

Titre: Evaluation de l'effet du silicate comme inhibiteur de corrosion dans
Title: un réseau de distribution d'eau potable. --

Auteur: Isabelle Bénard
Author:

Date: 1998

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bénard, I. (1998). Evaluation de l'effet du silicate comme inhibiteur de corrosion
dans un réseau de distribution d'eau potable. -- [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6758/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6758/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Raymond Desjardins
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DE L'EFFET DU SILICATE
COMME INHIBITEUR DE CORROSION
DANS UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

ISABELLE BÉNARD
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 (M.Sc.A)
(GÉNIE CIVIL)
AOÛT 1998



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37430-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉVALUATION DE L'EFFET DU SILICATE
COMME INHIBITEUR DE CORROSION
DANS UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Présenté par : Isabelle Bénard

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

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

Mme PRÉVOST, Michèle, Ph.D., présidente

M. DESJARDINS, Raymond, M. Ing., membre et directeur de recherche

M.LAVOIE, Jean, M.Sc.A., membre

Pour mon père Raymond

*Sur le chemin de l'Équerre, je n'ai jamais
cessé de penser à toi.*

Remerciements

Ce travail s'intègre dans un vaste projet sur la corrosion interne des réseaux de distribution d'eau potable. Je tiens tout d'abord à remercier les sociétés et organismes qui ont appuyé cette étude soit le Ministère des affaires municipales dans le cadre du programme Infrastructure Canada-Québec, la Ville de Laval, l'École Polytechnique de Montréal et les consultants Vallée Lefebvre et associés.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, Raymond Desjardins pour ses encouragements, ses conseils et ses corrections. Que Michèle Prévost reçoive également toute ma reconnaissance pour sa participation constructive à la direction de mes travaux.

Mes remerciements vont aussi à Jean Lavoie pour avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à l'équipe de recherche sur la corrosion : Pierre Lafrance, Jean Lavoie, Pierre Brisebois, Michel Leclair, Chantal Morisette, Normand Hamel, Daniel Duchesne, Annie Rompré, Patrick Niquette, Denis Allard, Sylviane Desautels, Stéphane Perron et Catherine Poirier. Je tiens à souligner le travail exceptionnel de Denis Allard et de Sylviane Desautels à la réalisation de ce projet, qu'ils reçoivent toute ma reconnaissance. Je remercie la compagnie National Silicates (PQ Corporation) pour les produits utilisés. Je remercie également les résidents qui m'ont permis d'aller échantillonner à leur domicile.

J'exprime une très grande gratitude à toute l'équipe de la Chaire Industrielle en Eau Potable qui a contribué de près et de loin à l'accomplissement de ce travail, et particulièrement Julie Philibert et Jacinthe Mailly pour leur aide.

Je remercie mon frère Frédéric, ma mère Rolande et mon père Raymond pour leurs visions et leurs amours.

Je ne saurais oublier le support moral et la générosité de mes ami(e)s particulièrement Tin et Sylviane.

Finally, I thank Michelle for her ability to find beauty in everything.

Résumé

La corrosion interne des réseaux de distribution d'eau potable cause des problèmes esthétiques et sanitaires, tel que la dissolution des métaux lourds et la coloration de l'eau. La présence de produits de corrosion sur les parois internes des conduites diminue leur capacité hydraulique, augmente la demande en oxydant et favorise l'activité bactérienne.

L'objectif de cette étude est d'implanter et de suivre un moyen de contrôle de la corrosion interne des réseaux de distribution. Le moyen choisi est l'ajout de silicate de sodium de type N, cet inhibiteur de corrosion avait pour objectifs de: 1) maintenir une concentration en fer total inférieure ou égale à 0,2 mg Fe/L pour tous les points de contrôle durant toute l'étude ; 2) réduire le taux de corrosion d'une conduite fraîchement nettoyée ; 3) récupérer une fraction de la capacité hydraulique des vieilles conduites ; 4) augmenter la stabilité du chlore libre et 5) abaisser l'activité bactérienne dans l'eau des conduites du secteur à l'étude.

Pour implanter et suivre l'ajout du silicate de sodium, un secteur d'étude a été choisi et isolé. Des rinçages unidirectionnels, des essais de performances hydrauliques, un nettoyage mécanique d'une conduite, des passages de caméra et des analyses de dépôts ont été faits. Des suivis des paramètres physico-chimiques et biologiques ont été réalisés de façon hebdomadaire et horaire.

Du silicate de sodium a été injecté dans un secteur du réseau de distribution d'eau potable de Ville de Laval pendant près de 5 mois, soit en moyenne 3,7 mg SiO₂/L du 18 juin au 18 août et 7,3 mg SiO₂/L du 18 août au 15 octobre 1997.

Les variations de consommation d'eau potable dans le secteur d'étude ont été importantes. Cela a causé des difficultés pour les mesures de débit et pour le contrôle de l'ajout du silicate de sodium.

Les caractéristiques de l'eau (pH et alcalinité) dans le réseau de distribution ne nous ont pas permis d'ajouter tout le silicate recommandé par la compagnie Silicate National Ltée, soit une concentration de 24 mg SiO₂/L lors de la période de passivation et une concentration minimale de 4 mg SiO₂/L en période de maintien.

Les augmentations brusques de concentrations de fer total dans l'eau du secteur ont été surtout causées par des changements rapides des conditions d'écoulement de l'eau ou par une stagnation prolongée de l'eau dans les conduites de fonte grise non revêtue.

Les résultats de l'analyse des échantillons prélevés tout au long de l'étude et des observations faites dans le réseau montrent que :

- il est possible d'ajouter du silicate de sodium comme inhibiteur de corrosion sans générer de plaintes de la part des consommateurs;
- l'ajout de silicate de sodium dans une conduite nettoyée mécaniquement ne permet pas de stabiliser rapidement le taux de corrosion. Cela a été montré de trois façons différentes :
 1. la concentration de fer total dans l'eau circulant dans cette conduite est demeurée élevée;
 2. le gain de capacité hydraulique obtenu suite au nettoyage mécanique a été en grande partie perdu durant les cinq mois de l'ajout de silicate de sodium;
 3. une caméra, insérée dans la conduite a montré que les tubercules arrachés lors du nettoyage mécanique, se reforment rapidement même si du silicate de sodium est injecté.
- l'ajout de silicate de sodium pendant cinq mois dans des conduites corrodées n'a pas permis d'améliorer les performances hydrauliques de ces conduites;

- l'ajout de silicate de sodium n'a pas fait baisser la demande en chlore. De plus, aucune variation d'activité bactérienne dans le réseau n'a été observée suite à l'ajout de silicate de sodium.

Abstract

The internal corrosion of water distribution systems causes sanitary and aesthetic problems, such as the dissolution of heavy metals and colouring of water. Tubercale, the by-product of corrosion on the internal surface of pipes, decrease the hydraulic capacity, increase the chlorine demand and foster bacterial activity.

This study conducted in the water distribution system of Laval (Quebec, Canada) was aimed at implementing and following an internal corrosion strategy in a water distribution system. The means chosen was to add sodium silicate type N into the water of an isolated section of the distribution system mainly built of grey iron piping. The addition of this corrosion inhibitor was supposed to: 1) maintain a total iron concentration inferior to 0.2 mg Fe/L for all the sample points during the duration of the study; 2) stabilise the rate of corrosion of a mechanically cleaned pipe; 3) regain a fraction of the hydraulic capacity of old pipes; 4) increase the chlorine stability and reduce the bacterial activity.

To implement and follow the addition of sodium silicate, a section of the distribution system was chosen and isolated. Unidirectional rinsing, hydraulic capacity tests, mechanical cleaning of one pipe, camera observations and analytical studies of samples were done. The physical, chemical and biological parameters were analysed on a weekly and hourly basis.

Sodium silicate was added to the water for 5 months. The water contained a natural concentration of 4 mg SiO₂/L. On average the concentration for the period from the 18th of June to the 18th of August was 3.7 mg SiO₂/L, and 7.3 mg SiO₂/L for the period from the 19th of August to the 15th of October.

The variations of the water demand in the area under study were considerable. For this reason it was difficult to measure the flow rate and control the concentration of sodium silicate added.

The characteristics of the water ($\text{pH}=7.0$ to 7.3 and alkalinity=22 mg/L as CaCO_3) in the distribution system did not allow for the addition of the sodium silicate recommended by the National Silicate Company: that is a concentration of 24 mg SiO_2/L during passivation and a minimal concentration of 4 mg SiO_2/L during maintenance.

The abrupt increases in the concentration of the total iron in the water of the area under study were due either to sudden changes in hydraulic conditions or to prolonged stagnation of the water in the grey iron piping.

The results of the sampling and observations show that:

- it is possible to add sodium silicate as an internal corrosion inhibitor without causing inconvenience to the consumer;
- the addition of sodium silicate in a mechanically cleaned pipe does not rapidly stabilise the rate of corrosion. This was shown three different ways:
 1. the total iron concentration in the water at the outlet of the pipe remained above 0.3 mg Fe/L for the first 40 days following the mechanical cleaning;
 2. the 45 % gain in the hydraulic capacity observed after the mechanical cleaning was reduced by 20 % within the 5 months of the addition of sodium silicate;
 3. and a camera introduced inside the pipe showed that the removed tubercles were rapidly reforming even with the addition of sodium silicate.
- the addition of sodium silicate for 5 months in the corroded pipes did not increase their hydraulic capacity.

Tables des matières

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	x
TABLES DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES	xvii
1. INTRODUCTION	1
1.1 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS.....	2
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
2.1. PROBLÈMES CAUSÉS PAR LA CORROSION	3
2.2. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LA CORROSION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE	4
2.3. CORROSION ÉLECTROCHIMIQUE.....	5
2.4. MÉTHODES DE CONTRÔLE DE LA CORROSION	6
2.5. LES INHIBITEURS DE CORROSION.....	7
2.6. UTILISATION DU SILICATE DE SODIUM POUR LIMITER LA CORROSION INTERNE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION.....	9
2.6.1. Historique des cas.....	9
2.6.2. Mécanisme de formation du film protecteur.....	13
2.6.3. Influence du pH.....	14
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES	18
3.1. IMPLANTATION D'UNE MÉTHODE DE CONTRÔLE DE LA CORROSION SUR UN RÉSEAU RÉEL.....	18
3.1.1. Consultation de la base de données.....	18
3.1.2. Choix de l'inhibiteur de corrosion.....	18
3.1.3. Choix du secteur d'essais.....	21

3.1.4. Interventions dans le secteur	27
3.1.4.1. Rincage unidirectionnel	28
3.1.4.2. Essais de performance hydraulique	30
3.1.4.3. Isolement du secteur à l'étude et mise en route de purges.....	33
3.1.4.4. Nettoyage mécanique d'une conduite.....	34
3.1.4.5. Passage de la caméra	36
3.1.4.6. Analyse de dépôts.....	36
3.1.5. Injection de silicate.....	37
3.1.6. Suivi de l'impact de l'ajout de silicate	37
3.2. MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE	40
3.2.1. Accès aux points d'échantillonnage	40
3.2.2. Préparation d'une campagne d'échantillonnage	40
3.2.3. Description d'un échantillonnage périodique	45
3.2.4. Description d'un échantillonnage ponctuel	46
3.2.5. Paramètres mesurés et méthodes d'analyses.....	48
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	49
4.1. EFFET DU SILICATE SUR L'ALCALINITÉ, LA DURETÉ, LE CO ₂ ET L'OXYGÈNE DISSOUS.....	49
4.2. EFFET DE L'ADDITION DE SILICATE SUR LE PH DE L'EAU	52
4.3. ADSORPTION DU SILICATE SUR LES PAROIS INTERNES DES CONDUITES	55
4.3.1. Bilan des concentrations de silicate.....	55
4.3.1.1. Échantillonnage hebdomadaire	56
4.3.1.2. Échantillonnage horaire	62
4.3.2. Analyse de dépôts.....	67
4.4. EFFET DU SILICATE SUR LA FORMATION D'UN FILM PROTECTEUR	67
4.5. EFFET DE L'AJOUT DE SILICATE SUR LA CAPACITÉ HYDRAULIQUE DES CONDUITES	71
4.6. EFFET DE L'AJOUT DE SILICATE SUR LA DISSOLUTION DU FER, DU CUIVRE DU PLOMB.....	72

4.6.1. Le fer.....	72
4.6.2. Le cuivre et le plomb.....	81
4.7. EFFET DE L'AJOUT DE SILICATE SUR LA STABILITÉ DU CHLORE LIBRE ET SUR LE DÉNOMBREMENT BACTÉRIEN	83
4.7.1. Le chlore libre	84
4.7.2. Le dénombrement bactérien.....	86
4.8. HYPOTHÈSES ET DISCUSSION	90
4.8.1. Concentration d'injection du silicate.....	90
4.8.2. Dépolymérisation du silicate.....	91
4.8.3. Effet du silicate dans les vieilles conduites	92
4.8.4. Effet du silicate dans la conduite mécaniquement nettoyée	94
5. CONCLUSION.....	96
RÉFÉRENCES.....	98

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 : Utilisation des silicates dans l'eau potable pour le contrôle de la corrosion	15
Tableau 3. 1 : Résultats des essais en bécher pour de la fonte grise (Rompré et al. 1997)	20
Tableau 3. 2 : Répartition des conduites en fonction de leurs matériaux (Lafrance et al. 1991)	22
Tableau 3. 3 : Caractéristiques des conduites aux points de suivis	26
Tableau 3. 4 : Interventions effectuées dans le secteur à l'étude	27
Tableau 3. 5 : Caractéristiques des échantillonnages périodiques	38
Tableau 3. 6 : Caractéristiques des échantillonnages ponctuel	39
Tableau 3. 7 : Matériels requis pour la collecte et l'analyse d'échantillons sur le terrain	41
Tableau 3. 8 : Préparation des tubes d'échantillonnage	43
Tableau 3. 9 : Préparation de la verrerie et procédure d'échantillonnage	44
Tableau 3. 10 : Paramètres analysés et les méthodes utilisées	48
Tableau 4. 1 : Moyennes et écarts types calculés en utilisant l'ensemble des résultats d'alcalinité, de dureté et de CO ₂	50
Tableau 4. 2 : Augmentation de la concentration de silicate entre l'entrée du secteur et les points d'observations	57
Tableau 4. 3 : Variations journalières des concentrations de silicate au poste St-Martin	63
Tableau 4. 4 : Temps de séjour estimés pour les points de suivi	66
Tableau 4. 5 : Comparaison des concentrations de fer total mesurées lors des échantillonnages horaires et hebdomadaires	80
Tableau 4. 6 : Viabilité de l'activité bactérienne en fonction du chlore libre	88

Liste des figures

Figure 2. 1 : Efficacité du silicate pour des conduites en acier galvanisé. (Shuldener et Sussman 1960)	11
Figure 3. 1 : Schéma de l'usine Pont-Viau (135 000 m ³ /d)	23
Figure 3. 2: Carte du réseau	25
Figure 3. 3 : Description d'un rinçage undirectionnel	29
Figure 3. 4 : Camion et buse pour le nettoyage mécanique d'une conduite	35
Figure 3. 5 : Concentration de fer total en fonction du temps d'écoulement aux points de suivis.....	46
Figure 3. 6 : Échantillonneur automatique installé chez un résident.....	47
Figure 4. 1 : Suivi de mai à juin 1997 (A) de l'alcalinité; (B)de la dureté; (B) du CO ₂ et (D) de l'oxygène dissous	51
Figure 4. 2 :L'oxygène dissous en fonction de la température de mai à juin 1997.....	52
Figure 4. 3: Effet de l'ajout de silicate sur le pH : A) au poste St-Martin; B)au point 11	54
Figure 4. 4 : Suivi de l'ajout de silicate durant les premiers 39 heures.....	58
Figure 4. 5 : Suivis des concentrations de silicate de mai à octobre : aux points 4 et 5 (A), aux points 9 et 11 (B) et aux points 11,12 et 13 (C)	61
Figure 4. 6 : Suivi des concentrations de silicate aux Postes St-Martin en fonction des heures.....	63
Figure 4. 7 : Débit disponible dans les conduites sous les rues Jean XXIII et Belleville en fonction des interventions.....	69
Figure 4. 8 : Passage de la caméra dans une conduite mécaniquement nettoyée (Jean XXIII) : (A) état initial; (B) immédiatement après le nettoyage et (C) 5 mois après l'ajout de silicate.....	70
Figure 4. 9 : Évolution des concentrations de fer total : (A) aux points 9 et 11; (B) aux points 4,5 et 13	76

Figure 4. 10 : Évolution de la turbidité aux points 5, 6, 8, 11 et 13	77
Figure 4. 11 : Concentration de fer total en fonction des concentrations de silicate au point 5 mesurées lors des échantillonnages hebdomadaires	77
Figure 4. 12 : Évolution de la turbidité et du fer total au point 11	78
Figure 4. 13 : Concentrations de fer total en fonction des concentrations de silicate au point 5 mesurées lors de l'échantillonnage horaire du 22 septembre 1997	81
Figure 4. 14 : Évolution du plomb et du cuivre au robinet du consommateur	83
Figure 4. 15 : Chlore libre en fonction du temps de séjour : (A) le 15 juillet; (B) le 7 août et le 7 octobre 1997	85
Figure 4. 16 : \log_{10} BHA en fonction des concentrations de chlore libre : (A) au point 2; (B) au point 9 et (C) au point 4	87
Figure 4. 17 : \log_{10} BHA en fonction des concentrations de silicate : au point 4 avant le début de la rechloration	89

CHAPITRE I

1. Introduction

La corrosion interne des réseaux de distribution d'eau potable est un problème complexe à laquelle doit faire face les exploitants de ces réseaux. La corrosion cause des problèmes esthétiques et sanitaires, tel que la dissolution des métaux lourds et la coloration de l'eau. La présence de produits de corrosion sur les parois internes des conduites diminue leur capacité hydraulique, augmente la demande en oxydant et favorise l'activité bactérienne.

Les recherches sur la corrosion ont conduit à une meilleure connaissance des méthodes pour contrer la dissolution des métaux. Ces méthodes sont: le contrôle du pH; l'ajustement de l'alcalinité; l'addition d'inhibiteurs de corrosion et l'utilisation de matériaux qui ne se corrodent pas. Des essais réalisés à l'échelle pilote, permettent d'identifier les méthodes de contrôle les plus efficaces. Par la suite, l'étude à échelle industrielle, sur le réseau de distribution, permet de vérifier l'efficacité de ces méthodes de contrôle en tenant compte des contingences liées à l'exploitation d'un réseau de distribution. Ce mémoire décrit les activités de recherche du troisième volet d'un programme de recherche sur la corrosion interne des réseaux de distribution de la Ville de Laval (Québec, Canada), soit l'implantation et le suivi d'une méthode de contrôle de la corrosion dans une partie d'un réseau réel de distribution d'eau potable.

Le chapitre 2 présente une revue bibliographique portant sur les méthodes de contrôle de la corrosion, en particulier l'utilisation du silicate de sodium comme inhibiteur de corrosion. Le chapitre 3 décrit le matériel et les méthodes nécessaire à l'implantation et au suivi d'une méthode de contrôle. Le chapitre 4 présente et discute les résultats obtenus alors que le silicate de sodium était injecté dans le réseau de distribution.

1.1 Hypothèses et Objectifs

Les résultats obtenus lors du premier volet de l'étude ont montré que l'ajout de silicate, à raison de 10 mg SiO₂/L, permet de réduire le taux de corrosion et de dissolution du fer de la fonte grise pour des coupons immergés dans des bechers (Rompré et al. 1997). La méthode de contrôle testée sur le réseau de distribution découle de ces résultats. Les hypothèses et objectifs de la présente étude sont que :

l'ajout de silicate de sodium de type N dans l'eau circulant dans les conduites d'un réseau de distribution est un moyen efficace de contrôle de la corrosion. Cet ajout permet de réduire le taux de corrosion des conduites et de minimiser les problèmes de dissolution des métaux. Il permet aussi de dissoudre, de façon contrôlée, les produits de corrosion. Cette dissolution redonne aux conduites une partie de leur capacité hydraulique perdue.

Afin de vérifier ces hypothèses, des essais ont été faits dans les conduites d'un secteur du réseau de distribution de Ville de Laval. L'ajout de silicate de sodium avait alors pour objectifs de: 1) maintenir une concentration en fer total inférieure ou égale à 0,2 mg Fe/L pour tous les points de contrôle durant tout l'étude ; 2) réduire le taux de corrosion d'une conduite fraîchement nettoyée ; 3) récupérer une fraction de la capacité hydraulique des vieilles conduites ; 4) augmenter la stabilité du chlore libre et 5) réduire l'activité bactérienne dans l'eau des conduites du secteur à l'étude.

CHAPITRE II

2. Revue bibliographique

2.1. Problèmes causés par la corrosion

La corrosion interne des réseaux de distribution d'eau potable peut être la cause de problèmes esthétiques ou sanitaires. Les problèmes sanitaires sont causés par la dissolution des conduites de cuivre, des brasures au plomb qui les relie et des métaux lourds inclus dans la fabrication de la robinetterie. Les problèmes esthétiques sont plutôt causés par la dissolution du fer et du zinc. Ces métaux en solution peuvent colorer l'eau, lui donné un mauvais goût ou même tacher la lessive.

Les produits de corrosion peuvent rester accrochés à la conduite et ainsi réduire la section d'écoulement et faire augmenter les coefficients de friction. Cela se traduit par une augmentation des pertes de charge, réduisant ainsi la pression et les débits d'eau disponible pour la lutte contre les incendies. La corrosion par piqûre peut causer des fuites d'eau. Ces fuites doivent être compensées par une augmentation de production à l'usine de traitement d'eau et une augmentation des débits pompés dans le réseau (AQTE 1980). Dans les cas extrêmes, les conduites corrodées doivent être remplacées, ce qui est coûteux. En effet, en plus des coûts de la conduite il faut prévoir des frais d'installation importants qui sont le résultat de l'excavation et de la reconstruction de la chaussée (AQTE 1980).

La mise en œuvre d'un programme de contrôle de la corrosion permettrait de réduire les coûts d'exploitation et de remplacement des conduites et la rencontre des normes pour la qualité de l'eau potable.

2.2. État des connaissances sur la corrosion des réseaux de distribution d'eau potable

Le problème de corrosion des réseaux de distribution en eau potable n'est pas récent. En 1845, un rapport sur la distribution de l'eau de Boston conclue: considérant la nature toxique du plomb et le fait qu'il soit facilement dissout dans l'eau, l'utilisation du plomb dans un réseau d'eau destinée à la consommation est fortement déconseillé (Karalekas et al. 1983). Ce rapport était à l'avant-garde. Les grands objectifs de la recherche dans le passé visaient plutôt à réduire la corrosion des matériaux du fer qui cause des problèmes d'esthétique et des problèmes de fuite.

Avec l'adoption du '*Safe Drinking Water Act*', aux États-Unis, en 1974, les producteurs d'eau doivent produire une eau sécuritaire du point de vue sanitaire pour les consommateurs. En 1977, une réglementation fixe, pour la première fois, des concentrations maximales de contaminant (plomb et cadmium entre autre) au robinet du consommateur (Kirmeyer et Logsdon 1983).

La recherche sur la corrosion a été plus active à la fin des années 70 afin de rencontrer ces nouvelles exigences. Ces recherches ont conduit à une meilleure connaissance des méthodes pour contrer la dissolution des métaux soit: le contrôle du pH; l'ajustement de l'alcalinité et l'addition d'inhibiteurs de corrosion. Ces recherches ont également conduit à l'utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion tel que les conduites de fonte avec un revêtement intérieur de ciment et les conduites en plastique.

En 1991, avec la révision de la réglementation sur le plomb et sur le cuivre, les distributeurs d'eau ont senti la nécessité d'améliorer leur compréhension des mécanismes qui régissent la solubilisation du plomb et du cuivre (Dodrill et Edwards 1995). C'est dans cette optique que plusieurs projets de recherche sur les inhibiteurs de la corrosion du plomb et du cuivre ont été effectués ou sont en cours de réalisation aux États-Unis.

2.3. Corrosion électrochimique

La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre le métal et son environnement occasionnant des changements dans les propriétés du métal (American Water Works Association Research Foundation 1997). Une cellule électrochimique se compose de quatre éléments essentiels: 1) l'anode ; 2) la cathode ; 3) un lien électrique permettant le passage des électrons entre l'anode et la cathode (i.e. le métal de la conduite) et 4) un électrolyte servant au transport des ions (i.e. l'eau potable).

L'anode et la cathode sont des zones ayant des potentiels électrochimiques différents ; l'anode étant plus électronégative que la cathode. Cette différence de potentiel permet des réactions de corrosion spontanées. La corrosion se produit à l'anode où il y a une oxydation du métal ($M \rightarrow M^{n+} + ne^-$), tandis qu'à la cathode un accepteur d'électrons, comme l'oxygène, permet une réaction de réduction ($A^{n+} + ne^- \rightarrow A$).

Pour une conduite composée d'un seul métal, les différences de potentiels sont créées par une hétérogénéité dans la structure du métal ou par une différence localisée des concentrations de l'électrolyte, de l'oxygène ou de l'hydrogène (Trethewey et Chamberlain 1988). Voici deux exemples: a) un atome dans la phase solide a une énergie thermodynamique minimale lorsqu'il atteint un site dans la matrice d'un cristal parfait. Un atome ou un groupe d'atomes à l'extérieur de cette matrice, sera anodique par rapport aux autres atomes et sujet à la corrosion (Trethewey et Chamberlain 1988) et ; b) un gradient d'oxygène se développe habituellement entre l'interface eau-tubercule et l'interface tubercule-conduite. L'interface eau tubercule, est plus riche en oxygène dissous, elle agit donc comme cathode, alors que l'interface tubercule-conduite moins riche en oxygène dissous sert d'anode ce qui favorise la corrosion (American Water Works Association Research Foundation 1997).

En l'absence d'un seul des quatre éléments essentiels (l'anode, la cathode, le lien électrique ou l'électrolyte), la corrosion cesse. Les méthodes de contrôle de la corrosion sont basées sur cette observation.

2.4. Méthodes de contrôle de la corrosion

Le contrôle de la corrosion peut être fait: 1) en isolant l'anode de la cathode, 2) en isolant l'anode et ou la cathode de l'électrolyte, 3) en rendant le métal cathodique, ou 4) en modifiant les propriétés de l'électrolyte (Lehmann 1964). Voici quelques exemples: a) lors du raccord d'une conduite neuve à une ancienne, il est important d'isoler ces deux conduites, sinon l'ancienne conduite avec ses produits de corrosion agira comme cathode alors que la nouvelle conduite agira comme anode et sera rapidement corrodée; b) le recouvrement d'une surface métallique (revêtement de ciment ou peinture) arrête la corrosion en isolant l'anode et la cathode de l'électrolyte ; c) l'ajout d'un métal plus électronégatif, par exemple du zinc sur une structure de fer permet une protection cathodique du fer. Le zinc agit comme anode, il se corrode et laisse le fer (cathode) intacte et d) une augmentation du pH de l'eau favorise la précipitation du carbonate de calcium à la cathode ce qui gène les réactions de réduction et par le fait même la corrosion (Trethewey et Chamberlain 1988).

Pour des conduites enfouies sous terre, un traitement de l'électrolyte permettant un contrôle efficace de la corrosion serait très intéressant. En effet, cela permettrait de solutionner des problèmes de corrosion sans qu'il soit nécessaire de faire des interventions dans les conduites qui sont difficiles d'accès. Dans cette perspective, l'ajout d'inhibiteur dans l'eau potable pourrait s'avérer un moyen économique de contrôle de la corrosion.

2.5. *Les inhibiteurs de corrosion*

Un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, ajoutée en petite quantité dans un environnement, arrête, diminue ou prévient la réaction du métal avec l'environnement (Hackerman et Snavely 1979).

La classification des inhibiteurs de corrosion varie selon les références bibliographiques. Les inhibiteurs peuvent être classés selon leurs mécanismes d'action, l'environnement dans lequel ils sont introduit, le métal sur lequel ils agissent ou leurs structures chimiques (Harrop 1988). Les classes les plus souvent citées sont: les inhibiteurs organiques ou inorganiques, les inhibiteurs cathodiques ou anodiques, les inhibiteurs favorisant la passivation, les inhibiteurs sécuritaires ou dangereux, les inhibiteurs oxydants ou non-oxydants et les inhibiteurs favorisant la précipitation ou l'adsorption.

Dans les réseaux de distribution d'eau potable, seul les inhibiteurs non toxiques pour l'être humain peuvent être utilisés. Il ne reste plus que quatre types d'inhibiteurs acceptables: ceux favorisant la précipitation du carbonate de calcium, les sels de zinc, les phosphates et les silicates. Les polyphosphates (inclus dans la classe des phosphates), les sels de zinc et les produits favorisant la précipitation du carbonate de calcium sont considérés comme des inhibiteurs cathodiques.

Un inhibiteur cathodique ralenti ou arrête les réactions chimiques de corrosion à la cathode. Il peut atteindre cet objectif en favorisant la formation d'un précipité sur cette électrode. C'est ce que font les sels de zinc, les polyphosphates et les substances qui favorisent la précipitation du calcium. Ces substances réagissent avec les anions d'hydroxyde et précipitent sur la cathode coupant ainsi le lien entre la cathode et l'électrolyte (Trethewey et Chamberlain 1988).

Dépendant des auteurs, les silicates et les phosphates peuvent être des inhibiteurs inorganiques (Harrop 1988), anodiques ((Trethewey et Chamberlain 1988) ; (Jones 1996)), favorisant la passivation ((Harrop 1988); (Riggs 1973)), dangereux ((American

Water Works Association Research Foundation 1997); (Harrop 1988); (Riggs 1973); (Evans 1960)), non-oxydants ((Jones 1996); (Harrop 1988); (Riggs 1973)) et favorisant la précipitation (Riggs 1973).

Un inhibiteur inorganique ne contient pas de carbone dans sa structure chimique. Un inhibiteur anodique réagit avec les cations métalliques produit lors de la corrosion pour former un film de passivation ou un sel à solubilité limitée recouvrant l'anode (Trethewey et Chamberlain 1988). Un inhibiteur favorisant la passivation est un type spécifique d'inhibiteur anodique qui recouvre l'anode d'un mince film l'isolant ainsi de l'électrolyte (Harrop 1988). L'utilisation des inhibiteurs favorisant la passivation est délicate. En effet, lorsque ces inhibiteurs sont injectés en concentration insuffisante, ils ne recouvrent pas l'ensemble des sites anodiques. Cela a pour résultat d'accélérer la corrosion des sites anodiques non recouvert favorisant ainsi une corrosion localisée ((American Water Works Association Research Foundation 1997) ; (Trethewey et Chamberlain 1988)). Un inhibiteur non-oxydant est un inhibiteur favorisant la passivation qui requiert la présence d'oxygène dissous pour former un film protecteur (Trethewey et Chamberlain 1988).

Les inhibiteurs qui favorisent la précipitation sont souvent considérés dans les publications scientifiques, comme des inhibiteurs cathodiques (Harrop 1988). Par contre, Riggs (1973) défini ces inhibiteurs comme des produits formant un film sur l'ensemble du métal en interférant ainsi avec l'anode et la cathode. Ces auteurs indiquent que les phosphates et les silicates causent la passivation de l'acier lorsqu'il y a présence d'oxygène, ils agiraient donc comme inhibiteur anodique. De plus, ils formeraient un dépôt sur l'acier favorisant la polarisation cathodique. Ils auraient donc un effet combiné en agissant simultanément à l'anode et la cathode, mais ces auteurs soulignent que ces inhibiteurs doivent quant même être utilisés en quantité suffisante afin de ne pas favoriser la corrosion localisée.

Étant donné que cette étude porte sur l'ajout de silicate dans un réseau de distribution en eau potable, la prochaine section est consacrée à ce sujet.

2.6. Utilisation du silicate de sodium pour limiter la corrosion interne des réseaux de distribution

2.6.1. Historique des cas

Plusieurs auteurs ont publié des résultats sur l'efficacité des silicates pour le contrôle de la corrosion interne de réseaux de distribution ((Rompré et al. 1998); (Rompré et al. 1997); (MacQuarrie et al. 1997); (Boireau et al. 1997); (Lytle et al. 1996); (Katsanis et al. 1986); (Lane et al. 1977); (McQuillan et Spenst 1976); (Lane et al. 1973); (Dart et Foley 1972); (Shuldener et Sussman 1960); (Shuldener et Lehrman 1957); (Lehrman et Shuldener 1952); (Sussman 1952); (Loschiavo 1948); (Stericker 1945); (Stericker 1938); (Texter 1923); (Tresh 1922)).

Lors d'une étude sur l'action des eaux naturelles sur le plomb, Tresh (1922) publie des résultats sur l'action de la silice et du silicate comme moyen de prévention contre l'empoisonnement par le plomb. Il remarque aussi l'effet du silicate sur la dissolution du fer: l'eau des consommateurs qui était continuellement turbide est devenue, après addition de silicate, une eau sans couleur.

Texter (1923) présente les mérites du silicate pour la prévention de la corrosion des conduites d'acier ou de fer non revêtu dans des réseaux domestiques de distribution d'eau chaude. Il indique que l'ajout de silicate dans l'eau a permis de régler les problèmes d'eau rouge en l'espace de quelques semaines. De plus l'analyse des pertes de poids indique une diminution de 50% de la corrosion.

Suite à l'ajout des silicates Stericker (1938) rapporte des résultats sur la dissolution du fer et sur l'effet du pH sur l'action du silicate. Une eau de lac ayant un pH variant entre

5,0 et 7,0 et un contenu en solides totaux variant entre 15 et 30 mg/L, dessert un village de maisons d'été. Cette eau, à cause de son faible pH et de sa faible concentration en solide totaux, est agressive. Après ajustement du pH ($\text{pH} \geq 8,6$) à l'aide de soude, des problèmes de couleur persistent. En bout de ligne de ce réseau de distribution, on mesure une concentration en oxyde de fer de 2,3 mg/L. Une journée après l'addition de silicate ($\text{Na}_2\text{O} : 3,3\text{SiO}_2 \approx 8 \text{ mg SiO}_2/\text{L}$), la concentration de fer baisse à 1,0 mg/L et ne dépasse pas 1,3 mg/L durant le reste de cette saison estival. À cause du faible pH, le silicate plus alcalin de type $\text{Na}_2\text{O} : 2,0 \text{ SiO}_2$ fut par la suite injecté. Ce type de silicate est habituellement recommandé pour des eaux acides. L'effet combiné de la hausse de pH et de l'addition de ce type de silicate déstabilisa la couche de corrosion et fit passer la concentration de fer de 0,97 mg/L à 5,43 mg/L.

Stericker (1945) rapporte l'efficacité du silicate contre les problèmes d'eau rouge dans des réseaux domestiques de distribution d'eau chaude et dans un réseau de distribution d'eau potable.

Loschiavo (1948) rapporte les résultats du conditionnement d'une eau souterraine utilisée pour l'alimentation de camps militaires. Durant les deux premiers mois d'un traitement avec le silicate ($\text{Na}_2\text{O} : 3,3\text{SiO}_2 \approx 10 \text{ mg SiO}_2/\text{L}$), les concentrations de fer, dans les eaux du réseau de distribution, ont d'abord monté à 30 mg/L pour ensuite baisser jusqu'à 0,1 mg/L. Les concentrations moyennes de fer avant injection du silicate ne sont pas mentionnées.

Shuldener et Sussman (1960) font le bilan de 30 ans d'expérience avec les silicates comme inhibiteur de corrosion dans les systèmes d'eau. Ils rapportent que les silicates ont allongé la durée de vie des conduites de fer galvanisé des réseaux domestiques de distribution d'eau chaude. La durée de vie des ces équipements est passée de trois à quatre ans (sans traitement) à 17 ans (avec traitement). Ils rapportent également l'efficacité des silicates pour réduire le volume des sous produits de corrosion formés sur de la fonte galvanisée immergée dans de l'eau froide (figure 2.1).

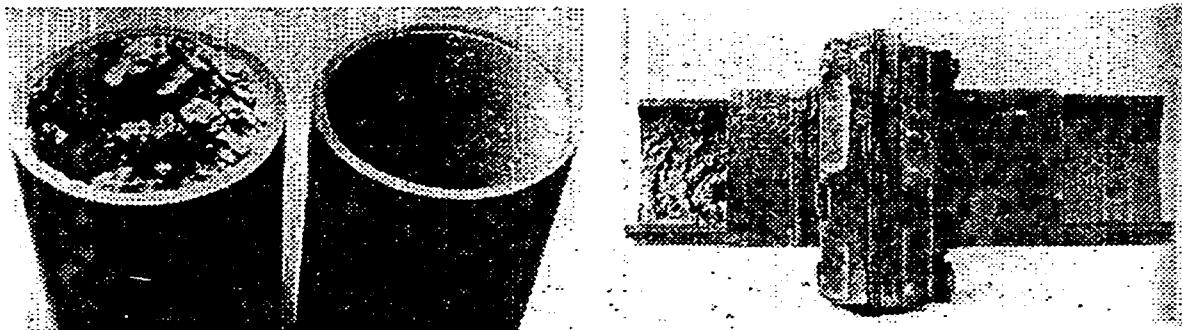


Figure 2. 1 :Efficacité du silicate pour des conduites en acier galvanisé. (Shuldener et Sussman 1960)

La partie gauche de la figure 2.1 présente deux conduites de 100 mm \varnothing en acier galvanisé, utilisées dans un système domestique de distribution d'eau froide. Ces deux conduites ont été retirées après deux ans de fonctionnement. L'eau dans la conduite de gauche ne contenait pas de silicate. L'eau dans la conduite de droite contenait environ 8 mg SiO₂/L (Na₂O: 3,3SiO₂). La partie droite de la figure 2.1 présente un injecteur de silicate utilisé pendant 15 ans. À gauche l'eau ne contenait pas de silicate, à droite l'eau contenait environ \approx 8 mg SiO₂ /L (Na₂O: 3,3SiO₂).

Lane et al. (1973) ont étudié, au laboratoire, à l'aide de mesures de perte de poids, l'efficacité du silicate comme inhibiteur de la corrosion, dans des systèmes de distribution d'eau chaude, sur de l'acier galvanisé, sur des alliages de cuivre et de nickel, et sur de l'acier inoxydable. Ils notent que le silicate est efficace pour réduire le taux de corrosion de l'acier galvanisé et des alliages de cuivre, mais qu'il n'est pas efficace pour réduire le taux de corrosion de l'acier inoxydable. Ils font aussi référence à une étude ultérieure sur la corrosion de l'acier causé par de l'eau chaude et notent que l'injection de quantité élevé de silicate, soit 25 mg SiO₂/L, n'a pas réussi à réduire la vitesse de corrosion de l'acier.

Lytle et al. (1996) rapportent l'efficacité du silicate de type N ($\text{Na}_2\text{O}: 3,3\text{SiO}_2$) pour la réduction des concentrations de plomb, de cuivre et de zinc dans les conduites d'eau d'un bâtiment. L'eau dans ce bâtiment contenait des concentrations de plomb trop élevées. Pour former un film protecteur, des concentrations de silicate de l'ordre de 32 mg SiO_2/L ont été injectées pendant 71 jours, pour ensuite être baissées à 16 mg SiO_2/L . La consommation du silicate a été de l'ordre de 1 mg/L lors de la formation et de l'entretien du film protecteur. Ces additions de silicate de sodium ont entraîné des hausses de pH. Le pH initial était de 7,7, il a augmenté jusqu'à environ 9,5 alors que 32 mg SiO_2/L était injecté. Ce dernier s'est ensuite stabilisé entre 8,8 et 9,1 lorsque la concentration de silicate a été baissée à 16 mg SiO_2/L . Les concentrations de plomb ont diminué rapidement et se sont stabilisées en l'espace de 25 jours. Les concentrations de cuivre et de zinc ont diminué presque instantanément.

Boireau et al. (1997) ont publié les résultats d'une étude française, réalisé aux échelles pilote et industrielle, sur la limitation de la solubilisation du plomb causé par l'ajout d'inhibiteur. Les résultats préliminaires, obtenus à partir d'éprouvettes de plomb, ont montré que les traitements à base de silicate de sodium (10, 20 et 30 mg SiO_2/L) n'ont pas d'effet significatif sur la vitesse de solubilisation du plomb.

MacQuarrie et al. (1997) ont réalisé une étude à l'échelle pilote, sur l'action des inhibiteurs de corrosion dans l'eau potable de la ville de Vancouver. Les résultats montrent que le silicate de sodium de type N ($\text{Na}_2\text{O}: 3,3\text{SiO}_2$) est efficace contre la corrosion du cuivre. Par contre, il n'est pas plus efficace qu'un ajustement du pH et de l'alcalinité, pour lutter contre la corrosion de coupons de fonte ductile.

Une étude portant sur l'efficacité de différentes méthodes de contrôle de la corrosion a été réalisée à ville de Laval. La première étape portait sur l'efficacité de méthodes de contrôle pour lutter contre la corrosion de coupons neufs immersés dans des bêchers. Les résultats de cette première étape montrent que le silicate est efficace pour diminuer le taux de corrosion des coupons de fer immersés dans des bêchers où il n'y a pas de

circulation d'eau (Rompré et al. 1997). La deuxième étape portait sur l'efficacité de méthodes de contrôle pour lutter contre la corrosion de coupons neufs immersés dans des réacteurs annulaires où il y a circulation d'eau. Les résultats de cette deuxième étape montre que le silicate n'est pas efficace pour diminuer le taux de corrosion des coupons de fer immersés dans les réacteurs annulaires (conditions d'écoulement), mais qu'il réussit, quand les conditions de pH le permettent, à séquestrer le fer (Rompré et al. 1998).

Le tableau 2.1 résume les conditions d'utilisation des silicates dans l'eau potable pour le contrôle de la corrosion. Ce tableau classe l'information selon les auteurs, le type d'essais, les matériaux utilisés et les effets observés. Les seuls effets positifs, causés par l'ajout du silicate pour contrôler la corrosion des conduites de fer, cités dans ces références sont: la diminution des problèmes d'eau rouge, la diminution du taux de corrosion du fer recouvert d'une couche de zinc et la diminution du taux de corrosion du fer pour des matériaux neufs immersés dans de l'eau stagnante.

2.6.2. Mécanisme de formation du film protecteur

Dans leurs travaux Lehrman et Shuldener (1952); (1951) proposent un mécanisme de formation du film protecteur dans des conduites en acier galvanisé. Le zinc, utilisé pour la galvanisation, réagit avec l'eau pour former des hydroxydes de zinc, ces ions chargés positivement neutralisent les ions chargés négativement de la silice pour former un dépôt. Ce film gélatineux, agglomère les particules contenues dans l'eau. Quand les conditions d'alcalinité et de pH le permettent, le fer et la dureté précipitent dans ce film. Le mécanisme par lequel la silice est consommée par le zinc est l'adsorption, comme ce phénomène s'accélère avec l'augmentation de la température ce type d'adsorption est une chimio-sorption. Ces travaux montrent également que les produits de corrosion ou plus précisément les hydroxydes métalliques solides sont nécessaires pour qu'il y ait formation d'un film. Ils indiquent aussi clairement, que sans ces hydroxydes solides il

n'y a pas de consommation des silicates. Le mode de formation du film, lorsque les produits de corrosion sont des hydroxydes de fer, n'a pu être démontré.

2.6.3. Influence du pH

Les travaux de Lane et al. (1977), montrent les effets des variations de pH de 7,2 à 9,0 et des variations des concentrations de silicate de 10 à 20 mg SiO₂/L (Na₂O: 3,3SiO₂), sur la corrosion de l'acier galvanisé neuf immergé dans de l'eau chaude (60°C). Des mesures de polarisation linéaire et des pertes de poids ont été effectuées pendant 120 jours. Les résultats montrent qu'un traitement initial avec 20 mg SiO₂/L à un pH ≥ 8,5 est ce qu'il y a de plus efficace pour former rapidement le film de protection et ainsi réduire le taux de corrosion. Par la suite, un traitement avec 10 mg SiO₂/L, à un pH d'environ 8,5, permet d'entretenir ce film et ainsi maintenir un taux de corrosion faible. Les auteurs notent que la combinaison optimale de pH et de silicate est influencée par la qualité de l'eau (dureté, alcalinité, chlore et sulfate).

Les travaux de Rompré et al. (1998) montrent l'effet du pH sur l'efficacité du silicate. Lorsque le pH est inférieur à 7,5 le silicate n'a pas d'effet sur la dissolution du fer des coupons de fonte grise immergés dans des réacteurs annulaires. Lorsque le pH est élevé, soit de l'ordre de 9,0, la dissolution du fer augmente. L'ajout de silicate séquestre le fer des coupons de fonte grise lorsque le pH est inférieur à 8,0. Ce fer dissous se retrouve sous une forme invisible et stable.

Tableau 2.1 : Utilisation des silicates dans l'eau potable pour le contrôle de la corrosion (suite)

Références	Type d'essai	Matériaux	Effets positifs ou négatifs
(Shuldener et Sussman 1960)	Résumé de 30 ans d'applications des silicates dans des réseaux de distribution d'eau potable chaude et froide.	Fer Galvanisé Acier galvanisé Laiton Cuivre Aluminium	<u>Effets positifs</u> Disparition des problèmes d'eau rouge. Disparition des taches laissées sur les équipements par le cuivre et le fer. Augmentation de la longévité des conduites de fer galvanisé. Réduction du taux de corrosion des conduites de fer galvanisé. Réduction du volume des tubercules dans les conduites de fer galvanisé.
(Lane et al. 1973)	Étude à échelle pilote sur des conduites neuves installées en boucle où circule de l'eau chaude.	Acier galvanisé Alliage de cuivre Acier	<u>Effets positifs</u> Réduction du taux de corrosion de l'acier galvanisé et des alliages de cuivre. <u>Aucun effet</u> Aucun effet sur le taux de corrosion de l'acier.
(McQuillan et Spens 1976)	Applications dans des réseaux domestiques de distribution d'eau chaude	Acier galvanisé	<u>Effets positifs</u> Augmentation de la longévité des conduites.
(Lane et al. 1973)	Ajout de silicate dans un montage pilote construit avec des conduites neuves installées en boucle où circule l'eau chaude.	Acier galvanisé	<u>Effets positifs</u> Développement rapide de la protection lorsque le silicate est injecté en plus grande concentration. Une fois le film formé, une diminution de la concentration de silicate offre la même protection. Donc, économie des coûts de maintien.
(Lyle et al. 1996)	Application sur des conduites à l'intérieur d'un bâtiment.	Plomb Cuivre Zinc	<u>Effets positifs</u> Réduction des concentrations de ces métaux dans l'eau.

Tableau 2.1 : Utilisation des silicates dans l'eau potable pour le contrôle de la corrosion (suite)

Références	Type d'essai	Matériaux	Effets positifs ou négatifs
(Shuldener et Sussman 1960)	Résumé de 30 ans d'applications des silicates dans des réseaux de distribution d'eau potable chaude et froide.	Fer galvanisé Acier galvanisé Laiton Cuivre Aluminium	<u>Effets positifs</u> Disparition des problèmes d'eau rouge. Disparition des taches laissées sur les équipements par le cuivre et le fer. Augmentation de la longévité des conduites de fer galvanisé. Réduction du taux de corrosion des conduites de fer galvanisé. Réduction du volume des tubercules dans les conduites de fer galvanisé.
(Lane et al. 1973)	Étude à échelle pilote sur des conduites neuves installées en boucle où circule de l'eau chaude.	Acier galvanisé Alliage de cuivre Acier	<u>Effets positifs</u> Réduction du taux de corrosion de l'acier galvanisé et des alliages de cuivre. <u>Aucun effet</u>
(McQuillan et Spens 1976)	Applications dans des réseaux domestiques de distribution d'eau chaude	Acier galvanisé	<u>Effets positifs</u> Aucun effet sur le taux de corrosion de l'acier.
(Lane et al. 1973)	Ajout de silicate dans un montage pilote construit avec des conduites neuves installées en boucle où circule l'eau chaude.	Acier galvanisé	<u>Effets positifs</u> Développement rapide de la protection lorsque le silicate est injecté en plus grande concentration. Une fois le film formé, une diminution de la concentration de silicate offre la même protection. Donc, économie des coûts de maintien.
(Lytle et al. 1996)	Application sur des conduites à l'intérieur d'un bâtiment.	Plomb Cuivre Zinc	<u>Effets positifs</u> Réduction des concentrations de ces métaux dans l'eau.

Tableau 2.1 : Utilisation des silicates dans l'eau potable pour le contrôle de la corrosion (suite)

Références	Type d'essai	Matériaux	Effets positifs ou négatifs
(Boireau et al. 1997)	Étude réalisée sur des éprouvettes	Plomb	Aucun effet
(MacQuarrie et al. 1997)	Étude pilote sur des conduites neuves installées en boucle	Cuivre Fonte ductile	<u>Effets positifs</u> Réduction du taux de corrosion du cuivre. <u>Aucun effet</u> Aucun effet sur le fer.
(Rompré et al. 1998) (Rompré et al. 1997)	Étude sur des coupons neufs immersés en bêchers. Étude sur des coupons neufs immergés dans des réacteurs annulaires.	Fonte grise	<u>Effets positifs</u> Réduction du taux de corrosion et de la dissolution du fer pour les essais en bêchers. Séquestration du fer pour les essais en réacteur annulaire. <u>Aucun effet</u> Aucun effet sur la diminution du taux de corrosion pour les essais en réacteurs annulaires <u>Effets négatifs</u> Déstabilisation des dépôts à pH élevé pour les essais en réacteurs annulaires.

CHAPITRE III

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Implantation d'une méthode de contrôle de la corrosion sur un réseau réel

3.1.1. Consultation de la base de données

La Ville de Laval possède une base de données sur le réseau de distribution. Cette base cartographie les conduites en fonction de leurs matériaux et diamètres. L'emplacement des chambres de vannes et poteaux d'incendie sont numérotés sur ces cartes. Un logiciel calcule les temps de séjour et vitesses d'écoulement dans ces conduites. La Ville de Laval possède également une base de données des plaintes des résidents. Cette base de données permet de retrouver une plainte en fonction du plaignant : nom, adresse, numéro de téléphone et secteur; en fonction de la nature de la plainte : maladie, goût, odeur, particules ou dépôts, couleur, pression et en fonction du type de bâtiment : uni-familial, duplex, multi-logements. Les résultats des analyses effectuées sont également notés. Ce sont ces bases de données qui ont été consultées afin de définir les problèmes de corrosion à résoudre. Lorsque le problème est défini, ces bases de données ont permis de choisir le secteur d'essai.

3.1.2. Choix de l'inhibiteur de corrosion

L'inhibiteur de corrosion utilisé dans le réseau de distribution d'eau potable est le silicate de sodium de type N ($\text{Na}_2\text{O} : 3,3 \text{ SiO}_2$). Il a été choisi suite à des essais en bêcher, où il a été comparé à un ajustement de pH et d'alcalinité, à l'addition d'orthophosphate et à l'addition de polyphosphate pour différentes conditions

d'application (tableau 3.1). Lors des essais, les effets des produits et les conditions d'application ont été testées sur des coupons de fer, de cuivre et de cuivre et plomb. Les coupons, suspendus à l'aide de crochet en PVC, sont immersés dans des récipients de verre hermétiquement fermés avec un couvercle de viton (Rompré et al. 1997). Le tableau 3.1 présente les résultats des essais en bécher avec les coupons en fonte grise. Ces résultats montrent l'efficacité relative des différentes méthodes de contrôle par rapport à une eau de référence semblable à celle distribuée par l'usine St-Rose à Ville de Laval soit une eau ozonée avec ajustement de pH à une valeur de 7,7 à l'aide de chaux. Dans la deuxième colonne du tableau 3.1, la concentration de fer total dans l'eau des béchers est comparée à celle dans les béchers contenant l'eau de référence. Cette efficacité relative est calculée de la façon suivante :

$$E_{Fe} = ([Fe]_r - [Fe]_e) / [Fe]_e * 100\% \quad (\text{Eq. 3.1})$$

E_{Fe} = Efficacité relative sur la dissolution du fer

Fe_r = Concentration de fer en mg/L dans l'eau de référence

Fe_e = Concentration de fer en mg/L suite à l'utilisation d'une stratégie de contrôle

Dans la troisième colonne du tableau 3.1, les pertes de poids des coupons de fonte grise immersés dans les béchers sont comparées avec les pertes de poids des coupons de fonte grise immersés dans l'eau de référence. Cette efficacité relative est calculée de la façon suivant :

$$E_{PP} = ([PP]_r - [PP]_e) / [PP]_e * 100\% \quad (\text{Eq. 3.2})$$

E_{PP} = Efficacité relative sur la perte de poids

PP_r = Pertes de poids des coupons immersés dans l'eau de référence

PP_e = Pertes de poids des coupons immersés dans l'eau ayant subi un traitement anti-corrosion

Les meilleurs résultats ont été observés dans le bâcher contenant 10 mg/L de silicate exprimé sous forme de SiO_2 et un pH final de 9,0. Pour cet essai, il y avait 41,9% moins de fer total dans l'eau et une perte de poids 9% plus faible que dans l'eau de référence. C'est cette dernière condition qui est testé sur le réseau de distribution.

Tableau 3. 1 : Résultats des essais en bécher pour de la fonte grise (Rompré et al. 1997)

Conditions d'incubation en présence de coupons en fonte grise	Efficacité par rapport à l'eau de référence ¹ (%) Fer total	Efficacité par rapport à l'eau de référence ¹ (%) Perte de poids
Ajustement de pH et d'alcalinité		
pH 9,0 (Ca(OH) ₂)	3,1	2,6
pH 7,7 (NaOH)	4,3	2,4
pH 9,0 (NOH)	3,6	Aucune
Alcalinité élevée pH 7,7 (NaOH)	34,2	Aucune
Alcalinité élevée pH 9,0 (NaOH)	31,0	4,2
Aération 24 heures (pH final=7,7)	25,3	11,3
L'orthophosphate		
OrthoP 0,5 mg/L (pH final=6,6)	0,8	Aucune
OrthoP 2 mg/L (pH final=6,5)	14,9	Aucune
pH 7,7 + orthoP 2 mg/L (pH final=7,5)	Aucune	Aucune
Le polyphosphate		
PolyP 0,5 mg/L (pH final=6,5)	Aucune	0,2
PolyP 2 mg/L (pH final=6,5)	14,7	Aucune
pH 7,7 + polyP 2 mg /L (pH final=7,5)	1,0	3,0
Le silicate de sodium de type N		
Silicate 5 mg/L (pH final = 6,9)	9,7	3,9
Silicate 10 mg /L (pH final =7,2)	36,4	3,9
Silicate 5 mg/L (ramené au pH initial de 6,6)	9,7	Aucune
Silicate 10 mg/L (ramené au pH initial de 6,6)	42,2	Aucune
pH 7,3 + Silicate 10 mg/L (pH final 9,0)	41,9	9,0

¹ Eau ozonnée et pH de 7,7

3.1.3. Choix du secteur d'essais

3.1.3.1. Critère de sélection du site d'essais.

Le secteur d'essais est choisi en fonction des critères suivants : a) le secteur doit pouvoir être aménagé pour les essais à peu de frais; b) l'endroit où l'injection de silicate est fait doit être facile d'accès et sécuritaire; c) le secteur est isolable du reste du réseau de distribution à l'aide de vannes; d) le secteur est bien documenté, en d'autres mots, les sens d'écoulement et les temps de séjour de l'eau, les matériaux, l'âge, et le diamètre des conduites sont connus; e) dans ce secteur, le réseau de distribution est construit à l'aide de conduite en fonte grise non revêtu ce qui occasionne des problèmes de corrosion qui conduisent à des pertes de capacité hydraulique et des eaux colorées; f) les problèmes rencontrés, dans ce secteur, sont connus et les plaintes des résidents bien documentées; g) finalement, il y a suffisamment de points d'échantillonnage pour bien suivre l'impact de l'ajout de silicate. Les critères de sélections pour chacun des points d'échantillonnages sont :

- accès facile par l'intermédiaire de chambre de vannes;
- point situé sur une conduite dans laquelle circule de l'eau contenant du silicate (point de suivi);
- point situé sur une conduite dans laquelle circule de l'eau sans silicate (point témoin);
- point de suivis sur des conduites de différents diamètres;
- points de suivis sur des conduites où les temps de séjour sont différents;
- points témoins où la qualité de l'eau est la même qu'aux points de suivi, c'est à dire une alimentation par la même usine de traitement et temps de séjour similaire;
- et points témoins sur des conduites de même matériaux et diamètre que les conduites sur lesquelles sont installés les points de suivi.

3.1.3.2. Description du réseau de Ville de Laval

La Ville de Laval est alimentée par trois usines de traitement : l'usine St-Rose qui puise son eau brute dans la rivière des Mille-Îles et les usines Chomedey et Pont-Viau qui puisent leurs eaux brutes dans la rivière des Prairies. Le réseau de distribution comprend plus de 1283 km de conduites, principalement en fonte grise et fonte ductile. Le tableau 3.2 illustre la répartition des conduites en fonction de leurs matériaux.

Tableau 3. 2 :Répartition des conduites en fonction de leurs matériaux (Lafrance et al. 1991)

Matériaux	% Relatif	Longueur (km)
Fonte grise	60,8%	780
Fonte ductile	29,4%	377
Hyprescon	7%	90
Acier	2,6%	33
PVC	0,2%	3

3.1.3.3. Description de l'usine Pont-Viau

Le secteur à l'étude est situé dans le quartier St-Vincent de Paul. Il est alimenté uniquement par l'usine Pont-Viau. La figure 3.1 illustre cette filière de traitement. De mai à octobre 1997, l'eau produite, par cette usine, a les caractéristiques moyennes suivantes : alcalinité de 19,2 mg CaCO₃/L, dureté de 48 mg CaCO₃/L, pH de 7,3 et turbidité de 0,11 UTN. Cette eau est agressive puisque son pH d'équilibre, selon la formule de Langelier, est de l'ordre 8,9.

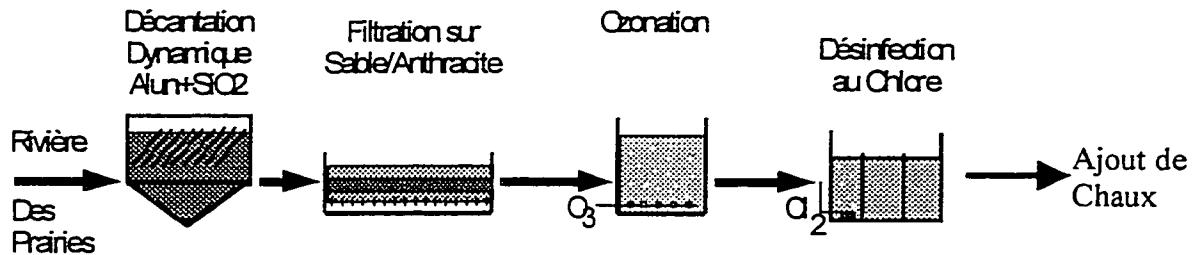


Figure 3. 1 : Schéma de l'usine Pont-Viau (135 000 m³/d)

3.1.3.4. Description du secteur d'essais (quartier St-Vincent de Paul)

Le secteur à l'étude se situe dans le quartier St-Vincent de Paul à Ville de Laval (Québec, Canada). Il est limité au nord par la voie ferrée du Canadien Pacifique, au sud par la rue de la Fabrique, à l'ouest par l'autoroute 25 et à l'est par l'avenue Belleville. La figure 3.2 présente une carte de ce secteur d'étude avec le nom des rues, les numéros des points d'échantillonnage, les diamètres des conduites, les sens normal de l'écoulement (flèche pleine) et les sens de l'écoulement après isolement du secteur (flèches pointillées). Dans ce secteur, le réseau de distribution alimente surtout des résidences uni-familiales et multi-familiales. La population desservie est estimée à environ 1500 personnes. Treize points d'échantillonnage ont été aménagés dans ce secteur et trois points témoins à l'extérieur de ce secteur.

En temps normal, deux postes de rechloration alimentent le secteur : le poste St-Martin et le poste Concorde. De l'usine Pont-Viau, les eaux circulent pendant 12 heures dans le réseau de distribution avant d'atteindre le poste St-Martin, mais seulement 5 heures avant d'atteindre le poste Concorde. Le poste St-Martin alimente la partie nord du

secteur alors que le poste Concorde alimente la partie sud du secteur. Les temps de séjour théorique, à partir de l'usine Pont-Viau, pour les différents points d'échantillonnage, calculé à l'aide du logiciel RINCAD (Baribeau 1995), sont résumés dans le tableau 3. 3.

Afin d'isoler le secteur à l'étude, les vannes au sud sur la rue de la Fabrique et au Nord sur la rue Chénier sont fermées. De plus, afin d'assurer un régime d'écoulement continu et de prévenir d'éventuels problèmes causés par l'ajout de silicate, quatre purges sont installées sur les conduites sous la rue de la Fabrique (points 10, 11, 12 et 13). Le secteur ainsi modifié est alimenté en totalité par la station de rechloration St-Martin. Ces modifications ont causé une augmentation des temps de séjour pour l'ensemble des points de suivis. Ces temps de séjour sont résumés dans la dernière colonne du tableau 3.3. Il faut noter que ces temps de séjour ont été estimés à partir de la demande en eau exercée par les résidents du secteur à l'étude. C'est la somme du temps de séjour entre l'usine Pont-Viau et le poste St-Martin et le temps de séjour entre le poste St-Martin et les différents points de suivis.

L'ensemble des conduites du secteur d'essais sont en fonte grise, à l'exception de la conduite sous la rue Liebert qui est en fonte grise et en fonte ductile. Les conduites sous les rues Breault, Liebert et Chénier (points 6,7 et 8) ont été nettoyées à l'aide d'acide phosphorique entre 1987 et 1990. La conduite sous la rue Jean XXIII a été mécaniquement nettoyée, entre les rues Lavigne et de la Fabrique, le 17 juin 1997. Le tableau 3.3 présente un résumé des caractéristiques des conduites ainsi que leur diamètre respectif.

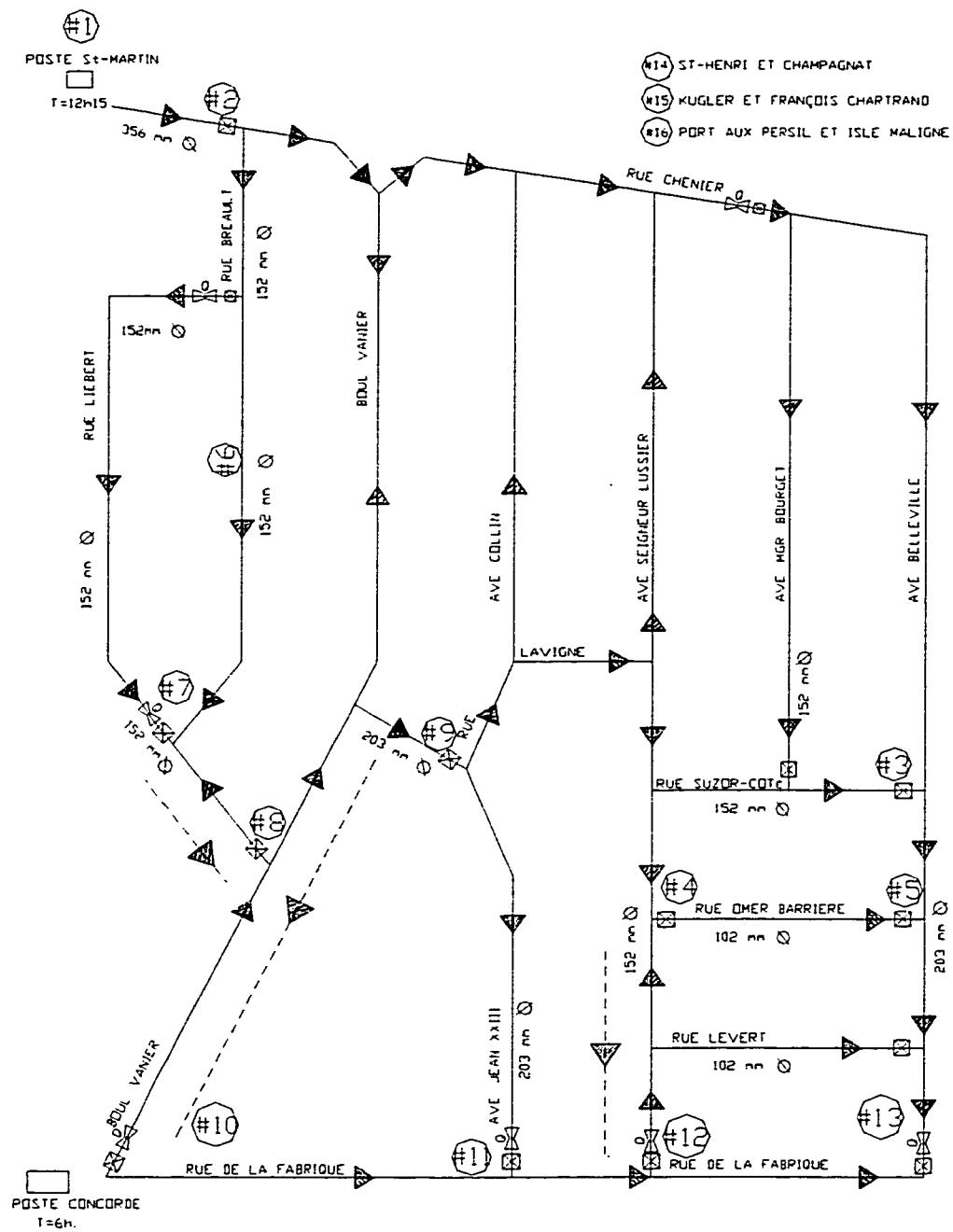


Figure 3. 2: Carte du réseau

Tableau 3. 3 : Caractéristiques des conduites aux points de suivis

#	Nom de rue	Informations	Diamètre des conduites (mm)	Temps de séjour hydraulique simulés (heures) ¹	Temps de séjour hydraulique estimés (heures) ²
0	Poste St-Martin	amont de l'inhibiteur point témoin		12	12
1	Poste St-Martin	point d'injection entrée du secteur		12	12
2	Chénier		350	12,5	12,5-13
3	Suzor-Coté		150	7-9	14-16
4	Omer-Barrière	petit diamètre	100	7-9	14-16
5	Omer-Barrière	petit diamètre	100	7-9	16-17
6	Breault	résidence multi-familiale	150	13	13-14
7	Liebert	fonte grise et ductile	150	13	13-16
8	Liebert	fonte grise et ductile	150	13	14-15
9	Jean XXIII		200	13	13-14
10	Bd Vanier	conduite purgée en continu non utilisée	300	6	---
11	Jean XXIII	conduite écurée et purgée en continu	200	6-7	16-17
12	Seigneur Lussier	conduite purgée en continu	150	6,5	15-17
13	Belleville	conduite purgée en continu	200	7,0	15,5-17,5
14	St-Henri	point témoin hors secteur	150	9,7	---
15	François Chartrand	point témoin hors secteur	150	12,7	---
16	Isle Maligne	point témoin hors secteur	150	15,8	---

¹ Vanne ouverte ² Vannes fermées et purges

3.1.4. Interventions dans le secteur

Afin de mettre en œuvre et de suivre l'ajout des silicates dans le secteur d'essais, plusieurs travaux ont été effectués sur le réseau. Avant l'addition de silicate, les travaux effectués sont : les rinçages unidirectionnels des conduites, les essais de performance hydraulique, l'installation de purges et de compteurs, la fermeture de vannes, le nettoyage mécanique de la conduite sous la rue Jean XXIII et le passage de la caméra. Après cinq mois d'injection de silicate, certains travaux ont été répétés soit : les essais de performance hydraulique et le passage de la caméra. De plus le prélèvement et l'analyse de dépôts ont été effectués. Le tableau 3.4 montre ces interventions en fonction de la date et en fonction des jours après l'ajout de silicate.

Tableau 3. 4 : Interventions effectuées dans le secteur à l'étude

Date	Jours après ajout de silicate	Interventions
23 mai 97	-26	État initial du réseau
27 mai 97	-22	Rinçage unidirectionnel du secteur
02 juin 97	-16	Essais de performance hydraulique dans le secteur
06 juin 97	-12	Installation des arrêts de corporation et mise en route de purges
07 juin 97	-11	Fermeture des vannes secteur sud
17 juin 97	-1	Fermeture des vannes du secteur nord
		Nettoyage mécanique de la conduite sous la rue Jean XXIII
		Passage de la caméra avant et après le nettoyage
		Baisse de pH à l'usine pH = 7,3
18 juin 97	0	Début de l'ajout de silicate
27 juin 97	9	Mise en route de la rechloration
19 août 97	62	Baisse du pH à l'usine Pont Viau : de 7,3 à 7,0
20 août 97	63	Augmentation de l'injection de silicate : de 4 à 7 mg SiO ₂ /L
15 octobre 97	119	Fin de l'injection de silicate
21 octobre 97	125	Prélèvement de dépôts dans la conduite sous la rue Belleville
		Arrêt de la rechloration
		Passage de la caméra dans la conduite sous la rue Jean XXIII
		Prélèvement de dépôts dans la conduite sous les rues Belleville et Jean XXIII

3.1.4.1. Rinçage unidirectionnel

Dans le but de nettoyer les conduites du secteur d'essais avant l'ajout de silicate, des rinçages unidirectionnels ont été effectués. Un rinçage est unidirectionnel lorsque l'eau dans la conduite circule dans un seul sens, soit, lorsque cela est possible, dans le sens habituel de l'écoulement. La vitesse de l'eau est alors d'environ 1m/s. La procédure générale suivie pour effectuer un rinçage des conduites est la suivante :

- déterminer le sens habituel de l'écoulement de l'eau;
- imposer un seul sens d'écoulement en fermant les vannes appropriées;
- isoler le tronçon en fermant les vannes appropriées;
- et ouvrir un poteau d'incendie et purger l'eau jusqu'à ce qu'elle soit claire.

La procédure est ajustée pour tenir compte des caractéristiques particulières de chaque tronçon. La figure 3.3 est une section de carte illustrant les sens d'écoulements, l'emplacement des vannes et poteaux d'incendies pour la conduite sous la rue Jean XXIII. La procédure spécifique utilisée pour purger la conduite Jean XXIII est comme suit (figure 3.3) :

- fermer les vannes no 443 et 401. Cela assure normalement une vitesse de 1m/s, un seul sens d'écoulement et isole le tronçon;
- ouvrir le poteau d'incendie no 120 pour purger la conduite jusqu'à l'obtention d'une eau claire;
- ouvrir les vannes no 443 et 401 et fermer le poteau d'incendie no 120;
- recommencer la procédure en imposant un écoulement de sens inverse pour assurer un nettoyage complet de la conduite entre le poteau d'incendie no 120 et la vanne no 401;
- fermer les vannes no 402, 403, 443 et 444. Cela assure une normalement une vitesse de 1m/s, un seul sens d'écoulement et isole le tronçon;
- ouvrir le poteau d'incendie no 129 pour purger la conduite jusqu'à l'obtention d'une eau claire;

- et ouvrir les vannes no 402 et 403, 443 et 444 et fermer le poteau d'incendie no 129.

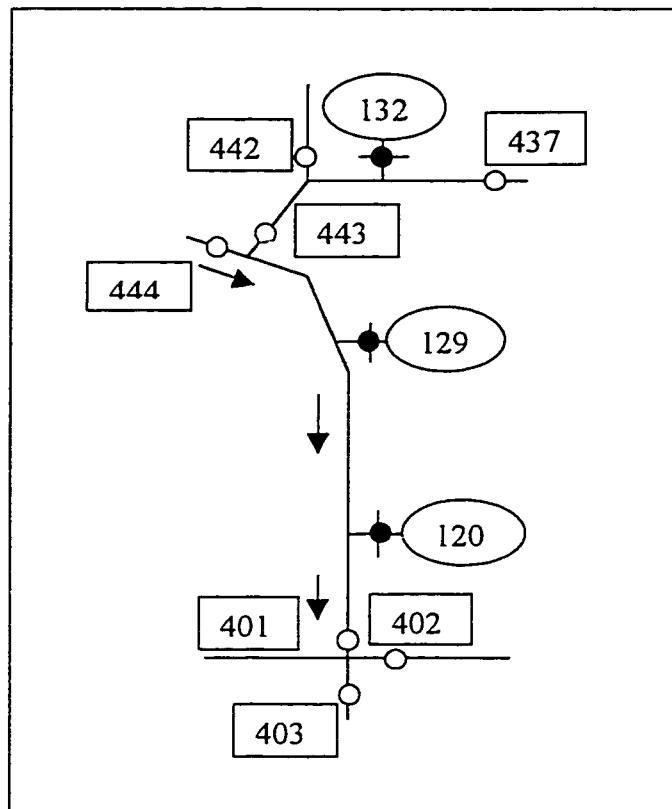


Figure 3. 3 : Description d'un rinçage undirectionnel

3.1.4.2. Essais de performance hydraulique

L'ajout de silicate peut-il redonner à de vieilles conduites leurs capacités hydrauliques initiales ? Les parois intérieures des conduites neuves sont lisses et ont un coefficient de friction relativement faible. Avec le temps, la corrosion, en dégradant ces parois, augmente le coefficient de friction et diminue le diamètre effectif. Ces changements se traduisent par une augmentation des pertes de charges et une perte de capacité hydraulique. En posant l'hypothèse que le silicate va dissoudre la couche de corrosion, on peut supposer qu'il améliorera la capacité hydraulique des vieilles conduites. Pour vérifier cette hypothèse, des essais de performance hydraulique ont été faits de façon identique avant et après l'ajout de silicate.

Un essai de performance hydraulique comprend des mesures des pressions statiques et dynamiques. Pour mesurer la pression statique, il faut ouvrir la vanne d'arrêt du poteau d'incendie et mesurer la pression à l'aide d'un manomètre. Pour mesurer la pression dynamique, il faut isoler le tronçon et favoriser un écoulement unidirectionnel. La pression est ensuite mesurée à l'aide d'un tube de pitot installé sur le poteau d'incendie. Après installation du tube de pitot, le poteau d'incendie est ouvert avant que les lectures de pressions dynamiques soient faites.

La procédure spécifique utilisée, par la ville de Laval, pour les essais de performance hydraulique sur la conduite sous la rue Jean XXIII est comme suit (figure 3. 3) :

- fermer les vannes no 444, 442 et 437;
- installer un manomètre sur la bouche du poteau d'incendie no 129;
- ouvrir la vanne d'isolement du poteau d'incendie no 129 et lire la pression statique sur le manomètre (**P3**);
- ouvrir ensemble les poteaux d'incendie no 132 et 120 (une bouche seulement);
- mesurer la pression dynamique à l'aide du tube de pitot au poteau d'incendie no 132 (**P1**) et 120 (**P2**);

- lire la pression statique sur le manomètre installé sur le poteau d'incendie no 129 (P4);
- fermer lentement et complètement la vanne du poteau d'incendie no 120;
- fermer partiellement la vanne du poteau d'incendie no 132 pour réduire le débit de purge;
- ouvrir lentement les vannes no 444, 442 et 437;
- lorsque l'eau est claire fermer complètement la vanne du poteau d'incendie 132;
- lire la pression statique sur le manomètre installé sur le poteau d'incendie 129 (P5);
- et fermer lentement la vanne du poteau d'incendie 129.

(P1) Pression dynamique au premier poteau d'incendie (kPa)

(P2) Pression dynamique au deuxième poteau d'incendie (kPa)

(P3) Pression statique au début de l'essai (kPa)

(P4) Pression statique résiduelle (kPa)

(P5) Pression statique à la fin de l'essai (kPa)

Le débit total purgé, en tenant compte que les bouches des poteaux d'incendie ont un diamètre standard de 60 mm, peut être évaluée ainsi :

Débit au premier poteau d'incendie :

$$Q_1 \text{ (litres/min.)} = 241,4 \sqrt{P_1} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Débit au deuxième poteau d'incendie :

$$Q_2 \text{ (litres/min.)} = 241,4 \sqrt{P_2} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Débit total :

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Il est nécessaire de ramener ce débit total purgé avec une pression résiduelle sur une base commune de pression afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans plusieurs secteurs. La pression résiduelle requise est de 138 kPa. Cette pression est suffisante pour combattre les pertes par friction dans une conduite de 150 mm de diamètre, les pertes à

la bouche d'un poteau d'incendie et les pertes dans un boyau d'arrosage d'incendie. Le débit total disponibles est calculé ainsi :

Pression résiduelle disponible :

$$D_1 = P_3 - P_4 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Pression de fonctionnement disponible :

$$D_2 = P_3 - 138 \text{ kPa} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

En modifiant la formule de Hazen-Williams, on peut calculer le débit théorique à une pression résiduelle de 138 kPa :

$$Q_4 = Q_3 \sqrt{D_2/D_1} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Le débit disponible ou, dans ce cas-ci, la capacité hydraulique de la conduite se calcule ainsi:

$$Q = Q_4 + 0,10(Q_4 - Q_3) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

3.1.4.3. Isolement du secteur à l'étude et mise en route de purges

Le silicate peut-il générer des effets négatifs lorsqu'il est ajouté dans un réseau réel? Lorsque le silicate est ajouté dans des conduites corrodées, il est possible qu'il déstabilise, de façon non contrôlée, les produits de corrosion fixés sur les parois des conduites et ainsi favoriser la dégradation des qualités esthétique de l'eau. Pour minimiser ces effets négatifs et pour faciliter le suivi des performances du silicate, le secteur est isolé. Au nord du secteur, les vannes sur la rue Breault et la rue Collin au nord de la rue Chénier sont fermées. Au sud, les vannes aux intersections des rues de la Fabrique et Vanier (point 10), des rues de la Fabrique et Jean XXIII (point 11), des rues de la Fabrique et Seigneur Lussier (point 12) et des rues de la Fabrique et Belleville (point 13) sont fermées (figure 3.2).

Quatre purges sont mises en route dans le secteur. Elles se situent aux points 10, 11, 12 et 13 (figure 3.2). Ces purges assurent un écoulement continu et favorise une distribution de l'inhibiteur dans tout le secteur à l'étude. De plus, elles servent à contrer les effets, sur la qualité de l'eau, d'éventuels décrochages de produits de corrosion causés par l'ajout de silicate ou par le nettoyage mécanique de la conduite Jean XXIII.

L'installation des purges a été faite de la manière suivante : un tuyau de cuivre de 25 mm de diamètre est installé sur l'arrêt de corporation de la conduite, il est dirigé vers l'égout dans une tranchée de 150 mm de profondeur creusée dans la rue. L'installation d'un compteur d'eau permet de connaître le volume total purgé et le débit instantané. Le débit de purge est ajusté à l'aide d'une vanne à bille.

3.1.4.4. Nettoyage mécanique d'une conduite

Le silicate peut-il former une couche protectrice et stabiliser une conduite après un nettoyage mécanique ? Certains auteurs rapportent que le silicate est efficace pour protéger des matériaux neufs où la couche de corrosion est en formation. Le silicate en s'adsorbant sur la paroi interne de la conduite formerait une couche protectrice (Katsanis et al. 1986); (Lehrman et Shuldener 1952) et (Lehrman et Shuldener 1951). Afin de vérifier cette hypothèse, la conduite Jean XXIII a été mécaniquement nettoyée. Pour réaliser ce nettoyage, un camion VAN-CON muni d'un tuyau de 19 mm de diamètre et d'une buse a été utilisé. La buse rotative à jet axial a une poussée de 13 790 kPa avec une pression résiduelle au bout de la buse de 8 274 kPa à 10 343 kPa. Une pompe dans le camion refoule l'eau jusqu'à la buse. L'eau, propulsée de façon axiale sur la paroi de la conduite, fait avancer le tuyau et la buse. Le camion fait d'abord glisser la buse jusqu'à mi-chemin dans la conduite, puis la ramène lentement. C'est lors de ce retour que la buse rotative décroche les tubercules de corrosion. Au bout de la buse des cavités obliques rotatives permettent de décrocher avec un jet à haute pression les zones non touchées initialement par la buse.



Figure 3. 4 : Camion et buse pour le nettoyage mécanique d'une conduite

Pour faire un nettoyage mécanique il faut :

- isoler le tronçon, en fermant les vannes appropriées;
- ouvrir la vanne d'un poteau d'incendie pour faire baisser la pression;
- enlever le porte opercule de la vanne;
- pomper le surplus d'eau de la chambre de vanne;
- insérer la buse dans la conduite par l'ouverture laissée par la vanne;
- passer la buse à plusieurs reprises;
- et procéder à un rinçage unidirectionnel par étape en purgeant l'eau par le poteau d'incendie le plus rapproché en premier et en purgeant par la suite l'eau par le poteau d'incendie le plus éloigné pour assurer de ne pas bloquer les poteaux d'incendies.

3.1.4.5. Passage de la caméra

Le silicate laisse-t-il des traces visibles, dans la structure macroscopique des dépôts? Afin de visualiser l'état des parois internes des conduites, une caméra See Snake de Rigid noir et blanc avec moniteur, centreur et 60 mètres de câble, a été introduite dans la conduite sous la rue Jean XXIII avant le nettoyage mécanique, immédiatement après le nettoyage mécanique et à la fin des six mois de l'étude. Ces photos permettent de voir dans quel état sont les parois intérieures des conduites après différentes étapes du projet.

Pour passer une caméra dans une conduite il faut :

- isoler le tronçon, en fermant les vannes appropriées;
- ouvrir la vanne d'un poteau d'incendie pour faire baisser la pression;
- enlever le porte opercule de la vanne;
- pomper le surplus d'eau de la chambre de vanne;
- et insérer manuellement la caméra dans la conduite par l'ouverture laissée par la vanne.

3.1.4.6. Analyse de dépôts

Le silicate laisse-t-il des traces visibles, dans la structure microscopique des dépôts? Afin de vérifier si le silicate s'adsorbe ou modifie la structure microscopique de la couche de corrosion, des analyses de dépôt ont été effectuées. Les dépôts sont prélevés, à la fin du projet, dans les conduites sous les rues Belleville et Jean XXIII lors du passage de la caméra. Ces dépôts, sous forme de tubercules, ont été envoyés à un laboratoire spécialisé pour l'analyse microscopique. Les dépôts ont été analysés à l'aide de stéréoscopie, de microscope électronique polariser avec analyseur au rayon X (EDXRA) et par tests chimiques et physiques.

3.1.5. Injection de silicate

L'injection de silicate est faite à partir d'un poste de rechloration. Deux bassins : le premier contenant 1850 L de silicate de sodium de type N ($\text{Na}_2\text{O} : 3,3 \text{ SiO}_2$) et un second contenant 100 L d'eau de dilution alimentent deux pompes doseuses *Metering Wallace Thierman*, Series 44, branchées à deux moteurs *Beel electronics SCR Controls*, 90 V DC, 150 R ohms, 46 kV, 1725 rpm et 1/3 HP de *General electric* et contrôlés par deux contrôleur *Beel series 600 DC Drive Model 609*, 15 A, 250 V. Le jour, un contrôleur digital *E5AK* jumelé au débitmètre du poste de rechloration permet d'ajouter des concentrations de silicate de sodium proportionnelles au débit dans la conduite alimentant le secteur à l'étude. La nuit, les valeurs de débit étant sous le seuil de détection du débitmètre, soit 700 L/min, un débit fixe de silicate de sodium d'environ 8 ml/min est injecté afin d'obtenir un ajout cible de silicate d'environ 4 mg SiO_2/L . Vers la fin de l'été, une faible demande en eau entraîne fréquemment des débits de jour inférieurs au seuil de détection du débitmètre, un débit de jour fixe d'environ 18 ml/min et un débit de nuit fixe d'environ 10 ml/min de silicate de sodium sont alors injectés afin d'obtenir un ajout cible de silicate d'environ 7 mg/L. Notons que le bassin de silicate de sodium doit être couvert puisque ce produit cristallise rapidement au contact avec l'air.

3.1.6. Suivi de l'impact de l'ajout de silicate

Afin d'assurer un suivi serré de l'impact de l'ajout de silicate dans le secteur à l'étude, 30 campagnes d'échantillonnage périodique et 21 campagnes d'échantillonnage ponctuel ont été effectuées du 23 mai au 22 octobre 1997. Les tableaux 3.5 et 3.6 résument les conditions dans le secteur, les dates des prélèvements, les points et les paramètres analysés pour les campagnes d'échantillonnage périodiques et ponctuels.

Tableau 3. 5 : Caractéristiques des échantillonnages périodiques

Tableau 3.5 : Caractéristiques des échantillonnages périodiques. (suite)

Condition du réseau	Date	Points analysés	pH	Tem	Turb	Fe	SiO ₂	Cl ₂	BHA & Coli
Moyenne de l'ajout de silicate ≈ 7,3 mg SiO ₂ /L	04/09/97	2 à 5, 7, 9, 11, 13 et 14			✓	✓			
	05/09/97	0 à 9 et 11 à 16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	12/09/97	4, 5, 9, 11 et 13	✓		✓	✓	✓		
	18/09/97	0, 5, 7 à 9, et 11 à 13	✓		✓	✓	✓		
	19/09/97	0, 5, 7 à 9, et 11 à 13	✓		✓	✓	✓		
	30/09/97	0, 1, 4, 5, 9, 11 et 13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	07/10/97	0 à 9 et 11 à 16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silicate arrêté	16/10/97	0, 1, 4, 5, 9, 11 et 13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Vannes ouverte	22/10/97	0, 1, 4, 5, 9, 11 et 13	✓	✓	✓	✓	✓		

Tableau 3.6 : Caractéristiques des échantillonnages ponctuel.

Condition du réseau	Date	Points analysés	Fe	SiO ₂	Cu	Pb
Moyenne de l'ajout silicate ≈ 3,7mg SiO ₂ /L	19/07/97	11	✓	✓		
	22/07/97	Résident 11	✓	✓		
	25/07/97	5	✓	✓		
	30/07/97	Résident 5	✓	✓		
	01/08/97	7	✓	✓		
	06/08/97	1		✓		
	15/08/97	1		✓		
Moyenne de l'ajout de silicate ≈ 7,3 mg SiO ₂ /L	19/08/97	1		✓		
	21/08/97	1		✓		
	25/08/97	1		✓		
	05/09/97	1		✓		
	09/09/97	1		✓		
	10/09/97	1		✓		
	11/09/97	1		✓		
	19/09/97	5, Résident 5	✓	✓		
	22/09/97	5, Résident 5	✓	✓		
	30/09/97	4, Résident 4	✓	✓		
	2/10/97	4, Résident 4	✓	✓		
Vanne ouverte sans silicate	7, 9/10/97	11, Résident 11	✓	✓		
	9/10/97	4, Résident 4			✓	✓
	22/10/97	4, Résident 4			✓	✓

3.2. Méthode d'échantillonnage

3.2.1. Accès aux points d'échantillonnage

L'équipement permettant l'accès aux points d'échantillonnage est un trou d'homme et une chambre de vanne, muni d'un arrêt de corporation installé sur la conduite. Le prélèvement est fait à l'aide d'un appareil de pitot à ouverture multiple, développé à l'École Polytechnique (Allard 1997). Un tube d'échantillonnage stérile permet d'amener l'eau jusqu'au camion où se font les prélèvements.

3.2.2. Préparation d'une campagne d'échantillonnage

Lors de la préparation d'une campagne d'échantillonnage, il faut regrouper le matériel listé dans le tableau 3.7. Par la suite, il faut préparer les tubes d'échantillonnage en suivant les étapes décrites dans le tableau 3.8. Enfin, il faut préparer la verrerie et procéder à l'échantillonnage suivant les étapes du tableau 3.9.

Tableau 3. 7 : Matériels requis pour la collecte et l'analyse d'échantillons sur le terrain

Matériels	Vérifier (✓)			
	Date	Date	Date	Date
Prise des échantillons				
Camion, masse, pic et cônes				
Bottes, casques de sécurité et dossards				
Bonbonne de gaz propane, chalumeau et allumeur				
Tubes d'échantillonnages				
Transport des échantillons				
Bouteilles de plastiques stériles pour microbiologie 250 ml				
Bouteilles de plastiques 250 ml (Alcalinité et Dureté)				
Bouteilles de plastiques contenant de l'acide nitrique 250 ml (Fer total)				
Bouteilles de plastiques 125 ml (silicate)				
Vials (turbidité)				
Ice packs				
2 Glaciaires				
Équipement général				
1 L d'eau distillée				
2 Pissettes				
Éthanol				
Eau de Javel diluée (500mg/L)				
Chiffons				
Poubelle				
Sacs de poubelle				
2 accumulateurs de recharge 9 volt				
Gants plastiques				
Feuilles de rentrées de données				
Carte du réseau				
Calculatrice, crayons				
Chlore résiduel				
DPD no.1 en poudre				
Cristaux d'iodure de potassium KI				

Tableau 3.7 : Matériels requis pour la collecte et l'analyse d'échantillons sur le terrain (suite)

Matériels	Vérifier (✓)			
	Date	Date	Date	Date
Chlore résiduel (suite)				
Solution normalisé de FAS 1 : 10 et Burette				
1 Erlenmeyer de 250 ml				
1 Burette				
1 Cylindre gradué 100 ml				
2 Petites cuillères de plastiques (1 ml)				
CO₂				
1 Erlenmeyer de 500 ml et bouchon				
Indicateur phénolphtaléine				
Soude (NaOH)(0,02 éq./L)				
1 Porte burette et burette				
1 Entonnoir				
Oxygène dissous				
Solution de sulfate manganeux (2 ml/éch.)				
Solution alcaline d'iodure et de nitrure (2 ml/éch.)				
Acide sulfurique concentré H ₂ SO ₄ (2 ml/éch.)				
Solution d'amidon (1 ml/éch.)				
Solution de thiosulfate 0,025 éq./dm ³ (12 ml/éch.) et Burette				
2 Flacons à DBO				
3 Pipettes gradués de 5 ml				
1 Pompe pipette				
1 Erlenmeyer 500 ml				
1 Becher 250 ml (plastique)				
1 Cylindre 250 ml				
pH				
pHmètre				
Solution tampon pH=7				
Solution tampon pH=10				
Petit tournevis				
Électrode				
1 Bêcher 250 ml (verre)				

Tableau 3.7 : Matériels requis pour la collecte et l'analyse d'échantillons sur le terrain (suite)

Matériels	Vérifier (✓)			
	Date	Date	Date	Date
Température				
1 Thermomètre				
Débit				
1 Cylindre 1 L				
Échantillonneurs automatiques				
É. Aut. avec ou sans acide				
2 cylindre de 1 L				
Attaches				
Paraffines				
1 Minuterie				
1 Electrovanne				
1 Fil électrique orange				
Robinet				
Washers				
2 Batteries chargés				
Attaches bungi				
Sac pour déchet				
Clef anglaise et clef à molette				
Corde				

Tableau 3.8 : Préparation des tubes d'échantillonnage

Étapes	Préparations requises
Désinfection des tubes	
1	Désinfecter les tubes à l'aide d'une solution 125mL HCL 4% / 10L d'eau du robinet.
2	Une pompe péristaltique refoule la solution à l'intérieur des tubes.
3	Laisser Trempé les tubes pendant 24 heures.
Installation des tubes	
4	Installer les tubes sur les pitots 24 heures précédant l'échantillonnage.
5	Brûler l'extrémité du pitot avec un brûleur à gaz.
6	Rincer les tubes aux points d'échantillonnage pendant 5 à 10 minutes à un débit de 1L/min.
7	Fermer le bout des tubes à l'aide d'une pellicule plastique.

Tableau 3, 9 : Préparation de la verrerie et procédure d'échantillonnage

Paramètres analysés	Alcalinité Dureté	Chlore	Cuivre et Plomb	Fer	Oxygène dissous	pH et Temp	Silicates	Turbidité	BHA Coliforme
Lieu	Labo-ratoire	Terrain	Labo-ratoire	Labo-ratoire	Terrain	Terrain	Labo-ratoire	Labo-ratoire	Labo-ratoire
Types de contenant	Bouteilles plastiques 250 ml	Erlenmeyer 250 ml	Bouteilles plastiques 250 ml	Bouteilles plastiques 250 ml	Flacons à DBO	Bécher 250 ml	Bouteilles plastiques 125 ml	Vial en verre ambré bouchons téflon 40 ml	Bouteilles plastiques 250 ml
Méthodes de nettoyage	Savon Versa-Clean Eau du robinet Eau DM ¹	Savon Versa-Clean Eau du robinet Eau DM	HNO ₃ à 10% Eau du robinet Eau DM	HNO ₃ à 10% Eau du robinet Eau DM	Savon Versa-Clean Eau du robinet Eau DM	Savon Versa-Clean Eau du robinet Eau DM	HNO ₃ à 10% Eau du robinet Eau DM	Savon Versa-Clean Eau du robinet Eau DM	Eau du robinet Eau DM
Réactifs avant remplissage	Aucun	DPD	2,5 ml HNO ₃ à 50% /100 ml	2,5 ml HNO ₃ à 50% /100 ml	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	0,1 ml thiosulfate / 120 ml
Rinçage avant remplissage	Oui (3 fois)	Oui (3 fois)	Aucun	Aucun	Oui (3 fois)	Oui (3 fois)	Oui (3 fois)	Oui (3 fois)	Aucun

¹Eau DM : Eau déminéralisée

3.2.3. Description d'un échantillonnage périodique

Les campagnes d'échantillonnage périodique sont effectuées en moyenne une fois par semaine afin de vérifier quels paramètres sont influencés par l'ajout de silicate. Un tel échantillonnage doit être effectué par deux personnes et se déroule comme suit : les cônes sont installés pour éloigner la circulation automobile, le trou d'homme est ouvert, la pression est notée, les tubes préalablement insérés sur les pitots sont purgés à raison de 1 L/min. Après 1 minute d'écoulement les échantillons de fer, de turbidité, de BHA et de coliforme sont prélevés, ensuite le pH, la température, le CO₂, le chlore libre et total ainsi que l'oxygène dissous sont analysés sur place. L'échantillonnage se termine avec la prise des échantillons de silicate, d'alcalinité et de dureté. Cette procédure est répétée pour chaque points d'échantillonnage. Seul l'échantillonnage au robinet extérieur de la résidence multifamilial et aux points témoins (points 6, 14, 15 et 16) est différent. Pour ces points, la prise du premier échantillon, pour la mesure du fer, est effectuée après 10 minutes d'écoulement au lieu de 1 minute, par la suite le reste de la procédure demeure identique.

Afin de vérifier qu'une purge de 1 L/min. pendant 1 minute est suffisante pour l'échantillonnage du fer, deux échantillonnages du fer ont été effectués en fonction du temps. La figure 3.5 montre les concentrations de fer total en fonction du temps d'écoulement pour les points d'échantillonnage 2, 3, 5, 7 à 9 et 11 à 13. Cette figure démontre qu'une minute d'écoulement représente des conditions propices à l'échantillonnage, puisque les concentrations de fer total sont stables entre 1 minute et 5 minutes d'écoulement.

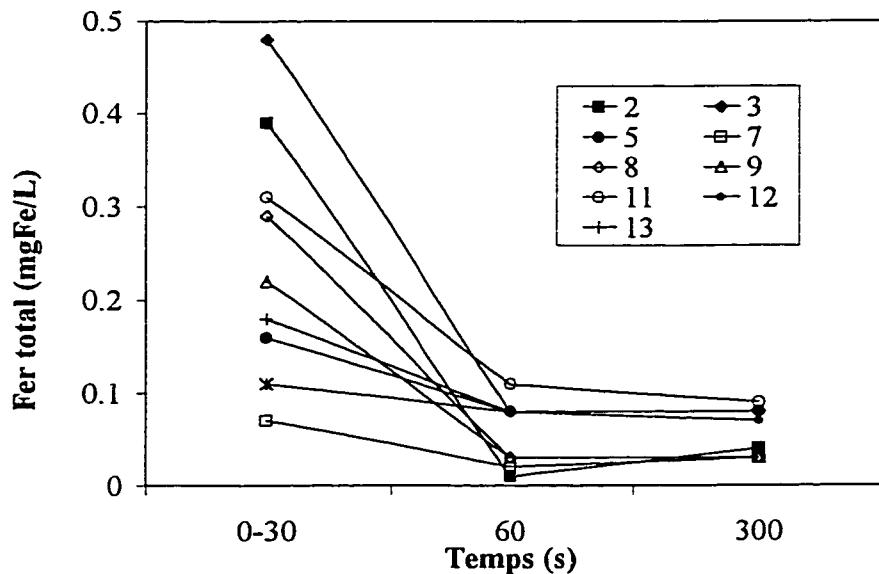


Figure 3. 5 : Concentration de fer total en fonction du temps d'écoulement aux points de suivis

3.2.4. Description d'un échantillonnage ponctuel

Deux types d'échantillonnage ponctuel sont effectués : a) le suivi des concentrations de fer et de silicate ; b) le suivi des concentrations de cuivre et de plomb.

Le suivi des concentrations de fer et de silicate s'effectue à l'aide d'un échantillonneur automatique ISCO 2700. Les échantillons sont prélevés directement dans la conduite par l'intermédiaire d'une chambre de vanne ou chez un résident. Quand le prélèvement s'effectue dans une chambre de vanne, l'échantillonneur automatique doit être installé de la façon suivante:

- le tube d'échantillonnage, installé sur le pitot, se déverse en continu ($Q < 1 \text{ L/min}$) dans le cylindre de prélèvement (1 L);
- le cylindre est fermé à l'aide d'une pellicule de paraffine;
- l'échantillonneur automatique, la batterie et le cylindre de prélèvement sont soutenus par une tablette accrochée à l'échelle;

- le tube d'aspiration de l'échantillonneur est inséré dans le cylindre de prélèvement et permet la prise des échantillons;
- et les échantillons sont prélevés à chaque heure pour une possibilité de 24.

L'échantillonneur automatique est installé de façon similaire lorsque les prélèvements sont faits au robinet extérieur d'un résident. De plus, chez un résident, une minuterie reliée à une électrovanne permet d'ouvrir et de fermer le robinet. Un raccord en T permet la prise simultanée d'échantillons provenant du robinet se déversant de façon continue ($Q \approx 0,3 \text{ L/min}$) et de façon ponctuelle ($Q \approx 5 \text{ L/min}$). La figure 3.6 montre un échantillonneur automatique installé chez un résident.

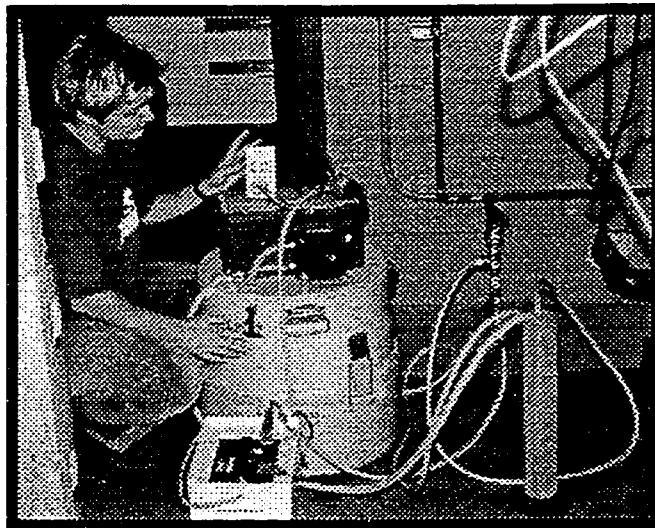


Figure 3. 6: Échantillonneur automatique installé chez un résident

Lors de la prise d'échantillons utilisés pour la mesure des concentrations de cuivre et de plomb, les échantillons sont prélevés, tôt le matin, alors que l'eau a séjourné pendant toute la nuit dans les conduites de plomberie domestique. Le robinet est ouvert et le débit ajusté à environ 5 L/min. Le premier échantillon est prélevé dans une bouteille, c'est l'eau écoulée lors des 30 premières secondes, le deuxième échantillon contient l'eau écoulée entre 30 et 60 secondes, les autres échantillons sont prélevés directement au robinet après 1 minute, 2 minutes, 5 minutes et 10 minutes d'écoulement.

3.2.5. Paramètres mesurés et méthodes d'analyses

Les principaux paramètres mesurés et les méthodes analytiques utilisées lors de cette étude sont résumé au tableau 3.10.

Tableau 3. 10 : Paramètres analysés et les méthodes utilisées

Paramètres analysés	Description de la méthode	Références
Alcalinité	Titrimétrie à l'acide sulfurique (0,02N)	(APHA et al. 1992)
Chlore libre résiduel	Colorimétrie à la DPD	(APHA et al. 1992)
CO ₂ libre	Titrimétrie à l'hydroxyde de sodium (0,02N)	(APHA et al. 1992)
Cuivre	Spectrométrie par adsorption atomique à la flamme	(APHA et al. 1992)
Dureté	Tritrimétrie à l'EDTA (0,01N)	(APHA et al. 1992)
Fer total	Colorimétrie à la phenanthroline (modifié)	(APHA et al. 1992)
Oxygène dissous	Méthode iodométrique (Winkler)	(APHA et al. 1992)
pH		
Plomb	Spectrométrie par adsorption atomique à la flamme	(APHA et al. 1992)
Silicate totaux	Colorimétrie au silicomolybdate	Méthode de Hach adapté de (APHA et al. 1992)
Température		
Turbidité		(APHA et al. 1992)
Bactérie hétérotrophes aérobies (BHA)	Filtration sur 0,45 µm, incubation sur R2A à 20°C, 7 jours	(APHA et al. 1992)
Coliforme	Filtration sur 0,45 µm, incubation sur M-ENDO à 35°C, 24 hrs.	(APHA et al. 1992)
Viabilité	Méthode au BacLight	(Boulos 1996)

CHAPITRE IV

4. Résultats et discussion

4.1. *Effet du silicate sur l'alcalinité, la dureté, le CO₂ et l'oxygène dissous*

L'alcalinité, la dureté, le CO₂ et l'oxygène dissous sont des paramètres de l'eau potable qui influencent la corrosion internes des conduites (AWWA 1991). L'alcalinité peut favoriser la formation d'un film protecteur sur les parois internes des conduites. Une valeur d'alcalinité élevée peut augmenter la dissolution du cuivre et du plomb. La dureté peut favoriser la formation d'un précipité de CaCO₃ sur les parois internes des conduites. Le CO₂ et l'oxygène dissous peuvent augmenter les vitesses de corrosion.

Afin de vérifier si l'ajout de silicate fait varier ces paramètres, l'alcalinité, la dureté, le CO₂ et l'oxygène dissous ont été mesurés durant les mois de mai et juin dans l'eau du secteur d'étude à l'aide d'échantillonnage hebdomadaire. La figure 4.1 présente les résultats de ces cinq campagnes d'échantillonnage en fonction du nombre de jours depuis le début de l'ajout de silicate aux points 0, 2 à 9 et 11 à 13. L'injection de silicate a débuté le 18 juin, soit le jour 0. La figure 4.2 présente la corrélation linéaire entre l'oxygène dissous et la température pour les même points et campagnes d'échantillonnage que la figure 4.1(D). Le tableau 4.1 présente la moyenne et l'écart type des concentrations d'alcalinité, de dureté et du CO₂. Dans ce tableau on calcul les moyennes et écart types en utilisant les résultats de tous les points d'échantillonnage pour toutes les campagnes d'échantillonnage durant les mois de mai et juin.

Nous pouvons conclure que l'ajout d'une concentration moyenne 4 mg SiO₂/L de silicate de sodium, dans l'eau du secteur à l'étude, n'a pas fait varier de façon significative l'alcalinité, la dureté ou le CO₂ durant les mois de mai et juin. En effet, les concentrations d'alcalinité, de dureté et de CO₂ mesurées avant l'ajout de silicate (avant le 18 juin) et celles mesurées après ne sont pas significativement différentes (figure 4.1).

De plus l'écart type de chacune de ces variables est faible (tableau 4.1). Les variations des concentrations d'oxygène dissous sont principalement influencées par la hausse des températures. En effet, une bonne corrélation linéaire entre ces variables est observée, soit $R^2=0,7$.

Étant donné que l'ajout de silicate n'a pas fait varier les concentrations d'alcalinité, de dureté, de CO_2 et d'oxygène dissous durant le mois de mai et juin, ces paramètres n'ont pas été échantillonnés pendant le reste de l'étude.

Tableau 4. 1 : Moyennes et écarts types calculés en utilisant l'ensemble des résultats d'alcalinité, de dureté et de CO_2

Paramètres	Alcalinité (mg CaCO_3 /L)	Dureté (mg CaCO_3 /L)	CO_2 (mg /L)
Moyenne	21,6	45,4	1,3
Écart type	1,6	2,7	0,4

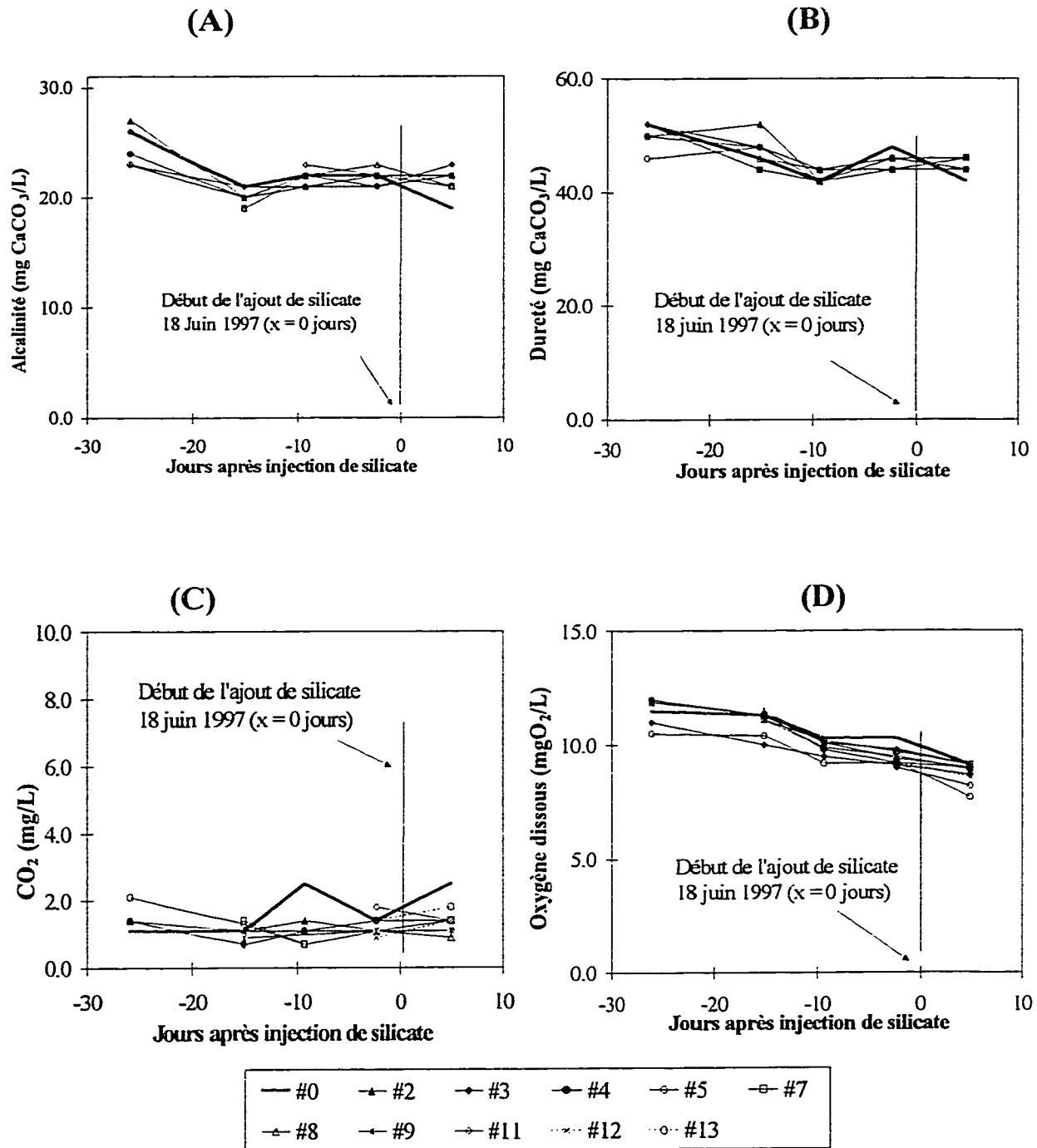


Figure 4. 1 : Suivi de mai à juin 1997 (A) de l'alcalinité; (B) de la dureté; (C) du CO₂ et (D) de l'oxygène dissous

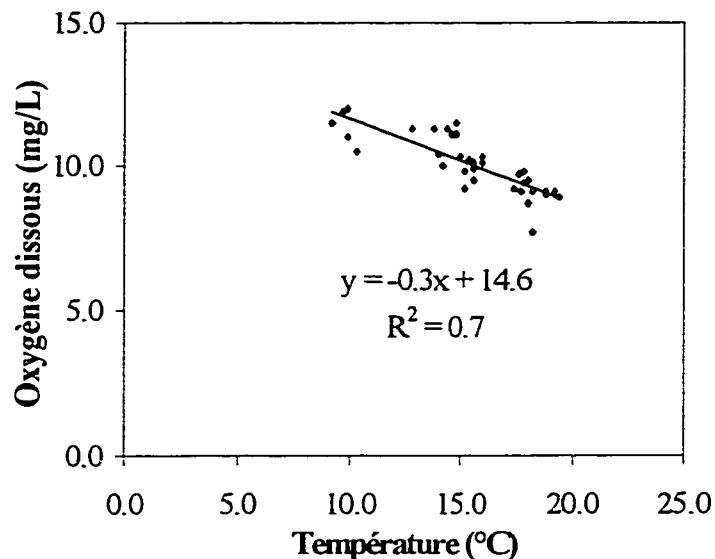


Figure 4. 2 L'oxygène dissous en fonction de la température de mai à juin 1997

4.2. Effet de l'addition de silicate sur le pH de l'eau

Tout comme l'ajout d'une base forte dans un milieu faiblement tamponné, l'ajout de silicate dans l'eau fait augmenter le pH. La figure 4.3 A) montre l'influence de l'ajout de silicate sur le pH de l'eau au poste St-Martin. Cette figure, a été obtenue en augmentant la concentration de silicate de 0 à 10 mg SiO₂/L et en mesurant le pH résultant. L'eau utilisée a été prélevée, dans le réseau de distribution, à l'entrée du poste St-Martin, elle contient environ 4 mg SiO₂/L. Cette figure montre que lorsque le pH dans l'eau à l'entrée du secteur à l'étude est de 7,2 une addition de 5 mg SiO₂/L augmente le pH à 8,4.

La figure 4.3 B) montre l'influence de l'ajout de silicate sur le pH pour l'eau du point 0 au point 11. Sur cette figure l'ordonné est la différence de pH entre le point 11 et le point 0, alors que l'abscisse est la différence entre les concentrations de silicate mesurées au point 11 et au point 0. Le point 0 est situé au poste St-Martin, immédiatement en amont

de l'injection du silicate, il sert de témoin. La soustraction des concentrations du silicate et des pH entre le point 11 et le point 0 élimine les variations de pH et de silicate causées par l'usine de traitement. Cette figure montre qu'une addition de 5 mg SiO₂/L occasionne une augmentation de pH de 1,1 unités dans l'eau de la conduite au point 11. On peut déduire que lorsque le pH dans l'eau de l'entrée du secteur est de 7,2 une addition de 5 mg SiO₂/L occasionne un pH de 8,3 dans l'eau au point 11.

Comme le montre la figure 4.3 l'ajout de silicate de sodium occasionne d'importante augmentation de pH dans l'eau du secteur à l'étude. Cette augmentation de pH limite l'ajout de silicate à partir d'un poste de rechloration. En effet de façon pratique, du 18 juin au 18 août, la concentration maximale pouvant être injectée sans dépasser un pH de 8,5 était en moyenne de 3,7 mg SiO₂/L parce que le pH à l'entrée du secteur était de 7,3. Après une baisse de pH à l'usine, du 8 août au 15 octobre la concentration maximale pouvant être injectée était en moyenne de 8 mg SiO₂/L parce que le pH à l'entrée du secteur était de 7,0.

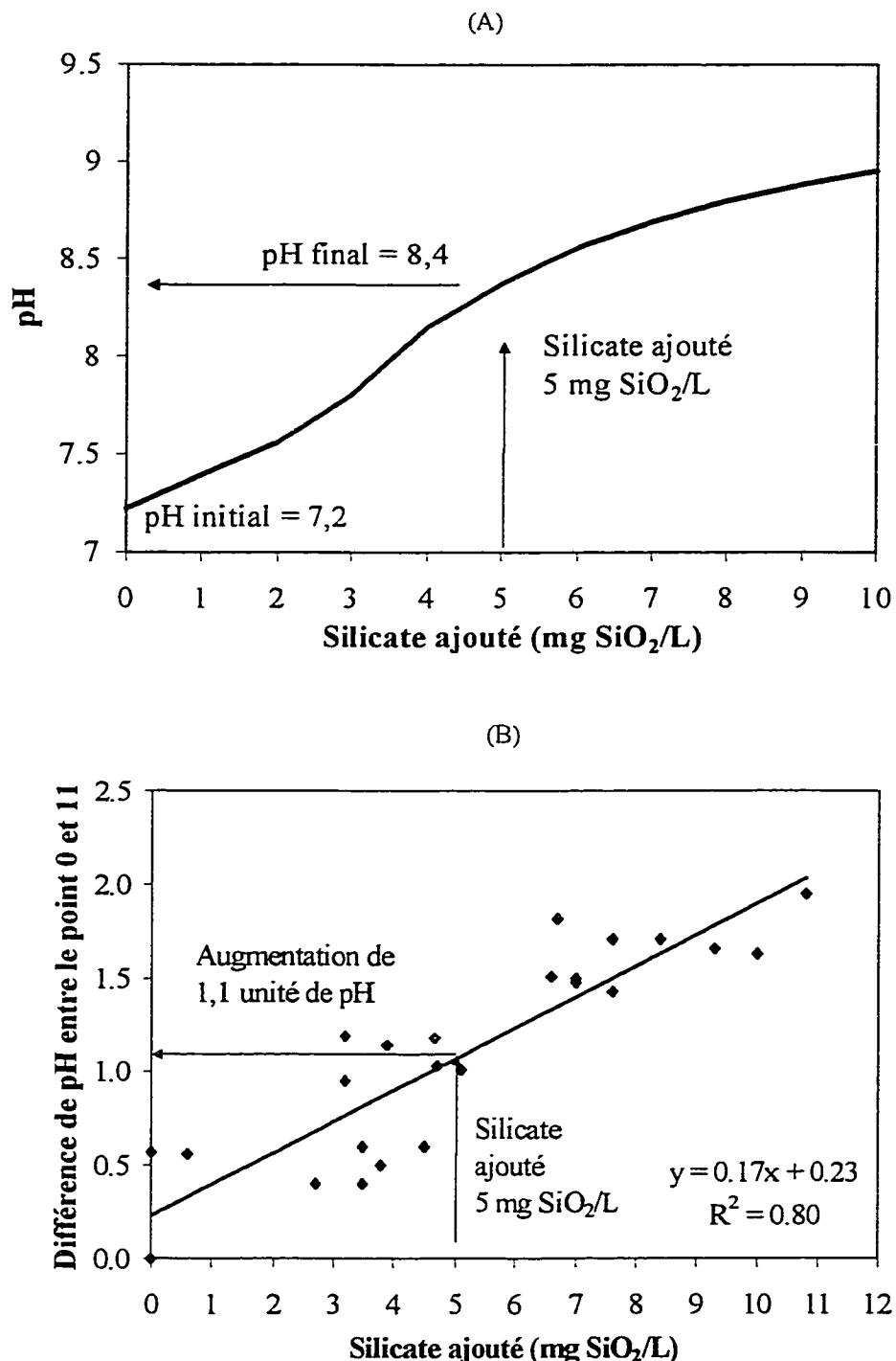


Figure 4. 3 Effet de l'ajout de silicate sur le pH : A) au poste St-Martin; B)au point 11

4.3. Adsorption du silicate sur les parois internes des conduites

Certains auteurs Katsanis et al. (1986) et Lehrman et Shuldener (1952) rapportent que l'ajout de silicate de sodium peut former une couche protectrice sur la surface interne des conduites. Pour ce faire le silicate doit être consommé ; sa concentration dans l'eau, lors de son séjour dans le secteur à l'étude, devrait donc baisser. La quantité de silicate de sodium ajouté, dans l'eau du secteur à l'étude, s'est fait en raison d'une concentration moyenne de 3,7 mg SiO₂/L, du 18 juin au 18 août, et de 7,3 mg SiO₂/L du 18 août au 15 octobre. D'après les résultats du suivi des concentrations de silicate et des analyses de dépôts, le silicate n'a pas été significativement adsorbé sur les parois des conduites.

4.3.1. Bilan des concentrations de silicate

Cette étude de la corrosion fut précédée d'une étape portant sur des essais dans des réacteurs annulaires. Les auteurs rapportent une consommation de silicate de l'ordre de 83,2 mg/m² durant la période de passivation et de l'ordre de 27,7 mg/m² en période de maintien (Rompré et al. 1998). En transposant ces résultats à l'étude réseau, une consommation de 0,4 mg/L SiO₂ en période de maintien allant jusqu'à 1,2 mg/L SiO₂ en période de passivation aurait dû être observée entre le point 1 et 13. Une consommation de 0,6 mg/L SiO₂ en période de maintien allant jusqu'à 1,7 mg/L SiO₂ en période de passivation aurait dû être observée entre le point 9 et 11. Finalement une consommation de 1,1 mg/L SiO₂ en période de maintien allant jusqu'à 3,3 mg/L SiO₂ en période de passivation aurait dû être observée entre le point 4 et 5.

Tel qu'indiqué au chapitre 3, le silicate n'est pas toujours injecté en quantité proportionnelle au débit d'eau dans la conduite. En effet, il y a des périodes où le débit d'eau est sous le seuil de détection du débitmètre. Le débit de silicate injecté dans l'eau est alors constant, ce qui se traduit par des variations de concentration de silicate: lorsque le débit d'eau augmente la concentration de silicate diminue. À cause de ces variations, le bilan de silicate est difficilement quantifiable. Les résultats des suivis

lorsque le débit d'eau augmente la concentration de silicate diminue. À cause de ces variations, le bilan de silicate est difficilement quantifiable. Les résultats des suivis hebdomadaires et horaires des concentrations de silicate nous apportent cependant de l'information pertinente sur ce bilan de silicate. Mais ces résultats ne peuvent affirmer ou nier qu'une consommation de l'ordre de 1 à 3 mg SiO₂/L a eu lieu dans l'eau du secteur à l'étude.

4.3.1.1. Échantillonnage hebdomadaire

Le tableau 4.2 montre les concentrations injectées de silicate pour l'ensemble des points dans le secteur étudié (points 1 à 9 et 11 à 13). Dans ce tableau, on calcule la différence entre les concentrations de silicate mesurées aux différents points et celles mesurées dans l'eau avant l'ajout de silicate (point 0) durant une même journée. Ensuite on calcule la moyenne, l'écart type, les valeurs minimales et maximales pour la période du 18 juin au 18 août et pour la période du 18 août au 15 octobre. Tel qu'indiqué au chapitre 3, les concentrations d'injection du silicate varie en fonction de l'heure dans une même journée. Ces concentrations sont plus élevées quand la demande en eau du secteur est faible notamment la nuit. Étant donné que les points de suivi ont différent temps de séjour, et que le silicate de sodium n'est pas significativement consommé, ces valeurs représentent une moyenne des concentrations d'injections du silicate.

Du 18 juin au 18 août, la moyenne des augmentations des concentrations de silicate est 3,7 mg SiO₂/L. Après une baisse du pH à l'usine, la moyenne des augmentations des concentrations de silicate est 7,3 mg SiO₂/L du 18 août au 15 octobre. Du 18 juin au 18 août l'écart type n'est pas très élevée, soit 0,6 mg SiO₂/L. Par contre, les concentrations de silicate varient de 2,1 à 5,3 mg SiO₂/L. Du 19 août au 15 octobre, les concentrations de silicate varient de 3,8 à 12,0 mg SiO₂/L alors que l'écart type n'est que de 1,6 mg SiO₂/L. Ces variations ne sont pas dues à la consommation du silicate par les parois internes des conduites, elles sont causées par la difficulté de maintenir une concentration d'injection constante pour les périodes de faible demande en eau.

Tableau 4. 2 : Augmentation de la concentration de silicate entre l'entrée du secteur et les points d'observations.

Période d'injection	Silicate injecté (mg SiO ₂ /L)	
	du 18-06 au 18-08 1997	du 18-08 au 15-10 1997
Moyenne	3,7	7,3
Écart type	0,6	1,6
Minimum	2,1	3,8
Maximum	5,3	12,0

La figure 4.4 présente l'évolution des concentrations de silicate mesurées dans l'eau aux points 0, 1, 4, 5 et 11 lors des premiers 39 heures suivant le début de l'injection du silicate de sodium dans l'eau du secteur. Le point 0, situé immédiatement en amont de l'injection, sert de témoin et présente la concentration de silicate observée normalement dans l'eau de ce réseau de distribution. Le point 1 situé immédiatement après l'injection du silicate, est l'entrée du secteur à l'étude.

Seule la conduite menant au cul de sac sur la rue Omer-Barrière (point 5) semble exercer une demande en silicate. La demande en silicate exercée par cette conduite peut être estimée en faisant la différence entre la concentration au point 4 et celle au point 5. Neuf heures après le début de l'injection du silicate, sa concentration passe de 7,8 à 6,6 mg SiO₂/L lorsque l'eau se déplace du point 4 au point 5 suggérant une consommation de 1,2 mg SiO₂/L. Cette consommation baisse à 0,6 mg SiO₂/L, 21 heures après l'injection du silicate. Étant donné que la précision de la méthode d'évaluation du silicate est de 0,5 mg SiO₂/L, cette consommation devient non significative.

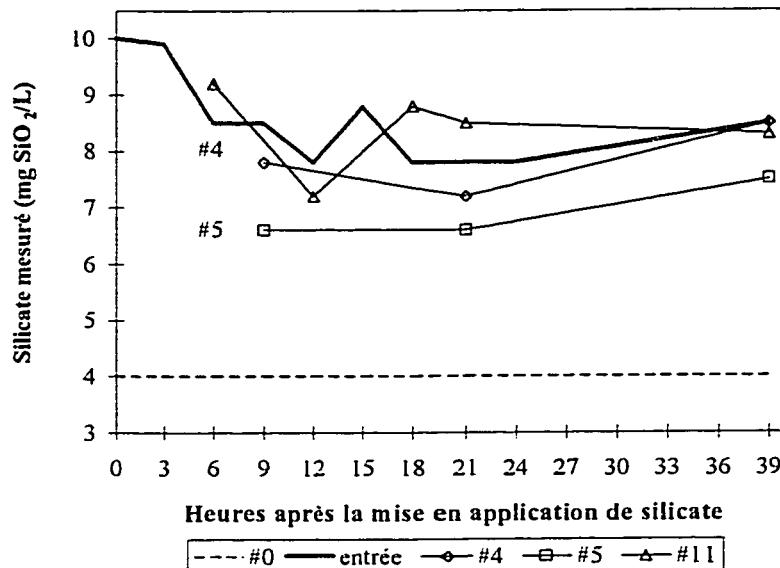


Figure 4.4 : Suivi de l'ajout de silicate durant les premiers 39 heures

La figure 4.5 présentent les concentrations de silicate en fonction des jours depuis l'injection de ce produit. Les résultats de ces mesures sont présentés aux points situés sur la conduite de 100 mm Ø sous la rue Omer-Barrière (figure 4.5 A), aux points situés sur la conduite nettoyée sous la rue Jean XXIII (figure 4.5 B) et aux points de purges (figure 4.5 C). Sur cette figure, la ligne pointillée indique la concentration de silicate, normalement présente dans l'eau, mesurée au point témoin 0, tandis que la ligne en gras représente la concentration de silicate mesurée au point d'injection. La différence verticale entre ces deux lignes, pour une même journée, représente la concentration de silicate injectée.

Durant 119 jours de l'ajout de silicate, la conduite de 100 mm Ø sous la rue Omer-Barrière ne semble pas exercer de demande en silicate, puisque les concentrations de silicate mesurées dans les eaux de ce tronçon ne sont pas plus faibles que celles mesurées à l'entrée du secteur (figure 4.5 A). La conduite nettoyé sous la rue Jean XXIII ne semble pas non plus exercer de demande en silicate. En effet, lorsque l'eau se déplace du point 9 au point 11, les concentrations de silicate ne diminuent pas (figure 4.5 B). De plus ces concentrations se comparent aux concentrations observées à l'entrée du secteur.

Enfin, les concentrations de silicate mesurées dans les eaux des purges ne sont pas vraiment différentes des concentrations mesurées à l'entrée du secteur ce qui suggère toujours une non consommation du silicate (figure 4.5 C).

Lors d'une campagne d'échantillonnage, tous les prélèvements, aux 13 points de mesures à l'intérieur du secteur à l'étude, sont effectués en moins de 4 heures. Cela est plus court que le temps pris par l'eau pour parcourir le secteur. Par exemple, le temps requis entre les prélèvements aux points 9 et 11 est de 15 minutes, tandis que le temps de séjour entre ces deux points peut varier de 1 à 2,5 heures. De plus, tel qu'expliqué au chapitre 3, la nuit ou durant les périodes où le débit est inférieur au seuil de détection du débitmètre, la pompe injecte un débit constant de silicate. Cela se traduit par des variations de concentration de silicate lorsque la demande en eau varie dans le secteur. Cela peut expliquer certains résultats qui semblent aberrant à première vue. Par exemple, le 5 septembre, au lieu d'observer une consommation entre l'entrée et la sortie de la conduite nettoyée, on mesure une augmentation de 13 mg SiO₂/L à 15 mg SiO₂/L lorsque l'eau passe du point 9 au point 11 (figure 4.5 B).

L'addition de silicate a été arrêtée le 15 octobre dans la matinée. Un échantillonnage hebdomadaire a été exécuté dans l'après-midi du 16 octobre. Les concentrations de silicate alors mesurées aux points de contrôle 4, 9, 11 et 13 sont égales aux concentrations (à +/- 0,5 mg SiO₂/L près) des eaux naturelles, soit celle au point d'entrée (figure 4.5). Si le silicate avait été adsorbé sur les parois des conduites pendant les cinq mois d'essais, nous aurions probablement observé une dissolution progressive de ce silicate. Cela se serait traduit par des concentrations de silicate aux points de mesures supérieures aux concentrations des eaux naturelles.

Étant donné que la concentration de silicate mesurée lors d'une même campagne d'échantillonnage hebdomadaire n'est pas la même aux différents points de suivis, il est impossible de conclure plus précisément sur le bilan des concentrations en silicate sans

avoir plus d'informations sur les variations horaires des concentrations d'injection du silicate. La prochaine section nous renseigne sur ces concentrations d'injection.

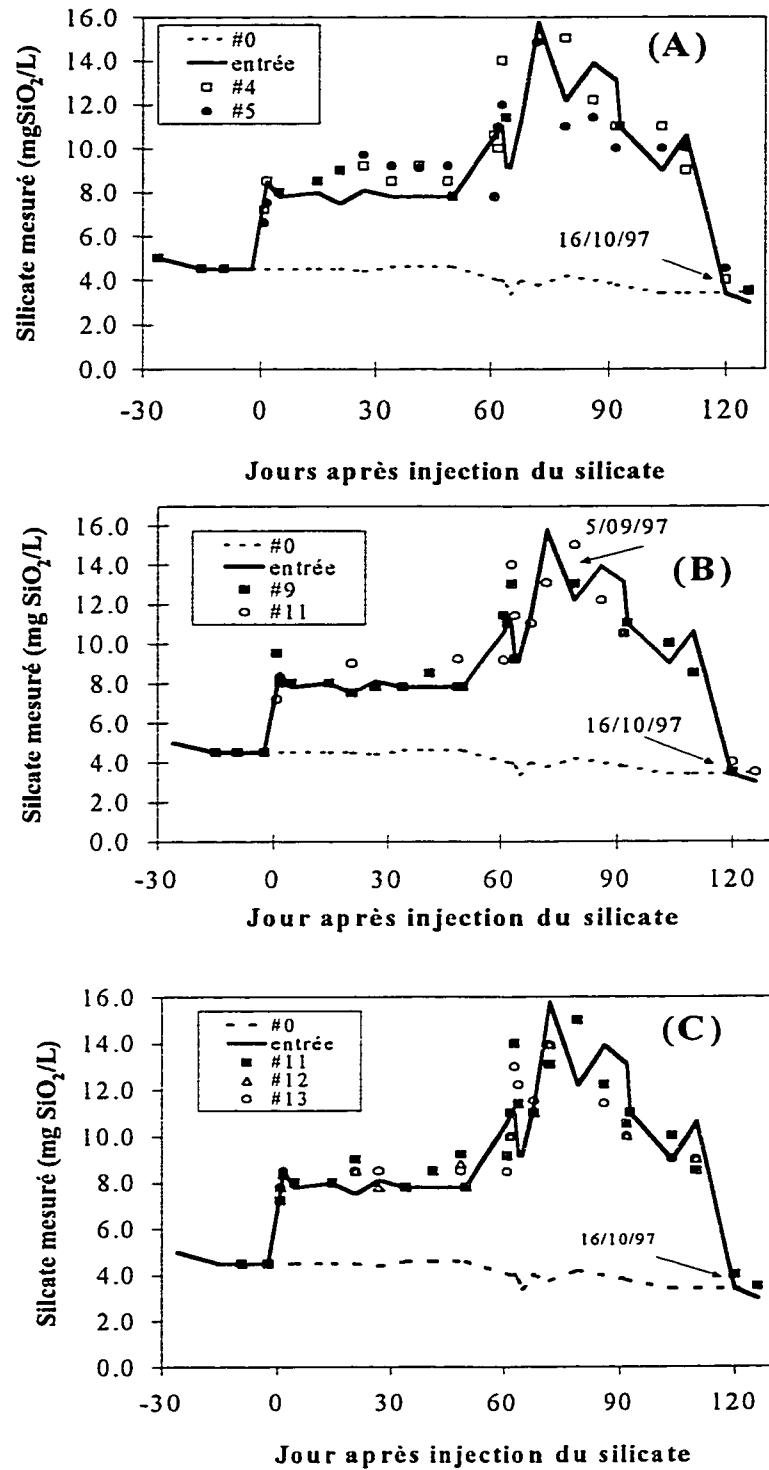


Figure 4.5 : Suivis des concentrations de silicate de mai à octobre : aux points 4 et 5 (A), aux points 9 et 11 (B) et aux points 11,12 et 13 (C)

4.3.1.2. Échantillonnage horaire

Les échantilleurs automatiques permettent un suivi, heure par heure, des concentrations de silicate aux différents points du secteur à l'étude. Le suivi des variations horaires des concentrations de silicate mesurées au poste St-Martin permet de constater d'importantes variations dans l'injection du silicate durant une même journée.

La figure 4.6 montre les concentrations de silicate mesurées au poste St-Martin en fonction des heures. Ces concentrations représentent la somme du silicate injecté et du silicate normalement présent dans l'eau. Cette figure montre les résultats de trois campagnes réalisées avec des échantilleurs automatiques les 15 et 16 août, les 25 et 26 août et les 9 et 10 septembre. Le tableau 4.3, compare les moyennes et les écart types des concentrations injectées de silicate lors d'une même journée avec celles observées lors des échantillonnages hebdomadaires. Dans ce tableau, on calcul la moyenne et l'écart type des résultats obtenus lors de chaque suivi horaire et on refait ce calcul pour les résultats des suivis hebdomadaires pour les deux périodes d'injection. Durant la période du 18 juin au 18 août, l'écart type maximale de la concentration de silicate injecté pour une même journée est de 1,2 mg SiO₂/L, tandis que l'écart type obtenu lors des suivis hebdomadaires est de 0,6 mg SiO₂/L. Durant la période du 18 août au 15 octobre, l'écart type maximale de la concentration de silicate injecté lors d'une même journée est de 2,2 mg SiO₂/L, tandis que l'écart type obtenu lors des suivis hebdomadaires est de 1,6 mg SiO₂/L. Puisque les écarts types des suivis horaires ont le même ordre de grandeur ou sont plus élevés que ceux des suivis hebdomadaires, on peut conclure que les variations des concentrations de silicate observées sont surtout causé par des variations horaires d'injections.

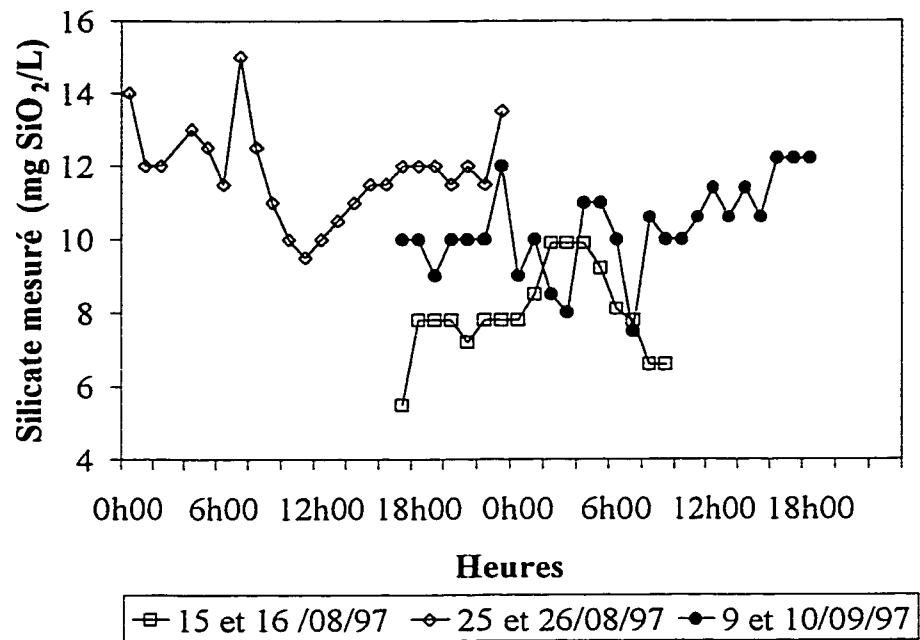


Figure 4. 6 : Suivi des concentrations de silicate aux Postes St-Martin en fonction des heures

Tableau 4. 3 : Variations journalières des concentrations de silicate au poste St-Martin

Échantillonnages	Moyenne +/- Écart type (mg SiO ₂ /L)
Horaires	
06 et 07/07/97	4,0 +/- 0,7
15 et 16/08/97	4,2 +/- 1,2
Hebdomadaires	
18/06 au 18/08/97	3,7 +/- 0,6
Horaires	
18 et 19/08/97	8,5 +/- 2,2
19 et 20/08/97	7,4 +/- 1,8
20 et 21/08/97	6,5 +/- 1,8
25 et 26/08/97	7,7 +/- 0,7
05 et 06/09/97	8,5 +/- 1,6
09 et 10/09/97	6,5 +/- 1,2
10 et 11/09/97	8,8 +/- 1,4
11 et 12/09/97	8,1 +/- 1,3
Hebdomadaires	
18/08 au 15/10/97	7,3 +/- 1,6

Nous avons observé que la concentration d'injection du silicate varie d'heure en heure lors d'une même journée. Pour estimer la consommation de silicate, il faut tenir compte du temps requis pour passer d'un point de suivi à l'autre. Ceci nous permettrait de relier la concentration d'injection avec la concentration aux points de suivis et par différence d'obtenir la consommation de silicate. Nous pouvons aussi procéder à l'inverse, c'est à dire supposer qu'il n'y est pas eu de consommation ou de dilution de silicate dans le réseau de distribution et estimer le temps de séjour en mesurant le temps entre des concentrations de silicate identiques aux différents points de mesure.

Le tableau 4.4 A) présente les temps de séjour estimés de cette façon à différent points de suivi pour 3 campagnes d'échantillonnage horaire, soit les 6, 19 et 21 août. Ces temps de séjour sont calculés de la façon suivante : un échantilleur automatique installé au point d'injection (poste St-Martin), prélève un échantillon par heure pendant 24 heures. Des échantillonnages à chacun des points un peu plus tard permettent d'estimer les temps de séjour. Par exemple, dans la nuit du 19 au 20 août, l'injection maximale est de 15 mg SiO₂/L à 4h00, ce maximum est détecté à 7h50 au point 7. Entre le poste St-Martin et le point 7, il y a donc un temps de séjour de 3h50.

Cette façon de procéder engendre des variations des temps de séjour pour un même point pour deux journées d'échantillonnage différentes. La consommation d'eau dans le secteur varie d'une semaine à l'autre en fonction de la température, des débits utilisés pour l'arrosages des pelouses, du nombre de citoyen en vacances, etc. De plus cette façon de procéder n'est pas précise parce qu'elle est basée sur un nombre trop faible d'observations soit une par heure.

Le tableau 4.4 B) présente les concentrations du silicate au poste St-Martin et aux points de suivi en fonction des heures pour le 19 et 20 août. Ce tableau a été utilisé pour la construction du tableau 4.4.A). Ainsi pour trouver le temps de séjour au point 2, nous devons le relier avec une concentration d'injection égale à la concentration au point 2. Trois possibilités s'offrent : la concentration d'injection à 0h00, celle entre 3h00 et 4h00 et celle entre 6h00 et 7h00. Nous savons que ce point se trouve très près du point

Trois possibilités s'offrent : la concentration d'injection à 0h00, celle entre 3h00 et 4h00 et celle entre 6h00 et 7h00. Nous savons que ce point se trouve très près du point d'injection (figure 3.2), alors la période d'injection la plus logique est celle entre 6h00 et 7h00. Nous en déduisons un temps de séjour d'environ une heure. Ce genre de déduction peut entraîner des erreurs d'estimation des temps de séjour pour les points plus éloignés, tels les points 13 et 5. Lorsqu'il est difficile d'estimer la période d'injection la plus probable, les deux périodes sont indiquées dans les tableaux 4.4 A et B.

Rappelons que ces temps de séjour ont été estimés en émettant l'hypothèse que le silicate n'a pas été adsorbé. Si les temps de séjour avaient été les mêmes pour les différents échantillonnages ou si la plage de temps de séjour avait été moins large, nous aurions pu conclure sur la consommation du silicate. En effet, nous aurions relié la concentration d'injection avec la concentration aux points de mesures en soustrayant pour chaque point un temps de séjour fixe. Malheureusement, la demande en eau, dans ce petit secteur, varie d'heure en heure, elle fait varier les temps de séjour de l'eau et la concentration d'injection du silicate. Même à l'aide d'échantillonnage horaire, nous ne pouvons pas conclure, de façon définitive, sur le bilan du silicate puisque ni la concentration d'injection ni les temps de séjour sont constants. D'après les résultats de l'étape 2 du projet corrosion, une consommation de l'ordre de 1 à 3 mg SiO₂/L aurait dû être observée sur le réseau. Nous ne pouvons ni affirmer ou nier qu'il y a eu une consommation de silicate de cet ordre.

Tableau 4. 4 : Temps de séjour estimés pour les points de suivi

(A)

Temps de séjour				
Point	6/08/97	19/08/97	21/08/97	min. à max.
2	0h55	0h55	1h05	0h55 à 1h05
3	2h04	3h10	4h15	2h04 à 4h15
4	2h13	3h15	4h20	2h13 à 4h20
5	4h23	4h50	4h25	4h23 à 4h50
7	1h50	3h50	1h00	1h00 à 3h50
8	2h03	2h55	1h55 ou 2h55	1h55 à 2h55
9	2h08	2h00	0h50	0h50 à 2h08
11	4h16	3h40	4h45	3h40 à 4h45
12	2h54	3h35	4h40	2h54 à 4h40
13	3h32	4h55	5h30	3h32 à 5h30

(B)

Poste St-Martin		Réseau			
Date et heures	mg SiO ₂ /L	Date et heures	mg SiO ₂ /L	Point	Temps de séjour
19/08/1997 22:00	10	20/08/1997 7:25	12	2	0h55
19/08/1997 23:00	11	20/08/1997 8:10	14	3	3h10
20/08/1997 00:00	12	20/08/1997 8:15	14	4	3h15
20/08/1997 01:00	15	20/08/1997 8:20	12	5	4h50
20/08/1997 02:00	11	20/08/1997 7:50	15	7	3h50
20/08/1997 03:00	11	20/08/1997 7:55	14	8	2h55
20/08/1997 04:00	15	20/08/1997 8:00	13	9	2h00
20/08/1997 05:00	14	20/08/1997 8:40	14	11	3h40
20/08/1997 06:00	13	20/08/1997 8:35	14	12	3h35
20/08/1997 07:00	11	20/08/1997 8:25	13	13	4h55

4.3.2. Analyse de dépôts

Les résultats des analyses des dépôts pour la conduite mécaniquement nettoyée sous la rue Jean XXIII et pour la conduite sous la rue Omer-Barrière ne montrent pas qu'il y a présence de silicate dans la structure des dépôts. Par contre l'analyse des dépôts dans les réacteurs annulaires montrent une présence de silicate (Rompré et al. 1998). L'absence de silicate dans les dépôts prélevés dans le réseau confirmerait qu'il n'y pas eu de consommation de silicate par les conduites ni de formation d'un film protecteur.

4.4. *Effet du silicate sur la formation d'un film protecteur*

Nous avons constaté que la concentration de silicate de sodium, lorsqu'elle parcourt les conduites du secteur ne diminue pas de façon significative. Nous n'avons cependant pas pu conclure sur l'adsorption du silicate sur les parois internes des conduites, par contre celui-ci peut-il tout de même former un film protégeant la conduite de la corrosion ? Certains auteurs Katsanis et al. (1986); Lehrman et Shuldener (1951); Lehrman et Shuldener (1952); Shuldener et Sussman (1960) et Lane et al. (1973) rapportent que l'ajout de silicate peut former une couche protectrice sur la surface interne des conduites permettant de réduire le taux de corrosion. La conduite mécaniquement nettoyée sous la rue Jean XXIII, avec ses surfaces de métal exposé subit probablement un taux de corrosion plus élevé que les autres conduites, âgées de 30 ans, recouvertes d'une couche de produits de corrosion. En effet, Sontheimer et al. (1981) rapportent un taux de corrosion 6 $\mu\text{m/année}$ pour des vieilles conduites de 1 à 3 ans. C'est un taux de corrosion beaucoup plus faible que celui de 400 $\mu\text{m/année}$ mesuré, à l'aide de polarisation linéaire, sur des coupons neufs en fonte grise (Raad 1998).

Afin de vérifier si l'ajout de silicate réduit le taux de corrosion, trois essais de performance hydraulique ont été faits sur la conduite sous la rue Jean XXIII, soit un premier avant son nettoyage mécanique (02/06/97), un deuxième après le nettoyage, mais avant l'ajout du silicate (17/06/97) et un troisième après l'ajout du silicate

(21/10/97). Les débits totaux disponibles, tel que mesurés selon la méthode décrite au chapitre 3 sont présenté sur la figure 4.7. Le nettoyage de la conduite sous la rue Jean XXIII a permis de faire augmenter le débit total disponible de 45 %. Par la suite l'ajout de silicate n'a pas permis de maintenir ce gain. En effet, après 5 mois d'ajout de silicate la capacité hydraulique de la conduite a baissé de 20%. Les images prise par une caméra dans la conduite sous la rue Jean XXIII, confirment cette baisse de capacité hydraulique (figure 4.8). En effet, ces photos montrent que le nettoyage mécanique a permis d'enlever environ 80% des tubercles. Des photos prise 5 mois plus tard, montrent que la plupart des tubercles se sont reformés même si du silicate était injecté durant cette période. Nous pouvons conclure que l'ajout de silicate, dans le secteur à l'étude, n'a pas formé un film protecteur sur la paroi interne de la conduite nettoyée.

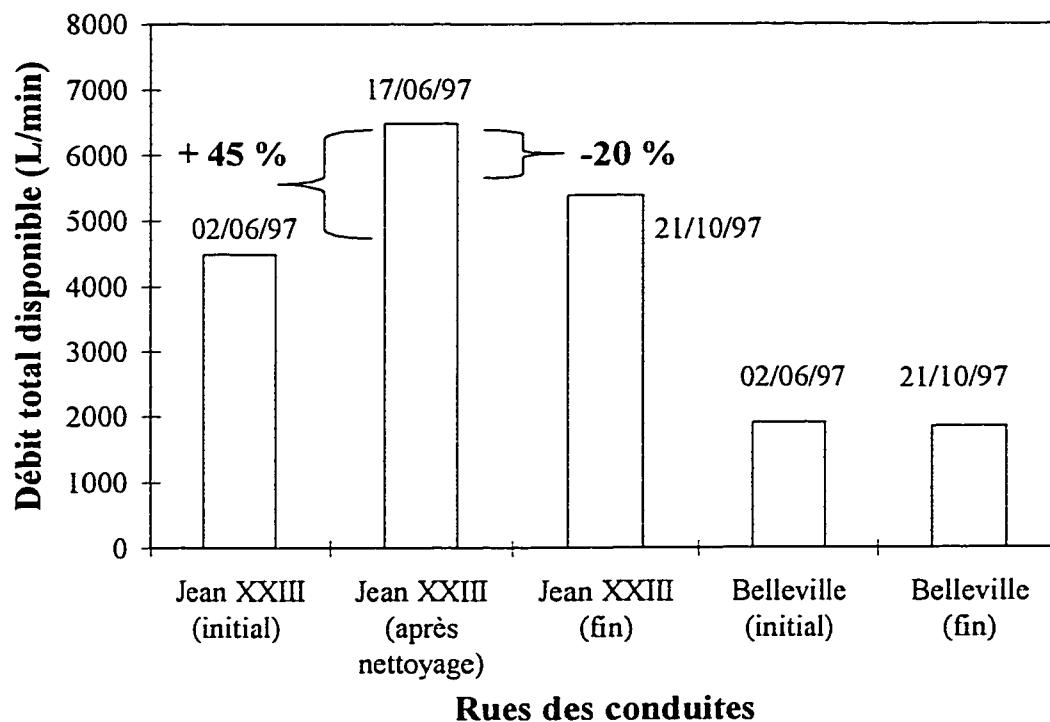


Figure 4. 7 : Débit disponible dans les conduites sous les rues Jean XXIII et Belleville en fonction des interventions

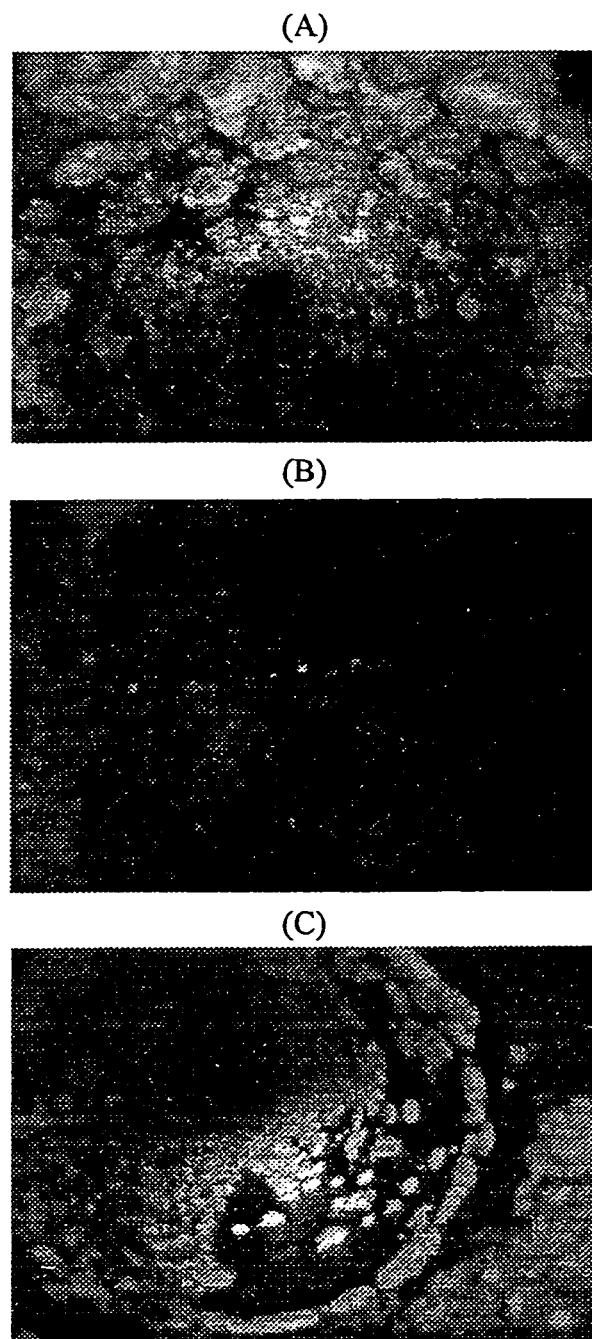


Figure 4. 8:Passage de la caméra dans une conduite mécaniquement nettoyée (Jean XXIII) : (A) état initial; (B) immédiatement après le nettoyage et (C) 5 mois après l'ajout de silicate

4.5. *Effet de l'ajout de silicate sur la capacité hydraulique des conduites*

L'accumulation des produits de corrosion à l'intérieur des conduites cause une augmentation du coefficient de friction et, lorsque les tubercules sont formés, une diminution de la section d'écoulement. Cela se traduit par des pertes de charge supplémentaires occasionnant des pertes de capacité hydraulique. La compagnie Silicate National Ltée, distributrice de silicate a rapporté que l'ajout de silicate peut ramollir et même dissoudre les tubercules. Ce qui réduirait les pertes de charges causées par les produits de corrosion et augmenterait ainsi la capacité hydraulique. Afin de vérifier cette hypothèse des essais de performance hydraulique ont été fait sur les conduites sous les rues Monseigneur Bourget, St-Lussier, Collin et Belleville.

La capacité hydraulique de la conduite sous la rue Belleville a été mesurée avant l'ajout du silicate (17/06/97) et après son ajout (21/10/97). Les débits totaux, tel que mesuré selon la méthode décrite au chapitre 3 sont présentés sur la figure 4.7. Aucun gain ou perte de capacité hydraulique est observé pour la conduite sous la rue Belleville. Les autres conduites présentent des résultats similaires. Nous pouvons conclure que l'ajout de silicate, dans le secteur à l'étude, n'a pas modifié la capacité hydraulique des conduites corrodées.

4.6. *Effet de l'ajout de silicate sur la dissolution du fer, du cuivre du plomb*

L'ajout de silicate n'a pas protégé de la corrosion la conduite nettoyée et n'a pas augmenté la capacité hydraulique des vieilles conduites. Par contre, on peut se demander si l'ajout du silicate fait baisser les concentrations de fer, de cuivre ou de plomb dans l'eau du secteur à l'étude.

4.6.1. Le fer

L'ajout de silicate, dans le passé, à souvent réussi à éliminer des problèmes d'eau rouge causés par la dissolution du fer (Rompré et al. 1998); (Katsanis et al. 1986); (McQuillan et Spenst 1976); (Shuldener et Sussman 1960); (Stericker 1945); (Stericker 1938); (Texter 1923) et (Tresh 1922). Afin de vérifier l'effet du silicate sur les concentrations de fer, plusieurs suivis de ce paramètre ont été réalisé.

La figure 4.9A) présente l'évolution du fer total en fonction des jours après l'injection du silicate, dans la conduite nettoyée sous la rue Jean XXIII. Sur cette figure le point 9 est l'entrée de la conduite Jean XXIII, tandis que le point 11 est la sortie. Ces résultats ont été obtenus lors des échantillonnages hebdomadaires effectués de mai à octobre.

Après le nettoyage mécanique de cette conduite, le 17 juin, les concentrations de fer total, dans les eaux de la purge au point 11, ont nettement augmenté. Elles sont passées de 0,13 mg Fe/L à 1,66 mg Fe/L. Afin de les ramener à un niveau acceptable, le débit de purge a été augmenté, de 50 L/min à 120 L/min puis à 190 L/min. Par la suite, le débit de purge a été baissé à 80 L/min puis à 60 L/min pour le reste de l'étude. La baisse des concentrations de fer observée par la suite, soit à partir du jour 21, serait plutôt causées par la formation d'une couche de corrosion que par l'ajout de silicate. Les résultats des essais de performance et du passage de la caméra appuient cette hypothèse (figure 4.7 et 4.8). Il a donc fallu 40 jours au total avec une saignée supérieure ou égale à 60 L/min pour faire baisser les concentrations de fer sous la marque de 0,3 mg Fe/L. À la fin de

essais de performance et du passage de la caméra appuis cette hypothèse (figure 4.7 et 4.8). Il a donc fallu 40 jours au total avec une saignée supérieure ou égale à 60 L/min pour faire baisser les concentrations de fer sous la marque de 0,3 mg Fe/L. À la fin de l'étude l'arrêt de la saignée et du silicate n'ont pas fait augmenter la concentration de fer, appuyant encore une fois l'hypothèse de la formation d'une couche de corrosion diminuant la dissolution du fer.

La figure 4.9 B) présente l'évolution du fer total en fonctions des jours après l'injection du silicate aux points 4 et 5 situés sur la conduite de 100 mm Ø sous la rue Omer-Barrière et au point de purge 13. Tandis que la figure 4.10 présente l'évolution de la turbidité en fonctions des jours après l'injection du silicate pour les points 5, 6, 8, 11, et 13. Ces résultats ont été obtenus lors des échantillonnages hebdomadaires effectués de mai à octobre. Les dates inscrites représentent les pointes de concentration pour les différents points.

Les importantes variations des concentrations de fer, dans l'ensemble des conduites, ont été causées par les interventions effectuées dans le secteur plutôt que par l'ajout du silicate. Par exemple, des branchements de camions citernes dans le secteur le 9 juillet et le 7 octobre explique l'augmentation inquiétante du fer et de la turbidité aux points 5, 6, 8 et 11 (figure 4.9 et figure 4.10).

Pour l'ensemble de l'étude, la conduite de 100 mm Ø sous la rue Omer-Barrière, présente quelques pics de concentration de fer total au point 5 (figure 4.9 B). Le pic de concentration de fer total, observé le 20 juin, ne peut être expliqué par une stagnation prolongée de l'eau ou par des changements brusque des conditions d'écoulement. Ce pic peut avoir été causé par le nettoyage mécanique de la conduite sous la rue Jean XXIII. Par contre, le sens normal de l'écoulement de l'eau ne favorise pas cette hypothèse (figure 3.2). Le pic de concentration de fer total du 9 juillet peut s'expliquer par une stagnation prolongée de l'eau. En effet, l'échantillon de fer total a été pris après une minute d'écoulement le jour même sans qu'une purge de 10 minutes ait été réalisé la

veille (tableau 3.7). Cet échantillon, prélevé à 8h52, contient une eau stagnante, le dernier échantillonnage remontant à six jours. Par contre, la concentration de fer total de 1,8 mg Fe/L est trop élevée pour être expliquée que par un phénomène de stagnation. En effet, entre 10h00 et 10h45 le 9 juillet, un camion citerne s'est branché sur le réseau de distribution. Son remplissage a causé des variations de débit importantes dans le réseau qui se sont traduites par des pointes de turbidité aux points 6, 8 et 11 (figure 4.14). Ce camion citerne s'est probablement branché sur le réseau de distribution, le 8 juillet, ce qui a causé la concentration de 1,8 mg Fe/L retrouvé au point 5 le 9 juillet. Le dernier pic de concentration de fer total, au point 5, soit celui du 7 octobre, a été causé par une série de branchements d'un camion citerne sur le réseau de distribution du secteur à l'étude.

Au point 4, à l'entrée de la conduite de 100 mm Ø, seul deux légers pics de concentration de fer total sont mesurés soit ceux du 5 et 12 septembre (figure 4.9 B). Ces pics ne sont pas expliqués. Au point 13, la pointe de concentration de fer total, soit celle du 22 octobre, s'explique par l'arrêt de la purge et par un changement brusque d'écoulement causé par les tests de performances hydrauliques du 21 octobre.

Les pointes de turbidité dans l'eau sont expliquées de la même manière que les pointes de fer (figure 4.10). Ce sont les interventions sur le réseau de distribution : nettoyage mécanique et branchement de camion citerne, qui sont les principales explications. Le pic du 18 juin au point 11 a été causé par le nettoyage mécanique de la conduite Jean XXIII et par une saignée de débit insuffisante, soit un débit de purge de 50 L/min. Les pics du 9 juillet et du 7 octobre, aux points 5, 6, 8, et 11 ont été causés par des branchements de camions citerne sur le réseau de distribution du secteur à l'étude. La pointe de turbidité observée au point 13, le 22 octobre, s'explique par l'arrêt de la purge et par un changement brusque d'écoulement causé par les tests de performances hydrauliques du 21 octobre.

La figure 4.11 présente la corrélation linéaire entre le fer total et le silicate, au point 5, pour les échantillonnages hebdomadaires de mai à octobre, à l'exemption de l'échantillonnage du 9 juillet où une pointe de concentration de fer causé par un branchement de camion citerne a été observée. Cette figure montre qu'il n'existe pas de corrélation entre le fer total et le silicate au point 5, $R^2=0,18$. Les mêmes tendances sont observées pour les autres points.

D'après les résultats des échantillonnages hebdomadaires, nous pouvons conclure que l'ajout de silicate n'a pas eu d'effet sur les pointes des concentrations de fer total observées durant l'étude. Par contre, notons tout de même que l'effet bénéfique, documenté, de l'ajout de silicate est la diminution des problèmes d'eaux rouges. La figure 4.12 montre les résultats des mesures hebdomadaires de turbidité et de fer total au point 11. Deux pointes de turbidité sont observées le 19 juin, immédiatement après le nettoyage mécanique de la conduite, et le 9 juillet lors d'un branchement d'un camion citerne. Après le nettoyage de la conduite Jean XXIII des hausses de fer total sont remarqués. Par contre, la tendance générale de la turbidité, à l'exception de deux pointes, n'est pas à la hausse. C'est à dire que pour cette conduite, nous n'avons pas eu de problème de fer particulaire qui cause des hausses de turbidité et des problèmes d'eau colorée. Est-ce l'effet du silicate qui aurait transformé le fer particulaire en fer dissous ? Les travaux de Rompré et al. (1998) concluent que l'ajout de silicate séquestre le fer particulaire des coupons en fonte grise lorsque le pH est inférieur à 8,0. Étant donné, que nous avons mesuré que le fer total, lors de l'étude sur le réseau, nous n'avons pas fait la distinction entre le fer particulaire et le fer dissous, nous ne pouvons pas conclure d'avantage sur ce point.

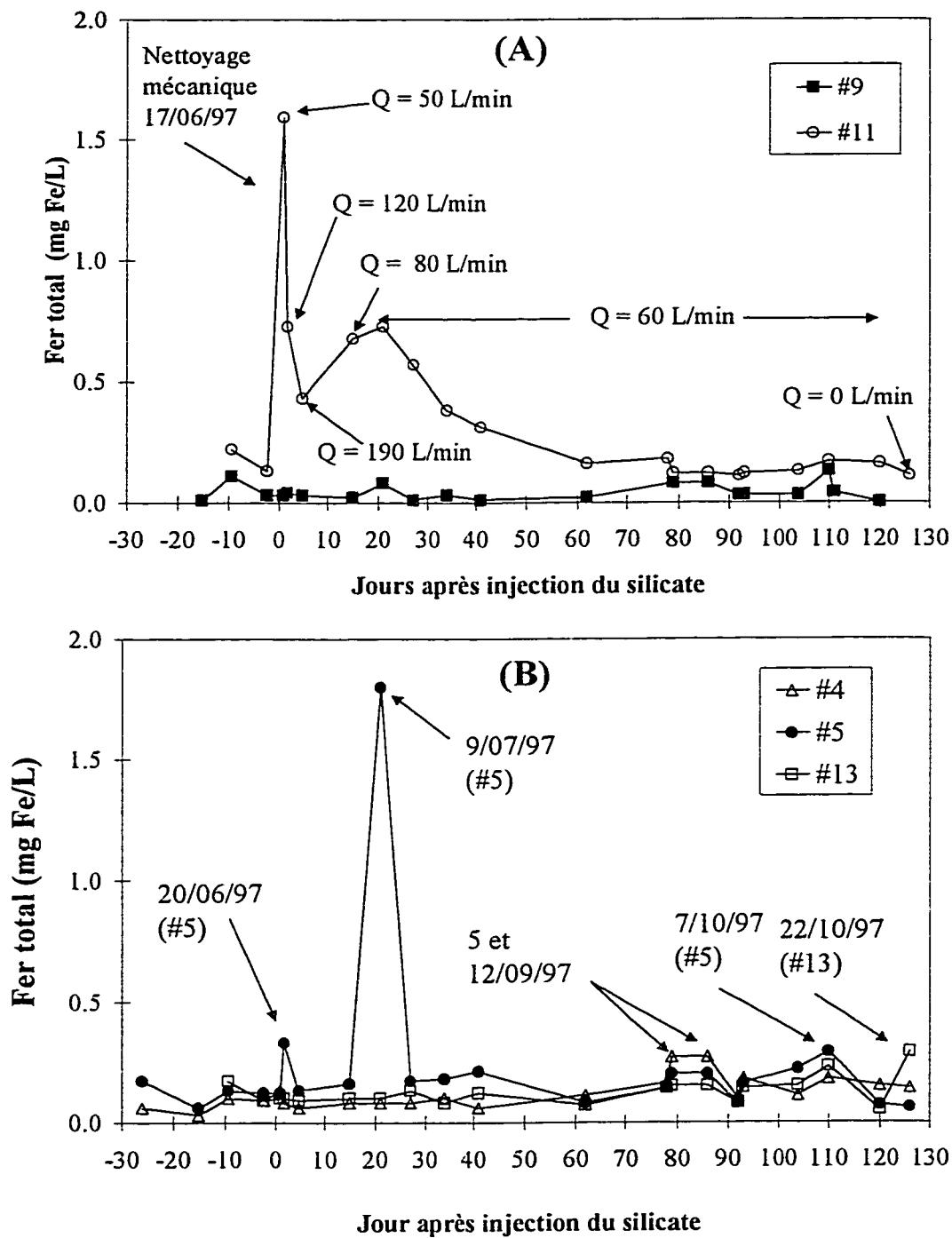


Figure 4.9 : Évolution des concentrations de fer total : (A) aux points 9 et 11; (B) aux points 4,5 et 13

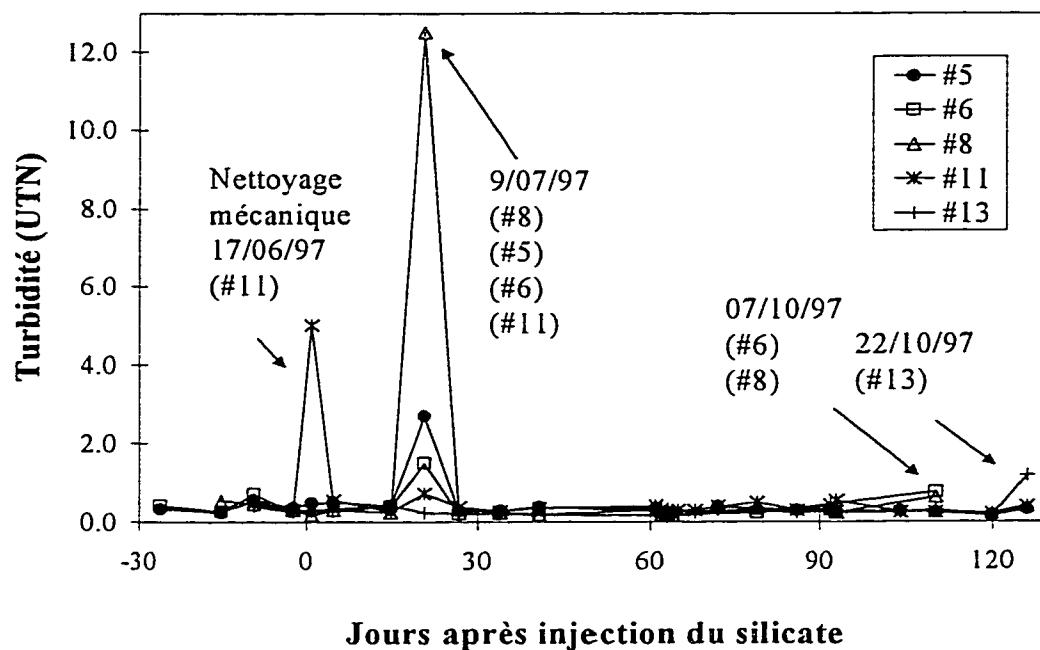


Figure 4. 10 : Évolution de la turbidité aux points 5, 6, 8, 11 et 13

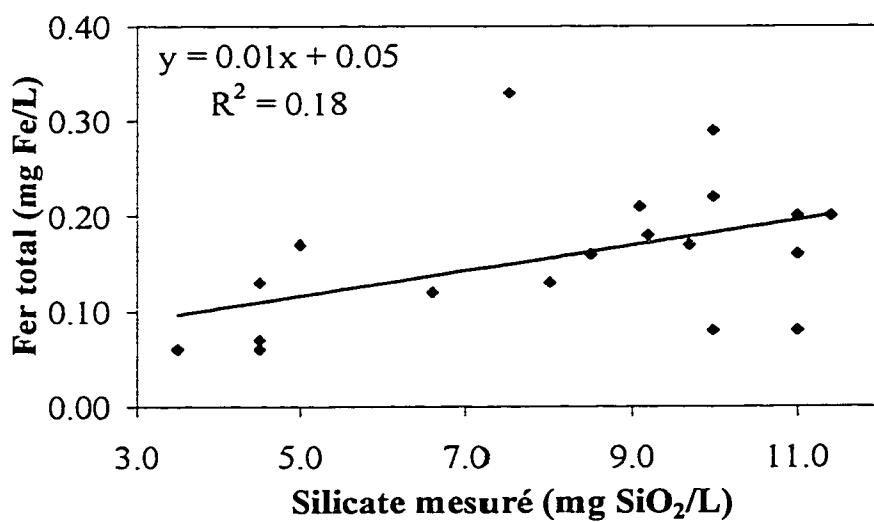


Figure 4. 11 : Concentration de fer total en fonction des concentrations de silicate au point 5 mesurées lors des échantillonnages hebdomadaires

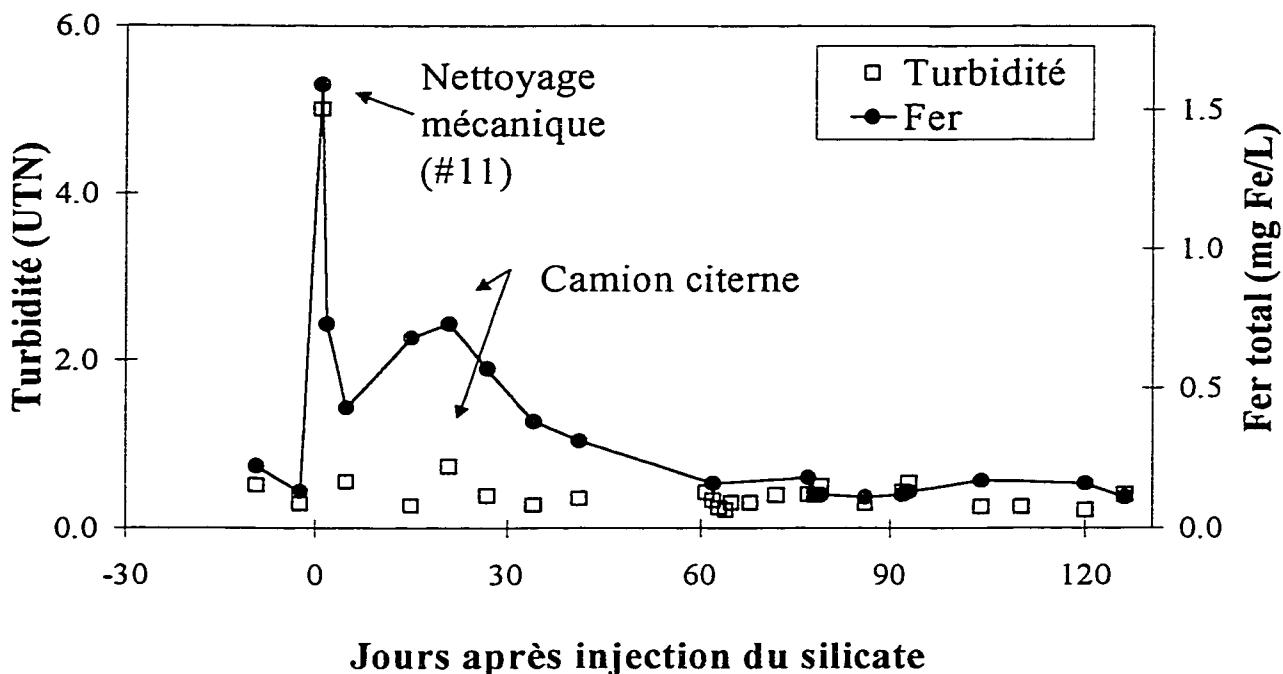


Figure 4. 12 : Évolution de la turbidité et du fer total au point 11

Le tableau 4.5 compare les valeurs des concentrations de fer total obtenues lors des suivis horaires et hebdomadaires aux points de suivis et au robinet du consommateur. Dans ce tableau, on calcule la moyenne et l'écart type des concentrations de fer total pour une même journée aux points de suivis 4, 5, 7, et 11 et au robinet du consommateur 4, 5, 7 et 11. De plus, on calcule la moyenne et l'écart type des concentrations de fer pour tous les résultats obtenues lors des suivis hebdomadaires, du 23 mai au 22 octobre, aux points de suivis, en prenant soin d'éliminer les pointes de concentration au point 11 le 20 juin et au point 5 le 9 juillet (figure 4.9). Les eaux prélevées au robinet du consommateur ont circulé successivement dans les conduites municipales et dans une entrée de service. Tous les autres échantillons n'ont circulé que dans les conduites municipales.

Pour la conduite de 100 mm Ø sous la rue Omer-Barrière, les concentrations moyennes de fer ainsi que les écarts types aux points de suivi sont comparables à ceux chez les consommateurs pour les échantillonnages du 25/07/97, 9/09/97 et 22/09/97 aux points 5 et pour les échantillonnages du 30/09/97 et 21/10/97 aux points 4. Les concentrations de fer sont légèrement supérieures dans l'eau des consommateurs. Ces différences ne sont pas significatives, surtout si on tient compte de la différence du régime d'écoulement. En effet, tel qu'expliqué au chapitre 3, l'eau prélevée, lors des échantillonnages horaires, coule en continu dans les trous d'homme, tandis qu'au robinet du résident une électrovanne ouvre et ferme le robinet. Pour la conduite nettoyée, sous la rue Jean XXIII, les concentrations moyennes de fer sont plus élevées dans l'eau au point 11 qu'au robinet du consommateur 11 pour les échantillonnages du 19/07/97 et 7/09/97. Ces différences s'expliquent en considérant que le consommateur 11 se situe à mi-chemin entre l'entrée de la conduite nettoyée et sa sortie au point 11. En résidant à mi-chemin l'impact du nettoyage mécanique de la conduite sur les concentrations de fer total est inférieur.

Les points 5 et 11 sont les seuls points où des suivis horaires ont été effectués pour les deux tranches de concentrations de silicate injecté soit 3,7 mg SiO₂/L et 7,3 mg SiO₂/L. Aux points 5, il n'y a pratiquement pas de différences entre les concentrations moyennes de fer total lorsque la concentration de silicate moyen injecté est de 3,7 mg SiO₂/L le 25/07/97 ou de 7,3 mg SiO₂/L le 19/09/97 et 22/09/97. Aux points 11, les moyennes des concentrations de fer sont inférieures en septembre lorsque le silicate moyen injecté est de 7,3 mg SiO₂/L. Cette baisse n'est pas l'effet du silicate, mais comme nous l'avons mentionné précédemment, elle a probablement été causée par la réapparition d'une couche de corrosion sur la surface interne de la conduite.

En comparant les écarts types des mesures horaires d'une même journée avec les écart types des mesures hebdomadaires aux points 4, 5 et 7, on constate qu'ils sont du même ordre de grandeur. On peut conclure que les variations des concentrations de fer total de l'ordre de +/- 0,05 mg Fe/L sont des variations normalement encourues dans l'eau du

réseau de distribution à l'étude. Ces variations horaires des concentrations de fer total ne sont pas dues aux variations horaires du silicate. La figure 4.13 présente la corrélation entre le fer total et le silicate, au point 5, pour l'échantillonnage horaire du 22 septembre. Cette figure montre qu'il n'existe pas de corrélation entre le fer total et le silicate au point 5, $R^2=0,02$. Les mêmes tendances sont observées aux autres points pour les autres échantillonnages.

Tableau 4. 5 : Comparaison des concentrations de fer total mesurées lors des échantillonnages horaires et hebdomadaires

Échantillonnages	Silicate injecté (mg SiO ₂ /L)	Moyenne +/- Écart type (mg Fe/L)	Moyenne +/- Écart type (mg Fe/L)
		Point 4	Consommateur 4
Horaires			
30/09/97	≈7,3	0,11 +/- 0,02	0,14 +/- 0,04
2/10/97	≈7,3	0,18 +/- 0,05	0,18 +/- 0,07
Hebdomadaires			
23/05 au 22/10/97		0,12 +/- 0,06	
		Point 5	Consommateur 5
Horaires			
25/07/97	≈3,7	0,15 +/- 0,02	0,20 +/- 0,07
19/09/97	≈7,3	0,17 +/- 0,04	0,20 +/- 0,04
22/09/97	≈7,3	0,11 +/- 0,02	0,14 +/- 0,18
Hebdomadaires			
23/05 au 22/10/97		0,14 +/- 0,05	
		Point 7	
Horaires			
01/08/97	≈3,7	0,03 +/- 0,03	
Hebdomadaires			
23/05 au 22/10/97		0,02 +/- 0,02	
		Point 11	Consommateur 11
Horaires			
19/07/97	≈3,7	0,57 +/- 0,04	0,22 +/- 0,05
07/09/97	≈7,3	0,18 +/- 0,08	0,12 +/- 0,02
Hebdomadaires			
23/05 au 22/10/97		0,12 +/- 0,06	

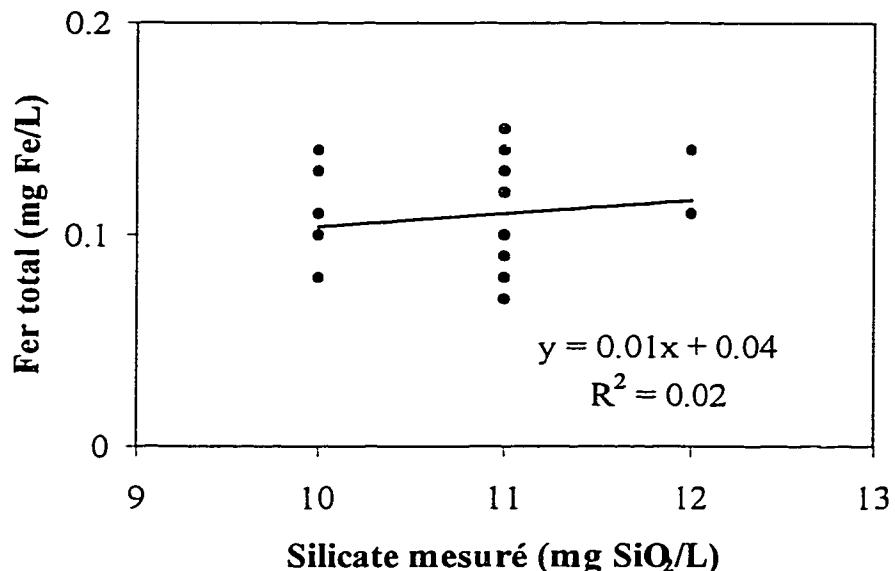


Figure 4. 13 : Concentrations de fer total en fonction des concentrations de silicate au point 5 mesurées lors de l'échantillonnage horaire du 22 septembre 1997

4.6.2. Le cuivre et le plomb

Le cuivre et le plomb dans les eaux potables proviennent surtout des branchements (entrées de service) et de la plomberie domestiques (Desjardins et Landry 1990). Dans le passé, cette partie du réseau de distribution a surtout été construite à l'aide de conduites de plomb ou de cuivre reliées par des brasures au plomb (Desjardins et Landry 1990). Il est donc normal que les concentrations de cuivre et de plomb soient très faibles et même nulles dans les échantillons prélevés dans le réseau de distribution municipal (avant le réseau domestique). Par contre, à la sortie du réseau domestique, soit au robinet, ces dernières concentrations ne sont pas nulles.

Afin de vérifier l'efficacité du silicate sur la réduction des teneurs de cuivre et de plomb, des mesures ont été faites, le 10 septembre alors que 11 mg SiO₂/L de silicate est injecté

dans le réseau. Ces mêmes mesures ont été refaites le 22 octobre, alors qu'il n'y avait plus de silicate d'injecté dans le réseau.

Rappelons que les eaux ont stagné dans le réseau domestique pendant au moins 8 heures avant le prélèvement du premier échantillon. Tel qu'expliqué au chapitre 3, le premier échantillon contient l'eau écoulée lors des premières 30 secondes, le deuxième échantillon contient l'eau écoulée entre 30 et 60 secondes, les autres échantillons sont prélevés directement au robinet après 1 minute, 2 minutes et 5 minutes d'écoulement. Le premier échantillon décrit la qualité de l'eau qui a séjourné dans le réseau domestique pendant 8 heures, alors que les échantillons suivants décrivent la qualité de l'eau qui a circulé pendant quelques secondes seulement.

La figure 4.14 montre les concentrations de cuivre et de plomb au robinet d'un résident en fonction du temps d'écoulement pour les échantillonnages du 10 et du 22 octobre. Dans le premier échantillon prélevé durant les premières 30 secondes de l'ouverture du robinet, il n'y a pas de différence de concentration de plomb entre le 10 et le 22 octobre. Par contre, il semble que l'ajout de 11 mg SiO₂/L de silicate ait permis de faire baisser la concentration de cuivre dans l'eau au premier jet. En effet, la concentration de cuivre passe de 0,107 à 0,076 µg Cu/L en présence de 11 mg SiO₂/L de silicate. Ce résultat doit cependant être interprété avec prudence puisque l'ajout de silicate a fait augmenter le pH de 7,5 à 8,8 et que certains auteurs Leitch (1996); Dodrill et Edwards (1995); Cohen (1993) et Shull (1980) ont rapporté qu'une augmentation du pH permet de réduire la solubilisation du cuivre dans l'eau.

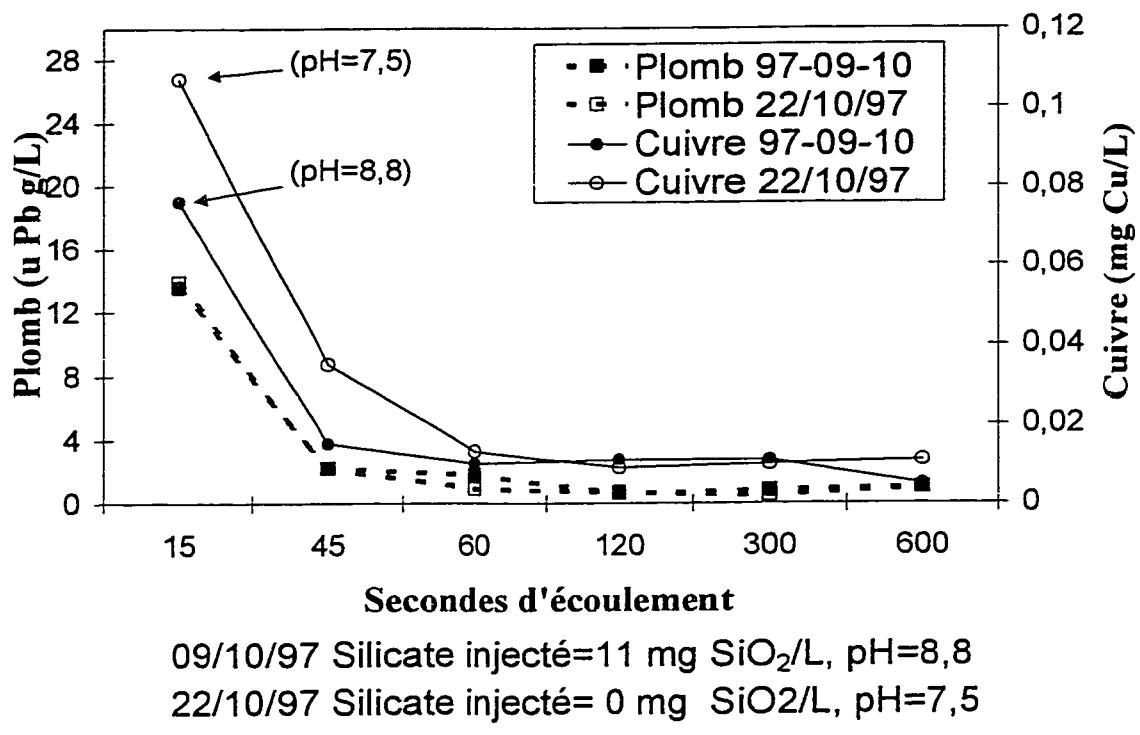


Figure 4. 14 : Évolution du plomb et du cuivre au robinet du consommateur

4.7. Effet de l'ajout de silicate sur la stabilité du chlore libre et sur le dénombrement bactérien

Le chlore libre dans l'eau réagit avec les composés azotés, la matière organique et le fer des conduites. La stabilité du chlore libre, dans un réseau de fonte grise, est principalement influencée par les dépôts de corrosion parce que celui-ci oxyde le fer et les sous-produit de corrosion (Lechevalier et al. 1993); (Pisigan et Singley 1987) et (Martin et al. 1982). Étant donné que l'ajout de silicate :1) n'a pas protégé, de la corrosion, la conduite nettoyée; 2) n'a pas augmenté la capacité hydraulique des vieilles conduites; et 3) n'a pas abaissé les concentrations de fer total, de cuivre ou de plomb, on doit s'attendre à ce que le silicate n'ait pas augmenté la stabilité du chlore libre ou abaissé le dénombrement bactérien.

4.7.1. Le chlore libre

Pour des conduites en fonte grise, la concentration de chlore libre baisse avec le temps de séjour. Ainsi plus le temps de séjour est long (temps requis pour que l'eau passe du poste de rechloration jusqu'au point d'échantillonnage) plus la concentration en chlore résiduelle sera faible.

La figure 4.15 montre le chlore libre en fonction du temps de séjour probable pour les points de contrôle 1 à 5, 7 à 9 et 11 à 13. La figure 4.14 A) a été tracée en utilisant les concentrations de chlore libre mesurées lors de l'échantillonnage hebdomadaire du 15 juillet. La concentration de chlore libre à l'entrée du secteur était de 0,71 mg Cl₂/L et la concentration de silicate ajouté à l'entrée était de 4 mg SiO₂/L. La figure 4.14 B) a été tracé en utilisant les concentrations de chlore libre mesurées lors des échantillonnages hebdomadaires du 7 août et du 7 octobre. La concentration de chlore libre était de 0,22 mg Cl₂/L (le 7 août) et de 0,20 mg Cl₂/L (le 7 octobre). Les concentrations de silicate ajoutées à l'entrée étaient respectivement de 3,2 mg SiO₂/L et de 6,6 mg SiO₂/L.

Cette figure montre que plus le temps de séjour est long plus la consommation du chlore libre est grande. En effet, le 15 juillet, avec une concentration d'injection de 0,71 mg Cl₂/L, du chlore libre est détecté aux points de suivi 2 à 4, 7 à 9 et 11 à 13, mais pas au point 5. Ce point, situé à la sortie de la conduite sous la rue Omer-Barrière, a un temps de séjour supérieur à 350 minutes. Lorsque la concentration d'injection du chlore libre est de l'ordre de 0,2 mg Cl₂/L, le chlore libre n'est détecté qu'aux points 2, 7, 8, et 9. Même lorsque l'on double la quantité de silicate injectée (de 3,3 à 6,6 mg SiO₂/L), le chlore libre est entièrement consommé dans les 150 premières minutes du temps de séjour.

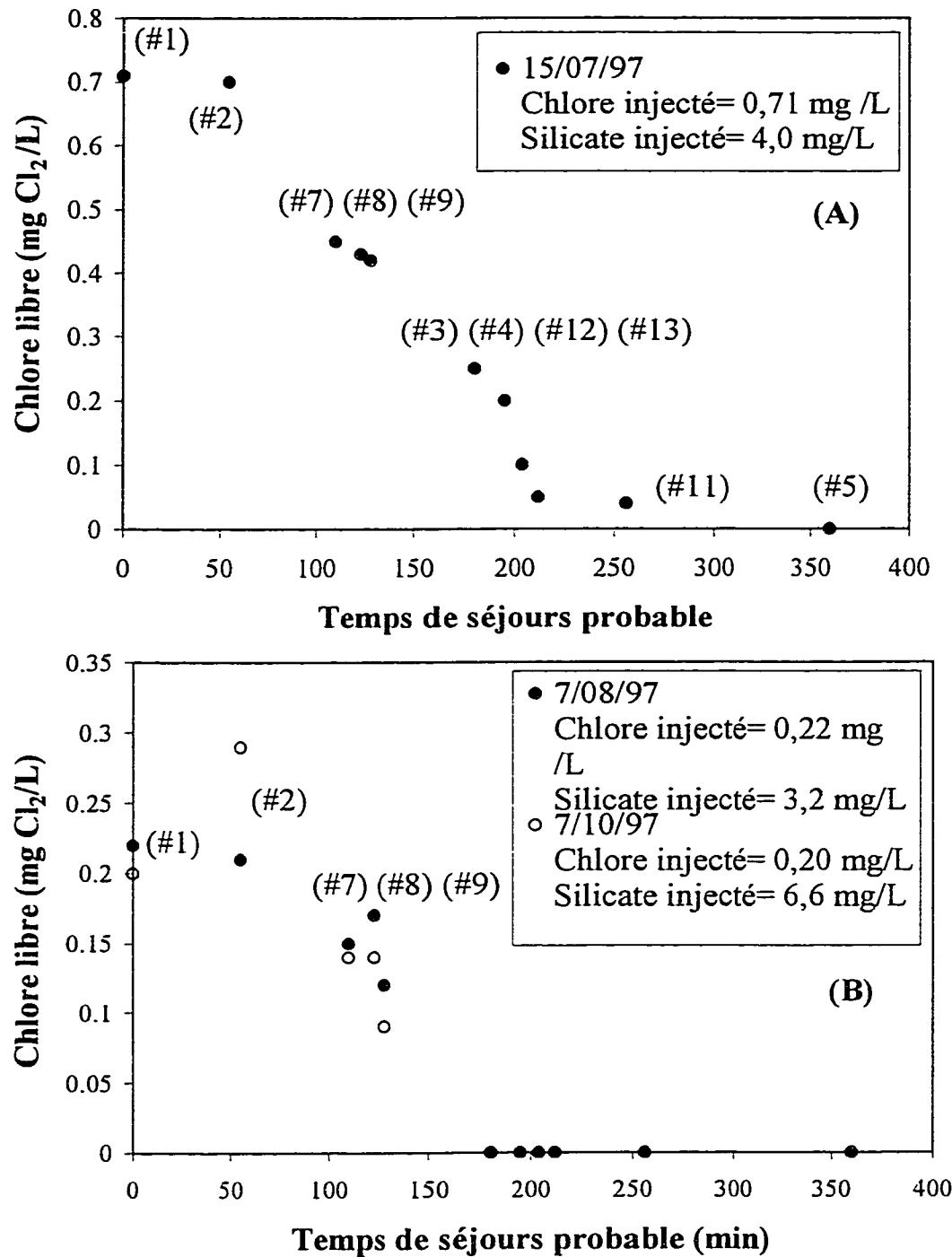


Figure 4. 15 : Chlore libre en fonction du temps de séjour : (A) le 15 juillet; (B) le 7 août et le 7 octobre 1997

4.7.2. Le dénombrement bactérien

Les tubercules augmentent l'aire de surface de la conduite, le transport de nutriment aux parois, la précipitation des composés organique et protège les bactéries de la désinfection (Lechevalier et al. 1996). La présence de bactéries coliformes dans les tubercules de corrosion de conduites en fer a été rapportée par plusieurs chercheurs (Camper 1994); (Lechevalier et al. 1996); (Emde et al. 1992); (Lechevalier 1990) et (Lechevalier et al. 1987); (Martin et al. 1982); (Tuovinen et al. 1980) ; (Allen et al. 1980). Le silicate, tel qu'injecté dans l'eau du secteur, n'a pas eu d'influence sur le taux de formation ou de dissolution des tubercules de corrosion. De plus, il n'a pas augmenté la stabilité du chlore libre. Étant donné que le silicate ne possède pas un effet biocide documenté, il est probable que celui ci n'ait pas eu d'effet sur le dénombrement bactérien.

La figures 4.16 présente le dénombrement, exprimé en logarithme, des bactéries hétérotrophes aérobies en fonction de la concentration de chlore libre pour les échantillonnages hebdomadaires effectués de mai à octobre. La figure 4.16 A) montre la corrélation linéaire entre le logarithme des dénombremnts de BHA et les concentrations de chlore libre au point 2, la figure 4.16 B) montre celle au point 9 et la figure 4.16 C) montre celle au point 4.

Dans l'eau du secteur à l'étude, le dénombrement bactérien est principalement influencée par la concentration de chlore libre. En effet de très bonne corrélation existe entre le dénombremnts des bactéries hétérotrophes aérobies et la concentration de chlore libre aux points où on mesure du chlore libre. Lorsque l'on s'éloigne du point d'injection du chlore, cette corrélation diminue : point 2 $R^2=0,97$, point 9 $R^2=0,73$ et point 4 $R^2=0,37$. Cela signifie que même si le chlore ne se rend pas jusqu'au point de suivi, la population de BHA est atteinte par le chlore en amont du point de suivi.

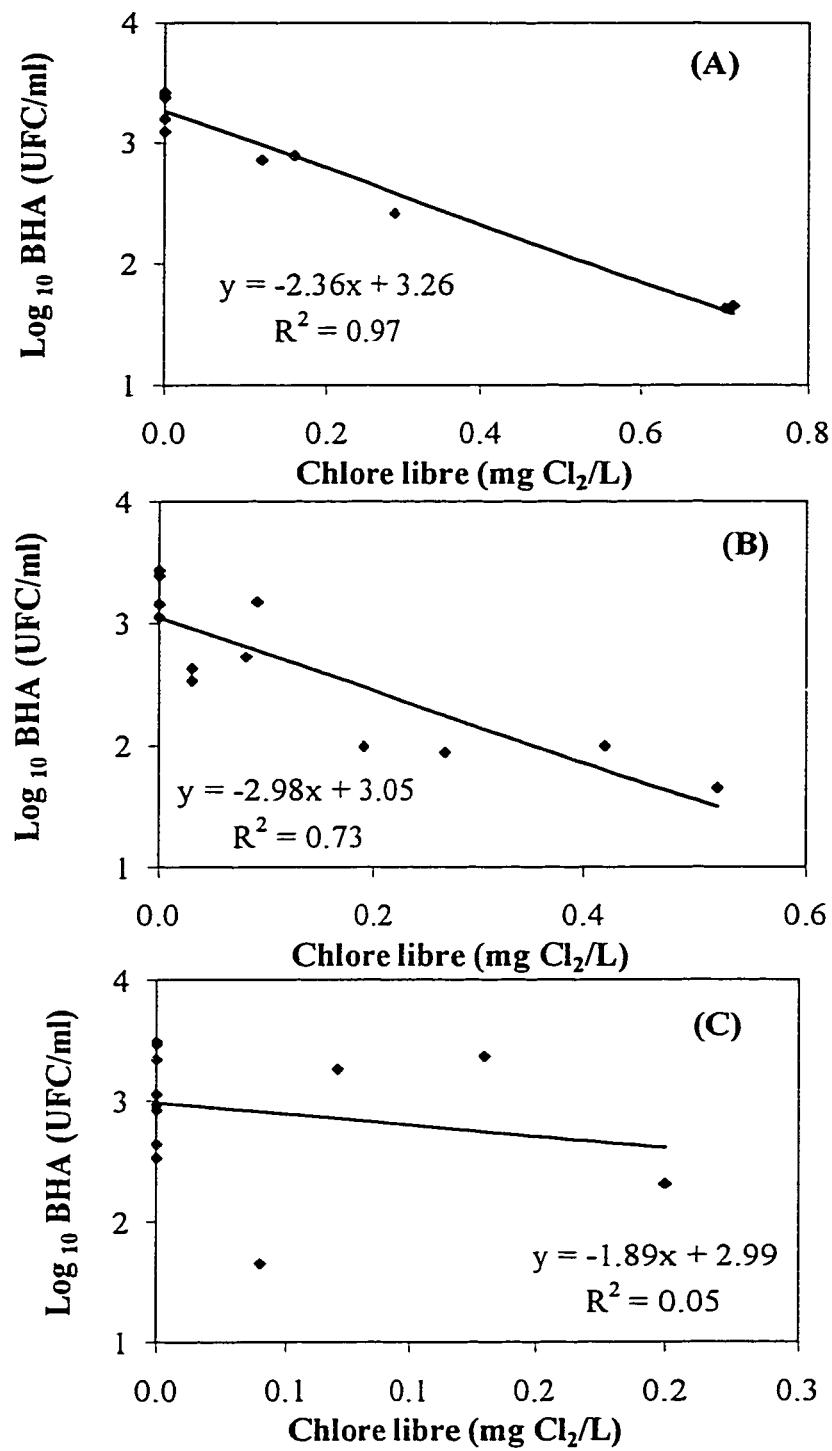


Figure 4.16 : $\text{Log}_{10} \text{BHA}$ en fonction des concentrations de chlore libre : (A) au point 2; (B) au point 9 et (C) au point 4

Le tableau 4.6 présente la viabilité de l'activité bactérienne en fonction du chlore libre, aux points 1, 7, 11 et 5, mesurée lors des campagnes d'échantillonnage hebdomadaires du 16 et 22 juillet. Ce tableau montre que même lorsque le chlore libre n'est pas détecté à un point de mesure la viabilité de l'activité bactérienne est affectée.

Tableau 4. 6 : Viabilité de l'activité bactérienne en fonction du chlore libre

	16 juillet 97		22 juillet 97	
Points	Chlore libre (mg Cl ₂ /L)	Viabilité (%)	Chlore libre (mg Cl ₂ /L)	Viabilité (%)
1	0,70	8,3	0,21	20,6
7	0,45	19,6	0,13	19,0
11	0,04	21,5	0,00	18,1
5	0,00	14,7	0,00	40,7

La figure 4.17 présente le logarithme des concentrations des bactéries hétérotrophes aérobies en fonction des concentrations de silicate au point 4 pour les échantillonnages hebdomadaires effectués avant le début de la rechloration. Cette figure montre qu'il n'existe pas de corrélation entre les BHA et le silicate au point 4, $R^2=0,02$. Les mêmes tendances sont observées aux autres points.

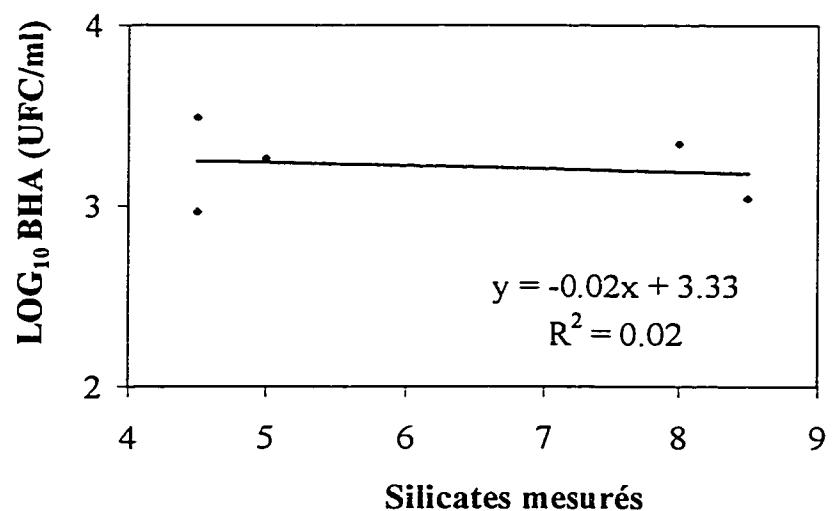


Figure 4. 17 : $\text{Log}_{10} \text{ BHA}$ en fonction des concentrations de silicate : au point 4 avant le début de la rechloration

4.8. Hypothèses et discussion

Cette étude conclue que l'ajout en moyenne 3,7 mg SiO₂/L de silicate du 18 juin au 18 août et 7,3 mg SiO₂ /L du 18 août au 15 octobre 1997, dans le secteur St-Vincent de Paul, Ville de Laval, n'a pas permis de :

- maintenir, dans l'eau, une concentration de fer total inférieure à 0,2 mg Fe/L;
- récupérer la capacité hydraulique des vieilles conduites;
- stabiliser la corrosion dans une conduite après un nettoyage mécanique;
- stabiliser le chlore libre;
- abaisser l'activité bactérienne.

Comment expliquer ces résultats ? Dans les prochaines sections, nous présentons une discussion quant à l'efficacité de l'ajout de silicate dans l'eau potable.

4.8.1. Concentration d'injection du silicate

L'injection de concentration insuffisante de silicate est une des raisons la plus souvent citée dans la littérature pour expliquer son inefficacité (Katsanis et al. 1986). D'après certains auteurs MacQuarrie et al. (1997); Lytle et al. (1996); Katsanis et al. (1986); Lane et al. (1977) et American Water Works Association Research Foundation (1997), il faut, dans une première étape ajouter une concentration importante de silicate afin de former une couche de passivation uniforme sur la surface interne de la conduite. Par la suite, l'ajout de quantité plus faible de silicate permet d'entretenir cette couche. Cette manière de procéder découle de l'hypothèse qui veut que le silicate agisse comme inhibiteur anodique. Une couverture partielle des sites anodique favorise la corrosion par piqûre ((American Water Works Association Research Foundation 1997); (Jones 1996); (Trethewey et Chamberlain 1988); (Harrop 1988); (Riggs 1973); (Schneider et Stumm 1964); et (Evans 1960)). Rappelons que l'oxydation du métal se fait à l'anode. En

réduisant l'aire de l'anode, sans réduire le courant, on favorise une corrosion accélérer des sites anodiques non recouvert.

Lane et al. (1977) ont, les premiers, documentés l'avantage de l'ajout de concentration élevée de silicate lors de la période de passivation. Ils proposent d'ajouter une concentration de 20 mg SiO₂/L durant la période de passivation. Par la suite, ils proposent d'ajouter 10 mg SiO₂/L de silicate afin de maintenir cette couche de passivation. La compagnie Silicate National Ltée, distributrice de silicate, recommande d'ajouter une concentration de 24 mg SiO₂/L lors de la période de passivation et par la suite de maintenir une concentration minimale de 4 mg SiO₂/L. Par contre, avant les travaux de (Lane et al. 1977), la concentration de silicate appliquée en période de passivation et de maintien était de 8 mg/L SiO₂ ((McQuillan et Spenst 1976); (Lane et al. 1973); (Shuldener et Sussman 1960); (Shuldener et Lehrman 1957); (Lehrman et Shuldener 1952); (Sussman 1952); (Stericker 1945); (Stericker 1938) et (Tresh 1922)).

Parce que nous voulions éviter les plaintes d'eaux colorées dans le secteur à l'étude, la compagnie Silicate National Inc a recommandé de ne pas dépasser, dans l'eau du réseau, un pH de 8,5. En effet, les travaux de Rompré et al. (1998) ont montré qu'à pH 9,0, l'ajout de silicate favorise la remise en suspension des produits de corrosion dans les réacteurs annulaires. Tel que mentionné à la section 4.2, la concentration maximale pouvant être injectée sans dépasser un pH de 8,5 était en moyenne 3,7 mg SiO₂/L du 18 juin au 18 août et de 7,3 mg SiO₂/L du 8 août au 15 octobre.

4.8.2. Dépolymérisation du silicate

La solution concentrée de silicate de sodium de type N contient surtout des polymères qui ne sont pas très efficaces comme inhibiteur de corrosion (Silicates National Ltée 1998). Après dilution, les polymères forment des monomères qui sont efficaces. Cette réaction de dépolymérisation peut prendre de 20 à 180 minutes (Silicates National Ltée 1998). On peut donc supposer que cette dernière n'a pas eu le temps de se produire étant

donné les temps de séjour relativement courts dans le secteur à l'étude. Par contre, des vérifications, nous ont permis de constater que la méthode de mesure du silicate, que nous avons utilisée, est basée sur une réaction du silicate sous forme de monomère avec le molybdate (Thompson et al. 1998). Cette dernière méthode ne mesure que le silicate sous forme de monomère.

4.8.3. Effet du silicate dans les vieilles conduites

Deux hypothèses sont avancées pour expliquer l'inefficacité du silicate comme inhibiteur de corrosion dans les vieilles conduites.

1. L'ajout de silicate ne diminue pas de façon significative le taux de corrosion des conduites en fonte grise, mais agit plutôt comme séquestrant.
2. Le faible taux de corrosion des vieilles conduites ne permet pas au silicate d'inhiber la corrosion.

Plusieurs applications du silicate de sodium comme inhibiteur de la corrosion en eau potable ont été présentées ((Rompré et al. 1998); (Rompré et al. 1997); (MacQuarrie et al. 1997); (Boireau et al. 1997); (Lytle et al. 1996); (Katsanis et al. 1986); (Lane et al. 1977); (McQuillan et Spens 1976); (Lane et al. 1973); (Dart et Foley 1972); (Shuldener et Sussman 1960); (Shuldener et Lehrman 1957); (Lehrman et Shuldener 1952); (Sussman 1952); (Loschiavo 1948); (Stericker 1945); (Stericker 1938); (Texter 1923) et (Tresh 1922). En examinant ces références de plus près on constate que les effets positifs du silicate pour le fer sont soit une diminution des problèmes d'eau rouge soit une réduction du taux de corrosion des conduites neuves en acier galvanisé (Tableau 2.1). Ce qui confirme les observations de Rompré et al. (1998): pour de la fonte grise en condition d'écoulement le silicate agirait en tant que séquestrant, mais pas en tant qu'inhibiteur.

Une conduite neuve et une conduite vieille de trente ans n'ont pas le même type de dépôts sur leurs surfaces internes. De plus, les conditions électrochimiques de leurs surfaces internes sont différentes. Des dépôts ont été prélevés dans chaque type de conduites et analysés. Les résultats montrent que la condition de ces dépôts varie avec leurs âges. Ainsi, plus la corrosion est avancée, plus la proportion de magnétite est élevée. Les produits de corrosion formés dans les réacteurs annulaires ont un rapport magnétite:goethite de 5:95 et 10:90. La proportion de magnétite y est plus faible que dans les produits de corrosion prélevés dans la conduite sous la rue Jean XXIII cinq mois après son nettoyage mécanique (30:70). Finalement, les dépôt dans la conduite vieille de 30 ans, sous la rue Belleville, présente un rapport égale entre la magnétite et la goethite (50:50).

Sontheimer et al. (1981), proposent un modèle pour expliquer la formation de la goethite et de la magnétite. Dans ce modèle, ils supposent que la formation de la sidérite est une première étape. La goethite est produite lors des réactions secondaires et tertiaires, alors que la magnétite ne se forme que lors des réactions tertiaires. La goethite produite lors des réactions secondaires est peu adhérente et est souvent à l'origine des problèmes d'eau rouge, tandis que la goethite et la magnétite, produites à partir de la sidérite, lors des réactions tertiaires, forment une couche adhérente et protectrice. Avec l'apparition de ces dépôts, le taux de corrosion diminue et stagne autour de 6 $\mu\text{m}/\text{année}$ dans les vieilles conduites de 1 à 3 ans (Sontheimer et al. 1981). C'est un taux de corrosion plus faible que celui de 400 $\mu\text{m}/\text{année}$ mesuré, à l'aide de polarisation linéaire, sur des coupons neufs de fonte grise (Raad 1998).

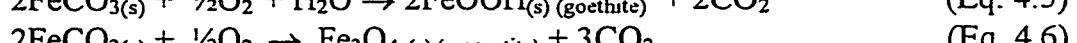
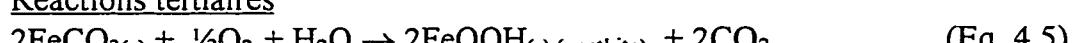
Réaction primaire



Réactions secondaires



Réactions tertiaires



Les résultats des essais de performance hydraulique et des analyses de fer total indiquent que les vieilles conduites du secteur à l'étude semblent effectivement avoir un taux de corrosion faible et que les dépôts principalement de goethite et de magnétite semblent donc former une couche protectrice. Dans ce contexte, il est normal que l'ajout d'un inhibiteur de corrosion n'a pas eu d'effet marqué sur le taux de corrosion.

4.8.4. Effet du silicate dans la conduite mécaniquement nettoyée

Deux hypothèses sont avancées pour expliquer l'inefficacité du silicate comme inhibiteur de corrosion dans une conduite mécaniquement nettoyée située sous la rue Jean XXIII.

1. L'ajout de silicate ne diminue pas de façon significative le taux de corrosion des conduites en fonte grise, mais agit plutôt comme séquestrant.
2. Les concentrations de silicate injectées furent trop faibles pour inhiber la corrosion d'une conduite mécaniquement nettoyée.

Tel qu'indiqué à la section 4.6.1, le nettoyage de la conduite Jean XXIII a généré des hausses de fer total, alors que la turbidité, à l'exception de deux pointes, n'a pas été à la hausse. C'est à dire que dans cette conduite, nous n'avons pas observé de problème de fer particulaire qui cause des hausses de turbidité et des problèmes d'eau colorée. Le silicate aurait transformé le fer particulaire en fer dissous. Puisque seul le fer total a été mesuré nous ne pouvons pas conclure sur ce point.

Contrairement aux vieilles conduites, une conduite nettoyée présente un taux de corrosion très élevé. Ce dernier serait d'un ordre de grandeur plus élevé que celui observé dans une conduite neuve. En effet, le taux de corrosion dans une conduite mécaniquement nettoyé pourrait se comparer au taux de corrosion dans une conduite neuve raccordée à une ancienne conduite. Suite au raccord d'une conduite neuve à une ancienne conduite, une différence de potentiel électrochimique s'établit entre le métal de

la nouvelle conduite qui possède un potentiel électronégatif élevé et la couche de corrosion de l'ancienne conduite qui a perdu son potentiel électronégatif. La conduite neuve agit comme anode tandis que la conduite ancienne agit comme cathode. Il s'ensuit une corrosion rapide de la nouvelle conduite (Trethewey et Chamberlain 1988). Le nettoyage mécanique de la conduite sous la rue Jean XXIII a permis d'enlever la plus grande partie des sous-produits de corrosion laissant environ 20% de la surface de la conduite couvert de tubercules non uniformément distribués sur les parois de la conduite. La corrosion extrêmement rapide de cette conduite a certainement été favorisée par la différence de potentiel électrochimique existant entre les surfaces exposées du métal et les surfaces recouvertes de sous-produit de corrosion. L'hétérogénéité des parois de la conduite a alors favorisé la corrosion par piqûre et la réapparition de tubercules.

L'ajout d'inhibiteurs de corrosion, dans l'eau alimentant une conduite nouvellement nettoyée, est peu documenté. Une seule référence concernant l'ajout de polyphosphate dans une telle conduite fut trouvée (Hatch 1973). Dans cette référence, l'auteur recommande d'ajouter assez de polyphosphate pour faire augmenter sa concentration jusqu'à 100 mg/L pendant le nettoyage mécanique. Par la suite la concentration de polyphosphate doit être maintenue entre 20 et 40 mg/L lors des premières journées suivant le nettoyage. Il est à noter que la concentration d'injection normale de cet inhibiteur varie entre 0,5 à 2,0 mg/L. Il est donc logique de penser que les quantités de silicate injectées dans l'eau de la conduite ont été trop faibles pour contrer les différences de potentiel électrochimique et inhiber de façon efficace la corrosion de la conduite sous la rue Jean XXIII.

CHAPITRE V

5. Conclusion

Du silicate de sodium a été injecté dans un secteur du réseau de distribution d'eau potable de Ville de Laval pendant près de 5 mois, soit en moyenne 3,7 mg SiO₂/L du 18 juin au 18 août et 7,3 mg SiO₂/L du 18 août au 15 octobre 1997.

Les variations de consommation d'eau potable dans le secteur à l'étude ont été très importantes. Cela a causé des difficultés pour les mesures de débit et pour le contrôle de l'ajout de silicate de sodium.

Les caractéristiques de l'eau (pH et minéralisation) dans le réseau de distribution ne nous ont pas permis d'ajouter tout le silicate recommandé par la compagnie Silicate National Ltée, soit une concentration de 24 mg SiO₂/L en période de passivation et une concentration minimale de 4 mg SiO₂/L en période de maintien. En effet, l'ajout de silicate de sodium fait monter le pH. Ce dernier doit, selon Rompré et al. (1998) demeurer inférieur à 8,5 afin d'éviter toute dégradation des qualités esthétiques de l'eau. Afin de respecter cette contrainte, il n'a pas été possible d'ajouter plus de 4 mg SiO₂/L lorsque le pH de l'eau à l'entrée du secteur était de 7,3 et 8 mg SiO₂/L lorsque le pH de l'eau à l'entrée du secteur était de 7,0. En respectant de tels concentrations, il a été possible de minimiser le nombre de plaintes de la part des consommateurs.

Les augmentations brusques de concentration de fer total dans l'eau du secteur ont été surtout causées par le nettoyage mécanique d'une conduite, par des changements rapides des conditions d'écoulement de l'eau ou par une stagnation prolongée de l'eau dans les conduites de fonte grise non revêtue. À l'exception de ces épisodes, il a été possible de maintenir une concentration de fer total inférieur à 0,2 mg Fe/L dans l'eau du secteur. Par contre ces concentrations de fer total était déjà atteinte avant l'ajout du silicate de sodium.

Les résultats de l'analyse des échantillons prélevés tout au long de l'étude et des observations faites dans le réseau montrent que:

- il est possible d'ajouter du silicate de sodium comme inhibiteur de corrosion sans générer de plaintes de la part des consommateurs;
- l'ajout de silicate de sodium dans une conduite nettoyée mécaniquement ne permet pas de stabiliser rapidement le taux de corrosion. Cela a été montré de trois façons différentes :
 1. la concentration de fer total dans l'eau circulant dans cette conduite est demeurée élevée;
 2. le gain de capacité hydrauliques obtenu suite au nettoyage mécanique a été en grande partie perdu durant les cinq mois de l'ajout de silicate de sodium;
 3. une caméra, insérée dans la conduite a montré que les tubercules arrachés lors d'un nettoyage mécanique, se reforment rapidement même si du silicate de sodium est injecté.
- l'ajout de silicate de sodium pendant cinq mois dans des conduites corrodées n'a pas permis d'améliorer les performances hydrauliques de ces conduites;
- l'ajout de silicate de sodium n'a pas fait baisser la demande en chlore. De plus, aucune variation d'activité bactérienne dans le réseau n'a été observé suite l'ajout de silicate de sodium.

Références

- ALLARD, D. (1997). Techniques d'échantillonnage et suivi de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution. 9 ième atelier sur l'eau potable, Montréal, 407-416.
- ALLEN, M. J., TAYLOR, R. H. et GELDREICH, E. E. (1980). The occurrence of microorganisms in water main encrustation. Journal of American Water Works Association, 72(11), 614-625.
- AWWARF (1997). Internal corrosion of water distribution systems, The Foundation, Denver. 586 p.
- APHA, AWWA et WEF (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Washington, D.C.
- AQTE (1980). Les fuites dans les réseaux de distribution d'eau- le programme de L'AQTE. Eau du Québec, 13(4), 337-339.
- AWWA (1991). "Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies.", McGraw-Hill Inc., New York.
- BARIBEAU, H. (1995). Évolution des oxydants et des sous-produits d'oxydation dans les réseaux de distribution d'eau potable de ville de Laval, Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- BOIREAU, A., BENEZET-TOULZE, M., RANDON, G. et CAVARD, J. (1997). Limitation de la solubilisation du plomb par ajout de produit filmogène. Transposition d'une étude sur pilote à un réseau réel. Techniques Sciences Méthodes, L'eau, 92(5), 63-72.
- BOULOS, L. (1996). Influence de l'état physiologique des coliformes sur leur résistance à la désinfection, Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada
- CAMPER, A. K. (1994). Coliform regrowth and biofilm accumulation in drinking water systems: A review. Biofouling and biocorrosion in industrial water systems, G. G. Geesey, Lewandowski, Z. et Flemming, H.-C., eds., Lewis.
- COHEN, A. (1993). Corrosion by potable waters in building systems. Material performance, 32(8), 56-83.

- DART, J. F. et FOLEY, P. D. (1972). Silicate as Fe, Mn deposition preventive in distribution systems. Journal of American Water Works Association, 64(4), 244-249.
- DESJARDINS, R. et LANDRY, D. (1990). Le contrôle du plomb dans l'eau potable. Techniques Sciences Méthodes, L'eau, Avril, 189-193.
- DODRILL, D. M. et EDWARDS, M. (1995). Corrosion control on the basis of utility experience. Journal of American Water Works Association, 87(7), 74-85.
- EMDE, K. M. E., SMITH, D. W. et FACEY, R. (1992). Initial investigation of microbially influenced corrosion in a low temperature water distribution system. Applied and Environmental Microbiology, 58(2), 169-175.
- EVANS, U. R. (1960). The corrosion and oxidation of metals, E. Arnold, London. 421 p.
- HACKERMAN, N. et SNAVELY, E. S. (1979). Fundamentals of inhibitors. NACE basic corrosion course, A. d. Brasunas, ed., National Association of Corrosion Engineers, Houston, 9.1-9.25.
- HARROP, D. (1988). Chemical Inhibitors for corrosion control. Chemical inhibitors for corrosion control: the proceedings of an international symposium, organized by the Industrial Division of the Royal Society of Chemistry and the Institution of Corrosion Science and Technology, University of Manchester, 21st-22nd April 1988, B. G. Clubley, ed., The Society, Cambridge, 1-16.
- HATCH, G. B. (1973). Inhibitors for potable water. Corrosion inhibitors, Nathan, ed., National Association of Corrosion Engineers, Houston, 126-148.
- JONES, D. A. (1996). Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, New Jersey. 572 p.
- KARALEKAS, P. C., RYAN, C. R. et TAYLOR, F. B. (1983). Control of Lead, copper, and iron pipe corrosion in Boston. Journal of American Water Works Association, 75(2), 92-98.
- KATSANIS, E. P., ESMONDE, W. B. et SPENCER, R. W. (1986). Soluble silicate corrosion inhibitors in water systems. Material Performance, 25(4), 19-25.
- KIRMEYER, G. J. et LOGSDON, G. S. (1983). principles of internal corrosion and corrosion monitoring. Journal of American Water Works Association, 75(2), 78-83.

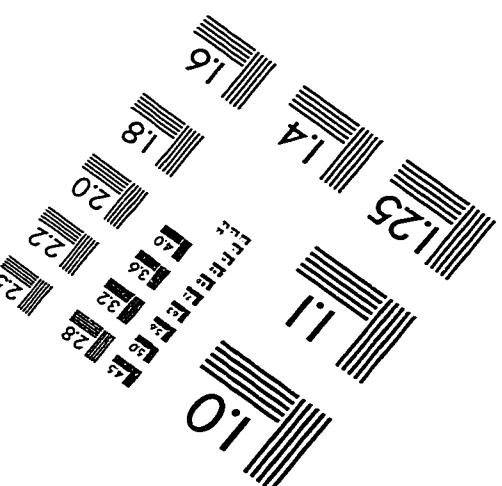
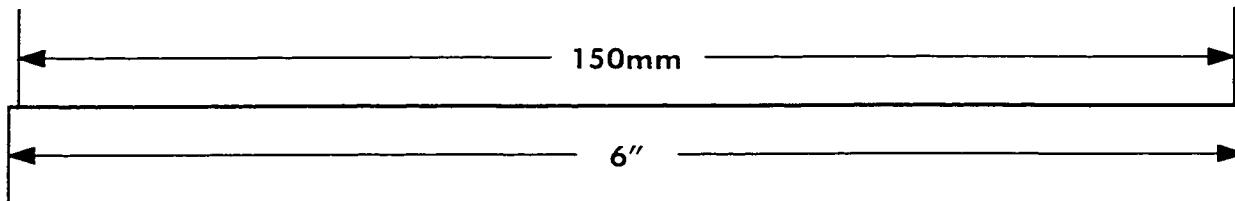
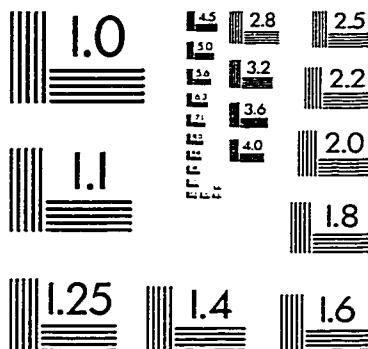
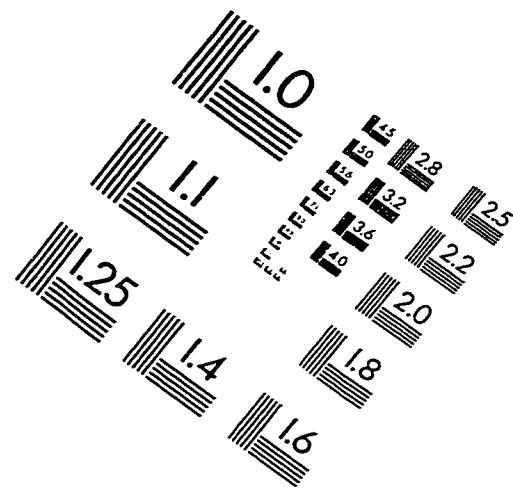
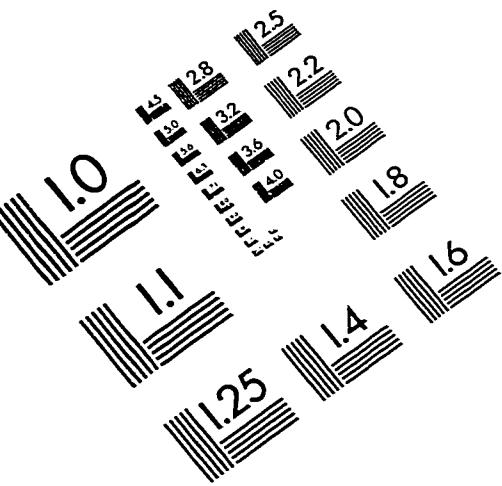
- LAFRANCE, P., LAVOIE, J. et TOUTANT, S. (1991). Les contrôles qualitatifs et les programmes de gestion des réseaux de distribution d'eau potable à Ville de Laval. Sciences et techniques de l'eau, 24(4), 333-337.
- LANE, R. W., LARSON, T. E., NEFF, C. H. et SCHILSKY, S. W. (1973). Silicate treatment inhibits corrosion of galvanized steel and copper alloys. Material protection and performance, 12(4), 32-37.
- LANE, R. W., LARSON, T. E. et SCHILSKY, S. W. (1977). The effect of pH on the silicate treatment of hot water in galvanized piping. Journal of American Water Works Association, 69(8), 457-461.
- LECHEVALIER, M. W. (1990). Coliform regrowth in drinking water: A review. Journal of American Water Works Association, 82(11), 74-86.
- LECHEVALIER, M. W., BABCOCK, T. M. et LEE, R. G. (1987). Examination and characterization of distribution system biofilms. Applied and Environmental Microbiology, 53(12), 2714-2724.
- LECHEVALIER, M. W., LOWRY, C. D., LEE, R., G. et GIBBON, D. L. (1993). Examining the relationship between iron corrosion and the disinfection of biofilm bacteria. Journal of American Water Works Association, 87(7), 111-123.
- LECHEVALIER, M. W., WELCH, N. J. et SMITH, D. B. (1996). Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. Applied and Environmental Microbiology, 62(7), 2201-2211.
- LEHMANN, J. A. (1964). Control of corrosion in water systems. Journal of American Water Works Association, 56(8), 1009-1018.
- LEHRMAN, L. et SHULDENER, H. L. (1951). The role of sodium silicate in inhibiting corrosion by film formation on water piping. Journal of American Water Works Association, 43(3), 175-188.
- LEHRMAN, L. et SHULDENER, H. L. (1952). Action of sodium silicate as a corrosion inhibitor in water piping. Industrial and engineering chemistry, 44(8), 1765-1769.
- LEITCH, R. A. (1996). Corrosion control:begin with pH adjustment. Water Engineering and Management, 143(1), 22-25.

- LOSCHIAVO, G. P. (1948). Experiences in conditioning corrosive army water supplies in New England. Corrosion, 4(1), 1-14.
- LYTLE, D. A., SCHOCK, M. R. et SORG, T. J. (1996). Controlling lead corrosion in the drinking water of a building by orthophosphate and silicate treatment. Journal of New England Water Works Association, 110(3), 202-207.
- MACQUARRIE, D. M., MAVINIC, D. S. et NEDEN, D. G. (1997). Greater Vancouver water district drinking water corrosion inhibitor testing. Canadian Journal of Civil Engineering, 24(1), 34-52.
- MARTIN, R. S., GATES, W. H., TOBIN, R. S., GRANTHAM, D., SUMARAH, R., WOLFE, P. et FORESTALL, P. (1982). Factors affecting coliform bacteria growth in distribution systems. Journal of American Water Works Association, 74(1), 34-37.
- MCQUILLAN, R. G. et SPENST, P. G. (1976). The addition of chemicals to apartment water supplies. Journal of American Water Works Association, 68(10), 415-419.
- PISIGAN, R. A. et SINGLEY, J. E. (1987). Influence of buffer Capacity, chlorine residual, and flow rate on corrosion of mild steel and copper. Journal of American Water Works Association, 79(2), 62-86.
- RAAD, R. (1998). Communication personnelle.
- RIGGS, O. L. (1973). Theoretical aspects of corrosion inhibitors and inhibition. Corrosion inhibitors, C. C. Nathan, ed., National Association of Corrosion Engineers, Houston, 7-27.
- ROMPRÉ, A., PRÉVOST, M. et ALLARD, D. (1997). Corrosion interne des réseaux de distribution d'eau: diagnostic et intervention. Étape 1 : Conception, installation et mise en route des réacteurs annulaires, des dispositifs de mesure de la corrosivité et mise au point des mesures d'analyse., École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- ROMPRÉ, A., NIQUETTE, P., PRÉVOST, M. et ALLARD, D. (1998). Corrosion interne des réseaux de distribution d'eau: diagnostic et intervention. Étape 1 : Determination des conditions d'expérimentation pour les essais sur réseau réel., École Polytechnique de Montréal, Montréal.

- SCHNEIDER, C. R. et STUMM, W. (1964). Evaluation of corrosion in distribution systems. Journal of American Water Works Association, 56(5), 621-632.
- SHULDENER, H. L. et LEHRMAN, L. (1957). Influence of bicarbonate ion on inhibition of corrosion by sodium silicate in a zinc-iron system. Journal of American Water Works Association, 49(11), 1432-1440.
- SHULDENER, H. L. et SUSSMAN, S. (1960). Silicate as a corrosion inhibitor in water systems. Corrosion, 16(7), 354-358.
- SHULL, K. E. (1980). An experimental approach to corrosion control. Journal of American Water Works Association, 72, 280-285.
- SILICATES NATIONAL LTÉE. (1998) Communication personnelle. .
- SONTHEIMER, H., KÖLLE, W. et SNOEYINK, V. L. (1981). The siderite model of the formation of corrosion scales. Journal of American Water Works Association, 73, 572.
- STERICKER. (1938). Sodium silicates in water to prevent corrosion. Industrial and engineering chemistry, 30(3), 348-351.
- STERICKER, W. (1945). Protection of small water systems from corrosion. Industrial and engineering chemistry, 37(8), 716-720.
- SUSSMAN, S. (1952). Cooling water problems in the New York Metropolitan area. Industrial and engineering chemistry, 44(8), 1740-1744.
- TEXTER, C. R. (1923). The prevention of corrosion in hot water supply systems and boiler economizer tubes. Journal of American Water Works Association, 10(9), 764-772.
- THOMPSON, J. L., SCHEETZ, B. E., SCHOCK, M. R., DARREN, L. A. et DELANEY, P. J. (1998). "Sodium silicate corrosion inhibitors: Issues of effectiveness and mechanism." .
- TRESH, J. C. (1922). The Action of Natural Waters on Lead. The Analyst, 47(10), 459-468, 500-505.
- TRETHEWEY, K. R. et CHAMBERLAIN, J. (1988). Corrosion for students of science and engineering, Wiley, New York. 382 p.

TUOVINEN, O. H., BUTTON, K. S., VUORINEN, A., CARLSON, L., MAIR, D. M. et YUT, L. A. (1980). Bacterial, chemical, and mineralogical characteristics of tubercles in distribution pipelines. Journal of American Water Works Association, 72(11), 626-635.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

