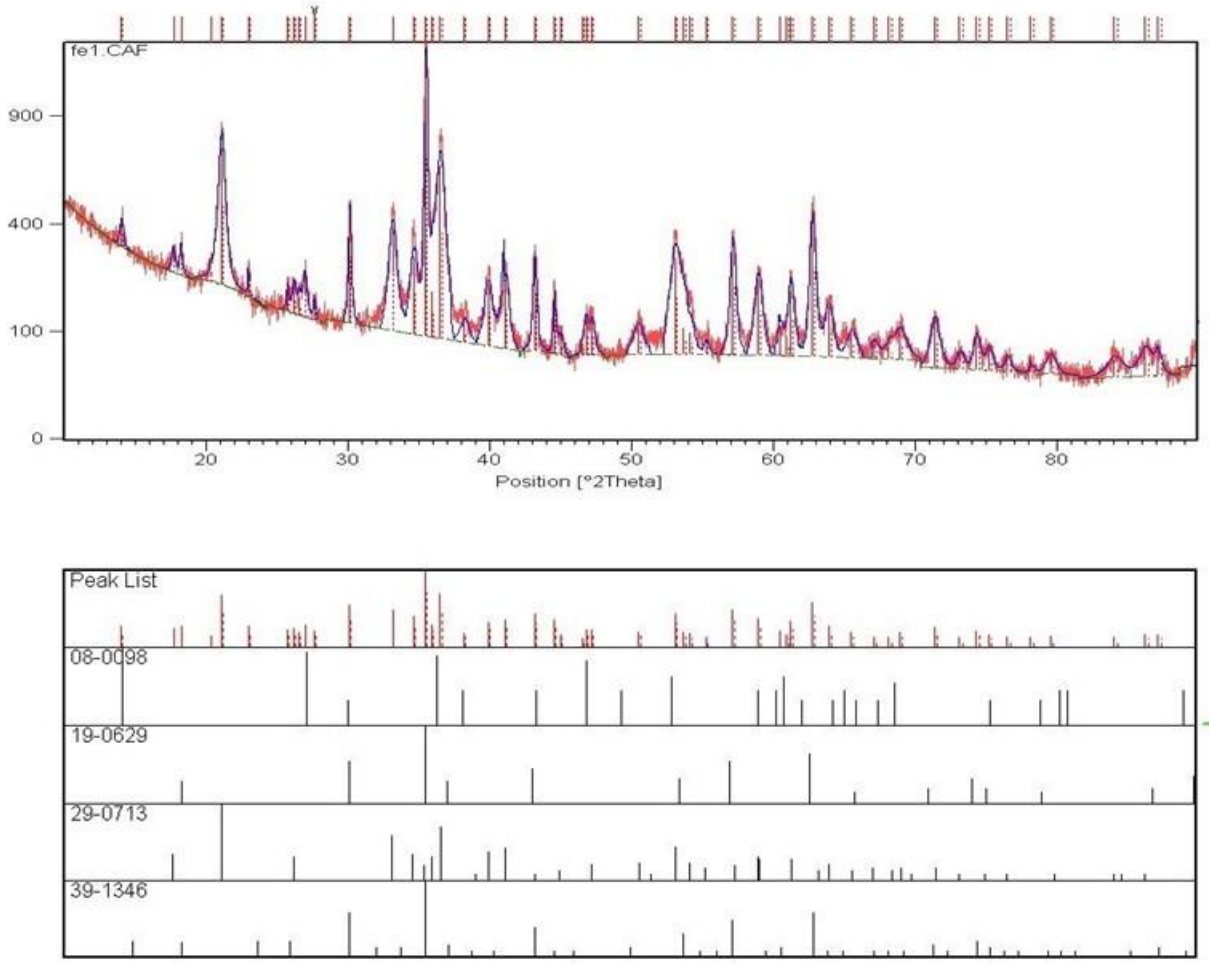
Figure D.4 : Détail d’un dépôt de la conduite Red Cross en fonte 250 Delavaud

ANNEXE E : RÉSULTATS DES ANALYSES XRD

Tableau E.1 : Noms des échantillons des 5 analyses XRD

Nom de l'échantillon (tamis 200)	Conduite	Couleur
Fe1	McVey	Brun foncé
Fe2	McVey	Orange pâle
Fe3	Red Cross	Brun foncé
Fe4	Red Cross	Orange pâle
Fe5	Mélange des deux conduites	Orange

Les échantillons sont réduits en poudre avec un pilon et un mortier. Les échantillons sont des poudres passant le tamis ATM no 200.

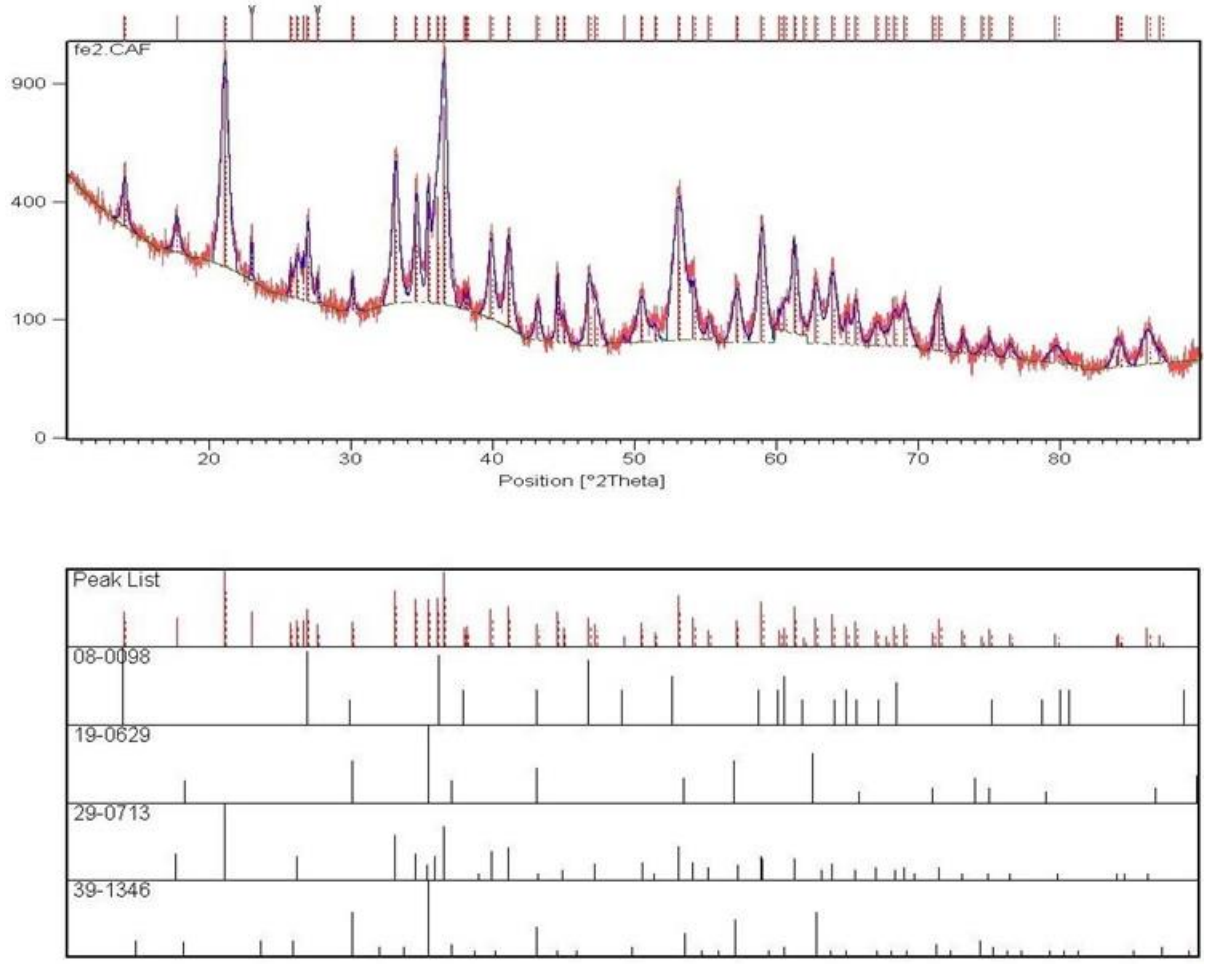


No.	Visib.	Ref. Co.	Sco.	Chemical Formula	Compound Name
	☑	08-0098	58	Fe O (O H)	Lepidocrocite
	☑	19-0629	61	Fe Fe2 O4	Magnetite, syn
	☑	29-0713	90	Fe O (O H)	Goethite
	☑	39-1346	79	Fe2 O3	Maghemite-\ITC\RG, syn

Figure E.1 : Résultats de l’analyse XRD de l'échantillon Fe1

La mesure a été effectuée avec le tube de Cu pour une durée de 2 heures. Le score indiqué pour chacune des phases du tableau ci-haut constitue un degré de «correspondance» entre la fiche de référence (numéro à 6 chiffres JC-PDF) et la mesure expérimentale. Le score est donc une indication de «probabilité de présence» (entre 0 et 100). Il n’est pas relié à la quantité relative d’une phase donnée dans l’échantillon. Pour évaluer la quantité relative d’une phase par rapport au tout, il faut se fier aux intensités relatives des pics d’une phase par rapport aux autres. L’échantillon semble contenir une grande quantité de FeO(OH) (goethite), une quantité relativement importante

de Fe_2O_3 (maghémite) et une faible quantité de FeO(OH) (lépidocrocite). L'échantillon pourrait également contenir du Fe_3O_4 (pics aux mêmes positions que maghémite).

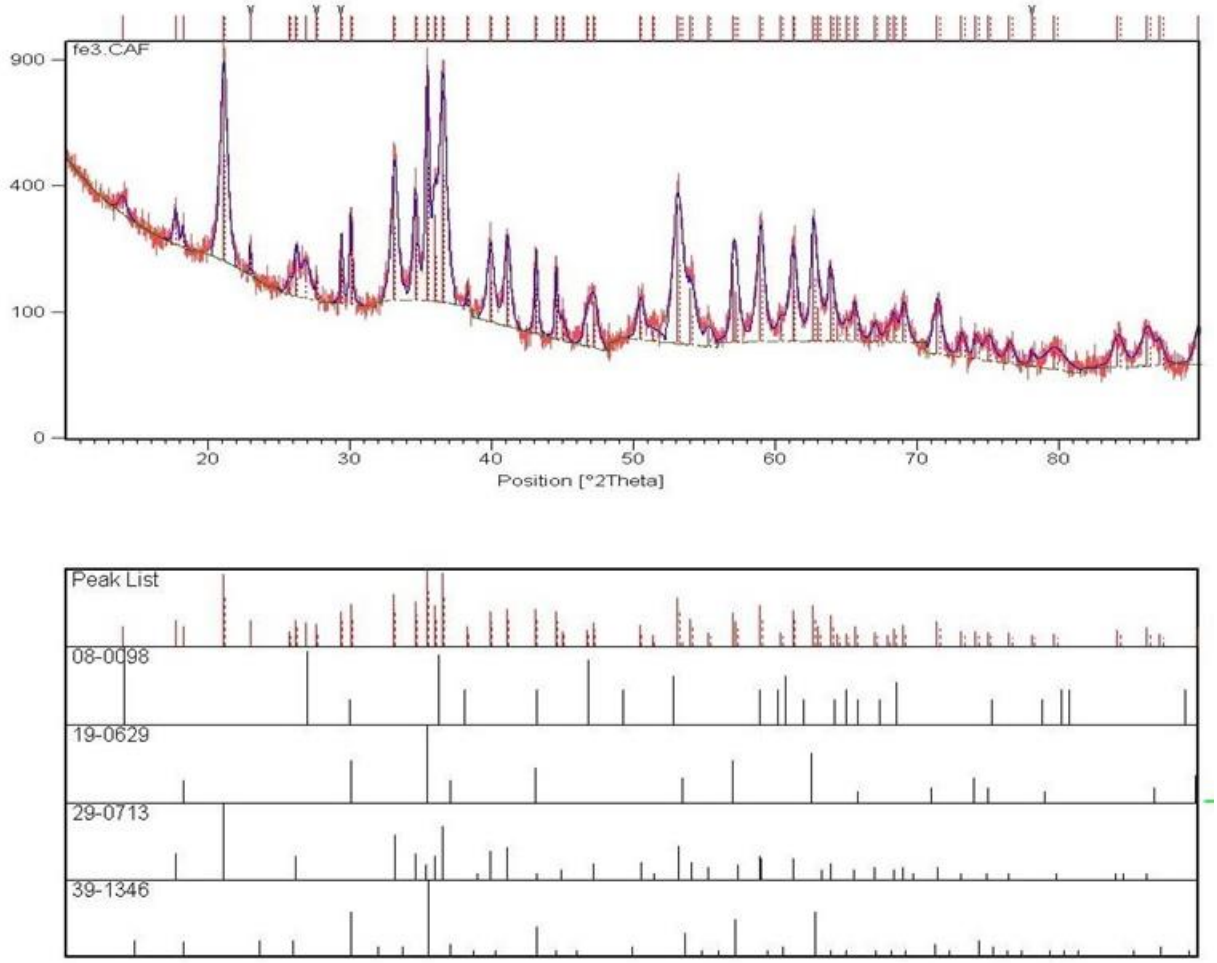


No.	Visib.	Ref. Co.	Sco.	Chemical Formula	Compound Name
	✓	08-0098	61	Fe O (O H)	Lepidocrocite
	✓	19-0629	57	Fe Fe2 O4	Magnetite, syn
	✓	29-0713	89	Fe O (O H)	Goethite
	✓	39-1346	70	Fe2 O3	Maghemite-\ITC\RG, syn

Figure E.2 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe2

La mesure a été effectuée avec le tube de Cu pour une durée de 2 heures. Le score indiqué pour chacune des phases du tableau ci-haut constitue un degré de «correspondance» entre la fiche de référence (numéro à 6 chiffres JC-PDF) et la mesure expérimentale. Le score est donc une indication de «probabilité de présence» (entre 0 et 100). Il n'est pas relié à la quantité relative d'une phase donnée dans l'échantillon. Pour évaluer la quantité relative d'une phase par rapport au tout, il faut se fier aux intensités relatives des pics d'une phase par rapport aux autres. L'échantillon

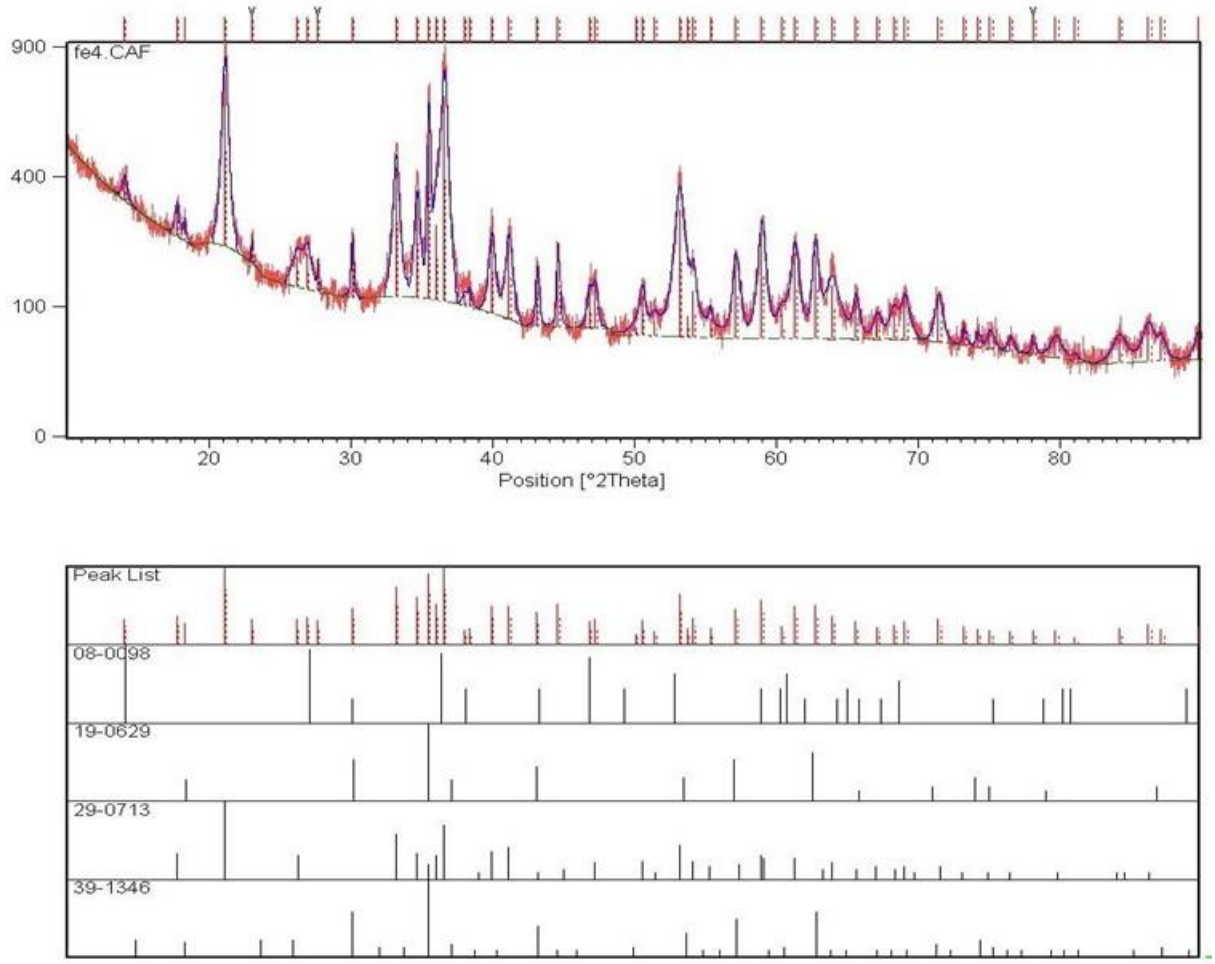
semble contenir une grande quantité de FeO(OH) (goethite) et de faibles quantités de Fe_2O_3 (maghémite) et de FeO(OH) (lépidocrocite). L'échantillon pourrait également contenir une faible quantité de Fe_3O_4 (pics aux mêmes positions que maghémite). L'échantillon Fe2 semble contenir moins de Fe_2O_3/Fe_3O_4 que l'échantillon Fe1 , une quantité semblable de FeO(OH) (goethite) et une quantité légèrement plus élevée de FeO(OH) (lépidocrocite).



No.	Visib.	Ref. Co.	Sco.	Chemical Formula	Compound Name
	✓	08-0098	53	Fe O (O H)	Lepidocrocite
	✓	19-0629	67	Fe Fe2 O4	Magnetite, syn
	✓	29-0713	89	Fe O (O H)	Goethite
	✓	39-1346	74	Fe2 O3	Maghemite-\ITC\RG, syn

Figure E.3: Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe3

La mesure a été effectuée avec le tube de Cu pour une durée de 2 heures. Le score indiqué pour chacune des phases du tableau ci-haut constitue un degré de «correspondance» entre la fiche de référence (numéro à 6 chiffres JC-PDF) et la mesure expérimentale. Le score est donc une indication de «probabilité de présence» (entre 0 et 100). Il n'est pas relié à la quantité relative d'une phase donnée dans l'échantillon. Pour évaluer la quantité relative d'une phase par rapport au tout, il faut se fier aux intensités relatives des pics d'une phase par rapport aux autres. L'échantillon semble contenir une grande quantité de FeO(OH) (goethite) et de faibles quantités de Fe_2O_3 (maghémite) et de FeO(OH) (lépidocrocite). L'échantillon pourrait également contenir une faible quantité de Fe_3O_4 (pics aux mêmes positions que maghémite). L'éch. Fe3 semble contenir des quantités semblables de FeO(OH) (goethite) et FeO(OH) (lépidocrocite) à celles de l'éch. Fe1 et une quantité plus élevée de Fe_2O_3/Fe_3O_4 que celle de l'éch. Fe1, mais plus faible que celle de l'éch. Fe2.

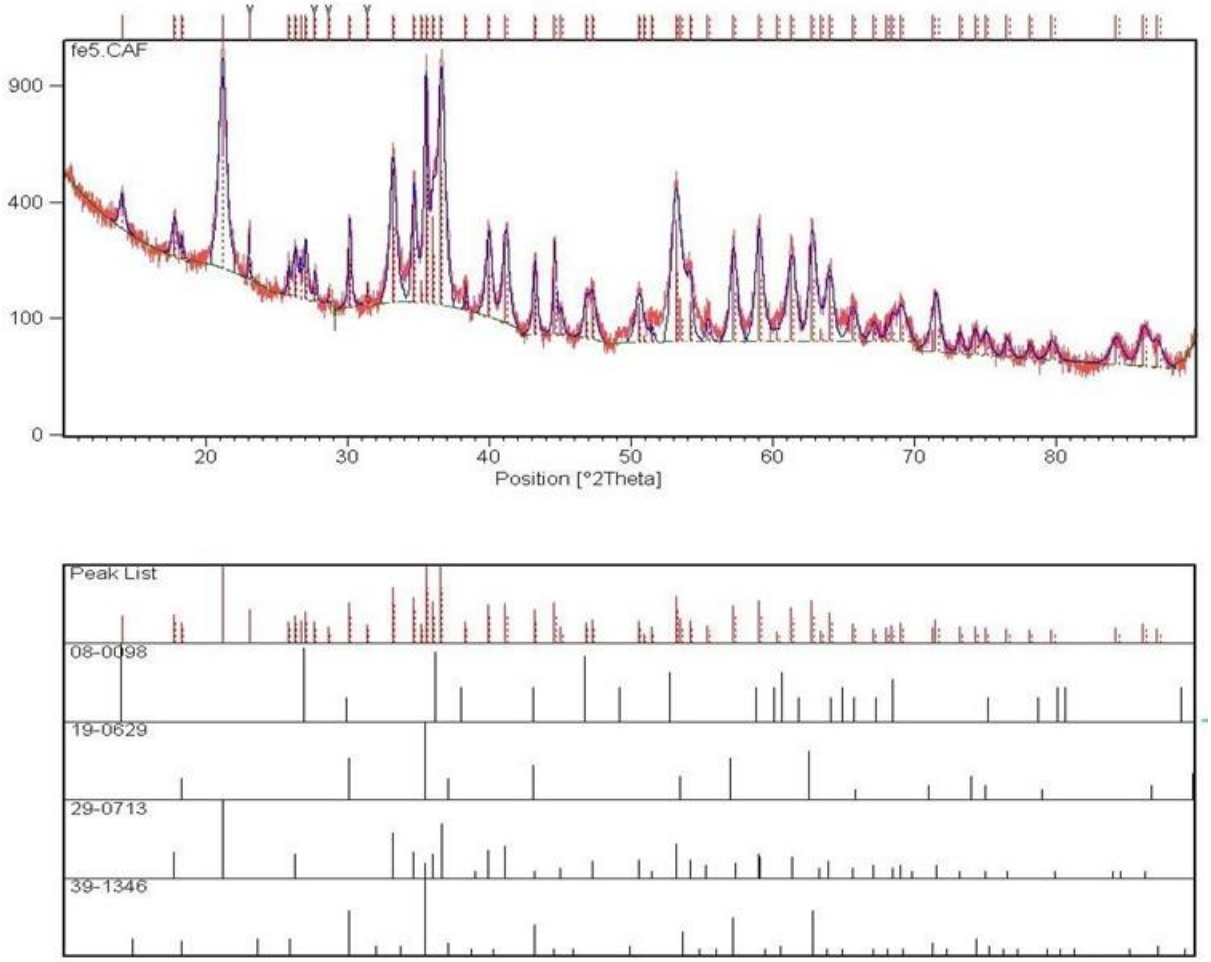


No.	Visib.	Ref. Co.	Sco.	Chemical Formula	Compound Name
	✔	08-0098	61	Fe O (O H)	Lepidocrocite
	✔	19-0629	69	Fe Fe2 O4	Magnetite, syn
	✔	29-0713	91	Fe O (O H)	Goethite
	✔	39-1346	80	Fe2 O3	Maghemite-\ITC\RG, syn

Figure E.4 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe4

La mesure a été effectuée avec le tube de Cu pour une durée de 2 heures. Le score indiqué pour chacune des phases du tableau ci-haut constitue un degré de «correspondance» entre la fiche de référence (numéro à 6 chiffres JC-PDF) et la mesure expérimentale. Le score est donc une indication de «probabilité de présence» (entre 0 et 100). Il n'est pas relié à la quantité relative d'une phase donnée dans l'échantillon. Pour évaluer la quantité relative d'une phase par rapport au tout, il faut se fier aux intensités relatives des pics d'une phase par rapport aux autres. L'échantillon semble contenir une grande quantité de FeO(OH) (goethite) et de faibles quantités de Fe_2O_3 (maghémite) et de FeO(OH) (lépidocrocite). L'échantillon pourrait également contenir une faible

quantité de Fe_3O_4 (pics aux mêmes positions que maghémite). L'éch. Fe4 semble contenir des quantités semblables de FeO(OH) (goethite), FeO(OH) (lépidocrocite) et de Fe_2O_3/Fe_3O_4 à celles de l'éch. Fe2.



No.	Visib.	Ref. Co.	Sco.	Chemical Formula	Compound Name
	✔	08-0098	58	Fe O (O H)	Lepidocrocite
	✔	19-0629	59	Fe Fe2 O4	Magnetite, syn
	✔	29-0713	89	Fe O (O H)	Goethite
	✔	39-1346	74	Fe2 O3	Maghemite-\ITC\RG, syn

Figure E.5 : Résultats de l'analyse XRD de l'échantillon Fe5

La mesure a été effectuée avec le tube de Cu pour une durée de 2 heures. Le score indiqué pour chacune des phases du tableau ci-haut constitue un degré de «correspondance» entre la fiche de référence (numéro à 6 chiffres JC-PDF) et la mesure expérimentale. Le score est donc une

indication de «probabilité de présence» (entre 0 et 100). Il n'est pas relié à la quantité relative d'une phase donnée dans l'échantillon. Pour évaluer la quantité relative d'une phase par rapport au tout, il faut se fier aux intensités relatives des pics d'une phase par rapport aux autres. L'échantillon semble contenir une grande quantité de FeO(OH) (goethite) et de faibles quantités de Fe_2O_3 (maghémite) et de FeO(OH) (lépidocrocite). L'échantillon pourrait également contenir une faible quantité de Fe_3O_4 (pics aux mêmes positions que maghémite). L'éch. Fe5 semble contenir des quantités semblables de FeO(OH) (goethite), FeO(OH) (lépidocrocite) et de Fe_2O_3/Fe_3O_4 à celles de l'éch. Fe2 et Fe4.