UNIVERSITÉ DE MONTREAL

DÉTERMINATION DES TEMPS DE SÉJOUR DANS LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE PAR TRAITEMENT DU SIGNAL

ANOUK DESJARDINS
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
SEPTEMBRE 1999

© Anouk Desjardins, 1999

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

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.

0-612-48848-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉTERMINATION DES TEMPS DE SÉJOUR
DANS LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE
PAR TRAITEMENT DU SIGNAL

Présenté par: DESJARDINS Anouk
en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. BRIÈRE François G., M.E., président
M. MARCHE Claude, Ph.D., membre et directeur de recherche
M.MILLETTE Robert, D.Sc.A, membre

REMERCIEMENTS

Je désire profiter de l'occasion qui m'est donnée de remercier toutes les personnes qui m'ont apporté un soutien, qu'il soit technique ou moral.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Claude Marche qui m'a dirigé et communiqué son intarissable optimisme et à Vincent Gauthier qui a été d'une grande disponibilité pour les essais réseau et la rédaction du mémoire.

Je remercie également la Ville de Montréal, et plus particulièrement Michel Gagné, chef de section usine à la Ville de Montréal, Robert Millette, ingénieur à la Ville de Montréal et Denis Tessier, contremaître aux filtres à l'usine de filtration Atwater, pour nous avoir permis de réaliser l'étude réseau, pour le prêt et l'installation d'équipement et pour l'intérêt porté au projet.

Merci à l'équipe du laboratoire d'hydraulique et plus particulièrement à mon ami Éric Mainville qui non seulement a été d'une grande aide au niveau technique, mais qui a le don de dédramatiser les situations et de montrer la vie sous son plus bel angle.

Merci à toute l'équipe de la Chaire pour avoir su créer une atmosphère de travail agréable et stimulante. Un merci tout spécial à Julie et Jacynthe pour l'aide apportée pour les présentations et à Denis, Patrice et Sylvianne pour l'aide inestimable pendant pour les essais réseau.

Finalement, je tiens à remercier François Brière et Robert Millette pour avoir accepté de juger ce mémoire.

RÉSUMÉ

L'étude de l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable est devenue un sujet de discussion et de recherche de plus en plus important, l'objectif étant de distribuer une eau de la meilleure qualité possible de l'usine jusqu'au robinet du consommateur. Le séjour de l'eau dans le réseau entraîne une modification de ses propriétés en fonction du temps, d'où l'utilité de la connaissance des temps de séjour locaux. Ceux-ci permettent de mieux comprendre l'interaction entre les paramètres physico-chimiques, chimiques et biologiques dans le réseau, et d'améliorer la qualité de l'eau distribuée.

Le temps de séjour de l'eau peut être mesuré par traçage ou par des logiciels de balancement hydraulique. Une étude menée en 1994 à la ville de Laval (Benrhanem, 1996) a démontré que les temps de séjour moyens qu'il est possible d'obtenir par les techniques conventionnelles sont très éloignés de la réalité en raison de plusieurs facteurs dont la complexité de certains réseaux de distribution, la variabilité des écoulements dans les canalisations et la dispersion/diffusion des particules d'eau.

Le but de ce projet de recherche est d'améliorer les techniques de traçage et d'analyse de temps de séjour en réseau d'eau potable en utilisant le traitement du signal pour traiter les données. Dans le cas d'un essai de traçage, le signal d'entrée est la variation de concentration de traceur injectée dans le réseau. Le signal de sortie est la variation de concentration de traceur reçue, après dilution, dispersion et superposition, au point d'échantillonnage. L'approche par le traitement du signal permet, d'une part, de surmonter les difficultés relatives à la connaissance de la structure du réseau et de ses conditions d'opération et, d'autre part, de connaître les temps de séjour et la proportion de leur contribution à un point d'échantillonnage en temps réel.

Dans le cadre de ce projet, trois méthodes d'analyse de résultats de traçage par le traitement du signal ont été développées: la reconstitution de signal, les corrélations croisées et l'analyse spectrale. La reconstitution de signal, qui nécessite une évaluation de la dispersion pour son application, et les corrélations croisées sont basées sur une reconnaissance de forme et de position. Ces méthodes permettent la déduction des temps de séjour en évaluant le décalage temporel nécessaire pour avoir la meilleure correspondance entre le signal émis à l'entrée du réseau et le signal reçu à un point d'échantillonnage. L'analyse spectrale est pour sa part basée sur la reconnaissance des fréquences d'injection reçues à un point d'échantillonnage : connaissant le moment d'injection des fréquences et leur moment d'apparition à un point d'échantillonnage, on peut déduire les temps de séjour.

Dans un premier temps, des simulations numériques et des essais en laboratoire ont été faits pour la mise au point des méthodes. Ensuite, des essais dans la partie supressée de la zone 3 du réseau de la Ville de Montréal ont été réalisés pour vérifier l'applicabilité des méthodes à un réseau réel. Pour ce faire, cinq points d'échantillonnage ont été installés dans la zone d'étude et l'injection de traceur, le chlorure de calcium, s'est faite sur la conduite de succion du poste de pompage situé au réservoir Vincent d'Indy.

L'application des méthodes en réseau réel a donné des résultats satisfaisants. La reconstitution de signal donne de très bons résultats au point d'échantillonnage $n^0 2$ et $n^0 3$ pour les chemins les plus courts qui sont mieux définis par la dispersion. L'application de la dispersion en réseau est complexe parce qu'elle nécessite la connaissance de la structure du réseau et de ses conditions d'écoulement. Pour l'estimation de la dispersion, des valeurs moyennes sont utilisées, les approximations se font alors sentir dans les chemins à temps de séjour plus élevés.

Les corrélations croisées sur une impulsion simple donnent de bons résultats aux points d'échantillonnage $n^0 2$ et $n^0 3$. Comme la reconstitution de signal, les corrélations croisées

sont basées sur une reconnaissance de forme et de position, mais ne nécessitent pas l'évaluation de la dispersion. Les corrélations croisées sur une onde carrée aléatoire ne sont pas adaptées à un traçage en réseau. L'analyse spectrale donne également de bons résultats aux points d'échantillonnage $n^0 2$ et $n^0 3$.

Les points d'échantillonnage n°4 et n°5 sont difficilement analysables étant donné la très faible variation de concentration de traceur à ces points. Le point n°4 est situé en bout de réseau et le point n°5 dans un cul de sac hydraulique, ce qui peut expliquer en partie la faible réponse de ces points au traçage.

Chacune des méthodes développées donnent des résultats de temps de séjour équivalents, mais leur application en terme d'injection de traceur et d'analyse des résultats est très différente. Le choix de la méthode d'analyse dépend du niveau de réponse et du degré d'automatisation désiré. Par exemple, pour une étude de la distribution des temps de séjour en temps réel, l'analyse spectrale est la méthode la plus adaptée. La mise au point finale des méthodes nécessite toutefois des améliorations au niveau de la qualité du signal d'injection et de la récupération des données.

ABSTRACT

Owing to public pressure and to concerns about quality control on the part of the services involved, study of the evolution of water quality in distribution systems has become an increasingly important topic of discussion and research, the objective being to distribute water of optimal quality from the plant to the consumer's tap. Since the properties of the water in a distribution system are modified according to the time of residence in the distribution system, it is useful to know local residence times. This makes it possible to better understand the interaction between the physico-chemical, chemical and biological parameters in the distribution system, which in turn facilitates any attempt to optimize the water quality delivered at any point.

For simple water distribution systems, mean residence times may be measured by tracer study, or estimated using hydraulic models. A campaign using tracer carried out in 1996 in the city of Laval indicated that the mean residence times determined by certain hydraulic models based on a knowledge of the physical and hydraulic characteristics of the distribution system did not always correspond to the experimental results and furthermore, did not provide all the information required. The analysis also showed that the tracer concentrations at sampling points still lack precision due to a number of phenomena, among them dispersion/diffusion.

A tracer analysis performed in a complex water distribution system is a delicate operation, subject to a very precise knowledge of the water distribution system: the state of the water distribution system and its consumption points and their variabilities. To obtain sufficiently accurate residence times and to be able to identify the number of paths the water takes and the proportion of their contributions, reliable and rapid analysis techniques that may be automated are necessary. The objective of this study is to improve tracer techniques and residence time analysis using tracer results subjected to

signal processing. In the case of a tracer study, the input signal is the fluctuation of the initial tracer concentration injected in the water distribution system. The output signal is the tracer concentration received, after dilution, dispersion and superposition, at the sampling point.

Three methods have been developed: signal reconstitution, cross correlation and spectral analysis. Signal reconstitution and cross correlation are based on form and position recognition. These methods make it possible to deduce the residence time at a sampling point by the evaluation of the best fits between the input signal (tracer concentration at the injection) and the output signal (tracer concentration at a sampling point). Spectral analysis is based on the recognition of injected frequencies at a sampling point: knowing the injection time of the frequencies and the time taken to be detected at the sampling point, it is possible to deduce the residence times.

Initially, numerical simulations and laboratory tests have been conducted for refinement of the methods. Then, tests in a water distribution system (city of Montreal, zone 3) have been carried out to verify the applicability of the methods to a real distribution system. For those tests, five sampling points have been installed in the study zone, with tracer injection (calcium chloride) being applied at the suction pipe of the pumping station situated at the Vincent d'Indy reservoir.

The application of the methods to a real water distribution system gave good results. Signal reconstitution provide good results for the sampling points n°2 and n°3 for the shorter paths that are better defined by the evaluation of the dispersion of the tracer. The application of the dispersion in a distribution system is complex because it takes into account the distribution system structure and its state of flow. For the evaluation of dispersion, mean values are taken so that the approximations tend to worsen for long residence time paths.

Cross correlation achieved on a simple impulsion give good results for the sampling points n°2 and n°3 as well. Like signal reconstitution, cross correlations are based on form and position recognition, but they do not require dispersion evaluation. Cross correlation on a random square wave is not adapted to tracer study in a water distribution system. Spectral analysis gives also good results for the sampling points n°2 and n°3.

The sampling point n°4 and n°5 are difficult to analyze because of the very low variation in tracer concentration at those points. The sampling point n°4 is on a dead end and the sampling point n°5 on a hydraulic dead end, which partly explains the low response from those sampling point to the tracer study.

Each of the methods developed give equivalent residence time results, but their application in terms of tracer injection design and results analyzes are very different. The choice of the method depends on the response level and the automation level desired.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VIII

TABLE DES MATIÈRES XI

LISTE DES TABLEAUX XV

LISTE DES FIGURES XVI

LISTE DES ANNEXES XIX

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1: REVUE DE LITTÉRATURE ET MISE EN CONTEXTE 3

1.1 LA QUALITÉ DE L'EAU À LA SORTIE D'USINE DE TRAITEMENT 3

1.2 ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE DISTRIBUTION 3

1.2.1 Impact des conditions physico-chimiques et biologiques sur la dégradation de la qualité de l'eau distribuée 4

1.2.2 Impact des conditions hydrauliques sur la dégradation de la qualité de l'eau distribuée 5

1.3 INFLUENCE DU TEMPS DE SÉJOUR 6

1.4 LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION 7

1.4.1 Les éléments de base d'un réseau de distribution 7

1.4.2 Description mathématique d'un réseau maillé 8

1.4.3 Modélisation 9

1.5 DÉTERMINATION DES TEMPS DE SÉJOUR 10

1.5.1 Traçage en réseau 11
1.5.2 La simulation des temps de séjour et ses difficultés 16
1.6 PRINCIPE GÉNÉRAL DU TRAITEMENT DU SIGNAL 18
1.6.3 Types de signaux 19
1.6.4 Capacité de séparation du traitement du signal 20
1.6.4 Effet du bruit sur l'analyse spectrale 20
CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODES 22
2.1 SIMULATIONS NUMÉRIQUES 22
2.1.1 Création du signal d'entrée 22
2.1.2 Simulation du signal de sortie 24
2.2 ESSAIS EN LABORATOIRE 24
2.2.1 Montage expérimental 24
2.2.2 Injection de traceur 26
2.2.3 Réalisation d'un essai 27
2.3 ESSAIS RÉSEAUX 27
2.3.1 Zone d'étude 27
2.3.2 Choix des points d'échantillonnage 29
2.3.3 Choix du traceur 29
2.3.4 Injection du traceur 31
2.3.5 Échantillonnage et récupération des données 31
2.3.6 Déroulement d'un essai 32
CHAPITRE 3: RECONSTITUTION DE SIGNAUX 35
3.1 MÉTHODE 35
3.1.1 Évaluation de la dispersion 36
3.1.2 Outil de superposition 37
3.2 IMPULSION SIMPLE 38
3.3 ONDE CARRÉE CONTINUE 42

3.4 DIFFICULTÉS LIÉES À LA RECONSTITUTION DE SIGNAL 48
3.5 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE 48
3.5.1 Point d'échantillonnage n^{0}4 48
3.5.2 Point d'échantillonnage n^{0}5 49

CHAPITRE 4: CORRÉLATIONS CROISÉES 53

4.1 PRINCIPE GÉNÉRAL 53
4.2 SIGNAUX PONCTUELS 57
4.2.1 Essai réseau 58
4.2.2 Limites de la méthode 60
4.3 ONDE ALÉATOIRE 61
4.3.1 Simulation numérique 61

CHAPITRE 5 : ANALYSE SPECTRALE 66

5.1 PRINCIPE GÉNÉRAL 67
5.1.1 Intervalle de temps de la transformée de Fourier 67
5.1.2 Transformée de Fourier de différents types d'onde 67
5.1.3 Fréquences pouvant apparaître dans la transformée de Fourier 69
5.1.4 Fréquence minimale détectable 69
5.1.5 Fréquences du signal 70
5.1.6 Fréquence d'échantillonnage 71
5.1.7 Méthode 72
5.2 ESSAI DE LABORATOIRE 75
5.2.1 Application de la méthode et analyse 77
5.3 ESSAI RÉSEAU 84
5.4 ÉVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS CHEMINS 90

CHAPITRE VI: ANALYSE COMPARATIVE DES MÉTHODES 93

6.1 COMPARAISON DES MÉTHODES D'ANALYSE 93
6.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS 96

6.3 DÉVELOPPEMENTS FUTURS PROBABLES 99
6.3.1 Réalisation des essais 99
6.3.2 Équipement 101
6.3.3 Application 101
CONCLUSION 103
ANNEXE I 112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Temps de séjour et facteurs de dilution pour la reconstitution de signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai de traçage du 25 mars 1999 42

Tableau 3.2: Temps de séjour et facteurs de dilution pour la reconstitution de signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai de traçage du 17 février 1999 47

Tableau 5.1: Apparition, disparition des fréquences et temps de séjour Essais de laboratoire 82

Tableau 5.2: Écarts entre valeurs observées et obtenues par analyse spectrale. Essai de laboratoire 83

Tableau 5.3: Apparition, disparition des fréquences et temps de séjour Essai réseau 88

Tableau 5.4: Écarts entre valeurs observées et obtenues par analyse spectrale Essai réseau 89

Tableau 6.1: Comparaison des résultats de temps de séjour 96

Tableau A4.1 : Propriétés chimiques des ions fluorures 120

Tableau A4.2 : Propriétés chimiques du lithium 121

Tableau A4.3 : Propriétés chimiques du chlorure de sodium 121

Tableau A4.4 : Propriétés chimiques du chlorure de calcium 122

Tableau A5.1 : Critères d'acceptabilité des traceurs 123

Tableau A5.2 : Paramètres affectés par un apport de chlorure de calcium ($CaCl_2$*$2H_2O$) 124

Tableau A5.3 : Étude des impuretés contenues dans le $CaCl_2 2H_2O$, à une concentration de 100 mg/L 125

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Paramètres affectés lors d'un traçage.....15
Figure 2.1: Montage expérimental.....25
Figure 2.2: Dispositif d'injection.....26
Figure 2.3: Zone 3 du réseau de distribution d'eau potable de la Ville de Montréal.....28
Figure 2.4: Échantillonnage. a) Installation du matériel sur le réseau. b) Pot de mesure pour l'échantillonnage et conductimètre utilisé au point $n^0$1.....32
Figure 2.5: Vérification de l'acquisition de données sur le terrain.....34
Figure 3.1: Essai de traçage du 25 mars 1999. a) Courbe d'injection corrigée b) Courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^0$2.....38
Figure 3.2: Résultat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage $n^0$2 pour l'essai réseau du 25 mars 1999.....39
Figure 3.3: Courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^9$3 40
Figure 3.4: Résultat graphique pour la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n°3 pour l'essai du 25 mars 1999.....41
Figure 3.5: Courbe d'injection de l'essai de traçage du 17 février 1999.....43
Figure 3.6: Courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^0$2 pendant l'essai de traçage du 17 février 1999.....43
Figure 3.7: Résultat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage $n^0$2 pour l'essai réseau du 17 février 1999.....44
Figure 3.8: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage $n^0$3 lors du traçage du 17 février 1999.....45
Figure 3.9: Chemins individuels utilisés dans la reconstitution de signal pour l'essai du 17 février 1999 au point d'échantillonnage $n^0$3.....46

Figure 3.10: Résultat graphique de la reconstitution de signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai réseau du 17 février 1999.....47
Figure 3.11: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}4. a) 17 février 1999. b) 25 mars 1999.....49
Figure 3.12: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}5 pendant le traçage du 17 février 1999.....50
Figure 3.13: Comparaison de la stabilité des points d'échantillonnage 2 et 5.....51
Figure 3.14: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}5 pendant le traçage du 25 mars 1999.....52
Figure 4.1: Quatre ondes continues. a) Onde sinusoïdale. b) Onde sinusoïdale avec bruit aléatoire. c) Onde semi-aléatoire. d) Onde aléatoire.....56
Figure 4.2: Fonctions d'autocorrélation idéalisées. a) Onde sinusoïdale. b) Onde sinusoïdale avec bruit aléatoire. c) Onde semi-aléatoire. d) Onde aléatoire.....56
Figure 4.3: Résultats de l'essai de traçage du 25 mars 1999.....58
Figure 4.4: Résultats de corrélation croisée de l'essai réseau du 25 mars 1999. a) Entre point 1 et point 2. b) entre point 1 et point 3.....59
Figure 4.5: Résultat de corrélation croisée du point 3 avec montée de traçage comme signal d'entrée. Essai du 25 mars 1999.....60
Figure 4.6: Courbe d'injection aléatoire.....62
Figure 4.7: Corrélation croisée sur un chemin.....63
Figure 4.8: a) Résultat numérique de traçage sur deux chemins à contributions égales b) Résultat de la corrélation croisée.....63
Figure 4.9: a) Résultat numérique de traçage sur deux chemins à contributions différentes. b) Résultat de la corrélation croisée.....64
Figure 5.1 : Transformée de Fourier d'ondes sinusoïdales et carrées. Exemple inspiré de de Coulon (1990).....68

Figure 5.2 : Schéma montrant la démarche d'identification du temps d'apparition d'une fréquence.....74
Figure 5.3 : Résultat de traçage en laboratoire. a) Sonde 1. b) Sonde 2. c) Sonde 3.....76
Figure 5.4 : Évolution spectrale au point d'injection.....78
Figure 5.5 : Évolution spectrale à la sonde 2 (alimentée par un seul chemin).....78
Figure 5.6 : Évolution spectrale à la sonde 3 (alimentée par 2 chemins).....79
Figure 5.7 : Évolution spectrale au point 2 de la zone 3 du réseau de la ville de Montréal. Traçage du 17 février 1999.....86
Figure 5.8 : Évolution spectrale au point 3 de la zone 3 du réseau de la Ville de Montréal. Traçage du 17 février 1999.....87
Figure A2.1 :Zone d'étude.....117

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I

Rapport sur les traceurs soumis à la Ville de Montréal en vue des essais réseau.....112

INTRODUCTION

Produire une eau de qualité et qui garde sa qualité jusqu'au robinet du consommateur est une préoccupation importante pour les producteurs d'eau. En sortie d'usine de traitement, l'eau est de très bonne qualité, mais se dégrade dans le réseau de distribution en raison de l'interaction entre les paramètres physiques, chimiques, biologiques et hydrauliques du réseau. Plusieurs recherches ont été menées pour comprendre les mécanismes de dégradation de la qualité de l'eau dans les réseaux. De ces études, il est ressorti que le temps de séjour de l'eau est directement relié aux facteurs causant la dégradation de la qualité de l'eau; la décroissance de chlore et la croissance bactérienne en sont les exemples les plus courants. Une bonne connaissance de la distribution des temps de séjour dans les réseaux de distribution d'eau potable peut donc permettre une meilleure gestion de la qualité de l'eau et de prévoir les interventions nécessaires à son maintien.

Le temps de séjour peut être mesuré par traçage, spécialement pour les réseaux simples, ou estimé par des logiciels de balancement hydraulique. Un traçage consiste à injecter un traceur conservatif et à évaluer son temps de propagation entre l'injection du traceur et son arrivée à un point de mesure dans le réseau d'étude. L'analyse des résultats obtenus lors d'une campagne de traçage en réseau réalisée en 1994 (Benrhanem, 1996) à la ville de Laval a montré que le temps de séjour moyen évalué couramment par certains logiciels de balancement hydraulique reflète peu la réalité, qu'il ne donne pas l'ensemble de l'information nécessaire et que les concentrations de traceur aux points de mesures sont imprécises à cause de plusieurs phénomènes dont la dispersion/diffusion des particules d'eau lors de leur transit dans les canalisations.

L'analyse du traçage en réseau complexe est fastidieuse, l'étude de Benrhanem (1996) le montre, et nécessite des techniques de traçage et d'analyse fiables, rapides et

automatisables pour déterminer les temps de séjour réels plutôt qu'estimer des temps de séjour moyens, effectivement peu utiles.

Le but de ce projet de recherche est d'améliorer les techniques de traçage et d'analyse de temps de séjour en réseau d'eau potable en utilisant le traitement du signal pour traiter les données. L'approche par le traitement du signal nous permet, d'une part, de surmonter les difficultés relatives à la connaissance de la structure du réseau et de ses conditions d'opération et, d'autre part, de connaître les temps de séjour et la proportion de leur contribution à un point d'échantillonnage en temps réel.

Dans un premier temps, des simulations numérique de traçage ont été réalisées pour mettre au point les méthodes. Ensuite, les méthodes ont été testées pour des essais en laboratoire, puis pour des essais dans la partie surpressée de la zone 3 de la Ville de Montréal. Chacune de ces étapes a été réalisée en considérant les limites d'un traçage dans un réseau de distribution d'eau potable (dispersion du traceur, par exemple), tous les paramètres des signaux (périodes, amplitude, fréquence d'échantillonnage) ont donc été choisis et testés dans cet optique.

Chacune des méthodes développées est présentée individuellement: reconstitution de signal, corrélation croisée et analyse spectrale. Une étude comparative des méthodes, tant au niveau de la mise en œuvre du traçage que de la méthode d'analyse et des résultats qui en découlent, est discutée pour relever les forces et les faiblesses des méthodes et finalement, des recommandations pour les développements futurs sont présentées pour la méthode qui semble la plus prometteuse, soit l'analyse spectrale.

CHAPITRE 1: REVUE DE LITTÉRATURE ET MISE EN CONTEXTE

Sous la pression du citoyen et les préoccupations de contrôle de qualité des services concernés, l'étude de l'évolution de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution est devenue un sujet de discussion et de recherche de plus en plus important, l'objectif étant de distribuer une eau de qualité optimale de l'usine jusqu'au robinet du consommateur.

1.1 LA QUALITÉ DE L'EAU À LA SORTIE D'USINE DE TRAITEMENT

La plupart des usines de traitement d'eau potable ont la capacité de produire une eau de qualité répondant aux normes et aux recommandations sur l'eau potable. L'automatisation et les systèmes de contrôle permettent aux opérateurs de suivre l'évolution de la qualité de l'eau dans l'usine et de réagir dans un délai très court si une variation appréciable de la qualité de l'effluent aux différentes unités de traitement est observée. La qualité d'une filière de traitement est jugée, notamment, sur la qualité microbiologique de l'eau. La ou les étapes de désinfection sont alors très importantes pour inactiver les micro-organismes et virus qui n'ont pu être interceptés ailleurs dans la chaîne de traitement. Un dilemme se pose cependant à ce niveau : d'une part, afin d'éviter des problèmes de recroissance bactérienne en réseau, il faut maintenir un résiduel de chlore suffisant. D'autre part, le chlore en réagissant avec la matière organique peut donner des goûts ou des odeurs à l'eau ainsi que des sous produits de chloration tels les trialométhanes qui sont des substances toxiques (AWWA, 1996b).

1.2 ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE DISTRIBUTION

L'évolution de la qualité de l'eau distribuée est attribuable à l'interaction entre les conditions physico-chimiques, biologiques et hydrauliques du réseau.

1.2.1 Impact des conditions physico-chimiques et biologiques sur la dégradation de la qualité de l'eau distribuée

L'évolution de la qualité microbiologique dans le réseau a intéressé plusieurs auteurs (Brazos and O'Connor, 1989; Characklis and Marshall, 1990; LeChevalier, 1990; LeChevalier *et al.*, 1988): les résultats confirment que la qualité bactériologique dans les réseaux peut se détériorer. Cette dégradation n'est pas seulement attribuable à des variables chimiques ou biologiques. L'état de la surface des conduites et leurs propriétés physiques individuelles (polarisation électrique, par exemple) influencent la fixation des matières organiques, les dépôts de tartres et l'apparition de formes de corrosion localisées (Haas *et al.*, 1983). Cette corrosion fournit des surfaces d'attachement pour les bactéries tout en les protégeant de la désinfection (LeChevalier, 1990). Ces dernières consomment aussi de l'oxygène et donnent naissance à des zones anaérobies où peuvent se développer des bactéries sulfato-réductrices responsables de la corrosion biologique (Chantereau, 1980). La dégradation est cependant moins importante pour les conduites de grands diamètres parce que le rapport entre la surface des parois et le volume d'eau circulant est petit (Desjardins *et al.*, 1997). Par contre, l'eau, après avoir circulé dans des conduites de grands diamètres, passe dans un réseau de conduites de petit diamètre avant d'être acheminée au consommateur.

Le maintien de la qualité biologique en réseau implique une double stratégie consistant à réduire, d'une part, la concentration en carbone organique dissous biodégradable présent dans l'eau refoulée en dessous d'un certain seuil (< 0,1 mg C/l) et, d'autre part, le nombre de bactéries présentes dans l'eau traitée (Mathieu, 1992). Ces mesures imposent l'utilisation de nouvelles technologies telles la micro ou la nanofiltration dont les coûts de production sont cependant trois fois plus importants que ceux des traitements conventionnels (Mathieu, 1992). Après avoir mesuré et évalué les abondances et les activités des bactéries dans différents réseaux de distribution, Servais *et al* (1992a et 1992b) ont également conclu qu'une diminution de la concentration en carbone organique dissous biodégradable dans l'eau refoulée pouvait permettre d'obtenir une

meilleure stabilité biologique dans le réseau. Un modèle (modèle SANCHO) (Servais *et al*, 1997) décrivant l'évolution des biomasses bactériennes fixées sur les parois des conduites et en suspension dans l'eau a été conçu afin de tester l'impact sur la recroissance en réseau des variations de quantités de chlore et de matière organique présentes dans l'eau refoulée dans un réseau. D'autres auteurs comme Van Der Kooij (1990) reconnaissent également la matière organique biodégradable comme l'un des principaux facteurs d'instabilité des eaux potables au cours de leur distribution. Une étude de sensibilité du modèle SANCHO a montré que, outre la concentration en matière organique présente dans l'eau refoulée, certains paramètres influencent de façon plus significative la variabilité de la réponse du modèle, indiquant de cette façon leur importance dans le processus de recroissance. Il s'agit du nombre maximal de sites disponibles à la fixation biologique, le taux maximum d'utilisation de substrats directs et la concentration initiale de substrats directement utilisables. Des mesures in situ de ces paramètres seraient souhaitables afin de mieux prédire la dynamique bactérienne en réseau (Cigana, 1997).

1.2.2 Impact des conditions hydrauliques sur la dégradation de la qualité de l'eau distribuée

Les conditions hydrauliques ont une grande influence sur la qualité de l'eau distribuée (LeChevalier *et al.*, 1988). Elles conditionnent en partie la formation de biofilm, la croissance d'organismes libres ou la solubilisation des matériaux des conduites. Les principaux paramètres à prendre en considération sont la vitesse et le temps de séjour.

a) La vitesse

La vitesse de l'eau a un impact sur sa qualité dans la mesure où elle influence la concentration de nutriment, la concentration résiduelle de désinfectant à l'interface eau-

conduite (la vitesse étant presque nulle à la paroi) et la fixation ou le décrochage des bactéries sur les parois des conduites. Une faible vitesse de l'eau entraîne une diminution de la concentration de résiduel de désinfectant et favorise aussi la croissance bactérienne et l'accumulation de biomasse sur les parois. À une vitesse élevée, le régime d'écoulement devient turbulent et les forces de cisaillements importants. Dans de telles conditions, l'accumulation de biomasse sur les parois est réduite et le décrochage des bactéries favorisé (Lau and Liu, 1993)

b) Le temps de séjour

Le temps de séjour a une influence sur la qualité de l'eau distribuée. Certains processus physico-chimiques et biologiques ne sont que partiellement connus, mais on identifie de plus en plus clairement le rôle du temps de séjour dans le réseau comme un facteur important expliquant la différence entre l'eau produite à l'entrée du réseau et l'eau consommée en bout de réseau. Kennedey *et al* (1991) montrent qu'il est nécessaire, pour espérer modéliser de façon adéquate la qualité de l'eau distribuée, de disposer de prévisions précises de vitesses et de temps de séjour dans les différents éléments de canalisations.

1.3 INFLUENCE DU TEMPS DE SÉJOUR

Au début des années 80, plusieurs auteurs ont tentés de relier, sans succès, la recroissance bactérienne dans les réseaux avec la turbidité, le désinfectant résiduel ou la température. Des études récentes concernant la formation des biofilms et l'évolution du carbone organique dissous biodégradable dans les réseaux ont poussé les recherches dans une toute autre voie : on a cherché à comprendre l'influence du temps de séjour sur le processus de recroissance bactérienne (Kerneïs *et al.*, 1995). Le temps de séjour d'une particule d'eau correspond au temps mis par cette particule pour arriver à un point de

mesure depuis sa source. Dans un réseau de distribution, plusieurs chemins peuvent contribuer à un point de mesure et par conséquent, fournir des temps de séjour très variables.

L'importance du temps de séjour réside dans le fait qu'il est directement lié à la plupart des paramètres biologiques, chimiques et hydrauliques régissant l'évolution de la qualité de l'eau distribuée (LeChevalier *et al.*, 1988; Servais *et al.*, 1994). Le temps de séjour est un paramètre fiable, dans la mesure où il est évalué avec une précision suffisante. Il peut être mesuré à l'aide de techniques de traçage en réseau ou déterminé par des logiciels de balancement hydraulique. Avant de présenter les méthodes de mesure des temps de séjour en réseau, la section suivante définit les composantes de base d'un réseau maillé, les équations mathématique qui les régissent et les efforts de modélisation de la qualité de l'eau.

1.4 LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

Un réseau de distribution est un système complexe. De nombreuses recherches ont été entreprises pour en comprendre l'évolution et les variations hydrauliques continuelles. À l'heure actuelle, on dispose d'une multitude de méthodes informatiques qui permettent de mieux comprendre les problèmes liés au réseau de distribution.

1.4.1 Les éléments de base d'un réseau de distribution

Un réseau de distribution maillé est une infrastructure importante qui permet la distribution de l'eau potable de façon à satisfaire la demande des consommateurs et, au besoin, de lutter contre les incendies. Les conduites du réseau sont enfouies assez profondément dans le sol pour éviter le gel de l'eau et, dans la mesure du possible, le réseau est constitué en mailles. Une maille est un espace clos formé par plusieurs conduites. Le sens de l'écoulement dans les conduites varie selon la demande en eau et

la vitesse y est rarement nulle, ce qui présente un avantage quant au maintien de la qualité de l'eau.

Un réseau maillé permet de mieux équilibrer la pression dans le réseau et le nombre de consommateurs sans service en cas de bris est réduit au minimum, puisque plusieurs chemins sont possibles pour atteindre un point. La pression en tout point du réseau doit d'une part, permettre le bon fonctionnement des électroménagers, des gicleurs automatiques, de lutter contre les incendies et, d'autre part, ne pas être excessive afin de protéger les soudures des conduites (Brière, 1994). Théoriquement, la vitesse de l'eau dans les conduites ne doit pas dépasser 3,0 m/s pour limiter les pertes de charge et retarder l'érosion des conduites. Il n'existe aucune vitesse minimale à respecter, mais il faut éviter les vitesses presque nulles qui peuvent être responsables de la mauvaise qualité de l'eau. De cette façon, une vitesse minimale de 0,3 m/s est recommandée en période de faible consommation (Brière, 1994). Voici quelques éléments constituant un réseau maillé: des tronçons, des nœuds (point de jonction entre deux tronçons ou entre un tronçon et une autre composante), des mailles, des réservoirs, des pompes, des vannes, des réducteurs de pression, de clapets, des poteaux d'incendie (Brière, 1994).

1.4.2 Description mathématique d'un réseau maillé

Les relations régissant les écoulements en réseau forment un système d'équations algébriques non linéaires. Le nombre d'équations formant le système dépend de la taille du réseau étudié. La non linéarité des équations suggère l'utilisation de méthodes de résolution approximatives. Quelle que soit l'approche préconisée, le système d'équation décrivant le réseau repose sur deux principes fondamentaux (Benrhanem, 1996).

1. Équation de continuité, par laquelle la somme algébrique des débits à un nœud est nulle;

$$\sum_{J=1}^{N}(Q_{IJ}+C_I)=0$$

N: nombre de noeuds dans le réseau

C_i: consommation au noeud i

Q_{ij}: débit dans le tronçon reliant les nœud i et j

2. La somme algébrique des pertes de charge autour d'une maille est nulle.

$$\sum_{n=1}^{k}(H_{IJ})=0$$

k: nombre de mailles dans le réseau

n: nombre de liens constituant la maille i

H_{ij}: perte de charge dans le tronçon i de la maille j

La perte de charge est donnée par la formule de Hazen William

$$H=\left(K*L*Q^{1.852}\right)/\left(C^{1.852}*D^{4.87}\right)$$

K: constante qui dépend des unités des termes de la formule

L: longueur de la conduite

Q: débit dans la conduite

C: coefficient de Hazen William

D: diamètre de la conduite

Le système d'équation est souvent résolu par la méthode itérative de Newton modifiée qui est réputée pour son efficacité dans le cas du calcul de balancement hydraulique d'un réseau de distribution.

1.4.3 Modélisation

La complexité d'un système hydraulique, tel un réseau de distribution, nécessite l'utilisation d'outils de calcul puissants. Grâce au progrès des techniques de calcul, à

l'automatisation de la gestion des données et aux capacités énormes de calcul des supports informatiques, la conception et l'automatisation d'un réseau opérationnel sont grandement facilités. L'intérêt grandissant concernant l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux a conduit au développement de modèles de qualité, devenu possible grâce au support informatique. Ces modèles sont utilisés pour simuler les changements de la qualité de l'eau en prenant en considération l'interaction entre les paramètres biologiques, chimiques, physico-chimiques et hydrauliques. Ils peuvent, par exemple, être utilisés pour évaluer le temps de séjour, simuler la diminution de désinfectant résiduel ou localiser le mouvement d'un contaminant lors d'une contamination accidentelle. Les modèles hydrauliques peuvent nous renseigner sur la structure d'un réseau et simuler les débits, les vitesses, les pressions, les pertes de charges et les temps de séjour.

Les modèles développés simulent l'évolution de la qualité et des conditions hydrauliques en régime permanent. Les conditions hydrauliques variant continuellement au grés de la demande, le régime permanent ne peut donner qu'une approximation des conditions réelles. Les prédictions offertes par ces modèles ne sont alors utiles que pour connaître la qualité moyenne de l'eau. De plus en plus, on tend à modéliser en régime non permanent en utilisant des tranches horaires de consommation pour suivre le plus fidèlement possible les fluctuations de la demande en eau et ainsi ajuster les consommations aux noeuds.

1.5 DÉTERMINATION DES TEMPS DE SÉJOUR

Le temps de séjour peut être déterminé par des méthodes numériques nécessitant l'utilisation de modèles hydrauliques, une connaissance précise de la structure du réseau et des variations hydrauliques, ou être mesuré par traçage. Les deux méthodes et leurs limites sont présentées.

1.5.1 Traçage en réseau

Par le traçage on modifie, en un point amont de l'écoulement, la concentration d'un élément du fluide et on observe la propagation de cette perturbation en différents points en aval. Le temps de séjour est le temps requis pour la translation, de la source au point de mesure, de la variation de concentration (Marche, 1994).

Pour déterminer les temps de séjour par traçage, on échantillonne sur le réseau de façon à mesurer l'évolution de la variation de concentration. L'échantillonnage peut être réalisé suivant plusieurs approches. L'une d'elles suggère de prélever des échantillons en plusieurs points et ce, pendant plusieurs jours (Maul *et al*, 1991). Les résultats obtenus sont par contre très difficiles à interpréter, la qualité de l'eau variant à l'usine et sur le réseau pendant la période d'échantillonnage (Mathieu, 1992). Une autre approche consiste à suivre l'eau durant son parcours dans le réseau, les points d'échantillonnage étant déterminés en fonction des temps de séjour estimés par un modèle hydraulique. Cette approche, validée par Lavoie (1991) a été adoptée dans le cadre de l'étude de Benrhanem (1996) pour valider les temps de séjour par un traçage.

Le traçage est très simple d'application lorsque l'écoulement est permanent, uniforme, complètement mélangé par la turbulence et non divisé (un chemin unique emprunté par toutes les particules d'eau). Il devient beaucoup plus complexe à analyser lorsqu'il est appliqué à un réseau réel, dans lequel ces conditions ne sont pas rencontrées.

1.5.1.1 Le transport et la dispersion du traceur

En réseau, le régime d'écoulement caractérisé par le nombre de Reynolds, gouverne la distribution transversale des vitesses dans les conduites. Le rapport de la vitesse maximale au centre de la conduite à la vitesse moyenne varie de 2,0 en régime laminaire à 1,2 en régime turbulent et la vitesse est nulle à la paroi (Munsen, 1994). Le temps de séjour d'une particule voyageant au centre de la conduite peut donc être très différent de

celui d'une particule au voisinage de la paroi, ce qui discrédite la valeur du temps de séjour moyen.

La concentration de traceur est sujette à la dispersion, qui comprend les phénomènes de diffusion et de convection, tout au long de son parcours dans les canalisations. La dispersion du traceur est associée aux divers échanges entre des particules circulant à des vitesses différentes et concentrées différemment (par exemple, le mélange de l'eau concentrée à l'interface d'eau non concentrée). Elle provoque un étalement de la courbe de concentration et rend très difficile la déduction du temps de séjour par translation. L'injection continue à temps fini d'un traceur donne lieu à une série de phénomènes qui se succèdent, ils sont expliqués ci-dessous (Graf et Altinakar, 1996):

- La convection *diffusion longitudinale et transversale* se développe lorsque la convection diffusion verticale est achevée. Elle se développe jusqu'à une distance:

$$L_z = \xi_z \frac{h^2}{\varepsilon_z}$$

Au terme de la convection diffusion transversale, la convection *dispersion longitudinale* prend place. La concentration de traceur est alors uniforme sur toute la section de la conduite. La diffusion longitudinale est considérée négligeable car la dispersion longitudinale, K_x, qui résulte de la répartition de vitesse, est très importante (Graf et Altinakar, 1996).

L'équation de convection dispersion unidimensionnelle est donnée par:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Cette équation est applicable si la concentration est bien répartie sur la toute la section de la canalisation, ce qui implique que les diffusions transversales soient achevées. Dans

le cadre du projet, l'injection de traceur se fait de façon continue à temps fini. L'injection d'un traceur pendant un temps fini à taux fixe, M_o/T, peut être assimilée par une série d'injections successives de petites masses, $(M_o/T)\Delta\tau = m_i$, pendant un temps $\Delta\tau$ infiniment petit. Chaque mini - injection va créer son nuage de façon gaussienne suivant l'équation (Graf et Altinakar, 1996):

$$C_i(x,t) = \frac{m_i}{S\sqrt{4\ K_x}} \exp\left[\frac{\left[x - U\ (t-\tau_i)\right]^2}{4K_x\ (t-\tau_i)}\right]$$

La concentration totale est la somme des concentrations de chacune des mini - injection, soit:

$$C\ (x,t) = \sum \Delta C_i(x,t) = \frac{1}{S\sqrt{4\ K_x}} \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{\sqrt{t-\tau_i}} xp\left[\frac{\left[x - U\ (t-\tau_i)\right]^2}{4K_x\ (t-\tau_i)}\right]$$

où:

C: concentration finale dispersée à un temps et une distance donnée (kg/m^3)

S: Section de la canalisation ou section de l'écoulement (m^2)

K_x: coefficient de dispersion (m^2/s)

τ_i: temps de libération d'une petite masse de traceur (s)

m_i: masse de traceur libérée à un temps τ_i (kg)

t: temps (s)

x: distance de parcours de l'eau (m)

U: vitesse de l'eau (m/s)

Pour faciliter l'exploitation de résultats de traçage, les points d'échantillonnage doivent être placés après les zones de diffusion verticale et transversale. Après ces zones, la concentration est uniforme sur toute la section de l'écoulement et le traceur ne sera alors affecté que de la dispersion longitudinale. Pour réduire la distance de diffusion verticale

et transversale, l'injection doit se faire au centre de la conduite (Graf et Altinakar, 1996). L'injection du traceur dans une région à haute turbulence ou une injection multipoints (installation d'un diffuseur, par exemple) contribuent également à achever les diffusions verticale et transversale plus rapidement.

1.5.1.2 Les multiples chemins et la piètre signification du temps de séjour moyen

Le nombre de chemins qu'une particule d'eau peut emprunter peut devenir très grand si le point de mesure est loin de la source. La concentration relevée durant le traçage à un point de mesure est alors le résultat d'un mélange entre des eaux à concentrations différentes. La figure 1.1 illustre les difficultés qu'on peut s'attendre à rencontrer pendant un traçage. Une injection simple de traceur est faite à l'entrée d'un petit réseau qui comporte deux chemins. Les contributions individuelles, illustrées sur la courbe de point d'échantillonnage, représentent la translation, après dilution, de la courbe d'injection dans chacun des chemins. Ces contributions sont sujettes à la dispersion qui déforme l'injection faite à l'entrée du réseau.

La courbe de concentration observée est le résultat d'un mélange entre des eaux à concentrations différentes ayant subit la dispersion et la dilution. C'est cette courbe qui permet la déduction du temps de séjour moyen. Dans le cas qui est illustré ici, il y a peu de chemin et les temps de séjour sont équivalents: le temps de séjour moyen n'est donc pas très éloigné des temps de séjour individuels. Toutefois, un nombre de chemins élevé et une répartition très différente des débits contribuants aux différents chemins peut conduire à une représentation du temps de séjour très éloignée de la réalité. En effet, le temps de séjour moyen déduit de la courbe de concentration moyenne peut parfois être la moitié du temps de séjour le plus long (Marche, 1996). Les résultats de l'étude de Benrhanem (1996) conduisent aux mêmes conclusions.

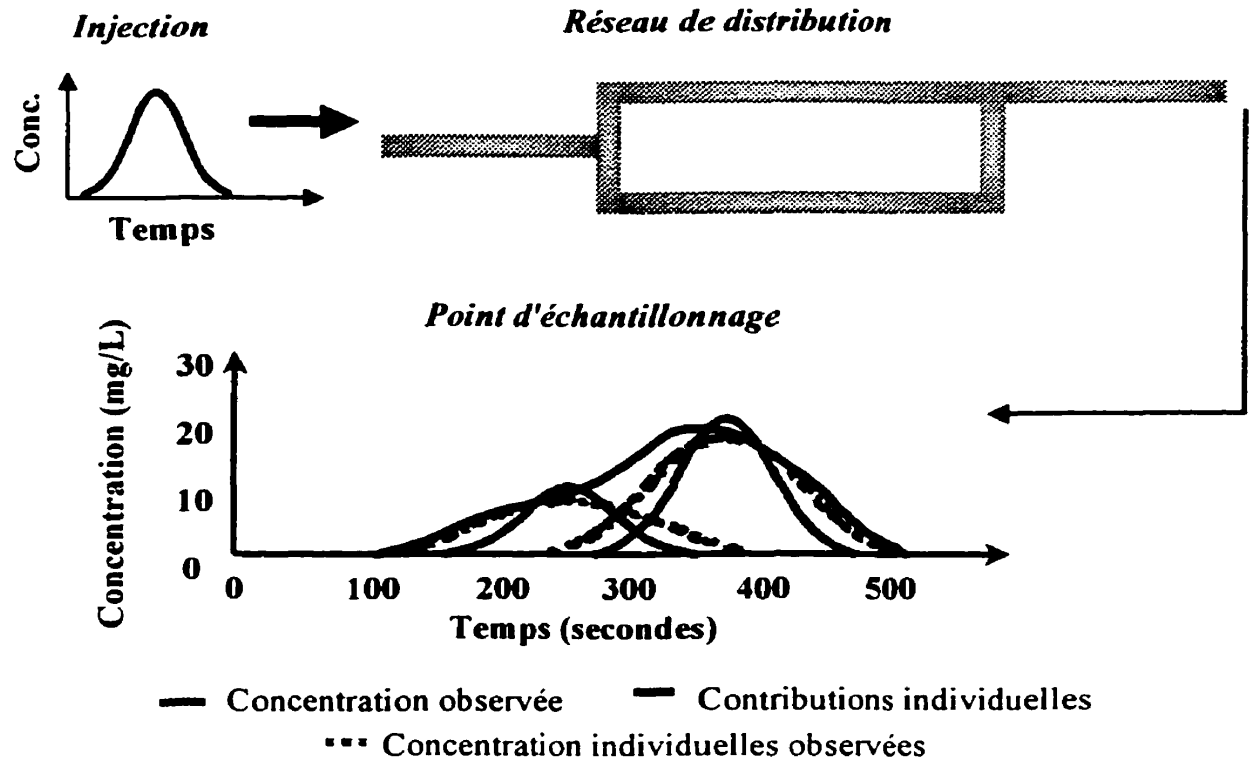


Figure 1.1: Paramètres affectés lors d'un traçage

1.5.1.3 La variabilité des conditions d'écoulement

Les temps de séjour sont couramment de plusieurs heures dans les réseaux de distributions des grandes villes . Or, entre le moment de l'injection du traceur dans le réseau et celui où il apparaît au point cible, le débit des usines s'est adapté continuellement aux demandes en eau changeantes durant la journée. Une variation de 30% est courante sur la période de traçage, qui affecte d'autant la précision des temps de séjour. Les logiciels de balancement hydraulique sont adaptés à une simulation des régimes permanents et la comparaison entre les temps mesurés et les temps simulés en souffre grandement, surtout si les variations de consommations sont imprécises.

Le traçage reste toutefois une source d'information irremplaçable sur les processus réels de transport dans un réseau (Marche, 1996), même s'il reste un outil sévère pour juger de la validité d'une démarche de modélisation du réseau comme nous le verrons à la section suivante.

Pour réaliser un traçage en réseau d'eau on doit s'assurer que le traceur est inerte, c'est à dire qu'il ne soit pas toxique, ne génère pas de goût, d'odeur, de couleur, qu'il soit conservatif et qu'il n'encourage pas la croissance bactérienne. La loi d'injection du traceur, la fréquence d'échantillonnage et les méthodes de mesures (analytiques ou en continu) ont également leur importance dans le choix du traceur. L'efficacité du fluor dans le traçage des réseaux de distribution a été vérifiée pour estimer les temps de séjour et calibrer les modèles hydrauliques (Kennedy *et al.*, 1991), mais plusieurs autres traceurs sont disponibles et peuvent parfois mieux répondre aux besoins d'un traçage.

1.5.2 La simulation des temps de séjour et ses difficultés

La plupart des modèles hydrauliques permettent de calculer le temps de séjour moyen d'une particule d'eau. Ces modèles considèrent un écoulement piston dans les conduites et un mélange parfait aux nœuds, ce qui est loin de représenter la réalité. Dans ces modèles, le débit d'entrée est un paramètre crucial tant au niveau de la prévision des écoulements que de la précision des temps de séjour. La consommation d'eau, qui influence le débit pompé dans le réseau, est estimée selon l'activité des quartiers, la saison et l'heure de la journée. L'introduction de cette estimation dans la modélisation numérique ne fournit pas les débits en temps réels, qui peuvent parfois être très différents de l'estimation.

L'identification de tous les chemins contribuant à un point d'analyse peut aussi devenir problématique. Dans certaines parties d'un réseau, plusieurs centaines de chemins

peuvent contribuer à un point d'analyse. Dans de telles conditions, il est très difficile d'avoir la certitude de considérer l'ensemble des chemins possibles.

Le moteur de calcul des modèles numériques introduit aussi des erreurs d'estimation. La plupart des modèles (PICCOLO, Rincad, AquaGeo, EPAnet) calculent les temps de séjour par chemin pour arriver au nœud le plus près de la source, puis font la moyenne pondérée de ces temps ($\Sigma(TS*Q)/\Sigma Q$). Le temps de séjour au nœud suivant est calculé à partir de cette valeur, ce qui induit des erreurs d'estimation cumulatives. Pour sa part, PADRE (Marche,1994) calcule les temps de séjour pour un régime permanent en considérant les chemins complets depuis la sortie de l'usine jusqu'au point d'analyse. Ensuite, il fait la moyenne pondérée de tous les temps de séjour contribuant et fournit la distribution de la concentration de traceur au point d'analyse étudié. Cette méthode de calcul réduit les erreurs, mais il reste que l'évaluation est faite pour un régime permanent et ignore les phénomènes de dispersion.

L'étude réalisée par Benrhanem (1996) montre que les erreurs sont très grandes dans l'estimation des temps de séjour par des modèles hydrauliques. En effet, ces modèles ignorent le phénomène de dispersion des particules d'eau, considèrent une vitesse uniforme et les estimations de consommation ne sont pas fidèles à la réalité. Considérant l'ensemble des difficultés liées à l'estimation des temps de séjour par des modèles numériques, l'estimation des temps de séjour est d'autant plus éloignée de la réalité que le nombre de chemin est grand.

L'analyse d'un traçage en réseau complexe est fastidieuse, l'étude de Mounia Benrhanem le montre, et nécessite des techniques de traçage et d'analyse fiables, rapides et automatisables pour déterminer les temps de séjour réels plutôt que d'estimer des temps de séjour moyens, effectivement peu utiles. Le but de ce projet de recherche est d'améliorer les techniques de traçage et d'analyse de temps de séjour en réseau d'eau potable en utilisant le traitement du signal pour traiter les données. Dans le cas d'un essai

de traçage, le signal d'entrée est la variation de concentration de traceur injectée dans le réseau. Le signal de sortie est la variation de concentration de traceur reçue, après dilution, dispersion et superposition, au point d'échantillonnage. L'utilisation du traitement du signal pour traiter ces données peut permettre la connaissance en temps réel des temps de séjour et évite les problèmes liés à la mauvaise connaissance physique et hydraulique du réseau. La section suivante présente les principes généraux du traitement du signal, qui seront approfondis et repris plus en détail aux chapitres 3, 4 et 5 lors de l'analyse.

1.6 PRINCIPE GÉNÉRAL DU TRAITEMENT DU SIGNAL

Le traitement des signaux intéresse tous les domaines scientifiques dans lesquels l'information est perçue par l'intermédiaire d'observations expérimentales et de grandeurs mesurables. Son universalité est attestée par la diversité de ses secteurs d'application: industriels, scientifiques, biomédicaux, spatiaux. L'optimisation des moyens de télécommunications et l'utilisation des radars pendant la seconde guerre mondiale est à la base du développement de la théorie du traitement des signaux que nous connaissons aujourd'hui (de Coulon, 1990). Actuellement, le traitement des signaux est une discipline autonome, qui s'intéresse à de multiples domaines, dont certains sont énoncés plus haut.

L'outil de base du traitement des signaux est le développement en série de fonctions; la transformée de Fourier permet ce développement et constitue la méthode la plus courante. La transformée de Fourrier d'un signal temporel est une fonction de la fréquence, elle introduit la relation entre le temps et la fréquence. Ceci conduit à la notion de spectre, qui est la répartition d'une grandeur caractéristique d'un signal (amplitude, énergie, puissance par exemple) en fonction de la fréquence (Press *et al.*, 1986). L'analyse spectrale en est l'application directe.

Un signal peut être défini comme étant toute représentation physique de l'information. La plupart du temps les signaux sont considérés comme étant des grandeurs électriques, mais le traitement du signal concerne tout type de signal, quelle que soit sa nature physique. Dans le cas d'un traçage, le signal est représenté par une loi d'injection qui est en fait une variation de la concentration d'un traceur dans l'eau distribuée en fonction du temps, la variation de concentration étant adaptée au type d'analyse et à l'information cherchée. La littérature nous montre qu'il est très difficile d'interpréter les résultats d'un traçage en raison, entre autres, de la dispersion des particules d'eau et du régime d'écoulement non-permanent des réseaux (Marche,1996; Benrhanem, 1996). Le signal de la courbe d'injection et de son évolution est difficile à interpréter, par contre, son spectre peut fournir beaucoup d'informations. En effet, malgré les phénomènes de mélange et de dispersion, la fréquence est conservative. Dans le cadre de ce projet, trois méthodes d'analyse faisant appel au traitement du signal sont exploitées: la reconstitution de signal, la corrélation croisée et l'analyse spectrale. Les principes de base des méthodes sont énoncés ci-dessous. Le développement complémentaire de ces méthodes au problème particulier de la détermination des temps de séjour dans les réseaux de distribution d'eau potable sera fait aux chapitres 3, 4 et 5.

1.6.3 Types de signaux

Il existe deux types fondamentaux de signaux. Les signaux déterministes, dont l'évolution en fonction du temps peut être prédite par un modèle mathématique et les signaux aléatoires, dont le comportement temporel est imprévisible. En traitement du signal, une panoplie de signaux peuvent être utilisés: onde stationnaire sinusoïdale, onde stationnaire carrée, onde semi-aléatoire, onde aléatoire, delta dirac, impulsion simple de toute forme, etc. Le type de signal choisi correspond à l'information cherchée et au type de traitement qui sera utilisé. Dans le cas qui nous occupe, l'information cherchée est le temps de parcours pour chacun des chemins d'un réseau, entre l'injection d'un traceur

(qui est le signal) et sa récupération à un point de mesure du réseau de distribution d'eau potable.

1.6.4 Capacité de séparation du traitement du signal

La capacité de séparation est définie comme étant la plus petite différence entre deux phénomènes variant en fonction du temps (dans notre cas, temps de séjour issus de chemins différents) pouvant être détectée par le traitement du signal. La capacité théorique est égale à deux fois la période (inverse de la fréquence, qui représente le temps entre deux mesures), mais ne peut être atteinte que pour des impulsions très courtes (Press *et al.*, 1986). Dans le cas d'un essai de traçage traité par corrélation croisée ou par analyse spectrale, la forme de la loi d'injection joue un rôle important dans la capacité de séparation et donc dans la détermination de temps de séjour du même ordre de grandeur, mais provenant de chemins différents. Étant donné la longueur des périodes nécessaires pour réussir un traçage à l'échelle d'un réseau de distribution, les méthodes d'analyse ne nous permettront pas de discriminer des temps de séjour très près les uns des autres. Toutefois, dans ce cas, on pourra établir la fourchette des temps minimums et maximums pour chaque point d'analyse. Cette information, obtenue en temps réel, sera suffisante pour établir un mode de gestion et pour décider s'il faut rechlorer un point chaud du réseau, par exemple.

1.6.4 Effet du bruit sur l'analyse spectrale

Le bruit est tout phénomène perturbateur gênant la perception et l'interprétation d'un signal. Le bruit est un phénomène aléatoire caractérisé dans le domaine des fréquences par une répartition uniforme: il occupe toutes les fréquences et noie les composantes intéressantes du signal (de Coulon, 1990). Pour palier à ce problème, il faut comparer la répartition des fréquences du signal étudié et du signal contenant le bruit pour déterminer dans quelle gamme de fréquence le bruit est surtout présent et passer un filtre passe haut ou passe bas, en fonction des fréquences qu'on veut isoler. En effet, les filtres

passes haut ou passe bas permettent d'isoler la gamme de fréquence qui nous intéresse et de limiter les effets du bruit. Toutefois, si le bruit est très présent dans la gamme de fréquence qui nous intéresse, il devient très difficile d'en limiter les effets.

CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODES

Avant de développer les méthodes d'analyse des résultats de traçage par traitement du signal à l'échelle d'un réseau, des simulations numériques de traçage et des essais en laboratoire ont été réalisés pour limiter le niveau de complexité du traitement des résultats. Ce chapitre présente chacune de ces étapes et leur mise en œuvre.

2.1 SIMULATIONS NUMÉRIQUES

L'objectif principal des simulations numériques est de créer un signal d'entrée, qui représente la variation de concentration de traceur, et de simuler la propagation de ce signal à travers différents chemins d'un réseau de distribution, le nombre de chemin variant selon le niveau de complexité étudié. Le signal de sortie est le signal résultant de la superposition des signaux individuels (variation de concentration de traceur) provenant de tous les chemins menant au point d'analyse considéré. Avec les signaux d'entrée et de sortie ainsi simulés, on peut rechercher les temps de séjour par traitement du signal, soit par corrélation croisée ou par analyse spectrale selon le type de méthode que l'on veut exploiter. Les simulations numériques permettent de vérifier rapidement la pertinence des signaux choisis (type de signal, fréquence, nombre de périodes, amplitude) en fonction du type de traitement utilisé et de l'importance de la dispersion. Elles permettent également de faire un développement préliminaire des méthodes d'analyses, qui seront raffinées avec les essais en laboratoire et en réseau réel. Ces méthodes sont présentées aux chapitres 3, 4 et 5.

2.1.1 Création du signal d'entrée

Pour tirer le maximum d'information d'un traçage, l'optimisation du signal d'entrée (évolution de la concentration de traceur en fonction du temps) est une étape très importante. Puisque les méthodes, que ce soit par corrélation croisée ou par analyse spectrale, ne prennent pas en considération la structure et les conditions d'opération du

réseau, le signal d'injection doit contenir l'information la plus adaptée possible au type de traçage qu'il est possible de faire et à la méthode d'analyse choisie. En effet, si le traçage est réalisé dans un réseau de petite taille (au laboratoire, par exemple), le signal d'entrée sera moins affecté par la dispersion et il pourra contenir des fréquences plus élevées (périodes courtes) que si le traçage est réalisé dans un réseau de distribution d'eau potable étendu. Étant donné l'étendue d'un réseau, le signal sera plus affecté par la dispersion et par la dilution causée par le mélange d'eau provenant de plusieurs chemins et des fréquences beaucoup plus faibles devront être choisies pour assurer la détection du signal à tous les points de mesure. L'optimisation du signal d'entrée consiste donc à trouver le meilleur compromis entre les fréquences injectées et leur capacité à être transportées sur de longues distances.

Considérant les effets de la dilution par le passage de l'eau tracée par les différents chemins et les effets de la dispersion, on crée le signal qui sera utilisé pour la simulation numérique. Plusieurs type de signaux ont été utilisés dans le cadre du projet: onde stationnaire carrée, onde aléatoire et impulsion simple.

Les ondes stationnaires carrées sont générées dans Excel: on doit prévoir la fréquence, le nombre de périodes et l'amplitude de l'onde. Pour générer l'onde carrée il s'agit, manuellement d'entrer les concentrations voulues aux temps voulus. Par exemple, pour créer une onde carrée à une période, d'amplitude 100 mg/L et de fréquence 0,2 hertz, il suffit d'entrer dans une colonne la séquence suivante: 5 cases avec 100 mg/L et 5 cases avec 0 mg/L. Le temps correspondant à cette séquence est de 0 à 10 secondes. Les ondes aléatoires sont générées avec la fonction aléatoire d'Excel: on génère une série de nombres entre 3 et 20 minutes (dans excel: =(ALEA(3:20)), cette série représente les périodes aléatoires. Les périodes sont entrées dans une colonne Excel de la même façon que pour l'onde carrée. Les ondes aléatoires sont créées de façon à contenir le plus d'information possible, mais les simulations numériques sont faites dans l'optique de la réalisation d'un essai de traçage en réseau, l'onde aléatoire est donc carrée et d'amplitude

stable. Les impulsions simples sont générées dans Excel: on doit prévoir la longueur du plateau et son amplitude.

2.1.2 Simulation du signal de sortie

Pour créer le signal de sortie, on doit choisir le nombre de chemins considérés pour arriver au point de mesure, leur temps de parcours et la proportion de leur contribution. Le signal de sortie est obtenu de la façon suivante, avec Excel:

- Décalage du signal d'entrée d'une valeur égale au temps de parcours pour chaque chemin (une colonne dans Excel pour chaque chemins avec la séquence d'injection. Le temps de chaque colonne devient Tinitial+TS);
- Dans certains cas, prise en compte de la dispersion (application de l'équation p.13);
- Affectation, pour chaque chemin, de la proportion de leur contribution (multiplication par le facteur de dilution. Par exemple si 50% du débit contribuant, la colonne d'Excel correspondant à ce chemin est entièrement multipliée par 0,5);
- Addition de tous les signaux ainsi décalés et dilués (addition de toutes les colonnes d'Excel).

2.2 ESSAIS EN LABORATOIRE

Les essais de traçage sont réalisés sur une boucle d'essai du laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal. Le traceur choisi est le chlorure de sodium (NaCL). Ce traceur est économique, facile d'utilisation et a la propriété de changer la conductivité de l'eau, ce qui présente un avantage non négligeable puisque des sondes de conductivité permettent un enregistrement en continu, sont abordables et faciles d'utilisation.

2.2.1 Montage expérimental

Le montage expérimental illustré à la figure 2.1 comprend :

- Un réseau de canalisations de 0,305 m de diamètre formant deux chemins

(51 m et 84 m) ;

- Trois conductimètres HANNA INSTRUMENTS HI8936C ;
- Deux manomètres différentiels pour l'ajustement des débits dans chacun des chemins;
- Un réservoir de solution traçante (H_2O + NaCl, concentré entre 100 et 200 g/L selon les essais);
- Une pompe d'injection ;
- Un débitmètre d'injection ;
- Un système d'acquisition de données (logiciel TEAM PRO).

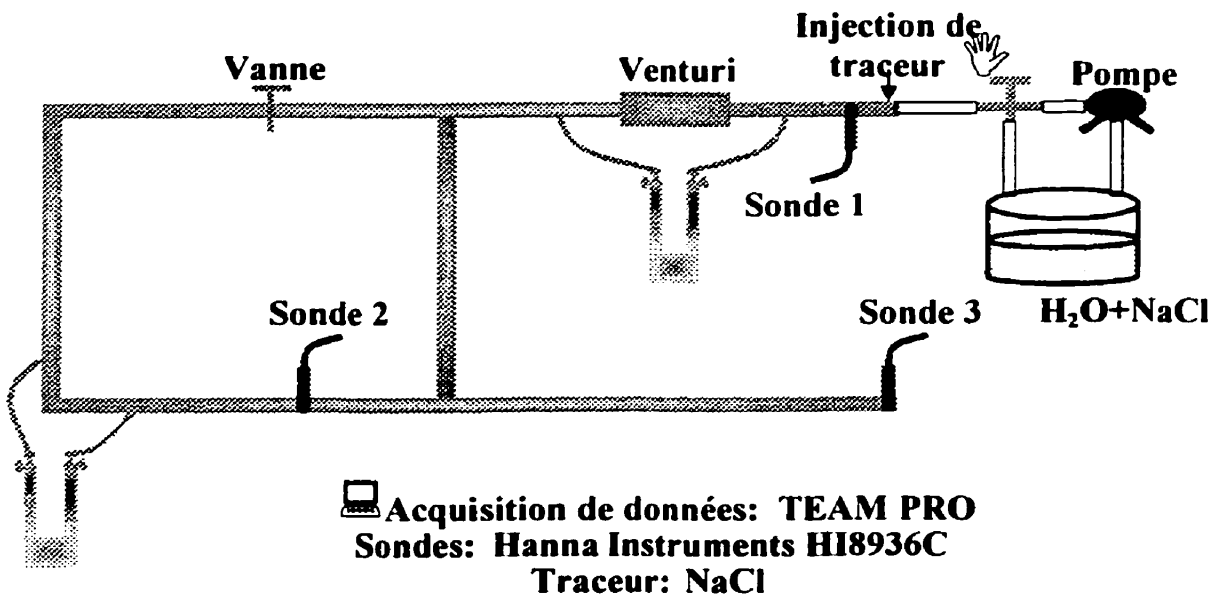


Figure 2.1 : Montage expérimental

Des courbes de tarage du venturi et du coude permettent de connaître la perte de charge à mesurer au niveau de chacun des manomètres pour obtenir les débits désirés dans chaque chemin. La vanne permet de modifier la répartition du débit entre les deux chemins. Les sondes 1, 2 et 3 des conductimètres sont installées en différents points sur le réseau, elles mesurent en continu la conductivité électrique en volts de l'eau et

transmettent l'information au système d'acquisition de données TEAM PRO. La sonde 1 mesure la conductivité à 1,2 m de l'injection. Cette distance est suffisante pour assurer un bon mélange du traceur grâce à un diffuseur qui est installé à l'injection. La sonde 2 mesure la conductivité du traceur provenant d'un chemin et la sonde 3 la conductivité du traceur provenant de deux chemins. Les conductimètres sont étalonnés à partir de solutions salines pour permettre la conversion des données en mg/L.

2.2.2 Injection de traceur

L'injection du traceur se fait au point 1 à l'aide du dispositif d'injection montré à la figure 2.2. Le dispositif d'injection est alimenté par une pompe doseuse et articulé par une vanne trois voies. La vanne trois voies permet d'orienter l'écoulement de traceur soit vers le point d'injection, soit vers la conduite de recirculation. Ce système permet d'injecter le traceur de façon à ce qu'il décrive des ondes carrées en évitant les arrêts/départs de la pompe doseuse. Par exemple, si on veut injecter du traceur, la vanne sera tournée de façon à diriger l'écoulement de traceur dans la conduite d'injection. Pour arrêter l'injection de traceur, la vanne sera tournée de façon à diriger l'écoulement dans la conduite de recirculation. Dans cette configuration, le traceur retourne dans le réservoir de solution traçante. Le même dispositif d'injection sera utilisé pour les essais réseau.

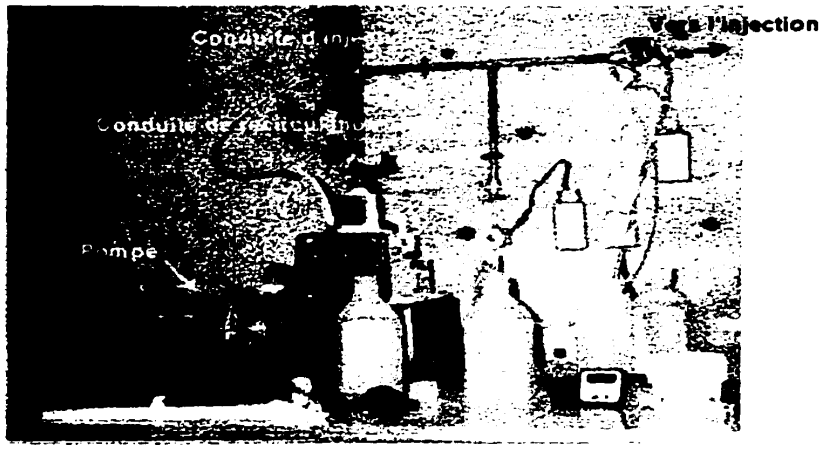


Figure 2.2: Dispositif d'injection

2.2.3 Réalisation d'un essai

Les étapes à suivre pour réaliser les essais de traçage en laboratoire sont présentées ci dessous:

1- Préparation de la solution de traçage. La concentration de la solution dépend du débit dans le réseau et du débit d'injection. On ajuste la concentration en fonction des débits de façon à avoir un apport d'au moins 30 mg/L de NaCl ;
2- Ajustement des débits dans les canalisation aux valeurs prévues pour l'essai (entre 100 et 200 L/s, selon les essais) ;
3- Nettoyage à l'éthanol et à l'eau des sondes de conductivité ;
4- Démarrage de la pompe doseuse en position recirculation ;
5- Remplissage des conduites du dispositif d'injection avec de la solution traçante ;
6- Ajustement des paramètres de TEAM PRO pour l'enregistrement des données ;
7- Injection du traceur ;
8- Récupération des données sur TEAM PRO ;
9- Arrêt de la pompe doseuse et de la pompe alimentant le réseau ;
10- Nettoyage à l'eau de la pompe doseuse, du dispositif d'injection et des sondes de conductivité.

À la fin de l'essai, les fichiers de données fournis par TEAM PRO sont analysés et utilisés au développement des méthodes d'analyse de traçage par traitement du signal. Avec les débits utilisés pour les essais, les temps de séjour sont assez courts et varient généralement entre 30 secondes et 5 minutes.

2.3 ESSAIS RÉSEAUX

2.3.1 Zone d'étude

Pour réaliser les essais en réseau réel, nous avons tracé dans la partie surpressée de la zone 3 de la ville de Montréal, laquelle est alimentée par des pompes de surpression

situées au réservoir Vincent d'Indy. Le secteur, montré à la figure 2.3, est borné d'est en ouest par les rues Vincent d'Indy et Gorman et du nord au sud par le chemin de la Côte Ste-Catherine et la rue Mont-Royal.

Ce secteur est d'envergure raisonnable pour une première validation des méthodes de détermination des temps de séjour en réseau réel parce qu'il est relativement petit et complètement isolé des autres secteurs par des vannes de division. De plus les consommations d'eau ne sont pas excessives puisque :

- Le secteur est essentiellement résidentiel ;
- Aucune industrie n'est desservie par ce secteur ;
- Aucun hôpital n'est desservi par ce secteur.

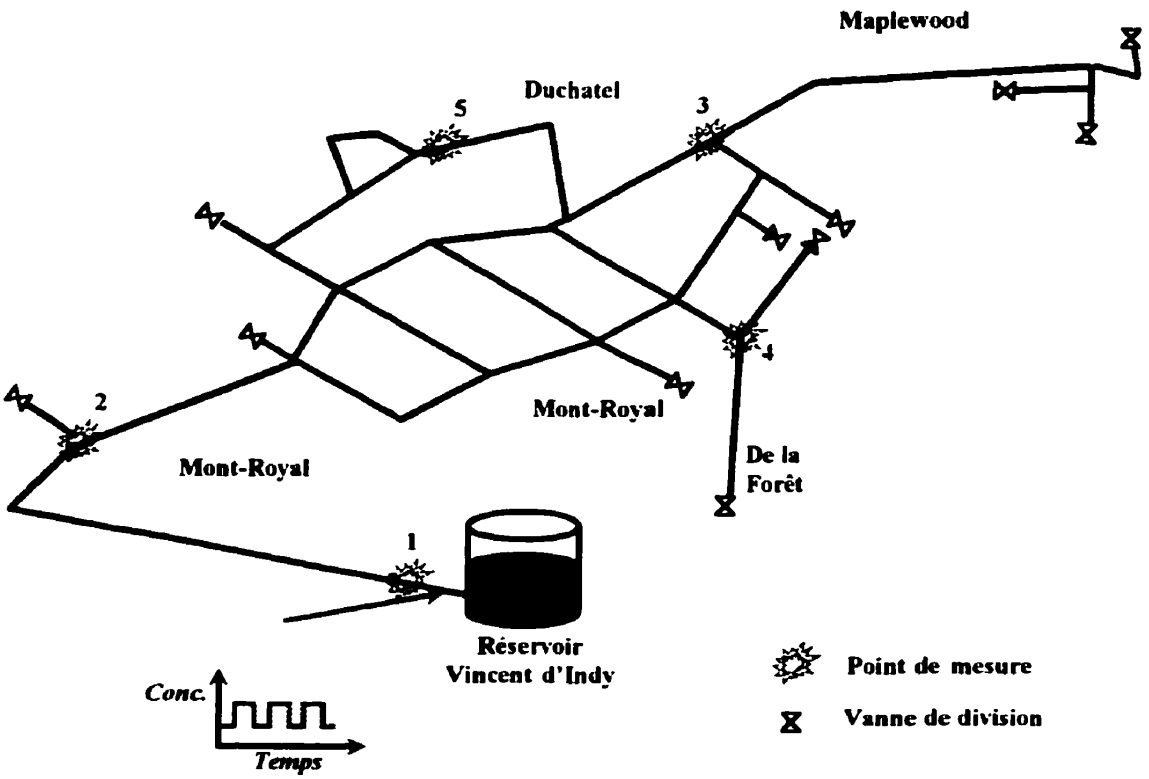


Figure 2.3: Zone 3 du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Montréal

2.3.2 Choix des points d'échantillonnage

Nous avons choisi cinq points d'échantillonnage, répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Le nombre de points d'échantillonnage choisis représente un bon compromis entre le matériel nécessaire et la répartition des points d'échantillonnage sur le réseau. Tous les points choisis sont situés dans des chambres de vannes munies d'un arrêt de corporation.

Le premier point est situé juste en aval des pompes de surpression du réservoir Vincent d'Indy. Il permet de mesurer le signal injecté et de vérifier que la concentration de traceur ne dépasse pas 100 mg/l, conformément aux normes et en accord avec la Ville de Montréal. Les autres points ont été choisis en fonction du niveau de complexité qu'ils représentent et de leur distance du point d'injection.

Le deuxième point d'échantillonnage est situé à l'angle des rues Mont-Royal et Claude Champagne. Ce point, situé à environ 270 m du réservoir, est alimenté par un seul chemin dans lequel les conduites ont 303 mm de diamètre. Il a été choisi pour faire une contre-vérification de l'injection sur le réseau et parce qu'il représente un cas simple pour une première analyse. Le troisième point d'échantillonnage est situé à l'angle Maplewood et Mc Culloch. Ce point, situé presque au bout de la zone, est alimenté par plusieurs chemins et représente, au premier abord, une complexité moyenne. Le quatrième point est situé dans un cul de sac à la jonction des rues Springrove, Mont-Royal et de la Forêt. Le cinquième point, à la jonction de Prince Phillips et Springroove, représente une complexité moyenne.

2.3.3 Choix du traceur

Pour réaliser un traçage dans un réseau de distribution d'eau potable, des considérations doivent être prises, tant au niveau des répercutions sur la qualité de l'eau potable que de la mise en œuvre du traçage. Elles sont présentées ci dessous, en ordre de priorité.

- **Santé publique** : le traceur ne doit avoir aucun effet nocif pour la santé du consommateur, en particulier pour les populations sensibles, soit les nourrissons et les personnes âgées;

- **Confort du consommateur** : le traceur ne doit pas provoquer de goût, d'odeur, de couleur ou de turbidité à l'eau qui pourrait incommoder le consommateur;

- **Stabilité dans le réseau** : le traceur ne doit pas réagir avec l'eau ou les éléments constituant le réseau de distribution, ne pas encourager la recroissance bactérienne, la corrosion ou l'entartrage du réseau de distribution;

- **Détection du traceur aux points de mesure** : la mesure du traceur doit pouvoir se faire en continu, à une fréquence d'échantillonnage élevée, et les données transmises à un système d'acquisition de données. Le temps de réponse de l'appareil mesurant le traceur doit être court pour ne pas modifier le signal reçu à un point d'échantillonnage;

- **Disponibilité/coût** : le traceur et l'instrumentation nécessaire pour la mise en œuvre du traçage doivent être disponibles et ne pas entraîner des dépenses excessives;

- **Manipulation du produit concentré** : la manipulation du traceur ne doit présenter aucun danger pour l'opérateur et les installations;

- **Utilisation antérieure dans le domaine de l'eau potable** : le but de l'étude n'est pas de tester de nouveaux traceurs, mais d'utiliser un produit dont l'usage a déjà été validé dans le cadre de la distribution d'eau potable.

Considérant les normes Québécoises, les recommandations sur l'eau potable de Santé Canada (SC), de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et de l'Environmental

Protection Agency (EPA) et les critères énoncés ci dessus, notre choix s'est arrêté sur le chlorure de calcium ($CaCl_2+2H_2O$). Ce traceur a la propriété de changer la conductivité de l'eau, ce qui nous permet d'utiliser le même matériel de mesure qu'au laboratoire.

Une recherche exhaustive des traceurs utilisables pour des eaux potables a été faite avant de choisir le traceur. Un rapport sur l'argumentaire du choix du traceur a été soumis à la ville de Montréal, il est présenté à l'annexe I.

2.3.4 Injection du traceur

L'injection du traceur se fait sur la conduite située juste en amont des pompes de surpression, au premier sous sol de la station de pompage Vincent d'Indy à un arrêt de corporation déjà présent. L'emplacement du point d'injection présente un double avantage: on injecte dans une zone où la pression n'est pas trop élevée et les pompes de surpression agissent comme mélangeur, la concentration de l'eau tracée est alors uniforme à son arrivée au premier point d'échantillonnage. Pour réaliser l'injection, on utilise le même principe et le même matériel que pour les essais en laboratoire (section 2.2.2 et figure 2.2). La pompe doseuse utilisée pour ces essais est prêtée par la Ville de Montréal.

2.3.5 Échantillonnage et récupération des données

Tous les échantillonnages se font à l'extérieur des conduites du réseau. Une petite conduite branchée sur l'arrêt de corporation alimente un pot de mesure dans lequel est plongée la sonde de conductivité. Le trop plein du pot de mesure est versé directement dans la chambre de vanne. Des tests effectués avant les traçages ont montré que la capacité de drainage des chambres de vanne est suffisante pour supporter l'apport du trop plein.

a) b)

Figure 2.4: Échantillonnage. a) Installation du matériel sur le réseau. b) Pot de mesure pour l'échantillonnage et conductimètre utilisé au point $n^0 1$.

Les sondes de conductivité sont reliées à un contrôleur qui transmet les données à une unité d'acquisition de données (Flo-Tote). Au terme d'un traçage, les données de chaque unité d'acquisition sont récupérées et utilisées pour l'analyse et le développement des méthodes d'analyse par traitement du signal.

2.3.6 Déroulement d'un essai

Avant la journée du traçage, on doit calibrer les sondes de conductivité, installer le matériel sur le terrain (pot de mesure, sonde de conductivité, contrôleur, Flo-Tote), désinfecter la pompe et le dispositif d'injection et préparer la solution de traçage.

<u>Préparation de la solution de traçage</u>

Considérant le débit moyen pompé dans la zone (environ 25 L/s) et le débit d'injection maximum (3,6 mL/s) la solution de traçage est concentrée à 500 g/L pour avoir un apport en chlorures d'environ 72 mg/L. La solution de traçage est préparée avec l'eau du robinet dans un réservoir désinfecté de 10 L .

Préparation de l'essai de traçage au réservoir et en réseau

La veille des traçages, une solution chlorée à 100 mg/l est pompée pendant une heure dans chaque conduite du poste d'injection (conduite de succion, d'injection et de recirculation). La solution pompée est récupérée et évacuée à l'égout. Ensuite, toutes les conduites du poste d'injection sont rincées pendant 20 minutes avec l'eau d'une conduite d'eau potable de la station de pompage haute pression du réservoir Vincent d'Indy. Le jour du traçage, les mêmes opérations sont répétées, mais cette fois, chaque conduite est désinfectée et rincée pendant 15 minutes. Juste avant le traçage, les conduites de succion, d'injection et de recirculation sont remplies avec la solution traçante. Pendant cette opération, la conduite d'injection est déconnectée juste en amont du clapet qui relie habituellement le tuyau d'injection à la conduite d'eau potable. La solution pompée est récupérée dans un bêcher et évacuée à l'égout. Cette étape est importante parce qu'elle permet, dès le début du traçage, d'injecter la concentration de traceur voulue et évite de diluer la solution traçante avec l'eau restée dans la conduite de recirculation.

Juste avant le traçage, on fait une dernière tournée des points sur le réseau pour s'assurer que les pots de mesures sont bien alimentés par l'eau du réseau, que les unités d'acquisition de données sont démarrées et que le drainage des chambres de vanne se fait normalement.

Réalisation des essais de traçage

Pour réaliser les essais de traçage en réseau, une équipe de deux personnes est affectée à la préparation du dispositif d'injection, à la mise en œuvre de l'injection et la récupération manuelle des données de conductivité au point 1. Après l'injection du traceur, la pompe, la conduite de succion, la conduite de recirculation et la conduite d'injection sont rincées avec de l'eau potable. Pendant cette opération, la conduite d'injection est déconnectée en amont du clapet qui relie la conduite d'injection à la conduite d'eau potable.

Pendant ce temps, une équipe réseau fait la tournée des points d'échantillonnage pour vérifier le drainage des chambres de vanne et prendre des mesures sur site pour s'assurer que l'acquisition de données se fait normalement. La dernière tournée des points d'échantillonnage se fait vers seize heures, mais le matériel est laissé sur place et l'acquisition de donnée se poursuit jusqu'au lendemain. Le lendemain du traçage, le matériel est ramené et les données de conductivités sont récupérées des Flo-Totes (système d'acquisition de données). Les données de conductivité sont ensuite converties en données de concentration (mg/L) avec une courbe d'étalonnage.

Figure 2.5: Vérification de l'acquisition de données sur le terrain

CHAPITRE 3: RECONSTITUTION DE SIGNAUX

Pendant un traçage, la courbe d'injection, qui représente le signal émis, se propage à travers différents chemins selon l'hydraulique du réseau d'étude. La concentration de traceur reçue à un point d'échantillonnage est alors le résultat de la superposition des signaux qui ont été dispersés et dilués par le passage à travers les différents chemins. En considérant la dispersion, la dilution et la superposition des signaux à un point d'échantillonnage, la méthode permet de reconstituer, à l'aide du signal émis, le signal reçu à un point d'échantillonnage. Cette méthode peut permettre la déduction des principaux temps de séjour et l'importance de leur contribution. Ce chapitre présente la reconstitution des signaux pour deux types d'essais de traçage: une impulsion simple et une onde stationnaire continue. Ces essais ont été réalisés dans la partie surpressée de la zone 3 du réseau de la Ville de Montréal.

3.1 MÉTHODE

Étant donné que la sonde utilisée pour mesurer les données de conductivité au point d'injection est d'une marque différente des sondes utilisées sur le réseau et qu'elle n'a pas la même sensibilité, les valeurs de conductivité au point d'injection sont ajustées sur le point d'échantillonnage $n^0 2$, qui a l'intérêt d'être situé près de l'injection. On suppose que la totalité du traceur injecté passe par le point $n^0 2$: ce point d'échantillonnage est alimenté par un seul chemin et n'est situé qu'à 270 m du point d'injection. Avec le principe de la conservation de la masse, on corrige l'amplitude de la courbe d'injection de façon à ce que la masse de traceur émise soit la même que la masse de traceur reçue au point d'échantillonnage $n^0 2$, ce qui permet d'éviter les problèmes d'intercalibration des sondes entre les deux points.

3.1.1 Évaluation de la dispersion

Avec la courbe d'injection ainsi corrigée, on évalue le coefficient de dispersion Kx entre le point d'injection et le point d'échantillonnage n^{0}2 avec l'équation de dispersion pour une injection continue à temps fini. L'équation qui a été présentée au chapitre I est rappelée ici.

$$C\ (x,t) = \sum \Delta C_i(x,t) = \frac{1}{S\sqrt{4\ K_x}} \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{\sqrt{t-\tau_i}} \exp\left[\frac{\left[x - U\ (t-\tau_i)\right]^2}{4K_x\ (t-\tau_i)}\right]$$

où:

C: concentration finale dispersée à un temps et une distance donnée (kg/m^3)

S: Section de la canalisation ou section de l'écoulement (m^2)

K_x: coefficient de dispersion (m^2/s)

τ_i: temps de libération d'une petite masse de traceur (t)

n: nombre de sommation liées

m_i: masse de traceur libérée à un temps τ_i (kg)

t: temps (t)

x: distance de parcours de l'eau (m)

U: vitesse de l'eau (m/s)

Toutes les données nécessaires à l'application de l'équation sont connues puisque le point d'échantillonnage n^{0}2 est situé très près de l'injection; les estimations de vitesses sont plus justes puisqu'un seul chemin alimente le point d'échantillonnage et les consommations d'eau risquent d'être moins élevées parce que peu d'habitations sont desservies avant le point d'échantillonnage. La longueur du parcours et la section moyenne pondérée de l'écoulement sont relevés sur les plans Aqua Géo fournis par la Ville de Montréal. La vitesse de l'eau pendant le traçage est connue grâce à un débitmètre installé par la Ville de Montréal sur la conduite qui alimente la zone d'étude. La masse de traceur est calculée avec la courbe d'injection corrigée.

L'équation a été programmée dans Excel. Le seul paramètre à faire varier est le coefficient de dispersion Kx. On fait varier le coefficient de dispersion jusqu'à ce que la courbe de dispersion calculée coïncide avec la courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^0 2$. Le coefficient de dispersion est ensuite supposé constant pour l'écoulement dans tout le réseau étudié lors du traçage.

Le signal théorique reçu au point d'échantillonnage n°3 est calculé en utilisant le signal mesuré au point n°2 et en lui appliquant le coefficient Kx trouvé au point $n^0 2$ et les valeurs de section, de distance et de vitesse pour le chemin le plus direct menant au point étudié. Cette façon de faire permet une évaluation de la dispersion au point d'échantillonnage $n^0 3$, sans toutefois connaître tous les chemins qui l'alimentent.

3.1.2 Outil de superposition

La reconstitution de signal est faite à l'aide d'un outil de superposition programmé dans Excel. L'usager doit entrer deux séries de données: la courbe d'injection corrigée par la dispersion et la courbe mesurée au point d'échantillonnage où l'on veut reconstituer le signal.

L'usager doit d'abord déterminer le nombre de chemins à considérer dans la reconstitution. Ensuite, pour chacun des chemins, l'usager entre un temps de séjour et un facteur de dilution dans les cases prévues à cet effet. La courbe d'injection dispersée est alors décalée du temps de séjour et affectée du facteur de dilution pour chaque chemin. Le principe de calcul du programme est de décaler la courbe d'injection du temps de séjour et de lui affecter le facteur de dilution pour chacun des chemins, au fur et à mesure que l'usager apporte des modifications et de faire la somme de tous les chemins. Dans le programme, deux courbes sont visibles: la courbe mesurée lors du traçage et la courbe superposée, obtenue de la somme de tous les chemins considérés dans la reconstitution. La reconstitution se fait visuellement et sa qualité peut être jugée avec

l'écart type entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. L'usager modifie la dilution et les temps de séjour pour chaque chemin de façon à avoir le meilleur recouvrement possible entre la courbe calculée et la courbe mesurée et par le fait même, avec l'écart type le plus faible possible. Pour faciliter la reconstitution, l'usager peut ajouter les chemins un à la fois de façon à voir la progression de la reconstitution. Dans ce cas, le facteur de dilution est mis à zéro pour tous les chemins qui ne sont pas considérés. Lorsque la reconstitution est satisfaisante, on connaît le nombre de chemins contribuants, leur temps de séjour et la proportion de leur contribution.

3.2 IMPULSION SIMPLE

La reconstitution de signal sur une impulsion simple a été faite pour l'essai réseau du 25 mars 1999. La figure 3.1 montre la courbe d'injection corrigée (sans la dispersion) et la courbe mesurée au point d'échantillonnage n^{0}2 sur le réseau. Pour faciliter les calculs et l'analyse, la concentration de base de l'eau du réseau en chlorure de calcium a été retranchée pour tous les essais.

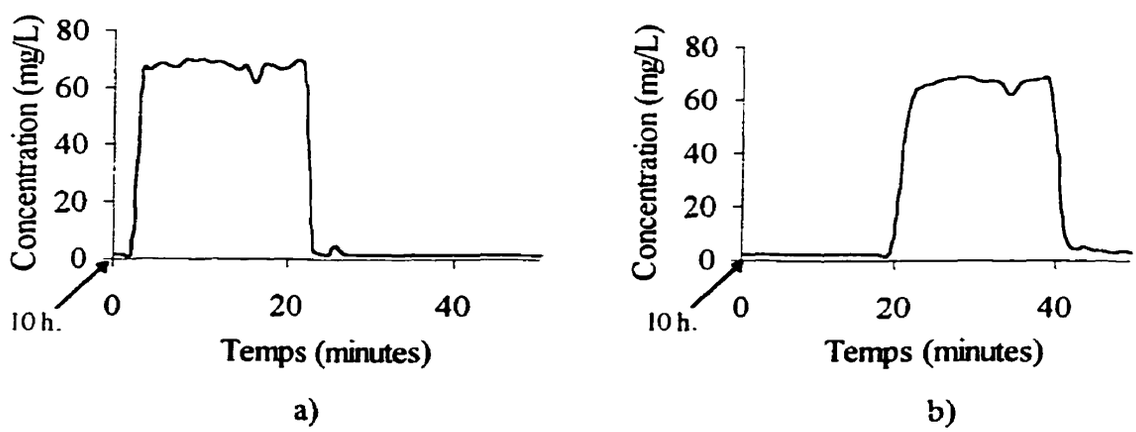


Figure 3.1: Essai de traçage du 25 mars 1999. a) Courbe d'injection corrigée
b) Courbe mesurée au point d'échantillonnage n^{0}2

Avec un coefficient de dispersion de 0,07 m^2/s (obtenu de l'équation p.13), on obtient une très bonne correspondance entre la courbe mesurée au point d'échantillonnage n^{0}2 et la courbe d'injection dispersée: la courbe d'injection dispersée représente 97% de la

masse de traceur mesurée au point 2. La courbe ainsi dispersée est ajustée visuellement sur la courbe mesurée à l'aide de l'outil de superposition de signal. La figure 3.2 montre le résultat de la reconstitution du signal. Sur toute les figures de résultats de reconstitution de signal, le zéro représente l'heure de l'injection, soit 10 heures dans le cas de l'essai qui est traité ici. La meilleure correspondance est obtenue pour un chemin avec un temps de séjour de 17 minutes.

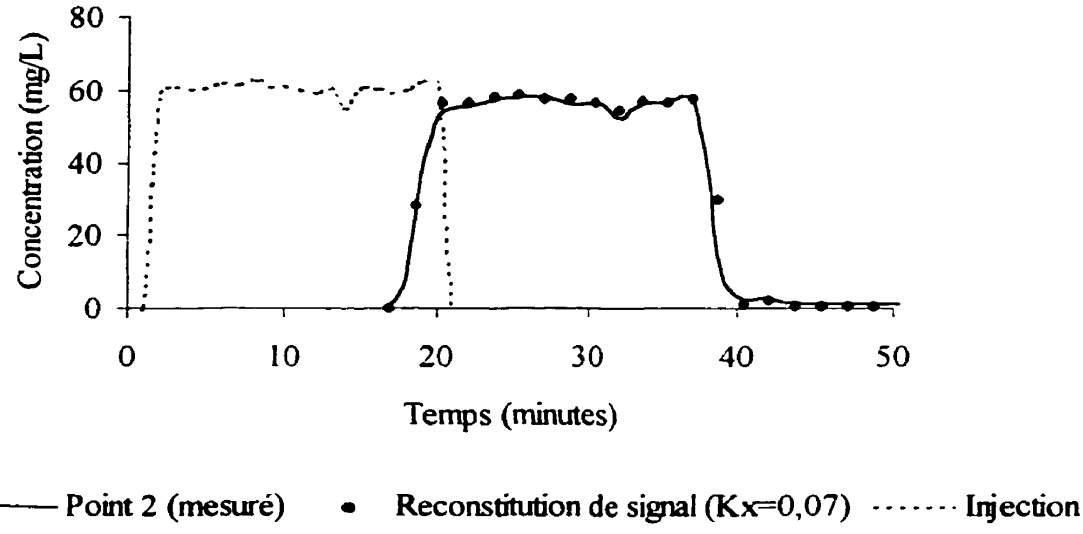


Figure 3.2: Résulat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n^{0}2 pour l'essai réseau du 25 mars 1999

La figure 3.3 montre la courbe de concentration en chlorure de calcium mesurée pendant le traçage au point d'échantillonnage n^{0}3. L'observation de la courbe montre trois contributions principales, dans lesquelles il peut y avoir plusieurs chemins, et une petite variation de concentration à la fin de l'enregistrement. Il est difficile de dire si cette variation de concentration correspond à la contribution d'un chemin où à une variation de la conductivité de base de l'eau dans le réseau étant donné la très faible amplitude de la variation. La durée des trois contributions principales est plus longue que la durée de l'émission du plateau au point d'injection. Cette durée peut être le résultat de la

dispersion de la courbe d'injection pendant son transport ou le résultat de la contribution de plusieurs chemins. L'effet de la dispersion est bien visible sur la courbe mesurée, puisque le signal est plus étalé et plus arrondi. On remarque également que la dispersion est plus importante pour les temps de séjour plus longs.

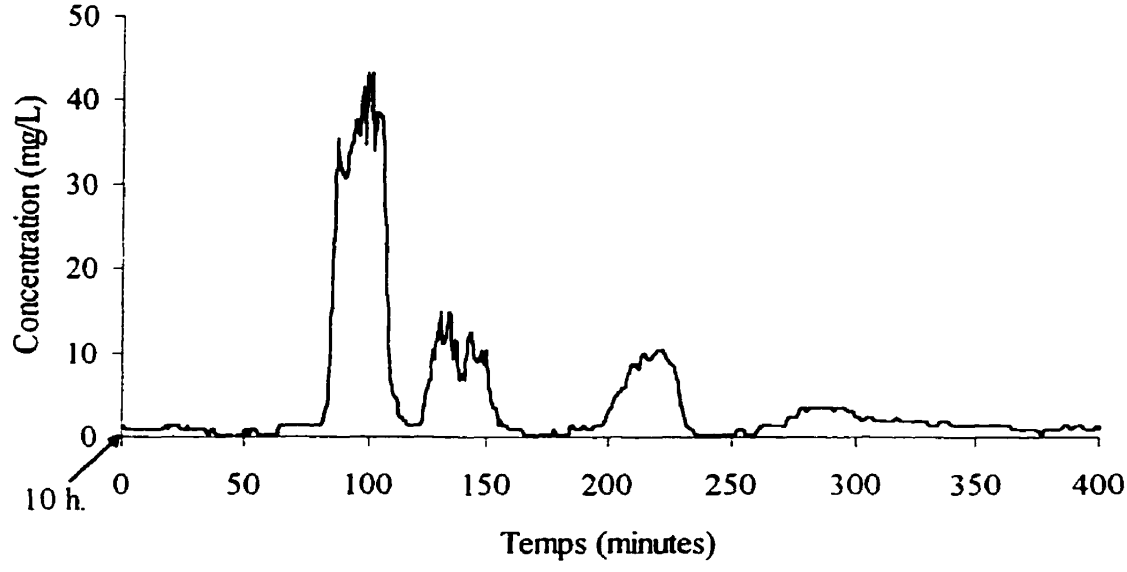


Figure 3.3: Courbe mesurée au point d'échantillonnage n^{0}3.

Pour évaluer la courbe de dispersion au point d'échantillonnage n^{0}3, on utilise le coefficient de dispersion calculé pour le point d'échantillonnage n^{0}2, puis on refait le calcul de dispersion en ajustant la distance, la vitesse moyenne pondérée et le diamètre moyen pondéré aux valeurs correspondant au chemin le plus direct menant au point d'échantillonnage n^{0}3. La courbe ainsi dispersée est ajustée sur la courbe mesurée à l'aide de l'outil de superposition de signal. La figure 3.4 montre le résultat de la reconstitution.

La figure 3.4 montre une bonne correspondance entre le signal mesuré au point d'échantillonnage n^{0}3 et la reconstitution du signal. En effet, le signal reconstitué représente 85% de la masse de traceur mesurée, le 15% manquant venant probablement

du fait que la dispersion est moins bien évaluée pour les chemins les plus longs. La correspondance pour la première contribution est meilleure que pour les deux autres. Ceci s'explique de la façon suivante: la dispersion au point 3 est évaluée sur le chemin le plus direct et par le fait même, le plus rapide. Les deux premiers chemins sont donc bien définis au niveau de la dispersion. Les autres contributions proviennent de chemins pour lesquels la distance de parcours est plus longue et la vitesse plus faible. Ces chemins sont toutefois difficiles, voire impossible à caractériser pour la dispersion parce qu'on ne sait pas quelles canalisations ont été empruntées pour arriver au point de mesure. Le chemin le plus rapide est facile à identifier parce qu'il suit la ligne d'eau principale de la zone d'étude.

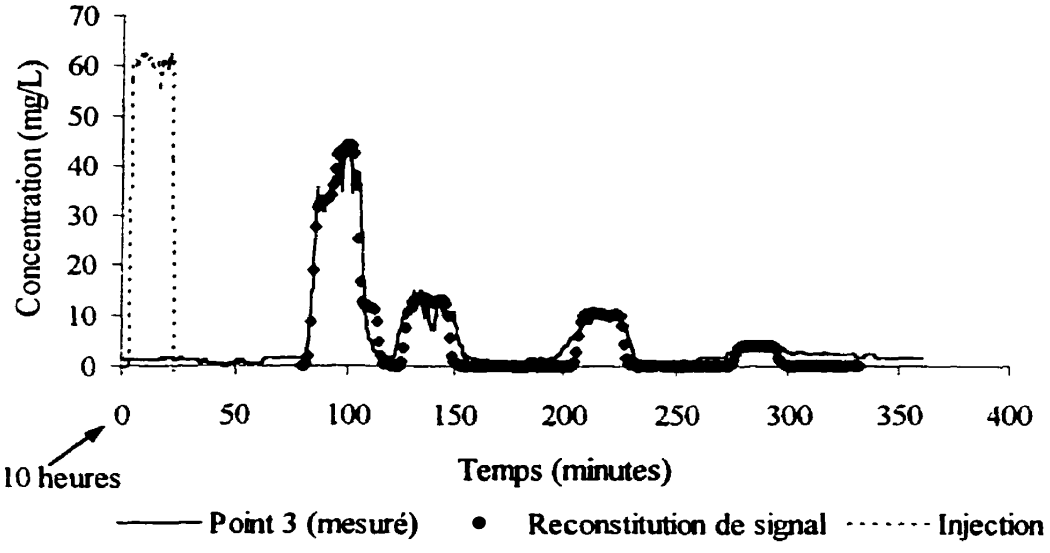


Figure 3.4: Résulat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai réseau du 25 mars 1999

Les résultats de reconstitution de signal doivent toutefois être interprétés avec un regard critique. Le meilleur résultat de reconstitution, pour la première contribution, est obtenu pour deux chemins, alors que la durée de réception de cette contribution est à peu près équivalente à la durée de l'injection. Il y a peut être effectivement deux chemins dont les

temps de séjour sont proches à l'intérieur de cette contribution, mais il est également possible que la dispersion ait été sous-estimée. En effet, le signal théorique reçu au point d'échantillonnage n°3 est calculé avec le coefficient de dispersion évaluée au point 2 et une vitesse estimée. Ces simplifications peuvent entraîner des erreurs.

Les valeurs de temps de séjour et les facteurs de dilutions affectés aux différents chemins pour la reconstitution du signal sont présentés dans le tableau 3.1. On remarque tout d'abord que le total des proportions est de 1, alors qu'il a été établi précédemment que 85% de la masse de traceur est retrouvée à ce point d'échantillonnage. Cet écart est sans doute dû à l'évaluation approximative de la dispersion, puisque les dilutions sont évaluées sur une courbe dispersée. Si l'évaluation de la dispersion ne reflète pas tout à fait la réalité, l'erreur se répercute sur la dilution puisque cette dernière est ajustée avec la courbe dispersée, sur la courbe mesurée.

Tableau 3.1: Temps de séjour et facteurs de dilution pour la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n°3 pour l'essai de traçage du 25 mars 1999

	Temps de séjour (minutes)	Proportion
Chemin 1	80	0,52
Chemin 2	90	0,15
Chemin 3	120	0,18
Chemin 4	202	0,13
Chemin 5	242	0,02
		Total des proportions=1

3.3 ONDE CARRÉE CONTINUE

La reconstitution de signal pour une onde continue est présentée pour l'essais réseau du 17 février 1999.

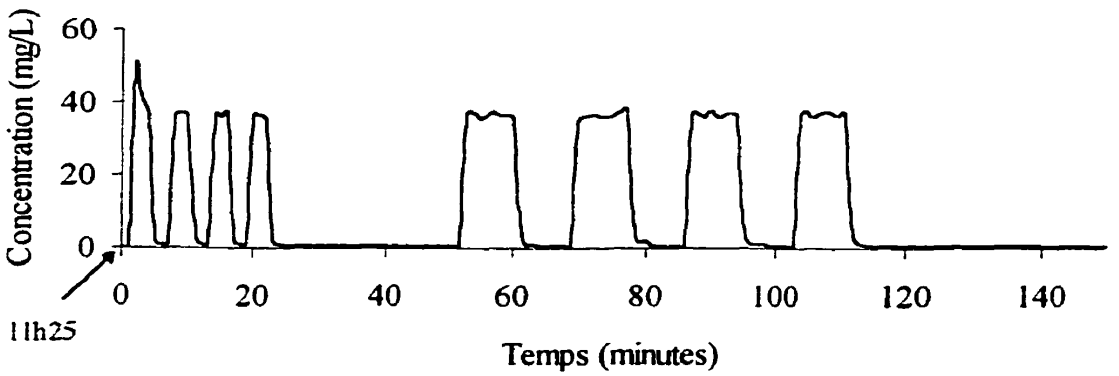


Figure 3.5: Courbe d'injection de l'essai de traçage du 17 février 1999

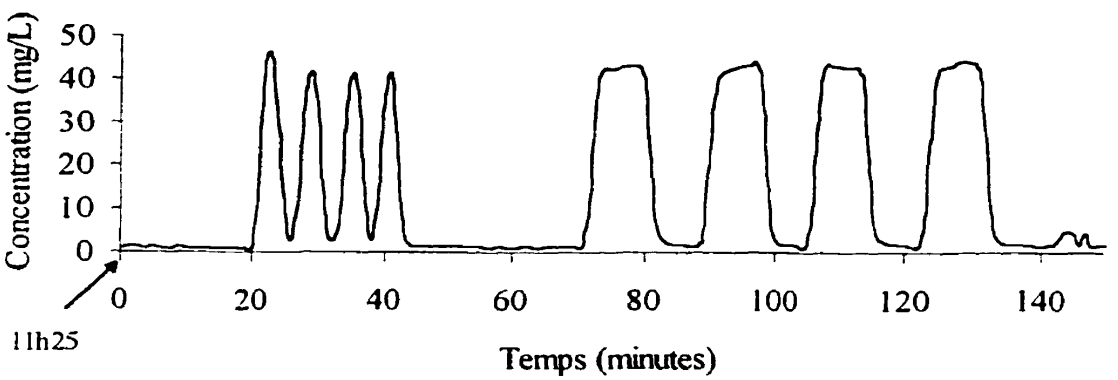


Figure 3.6: Courbe mesurée au point d'échantillonnage n°2 pendant l'essai de traçage du 17 février 1999

La figure 3.5 montre la courbe d'injection (sans la dispersion) et la figure 3.6, la courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^0 2$ sur le réseau. Avec un coefficient de dispersion de 0,05 m^2/s, on obtient une bonne correspondance entre la courbe mesurée au point d'échantillonnage $n^0 2$ et la courbe d'injection dispersée: la courbe d'injection dispersée représente 97% de la masse de traceur mesurée au point $n^0 2$. Le coefficient de dispersion est toutefois un peu plus faible que celui trouvé pour l'essai de 25 mars 1999 (Kx=0,07 m^2/s). Ceci s'explique par le fait que la vitesse pendant l'injection du 25 mars est plus faible que pendant l'injection du 17 février. Avec l'outil de reconstitution du signal, on

trouve la meilleure correspondance entre la courbe mesurée au point 2 et le signal reconstitué pour un temps de séjour de 20 minutes. La figure 3.7 montre cette reconstitution.

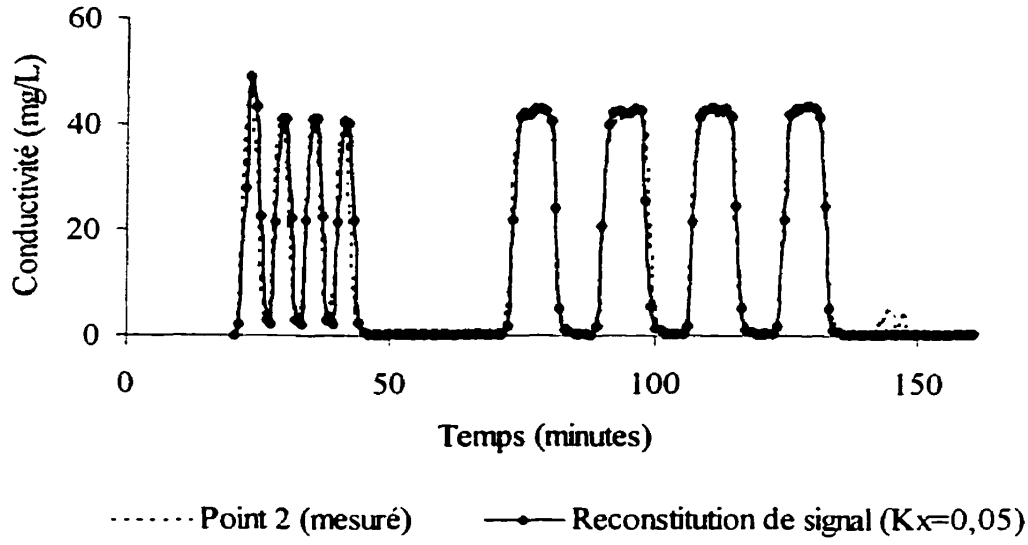


Figure 3.7: Résulat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n^{0}2 pour l'essai réseau du 17 février 1999

La figure 3.8 montre la courbe de concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}3 lors du traçage. L'observation visuelle de la courbe montre deux principaux chemins qu'il est facile de reconnaître par la première série de fréquence, autour de 80 minutes et de 110 minutes. Les deuxièmes séries de fréquence correspondant à ces temps sont plus difficiles à voir parce qu'elles sont complètement superposées. À environ 210 minutes, on peut observer une variation de concentration correspondant à la première série de fréquence, mais très dispersée et en très faible amplitude. À la toute fin de l'enregistrement, vers 240 minutes, on remarque deux petites variations qui pourraient correspondre à la fin de la deuxième série de fréquence, la première série étant difficile à discerner à cause la superposition. Entre 160 minutes et 220 minutes, la concentration de base en chlorure de calcium est plus élevée, soit autour

de 6 mg/L. Cette concentration peut être le résultat de la dispersion ou de la contribution de chemins qu'il est impossible de distinguer à cause de la superposition.

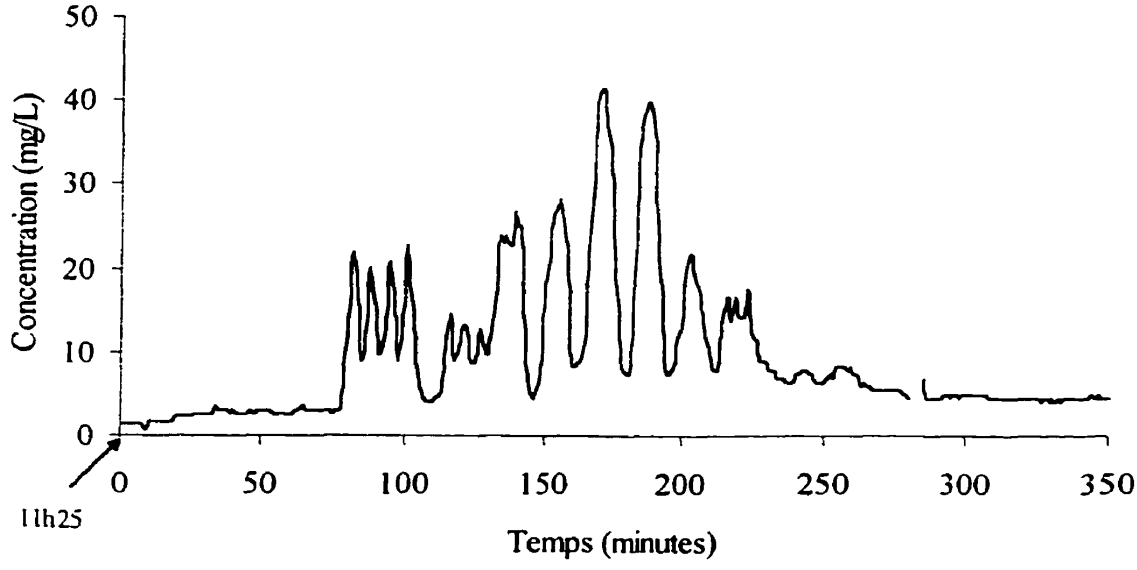


Figure 3.8: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}3 lors du traçage du 17 février 1999

Pour évaluer la courbe de dispersion au point d'échantillonnage n^{0}3, on utilise le coefficient de dispersion calculé pour le point d'échantillonnage n^{0}2, puis on refait le calcul de dispersion en ajustant la distance, la vitesse moyenne pondérée et le diamètre moyen pondéré aux valeurs correspondant au chemin le plus direct menant au point d'échantillonnage n^{0}3. La courbe ainsi dispersée est ajustée sur la courbe mesurée à l'aide de l'outil de superposition de signal. Les courbes représentant les chemins individuels utilisés dans la reconstitution de signal sont montrées à la figure 3.9. Le résultat de la reconstitution est montré à la figure 3.10.

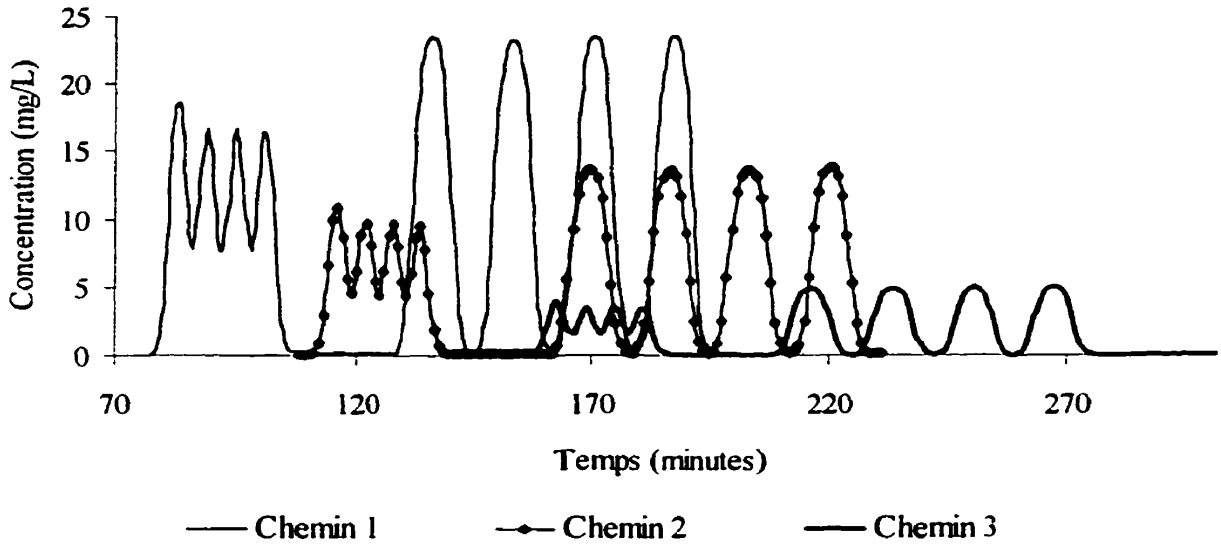


Figure 3.9 : Chemins individuels utilisés dans la reconstitution de signal pour l'essai du 17 février 1999 au point d'échantillonnage n^{0}3

La figure 3.10 montre une assez bonne correspondance est obtenue entre la courbe mesurée au point d'échantillonnage et le signal reconstitué: on retrouve 92% de la masse de la courbe mesurée dans la reconstitution. On remarque toutefois, dans la reconstitution de signal, un manque de concentration à environ 204 minutes et un surplus de concentration à environ 220 minutes. De plus, la variation de concentration correspondant à la première série de fréquence entre 215 et 225 minutes est absente. Plusieurs configurations ont été testées pour rectifier ces lacunes, mais la meilleure configuration obtenue reste celle qui est présentée ci-dessus. Ces lacunes peuvent s'expliquer en par le fait que les courtes périodes sont plus affectées par la dispersion que les longues périodes. Ainsi, la première série de fréquence sera plus affectée par la dispersion et, pour une dispersion significative, son amplitude résultante sera plus faible que pour la deuxième série de fréquence. L'ajustement de la dilution a été fait pour la première série de fréquence parce que c'est le signal le plus clair de la courbe mesurée au point 3. La simulation de la dispersion étant approximative, il est possible que la

combinaison dispersion dilution ne soit pas parfaite et que l'amplitude de la deuxième série de fréquence soit surestimée. Ceci peut expliquer le fait que, pour les deuxièmes séries de fréquence, les amplitudes de la reconstitution soit élevées par endroits. Il est donc difficile d'ajuster la reconstitution de façon à obtenir exactement ce qui est visible sur la courbe.

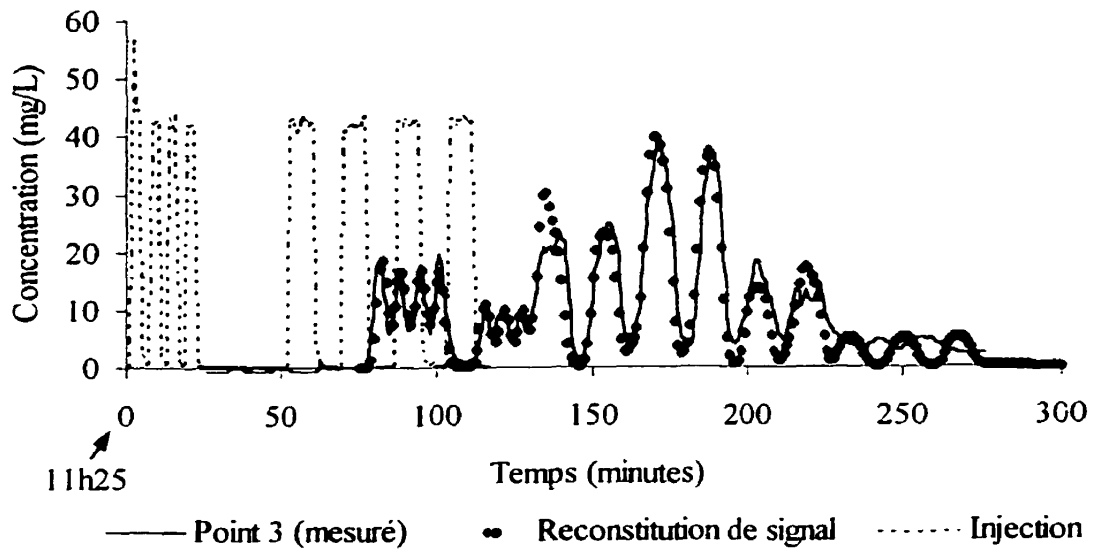


Figure 3.10: Résulat graphique de la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai réseau du 17 février 1999 (3 chemins)

Les valeurs de temps de séjour et les facteurs de dilution affectés aux différents chemins pour la reconstitution du signal sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2: Temps de séjour et facteurs de dilution pour la reconstitution du signal au point d'échantillonnage n^{0}3 pour l'essai de traçage du 17 février 1999

	Temps de séjour (minutes)	Proportion
Chemin 1	75	0,43
Chemin 2	108	0,25
Chemin 3	124	0,09
		Total des proportions=0,77

3.4 DIFFICULTÉS LIÉES À LA RECONSTITUTION DE SIGNAL

Pour des signaux simples comme une impulsion, il est plus facile d'avoir une bonne reconstitution de signal. Toutefois, pour des signaux complexes comme une onde carrée continue à deux fréquences, la reconstitution peut devenir difficile étant donné le nombre d'inconnus. En effet, la dispersion est changeante en fonction des chemins parcourus, de leur temps de séjour et des variations de vitesse dans les canalisations dues au régime non permanent du réseau de distribution. De plus, la dispersion n'affecte pas de la même façon les différentes périodes à l'intérieur d'un signal et la combinaison dispersion-dilution peut alors devenir assez difficile à évaluer pour avoir un recouvrement optimal de la courbe mesurée et du signal reconstitué. Puisqu'il existe plusieurs combinaisons de signaux pouvant donner des résultats plus ou moins bons, il faut donc temps et patience pour trouver la meilleure combinaison possible.

3.5 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE

Quatre points d'échantillonnage sont installés sur le réseau d'étude, mais l'analyse de reconstitution de signal n'a été faite que sur deux d'entre eux, les points d'échantillonnage n°2 etn°3, et ce, pour les deux essais de traçage qui ont été traités. En effet, les résultats de traçage des points 4 et 5 sont difficiles à interpréter et se prêtent mal à la reconstitution de signal. Les résultats de traçage relatifs à ces points d'échantillonnage, pour les essais du 17 février et du 25 mars 1999 sont présentés ici.

3.5.1 Point d'échantillonnage n°4

Le point d'échantillonnage n°4 est situé dans un cul de sac, à l'angle des rues Springrove, Mont-Royal et de la Forêt. La figure 3.11 montre les résultats des traçages du 17 février et du 25 mars 1999 relatifs à ce point d'échantillonnage.

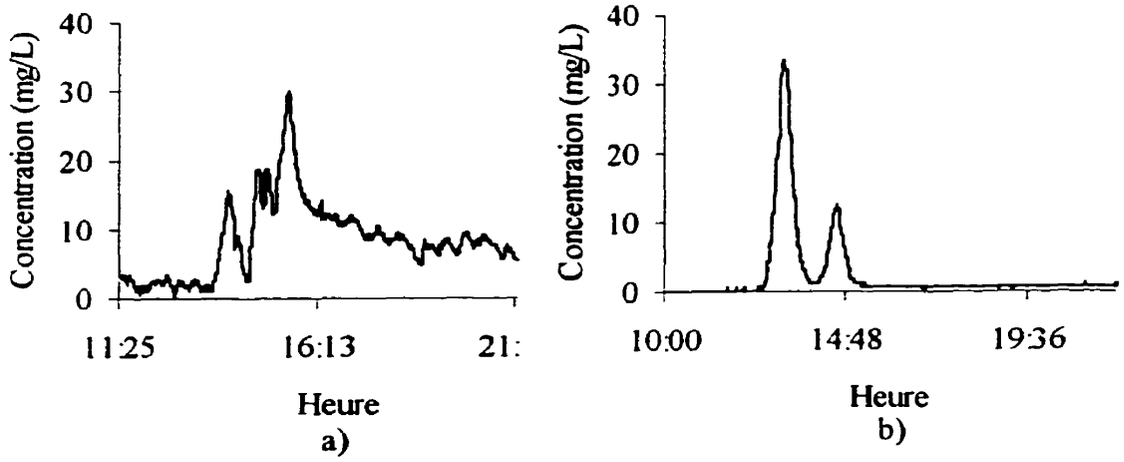


Figure 3.11: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}4 a) 17 février 1999 b) 25 mars 1999

La figure 3.11 montre bien l'effet d'une conduite dans laquelle la vitesse de l'eau est presque nulle. En effet, les courbes mesurées, surtout lors du traçage du 17 février, sont très étalées et assez déformées par la dispersion. Dans la courbe mesurée le 17 février, les deux séries de fréquences qui ont été injectées ne sont presque plus visibles. Dans les deux essais de traçage, on devine deux contributions principales, mais il est impossible de dire si ces contributions proviennent de deux chemins ou sont le résultat de la superposition de plusieurs chemins. Le point d'échantillonnage n^{0}4 illustre bien les difficultés d'interprétation liées à un traçage en cul de sac et montre la discontinuité dans les consommations étant donné le comportement très différent du 17 février par rapport au 25 mars.

3.5.2 Point d'échantillonnage n^{0}5

Le cinquième point d'échantillonnage est situé à la jonction de Prince Phillips et Springrove. Au premier abord, ce point d'échantillonnage semble relativement simple d'interprétation parce qu'il n'est pas situé dans un cul de sac et il n'est pas très éloigné du

point d'injection. Le résultat de l'essai de traçage du 17 février 1999 est présenté à la figure 3.12.

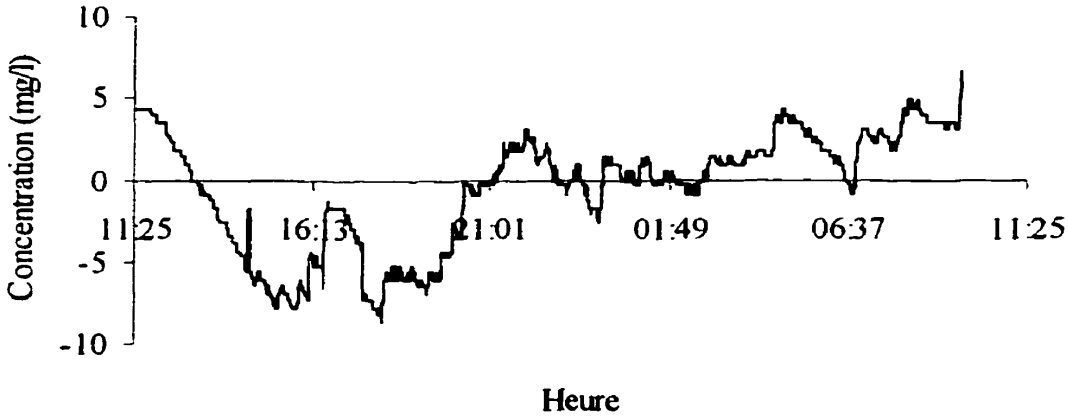


Figure 3.12: Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}5 pendant le traçage du 17 février 1999

L'observation de la courbe montrée à la figure 3.12 indique qu'il y a eu un problème au point 5 pendant le traçage. Le problème peut avoir plusieurs sources: sonde défectueuse, système d'acquisition de donné défectueux ou courant de densité gênant la mesure des données de traçage. Pour vérifier si la sonde ou le système d'acquisition de données au point 5 sont défectueux, nous avons interverti les sondes et les systèmes d'acquisition de données du point 2 et du point 5, puis enregistré la conductivité de l'eau à ces deux points, sans faire de traçage. Nous avons choisi l'équipement du point 2 parce que les données mesurées à ce point sont très stables. La comparaison entre la conductivité mesurée au point 2 et la conductivité mesurée au point 5 est montrée à la figure 3.13.

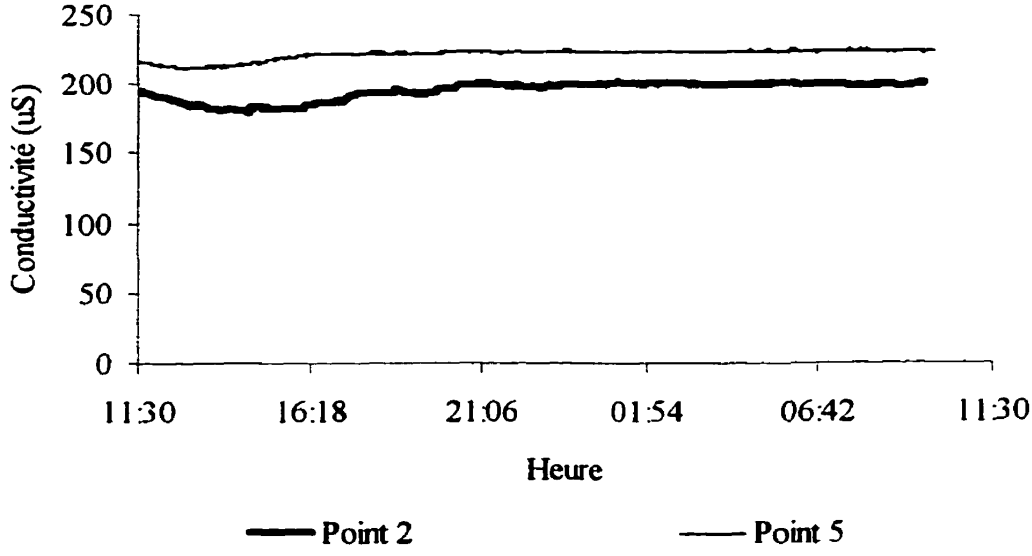


Figure 3.13: Comparaison de la stabilité des points d'échantillonnage 2 et 5

La figure 3.13 montre une très bonne stabilité de la conductivité de base pour les points 2 et 5. Les deux sondes réagissent de la même façon, mis à part une légère différence de conductivité de base. La sonde et le système d'acquisition de données utilisés au point d'échantillonnage n°5 le 17 février 1999 ne sont donc pas défectueux.

Les résultats de traçage du 25 mars 1999 sont aussi peu convaincants que ceux du 17 février 1999. Cette fois, les concentrations ne sont pas négatives, mais extrêmement élevées, oscillant autour de 500 mg/L, sans tendance particulière indiquant l'arrivée de traceur.

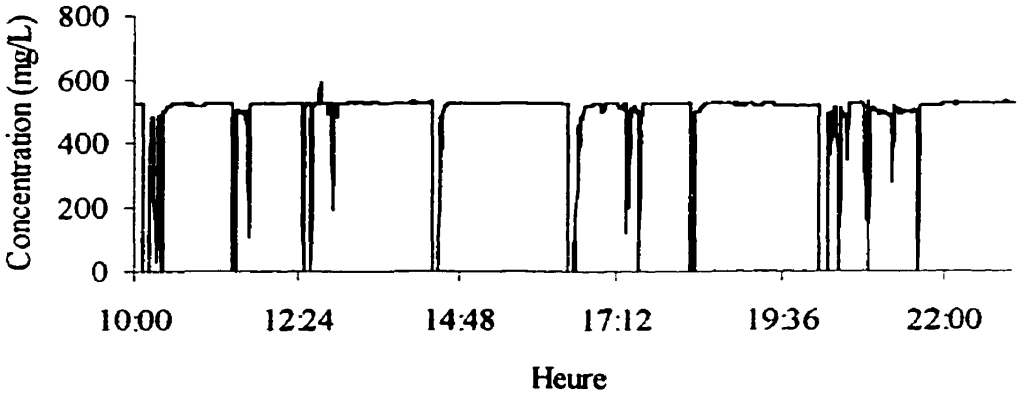


Figure 3.14 : Concentration en chlorure de calcium mesurée au point d'échantillonnage n^{0}5 pendant le traçage du 25 mars 1999

Les résultats de traçage obtenus au point 5 sont difficiles à interpréter puisque le traçage en l'absence d'ajout de traceur a donné de bons résultats. Les résultats de traçage obtenus à ce point d'échantillonnage peuvent être influencés par des courants de densité qui augmentent ou diminuent la conductivité de l'eau dans le réseau à cet endroit. L'absence de toute variation de conductivité pouvant provenir d'un traçage peut s'expliquer par de très longs temps de séjour qui causent une dispersion importante. En effet, le point d'échantillonnage est situé dans une rue où il y a peu d'habitations. Étant donné que les traçages ont eu lieu à 11:25 et 10:00 respectivement, la pointe du matin est terminée et la consommation beaucoup plus faible: l'écoulement en faible consommation est alors beaucoup moins important.

CHAPITRE 4: CORRÉLATIONS CROISÉES

Le chapitre précédent a montré qu'il est possible dans certains cas, si on peut évaluer la dispersion, de reconstituer un signal à un point d'échantillonnage en se basant sur le signal injecté. Dans le présent chapitre, les outils de traitement de signal sur des essais de traçage sont introduits et, plus précisément, l'analyse de corrélation croisée est développée.

La corrélation croisée évalue l'importance de la compatibilité entre deux signaux décalés dans le temps, l'importance de compatibilité étant traduite par l'amplitude de la corrélation. Dans le cas d'un traçage, la courbe d'injection est diluée à travers les différents chemins en fonction de la contribution de ces chemins. L'amplitude de la corrélation croisée nous renseigne alors sur l'importance des contributions par chemins, chaque maximum représentant un chemin (Bendat, 1993). Ces concepts et leur applicabilité au réseau étudié sont détaillés dans ce chapitre; le principe de calcul général est d'abord présenté, ensuite, l'adaptation des principes et l'interprétation pour les signaux ponctuels et continus utilisés dans des essais de traçage sont abordés.

4.1 PRINCIPE GÉNÉRAL

Le produit scalaire de deux signaux est une mesure de leur similitude de position et de forme. La fonction de corrélation croisée traduit l'évolution de cette similitude dans le temps (τ), l'amplitude de la corrélation croisée montrant l'importance de la similitude (de Coulon, 1990). La fonction de corrélation croisée entre un signal réel x(t) et un signal réel décalé dans le temps y(t) est donnée par:

$$\varphi_{xy}^{\circ}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt$$

Pour simplifier le calcul de l'intégrale et parce que les identités mathématiques le permettent (Press *et al.*, 1986), les calculs sont réalisés dans le domaine fréquentiel obtenu par la transformée de Fourier du signal étudié. La fonction de corrélation devient, dans le domaine fréquentiel (de Coulon, 1990):

$$\overset{\circ}{\Phi}_{xy}(f) = X(f)Y(f)$$

Où X(f) et Y(f) représentent les transformées de Fourier de x(t) et de y(t). L'identité mathématique permettant le passage dans le domaine fréquentiel est donnée par:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Après avoir effectué le produit scalaire dans le domaine fréquentiel, on peut retourner dans le domaine temporel par la transformée de Fourier inverse. Son identité mathématique est donnée par:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} dt$$

Les fonctions de corrélation croisée de signaux réels sont aussi réelles. Par exemple, si x(t) et y(t) sont en volts (V), $\varphi^{o}_{xy}(t)$ est en V^2*s (de Coulon 1990). Dans le cas d'un traçage en réseau, le signal x(t) correspond à l'injection et le signal décalé y(t) correspond au point de mesure sur le réseau. Pour effectuer une corrélation croisée entre ces deux signaux réel, leur dimension (nombre de données) doit être la même.

Qualitativement, une corrélation se fait de la façon suivante: le signal de sortie est placé à la suite du signal d'entrée, puis il est déplacé progressivement dans le temps vers le signal d'entrée à la recherche d'une similitude de position et de forme. Les temps de séjour obtenus par corrélation croisée associés aux différents chemins sont identifiés par

les maximums et la proportion de leur contribution est évaluée par l'amplitude du maximum.

L'évaluation des temps de séjour par chemin par corrélation croisée peut devenir toutefois très difficile si le nombre de chemins est élevé et qu'il y a superposition de signaux provenant de chemins différents. Il faut se rappeler que les corrélations sont basées sur une reconnaissance de forme; la superposition des signaux provenant de chemins différents déforme le signal originalement injecté et contribue à une perte importante d'information. Pour surmonter cette difficulté, Bendat et Piersol (1993) suggère deux approches : utiliser un signal ponctuel ou une onde aléatoire complexe.

Pour connaître les temps de séjour en temps réel, on doit injecter un traceur en continu pour avoir accès à l'information en tout temps aux points d'échantillonnage du réseau. Or, on a vu plus tôt que la superposition des signaux représente un problème pour les analyses de corrélation. À ce sujet, Bendat et Piersol (1993) suggère d'utiliser une onde aléatoire. Un signal totalement aléatoire permet d'accroître la quantité d'information véhiculée par le signal et par le fait même, d'optimiser le résultat de la corrélation croisée. Dans un tel signal on ne doit retrouver aucune séquence répétitive et aucune période multiple des autres. L'avantage de faire des traçages en continu est de taille: on peut connaître à n'importe quel moment les temps de séjour en temps réel des points de mesure. Connaissant les temps de séjour dans réseau à chaque instant, il devient possible d'assurer une gestion de la qualité de l'eau en temps réel et de prévoir les interventions nécessaires pour limiter la dégradation de la qualité de l'eau distribuée.

Voici quelques exemples d'ondes et de leur autocorrélations. Une autocorrelation est la corrélation d'un signal avec lui-même, sans décalage temporel. Ces exemples sont tirés de Bendat et Piersol (1993).

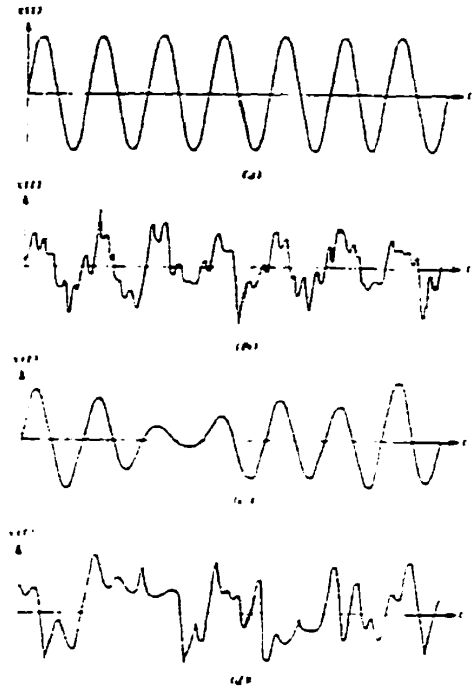


Figure 4.1: Quatre ondes continues. a) Onde sinusoïdale. b) Onde sinusoïdale avec bruit aléatoire. c) Onde semi- aléatoire. d) Onde aléatoire.

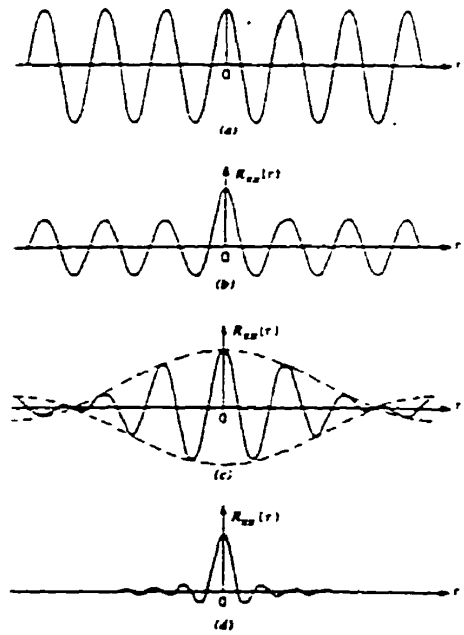


Figure 4.2: Fonctions d'autocorrélation idéalisées. a) Onde sinusoïdale. b) Onde sinusoïdale avec bruit aléatoire. c) Onde semi-aléatoire. d) Onde aléatoire.

La figure 4.2a) montre que l'autocorrélation d'une onde sinusoïdale donne plusieurs maximums. En effet, lors de la procédure de calcul, plusieurs similitudes sont rencontrées. La fonction d'autocorrélation résultante est centrée à zéro, ce qui indique que le signal d'entrée n'a pas subi de décalage temporel. Les figures 4.2b) et c) montrent également plusieurs similitudes, mais d'amplitudes différentes. En effet, les signaux, quoique déformés par le bruit, montrent une certaine périodicité. Les fonctions d'autocorrélation résultantes sont elles aussi centrées à zéro. Ces trois types de signaux peuvent difficilement être utilisées pour évaluer les temps de séjour dans un réseau parce qu'il deviendrait vite difficile de discerner les temps de séjour des multiples similitudes d'un même signal. La figure 4.2d) montre qu'une onde aléatoire est le type de signal continu le plus adapté à la recherche des temps de séjour dans un réseau: étant donné la quantité d'information véhiculée par le signal, il n'y a qu'une similitude possible qui correspond au temps de décalage du signal (temps de séjour), ici 0.

Des outils de calculs puissants comme Matlab permettent d'effectuer facilement et rapidement les transformées de Fourier et les transformées de Fourier inverses grâce à des fonctions prédéfinies. Tous les calculs qui concernent ce chapitre ont été faits avec Matlab, selon les principes généraux énoncés ci-dessus.

4.2 SIGNAUX PONCTUELS

Les signaux ponctuels limitent les effets de superposition qui rendent l'interprétation des corrélations difficiles. Pour faire une analyse de corrélation croisée sur un signal ponctuel, il s'agit d'injecter un signal très simple: un plateau carré ou une gaussienne par exemple. L'analyse par corrélation croisée d'un tel signal est assez simple, les temps de séjour ressortiront sans ambiguïté s'ils sont assez différents les uns des autres. Dans le cadre du projet, nous avons utilisé un plateau carré pour sa facilité de mise en œuvre. L'injection d'un tel signal ne requiert pas d'équipement spécialisé, ce qui limite les difficultés et les coûts.

4.2.1 Essai réseau

La figure 4.2 montre les résultats de l'essai de traçage du 25 mars 1999 aux points d'injection, 2 et 3 de la zone 3 du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Montréal.

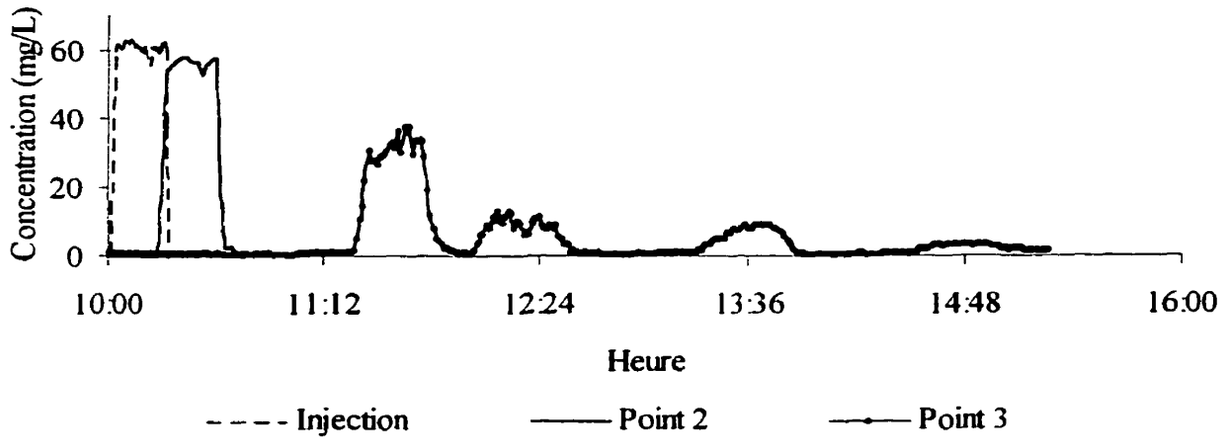
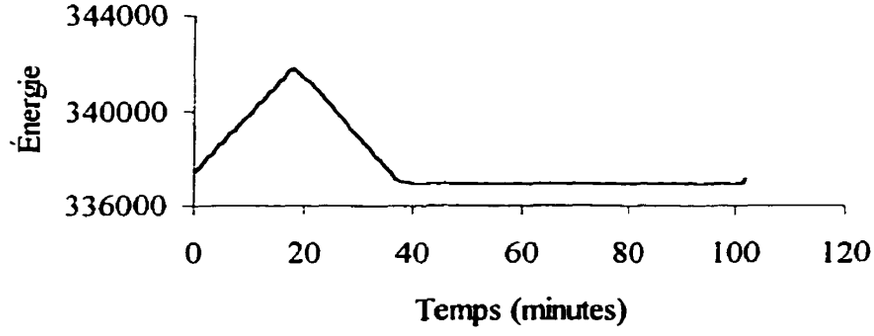


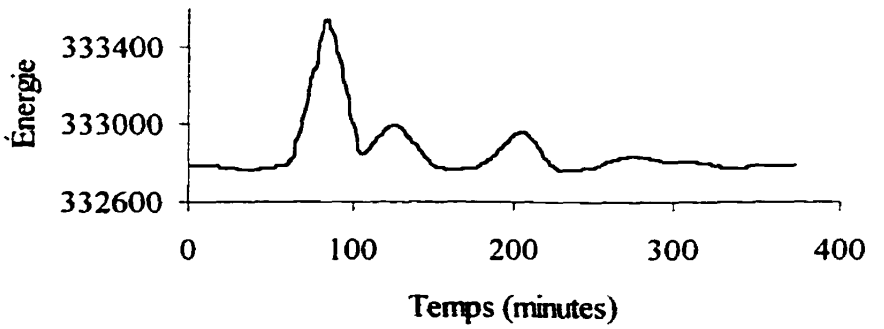
Figure 4.3 : Résultats de l'essai de traçage du 25 mars 1999.

On sait qu'il y a un seul chemin qui contribue au point 2, dans lequel le temps de parcours est d'environ 17 minutes (cf. chapitre III).

La figure suivante montre les résultats de corrélation pour les points 2 et 3.



(a)



b)

Figure 4.4 : Résultats de corrélation croisée de l'essai réseau du 25 mars 1999. (a) entre point 1 et point 2, (b) entre point 1 et point 3

Tel que mentionné précédemment, les temps de séjour sont identifiés par les maximums. La figure 4.4 a) montre le temps de séjour de façon très nette à 18 minutes, 17 minutes avait été trouvé par la reconstitution de signal au chapitre précédent. La figure 4.4b) montre 3 groupes de temps de séjour à environ 1h26 (86 min.), 2h09 (129 min.) et 3h28 (248 min.). Ces temps correspondent aux trois principaux de temps de séjour, à quelques minutes près, qui ont été relevés par la reconstitution de signal, mais de l'information est perdue par rapport à l'observation visuelle. En effet, les variations de la deuxième contribution du point d'échantillonnage $n^0 3$ paraissent complètement lissées par l'analyse de corrélation. La reconstitution de signal a toutefois montré un seul chemin dans cette contribution, mais dans l'analyse on a relevé la possibilité qu'il y ait deux chemins à temps de séjour similaires à l'intérieur de la contribution ou que la variation qui est visible soit due à une variation hydraulique sur le réseau.

Pour améliorer les résultats de corrélation et éviter la perte d'information visuelle, on modifie le point 1 (signal d'entrée) de façon à considérer seulement la montée de traceur. Pour modifier le signal d'entrée, il suffit de remplacer par zéro tous les points

qu'on ne veut pas considérer. Le calcul de corrélation entre le point 1 modifié et le point 3, le résultat obtenu est montré à la figure 3.5.

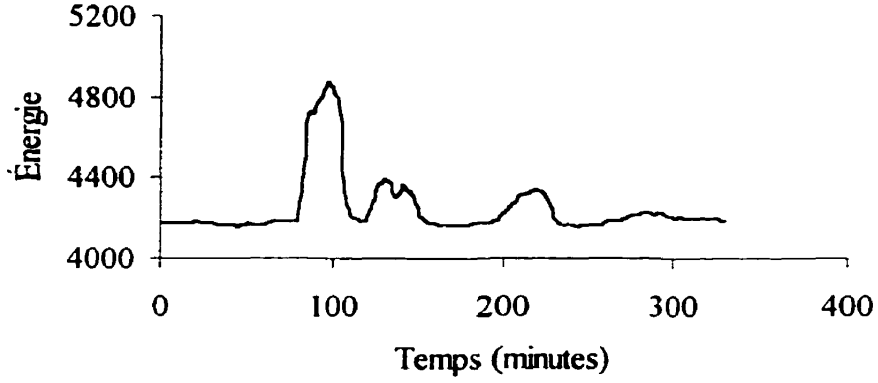


Figure 4.5 : Résultat de corrélation croisée du point 3 avec montée de traçage comme signal d'entrée. Essai du 25 mars 1999

La figure 4.5 montre qu'il y a une amélioration visuelle de la réponse de l'analyse par corrélation croisée en considérant, comme signal d'entrée, la montée de traceur seulement. Cette façon de faire nous permet d'obtenir le même niveau de réponse que l'analyse visuelle. Il faut toutefois garder un regard critique face aux résultats. En effet, on a vu précédemment que la variation dans la deuxième contribution peut être interprétée comme étant le résultat de deux chemins à temps de séjour similaires ou due à une variation hydraulique sur le réseau. La deuxième hypothèse semble plus probable, la reconstitution de signal ayant montré qu'il y a probablement présence d'un seul chemin.

4.2.2 Limites de la méthode

La méthode d'évaluation des temps de séjour par corrélation croisée sur un signal ponctuel permet la détermination de temps de séjour provenant de différents chemins. En effet, étant donné la courte durée du signal injecté, les risques de superposition qui

gênent l'analyse de corrélation sont diminués, mais pas annulés. Toutefois, ce type d'analyse n'apporte pas plus d'information que les techniques traditionnelles et ne permet pas la détermination des temps de séjour en temps réel, qui est l'objectif principal de cette recherche. En effet, l'information injectée est ponctuelle, l'information peut, par conséquent, n'être récupérée que ponctuellement. Pour déterminer les temps de séjour en temps réel, il faut injecter de l'information dans un signal à tout instant.

Le principal avantage de la méthode par rapport aux techniques traditionnelles et à la reconstitution de signal est la rapidité et la facilité du calcul. En effet, pour faire une corrélation croisée seuls les enregistrements au point d'injection et au point d'échantillonnage étudié sont nécessaires et les résultats sont disponibles en quelques secondes.

Une injection semi-continue pourrait, au premier abord, constituer un compromis acceptable entre une analyse en continu et la limitation des superpositions. Toutefois, étant donné les limites d'injection imposées par un traçage en réseau, il devient vite très difficile d'injecter des signaux assez différents les uns des autres pour éviter la confusion. Cette façon de faire augmente les chances de superposition et ajoute un niveau de difficulté : la discrimination des signaux reçus au point de mesure.

4.3 ONDE ALÉATOIRE

4.3.1 Simulation numérique

Avant de faire un traçage avec une onde aléatoire, que ce soit au laboratoire ou en réseau, nous avons procédé à une série de simulations numériques pour vérifier la réponse de l'analyse de corrélation sur un signal aléatoire qu'il est possible d'injecter dans un réseau. Le matériel à notre disposition ne nous permet d'injecter que des ondes carrées et il faut des plateaux assez longs pour que le traceur soit détectable aux points

de mesures dans un réseau de distribution d'eau potable. Des plateaux courts risquent effectivement de totalement disparaître à cause de la dispersion du traceur pendant son transport. La longueur des plateaux nécessaires pour des essais à plus petite échelle, au laboratoire par exemple, est toutefois moins grande, mais il faut garder en tête que l'objectif est d'appliquer la méthode à un réseau réel.

Le premier essai de corrélation sur onde aléatoire continue a été fait sur un seul chemin, c'est à dire que l'onde a tout simplement été décalée dans le temps, sans dilution, superposition ni dispersion. Ce cas de figure est vraiment le plus simple qu'on puisse rencontrer. La figure 4.6 montre la courbe d'injection qui a été générée aléatoirement pour des périodes comprises entre 3 et 20 minutes.

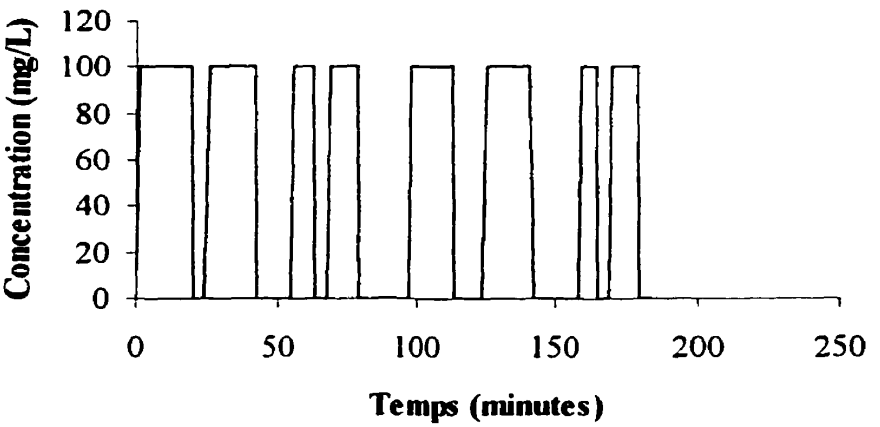


Figure 4.6: Courbe d'injection aléatoire

La figure 4.7 montre le résultat de la corrélation entre la courbe d'injection et la courbe d'injection décalée de 20 minutes.

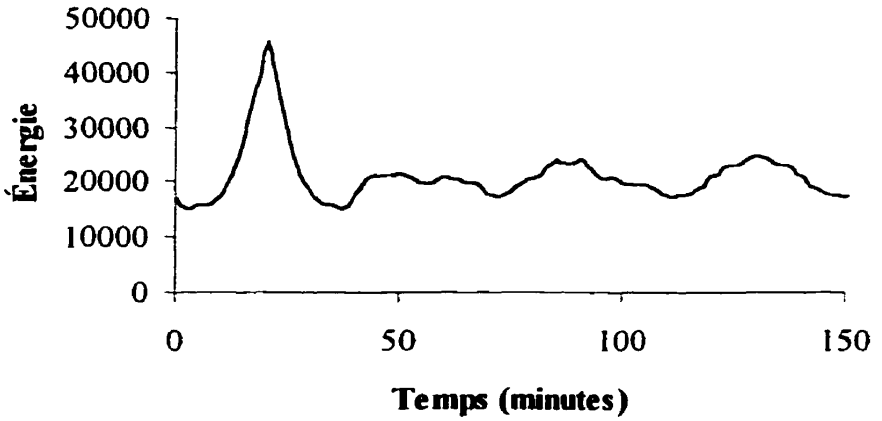


Figure 4.7: Corrélation croisée sur un chemin

Le temps de séjour apparaît de façon très nette à 20 minutes. On note toutefois la présence de bruit à 50, 90 et 133 minutes qui pourrait être confondu avec des temps de séjour à faible contribution. Mais le bruit reste en énergie relativement faible par rapport au phénomène cherché.

La figure 4.8 montre le résultat numérique de la superposition de deux chemins à contribution de débit égale ayant 20 minutes et 35 minutes de temps de séjour et le résultat de la corrélation croisée.

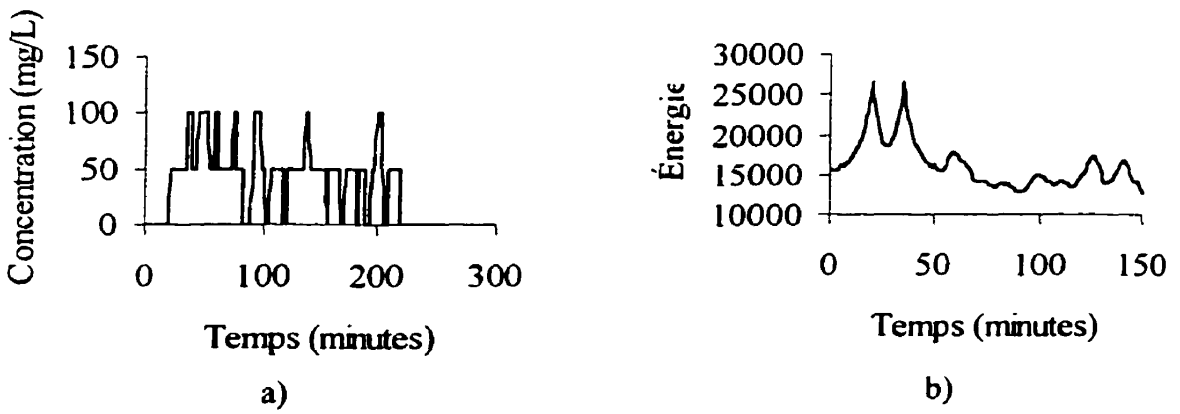


Figure 4.8: a) Résultat numérique de traçage sur deux chemins à contributions égales.
b) Résultat de la corrélation croisée

On retrouve de façon très nette les deux chemins à 20 minutes et à 35 minutes. L'amplitude des maximums nous indique que les deux chemins contribuent également au point de mesure. La présence de bruit à 63,128 et 144 minutes reste faible par rapport aux énergies associées aux temps de séjour cherchés.

Un autre essai numérique a été fait avec les mêmes temps de séjour, soit 20 minutes et 35 minutes, mais avec des contributions de débit différentes: le premier chemin contribue à 70% et le deuxième chemin à 30%. La figure 4.9 montre le résultats numérique de la superposition des chemins et le résultat de la corrélation.

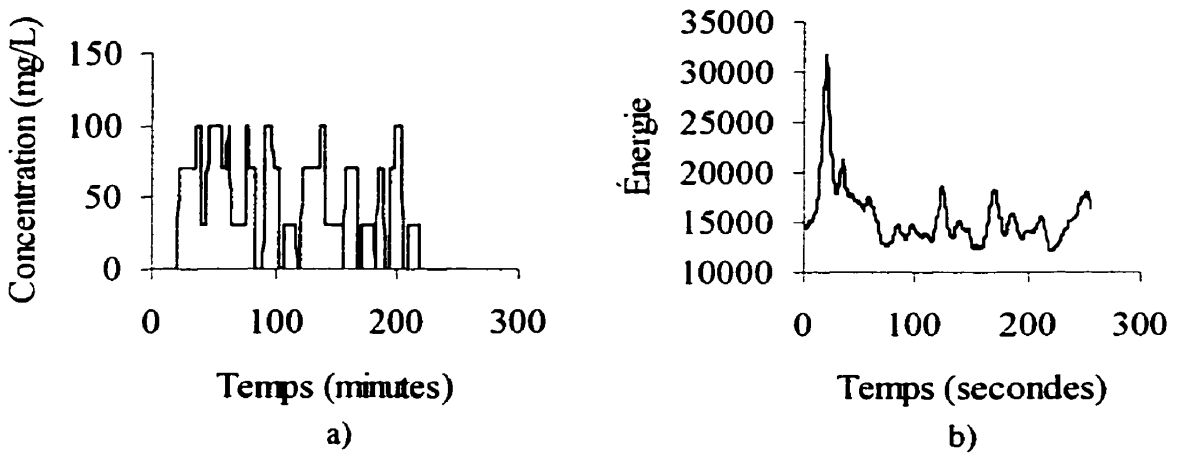


Figure 4.9: a) Résultat numérique de traçage sur deux chemins à contributions différentes. b) Résultat de la corrélation croisée.

On retrouve de façon très nette le temps de séjour de 20 minutes. Ce temps de séjour est associé au chemin qui contribue à 70%. Le temps de séjour de 35 minutes qui provient du chemin qui contribue à 30% est plus difficile à identifier. On discerne un maximum à 35 minutes, mais son amplitude est de l'ordre de grandeur du bruit et peut donc y être confondu. Dans le cas d'un essai réel où les temps de séjour ne sont pas du tout connus, le temps de séjour 35 minutes n'aurait pas été relevé comme étant un temps de séjour significatif.

Bien qu'il s'agisse d'un cas assez simple, il est difficile, avec les possibilités d'injection, d'obtenir de bons résultats. De plus, des essais de simulations numériques ont montrés que les temps de séjour qui ont une contribution de débit inférieure à 50% sont noyés par le bruit, et ce pour des simulations numériques sur seulement deux chemins. Dans un réseau, de multiples chemins peuvent alimenter les points de mesure avec des contributions différentes. L'évaluation des temps de séjour par cette méthode ne nous permettrait probablement d'évaluer que le temps de séjour le plus rapide et/ou le plus contribuant en terme de débit.

L'intérêt de la méthode de corrélation croisée sur une onde aléatoire continue est la grande quantité d'information qui peut être véhiculée par le signal. L'information est d'autant plus grande que le signal est complexe en fréquences et en amplitude. Avec les limitations de périodes et d'amplitude qu'il est possible d'injecter dans un réseau, on ne peut toutefois espérer accroître de façon significative le signal d'injection. De plus, Bendat et Piersol (1993) suggèrent que l'évaluation des temps de séjour par chemins avec une onde aléatoire continue devient très difficile si le point d'analyse est alimenté par plus de trois chemins.

Étant donnée les limites des corrélations croisées, l'adaptation et le développement de cette méthode à la détermination des temps de séjour dans un réseau de distribution n'a pas été sélectionnée pour le traitement de données de traçage. Les corrélations sur une impulsion simple donnent des résultats acceptables, mais ne permettent pas la détermination des temps de séjour en temps réel. Une onde aléatoire continue pourrait permettre la détermination des temps de séjour en temps réel, mais l'analyse des résultats est très complexe et devient difficile si un point d'analyse est alimenté par plus de trois chemins. De plus, les limites d'un traçage, tant au niveau des périodes d'injection que de la mise en œuvre, ne permettent pas d'avoir une onde complètement aléatoire.

CHAPITRE 5 : ANALYSE SPECTRALE

Dans le cadre de cette étude, les essais de traçage sont traités par le traitement du signal, le signal étant représenté par la variation de concentration de traceur en fonction du temps qui est injecté dans le réseau d'étude. La reconstitution de signal et la corrélation croisée, qui ont été présentés aux chapitre 3 et 4 respectivement, utilisent l'ensemble du signal d'injection et du signal reçu au point d'échantillonnage pour l'évaluation des temps de séjour. Ces méthodes, qui sont basées sur une reconnaissance de forme et de position, peuvent parfois être moins efficaces lorsqu'il a une forte dispersion et, surtout, lorsqu'il y a superposition de plusieurs chemins.

L'analyse spectrale, pour sa part, est basée sur l'information fondamentale contenue dans un signal : la fréquence, qu'on peut retrouver avec la transformée de Fourier. L'analyse spectrale est définie comme étant l'évolution de l'énergie d'une fréquence contenue dans un signal en fonction du temps (de Coulon, 1990). Connaissant le moment d'émission d'une fréquence contenue dans un signal d'injection et connaissant son moment d'apparition dans le signal reçu à un point d'échantillonnage, on peut déduire le temps de séjour. Le principal avantage d'utiliser la fréquence pour traiter des données de traçage est qu'elle est conservative, c'est à dire qu'elle est indépendante des conditions d'écoulement et n'est donc pas affectée par la dispersion et la dilution. La méthode ne devrait donc pas être limitée par la déformation du signal, comme c'est le cas pour la reconstitution de signal ou la corrélation croisée. Les principes de bases de l'analyse spectrale sont d'abord introduits puis, son application au problème particulier du traitement d'essais de traçage par l'analyse spectrale est présentée pour un essai en laboratoire et un essai en réseau.

5.1 PRINCIPE GÉNÉRAL

La méthode de détermination des temps de séjour en réseau par analyse spectrale consiste à décomposer le signal (en l'occurrence, la courbe de traçage) en ses composantes de Fourier et d'aborder le problème dans le domaine des fréquences plutôt que dans le domaine des concentrations de traceur. L'avantage de travailler dans le domaine fréquentiel est lié au fait que les fréquences contenues dans le signal sont indépendantes des conditions d'écoulement. Les fréquences contenues dans l'injection de traceur devraient donc être détectées aux points d'échantillonnage malgré la dispersion du traceur et la superposition des concentrations provenant de différents chemins.

5.1.1 Intervalle de temps de la transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'un signal se fait à l'intérieur d'un intervalle de temps. L'intervalle de temps est choisi par l'usager en fonction de la partie du signal étudiée. La réponse de la transformée de Fourier est une représentation fréquentielle en fonction de l'énergie, c'est à dire qu'elle donne les fréquences et leur énergie dans l'intervalle de temps considéré pour le calcul, le seul repère temporel étant les bornes de l'intervalle de temps. Or, ce qui nous intéresse c'est le moment d'apparition des fréquences présentes dans le signal qui est représenté par la courbe d'injection de traceur dans le réseau d'étude. La méthode d'analyse qui est exposée plus loin vise à ajuster la longueur de l'intervalle de temps pour la recherche des fréquences et à déplacer cet intervalle de temps dans le but d'identifier les moments d'apparition et de disparition de ces fréquences. Avant de présenter plus en détail la méthode d'analyse proprement dite, les paramètres nécessaires à la compréhension de l'analyse spectrale sont présentés.

5.1.2 Transformée de Fourier de différents types d'onde

La méthode étant basée sur la reconnaissance des fréquences, il est important d'avoir un signal continu stable pour quelques périodes pour être en mesure de bien évaluer l'image spectrale et de limiter les effets de la dispersion. La figure 5.1 montre schématiquement

les résultats de transformées de Fourier pour une onde stationnaire sinusoïdale et une onde stationnaire carrée. Le principe de calcul de la transformée de Fourier a été présenté au chapitre 4.

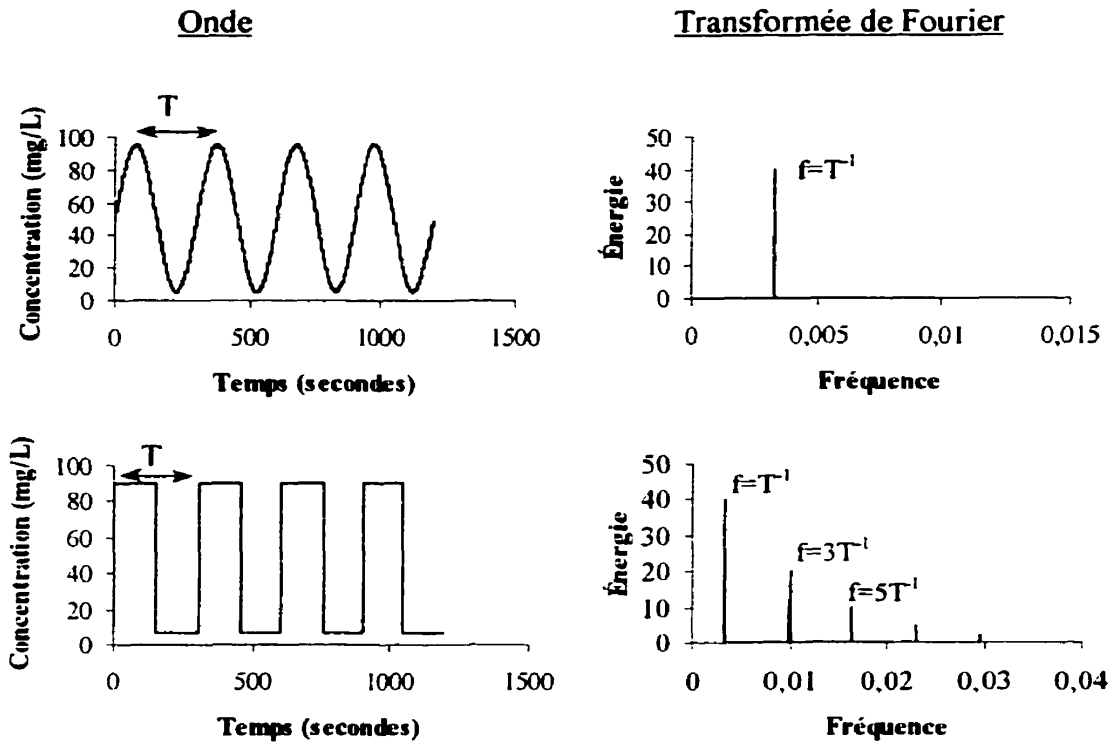


Figure 5.1: Transformée de Fourier d'ondes sinusoïdales et carrées. Exemple inspiré de de Coulon (1990)

Une onde sinusoïdale est le signal idéal pour une méthode basée par la reconnaissance des fréquences. En effet, sa transformée de Fourier fait apparaître, dans le domaine fréquentiel, une seule fréquence bien définie à environ T^{-1}. L'onde stationnaire carrée fait apparaître elle aussi la fréquence T^{-1} de façon assez nette, toutefois l'apparition des harmoniques à nT^{-1} où T= 3, 5, 7,... (de Coulon 1990) peuvent gêner l'analyse. Néanmoins, pour une première approche et pour des raisons de facilité de mise en œuvre, l'onde carrée a été choisie pour les essais laboratoire et les essais réseau.

Le résultat de la transformée de Fourier est d'autant plus précis que le nombre de points considérés dans l'intervalle de temps sera grand. Le nombre de points considérés par la transformée de Fourier est toujours une puissance de deux (Bendat, 1993). Par exemple, si 1000 points sont compris dans la fourchette d'analyse, seulement 512 seront pris en considération. Il est donc important d'ajuster la fourchette de temps de façon à considérer un nombre de points qui est une puissance deux.

5.1.3 Fréquences pouvant apparaître dans la transformée de Fourier

Les fréquences qui peuvent apparaître par la transformée de Fourier dépendent de la fréquence d'échantillonnage et du nombre de points considérés dans l'intervalle de temps. Le pas de fréquence (Δf) qui décrit les possibilités d'apparition des fréquences est donné par (Bendat, 1993):

$$\frac{F_s}{N} = \Delta f$$

où F_s = fréquence d'échantillonnage

N =nombre de point (puissance de deux)

Par exemple, si le pas des fréquences de la transformée de Fourrier (Δf) est 0,00195 hertz et que la seule fréquence présente dans l'enregistrement est 0,025 hertz, le calcul de la transformée de Fourier pourra nous donner 0,0234 hertz (12*0,00195) ou 0,0254 hertz (13*0,00195), puisque la fréquence cherchée se trouve entre les deux multiples.

5.1.4 Fréquence minimale détectable

Pour détecter un phénomène, la fréquence d'échantillonnage doit être plus rapide que le phénomène. Pour être détecté, un phénomène doit respecter le principe de Nyquist (Cartwight, 1990):

$$\frac{F_s}{2} \succ f$$

où Fs = fréquence d'échantillonnage

f = fréquence injectée

Le principe de Nyquist nous indique que la fréquence d'échantillonnage (Fs) doit être plus rapide que le phénomène (f). Par exemple, si on échantillonne à toutes les 2 secondes (Fs=1/T=0,5 hertz), la fréquence cherchée doit être supérieure à 0,25 hertz (ou 4 secondes) pour être détectée, c'est à dire être définie par au moins deux points.

5.1.5 Fréquences du signal

Nous avons vu aux chapitres précédents que pour détecter le traceur à tous les points de mesure et limiter les effets de la dispersion, on doit injecter des périodes assez longues dans un réseau, la longueur des périodes dépendant de l'étendue du réseau d'étude et de l'importance de la dispersion. Le choix des fréquences devra donc se faire sur la base de cette limite. Le choix des fréquences d'injection doit aussi être fait en considérant le principe de Nyquest, la fréquence d'échantillonnage et le nombre de points qui sera considéré dans l'intervalle de temps quand les résultats seront traités.

Pour avoir une définition plus fine des fréquences détectables dans un intervalle de temps, on a intérêt à avoir une fréquence d'échantillonnage rapide et un nombre de points important dans l'intervalle de temps considéré. Nous verrons toutefois lors du développement de la méthode qu'il faut faire un compromis au niveau du fenêtrage de l'intervalle de temps pour déterminer le moment d'apparition d'une fréquence et choisir une fréquence d'échantillonnage réalisable. Donc, pour avoir les meilleurs résultats possibles, il faut faire un compromis entre la fréquence d'échantillonnage, les fréquences d'injection et le nombre de points considérés dans l'intervalle de temps.

Pour réaliser un traçage en continu, et donc être en mesure de connaître le temps de séjour en tout instant, on doit injecter des fréquences différentes en des moments bien précis. De cette façon, lorsqu'une fréquence est détectée à un point d'échantillonnage, on peut connaître l'heure de son émission et donc déduire le temps de séjour. Si une seule fréquence est injectée en continue, on perd le repère de temps à l'injection et on n'est donc plus en mesure de déduire le temps de séjour. Au niveau théorique, dans un système idéal, on pourrait injecter une onde sinusoïdale à fréquence variable. De cette façon, à chaque instant, une fréquence différente est injectée et nous permet, à tout instant, de déduire le temps de séjour en analysant les points de mesure. Au niveau pratique ce type d'injection nécessite du matériel spécialisé pour sa réalisation (générateur de fréquence, pompe programmable et acquisition de données très puissante). Nous avons donc opté pour une injection d'onde carrée semi-continue. Pour réaliser ce type de signal, on injecte quelques périodes de même fréquence pour assurer la bonne détection de la fréquence, avant d'injecter une autre série de fréquences.

5.1.6 Fréquence d'échantillonnage

Puisqu'on travaille avec d'assez longues périodes pour que le traceur soit détectable aux points d'échantillonnage malgré la dispersion, il est facile d'avoir une fréquence d'échantillonnage qui définisse bien le phénomène. La fréquence d'échantillonnage choisie pour les essais de traçage sera la plus rapide possible pour avoir un Δf assez faible (Δf étant le pas de fréquence de la transformée de Fourier) tout en restant réalisable pour le système d'acquisition de donnée à notre disposition. Les choix des fréquences injectées et de la fréquence d'échantillonnage sont très importants pour tirer le maximum d'information de la transformée de Fourier et pour arriver à discriminer les fréquences les unes des autres. Tous les concepts présentés ci dessus seront détaillés et présentés dans le contexte d'un essai au laboratoire.

5.1.7 Méthode

Avant de réaliser un traçage, on doit choisir les fréquences d'injection et le nombre de périodes injectées. Les fréquences d'injection sont choisies en fonction de la fréquence d'échantillonnage qu'il est possible d'avoir avec le système d'acquisition de données et le nombre de points qui sera compris dans l'intervalle de temps lors du calcul des transformées de Fourier. Après la récupération des données de traçage, chaque point d'échantillonnage est traité suivant les étapes décrites ci-dessous.

Étape 1:

Calcul du nombre de points compris dans la fourchette d'analyse. Des essais lors de la mise au point de la méthode ont montrés, au niveau pratique, que la fourchette d'analyse doit comprendre deux périodes pour qu'une fréquence apparaisse systématiquement dans l'analyse de Fourier. Le nombre de points dans la fourchette d'analyse doit donc comprendre deux fois la plus longue période et inclure un nombre de points en puissance de deux. On obtient N.

Étape 2:

Calcul du pas de fréquence (Δf) que la transformée de Fourier peut donner sur base de la fréquence d'échantillonnage et du nombre de points. On peut alors identifier les fréquences cherchées dans l'analyse de Fourier, qui correspondent aux fréquences les plus près des fréquences injectées

Étape 3:

Analyse par intervalle de temps (déterminé à l'étape 1) glissant du signal mesuré. L'intervalle de temps est décalé d'un pas de temps déterminé par l'usager selon l'étendue du réseau d'étude et des temps de séjour. Par exemple, sur le banc d'essai du laboratoire où les temps de séjour sont de l'ordre de la minute, l'intervalle de temps est décalé de 10 secondes à chaque calcul de transformée de Fourier, alors que pour les essais dans le réseau, l'intervalle est décalé de 60 secondes à chaque calcul. Plus le pas de temps du

décalage est grand, plus l'analyse est rapide, mais les résultats sont moins précis. À chaque calcul, les fréquences apparues, leur énergie et le temps du début de la fourchette d'analyse sont pris en note.

Étape 4:
Construction des graphiques d'évolution spectrale (énergie des fréquences en fonction du temps) pour chaque fréquence. Le graphique montre l'évolution de l'énergie des fréquences en fonction du temps de début de la fourchette d'analyse.

Étape 5:
Identification du moment d'apparition et de disparition des fréquences cherchées.

Étape 6:
Ajustement des moments d'apparition et disparition des fréquences. Des calculs répétés ont montrés qu'une fréquence apparaît généralement quand une période complète est comprise dans la fourchette d'analyse, tel que montré à la figure 5.2. on peut dire que son temps réel d'apparition est le temps de début d'analyse, plus le nombre de points compris dans la fourchette, moins la période de la fréquence considérée (illustré la figure 5.2). Son temps réel de disparition est alors le temps de début d'analyse, plus la période. D'où:

Apparition : Tdébut+N-T
Disparition : Tdébut+T

Où T est la période et N le nombre de points considérés dans la fourchette d'analyse;

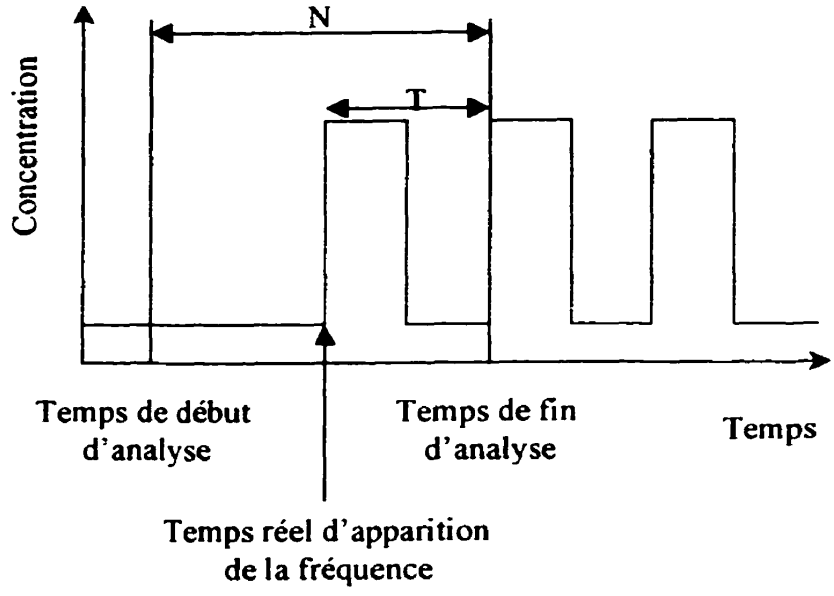


Figure 5.2: Shéma montrant la démarche d'identification du temps d'apparition d'une fréquence

Étape 7:

Le temps de séjour correspond à la différence de temps entre le moment d'apparition des fréquences au point d'injection et le moment d'apparition au point d'échantillonnage étudié.

Étape 8:

Les différents chemins et les temps de séjour qui leur sont associés peuvent être évalués de deux façons, tout dépendant si les temps de séjour sont très différents les uns des autres ou pas. Pour les temps de séjour très différents les uns des autres, les fréquences d'injection devraient apparaître plusieurs fois, c'est le cas le plus simple. Pour les temps de séjour plus semblables (il n'y a alors pas de délai entre deux apparitions de cette fréquence parce qu'il y a superposition), on estime la durée de contribution des fréquences. Ces durées sont comparées à leur durée d'émission réelle. On peut donc

déduire le nombre de chemins contribuants et le temps de séjour par chemin. Si deux ou plusieurs chemins ont des temps de séjour très semblables, on pourra estimer la proportion des temps de séjour contribuant plutôt qu'identifier les temps de séjour individuels. La proportion des temps de séjour est montré à l'étape 5.4.

5.2 ESSAI DE LABORATOIRE

Un essai de traçage, montré à la figure 5.3, a été réalisé sur la boucle d'essai du laboratoire d'Hydrodynamique qui a été présentée au chapitre 2 dans les conditions suivantes:

Injection: 10 périodes de 40 secondes (f=0,025) et 10 périodes de 78 secondes (f=0.013)

Fréquence d'échantillonnage: 1 hertz (à toutes les secondes)

Débit dans les canalisations: débit total 115 L/s, grand chemin 57 L/s,
petit chemin 58 L/s

Temps de séjour théoriques: sonde 2: 55 secondes, sonde 3: 30 et 78 secondes

Puisque la boucle d'essai est à petite échelle par rapport à un réseau, la dispersion affecte beaucoup moins les courbes de traceur, on peut donc se permettre d'injecter des périodes beaucoup plus courtes. Ce choix est aussi motivé par l'économie de traceur.

À la sonde 1 on observe un comportement assez stable au niveau des périodes d'injection, on mesure en effet environ 40 secondes à chaque période. En amplitude, on remarque des variations qui peuvent être dues à une petite variation du débit de pompage ou à une non homogénéité de la concentration de traceur sur la section d'écoulement. À la sonde 2 le comportement est stable tant au niveau des périodes d'injection (périodes mesurées environ 78 secondes) que de l'amplitude, la concentration de traceur au point 2 étant homogène sur toute la section d'écoulement. À la sonde 3 le comportement est aussi stable et la superposition des fréquences provenant des deux chemins est bien visible.

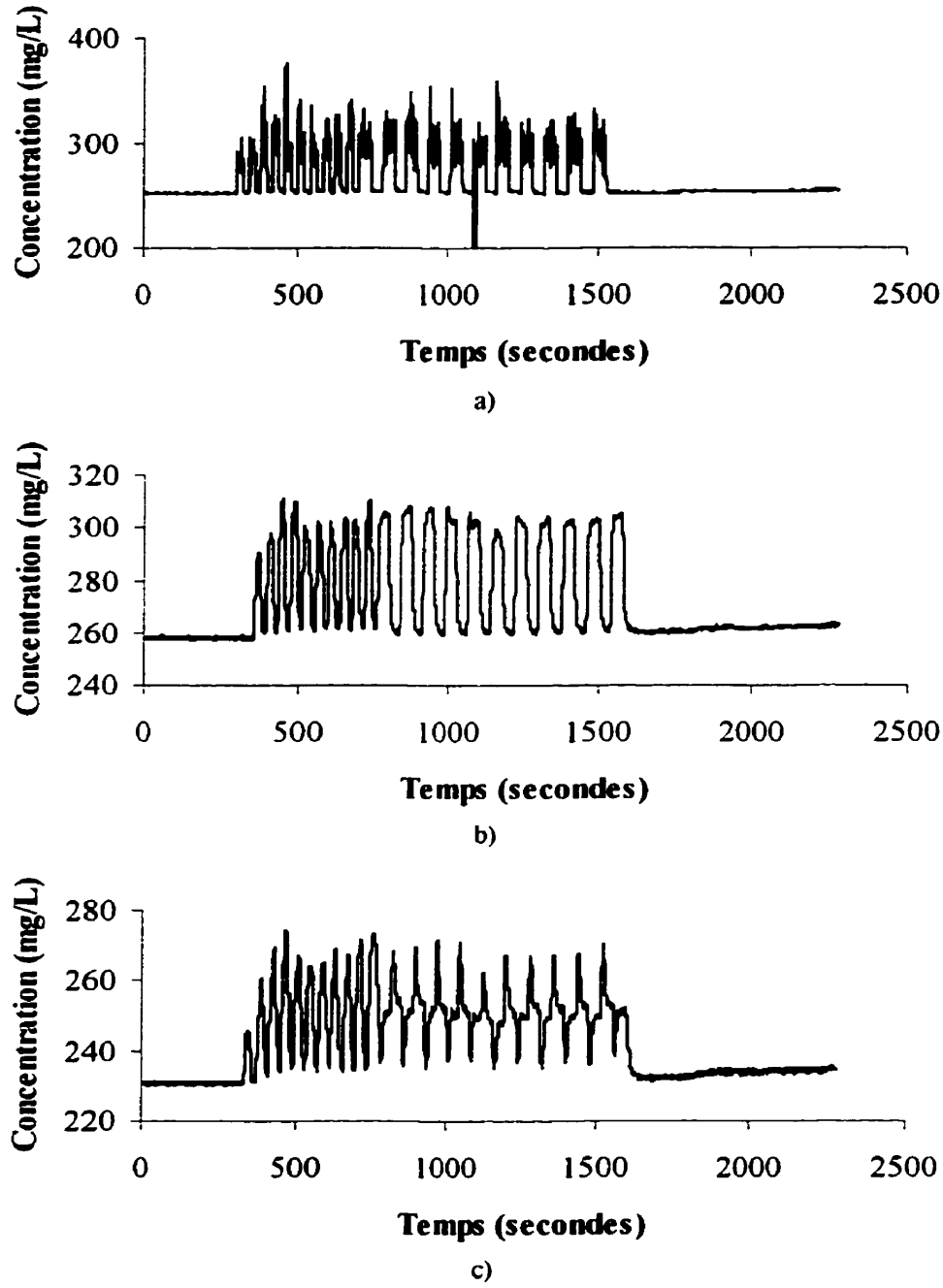


Figure 5.3: Résultat du traçage en laboratoire. a) sonde 1, b) sonde 2, c) sonde 3

5.2.1 Application de la méthode et analyse

Le point d'injection et chacun des points d'échantillonnage ont été traités en suivant la méthode exposée au point 2.5.3. La fréquence d'échantillonnage est de une seconde.

Vérification du principe de Nyquist

$$\frac{F_s}{2} \succ f \Rightarrow 0{,}5 > 0{,}013 \quad et \quad 0{,}025$$

Puisqu'on travaille dans le domaine des très basses fréquences avec une fréquence d'échantillonnage assez élevée, on est rarement limité, dans notre domaine d'application, par le principe de Nyquist.

Étape 1. Détermination du nombre de points compris dans la fourchette d'analyse:

Dans l'essai considéré ici, la plus longue période est de 78 secondes et la fréquence d'échantillonnage aux secondes, on doit donc avoir 156 points dans l'analyse. Or 156 n'est pas une puissance de deux, on devra alors considérer 256 points dans la fourchette d'analyse.

Étape 2. Calcul de la précision de la transformée de Fourier

La précision de la transformée de Fourier est alors:

$$\frac{F_s}{N} = \frac{1}{256} = 0{,}0039 \quad = \Delta f$$

Les fréquences que la transformée de Fourier peut détecter sont donc un multiple de 0,0039. Les fréquences cherchées sont 0,013 et 0,025 hertz. On pourra donc retrouver, pour la fréquence 0,013 hertz, les fréquences 0,0117 et 0,0156 hertz. Et pour la fréquence 0,025 hertz, on pourra retrouver les fréquences 0,0234 et 0,0273 hertz.

Étape 3. Calcul des transformées de Fourier par fourchette glissante

Étape 4. Construction des graphiques d'évolution spectrale

Les résultats d'évolution spectrale et l'analyse des résultats sont présentés ci-dessous.

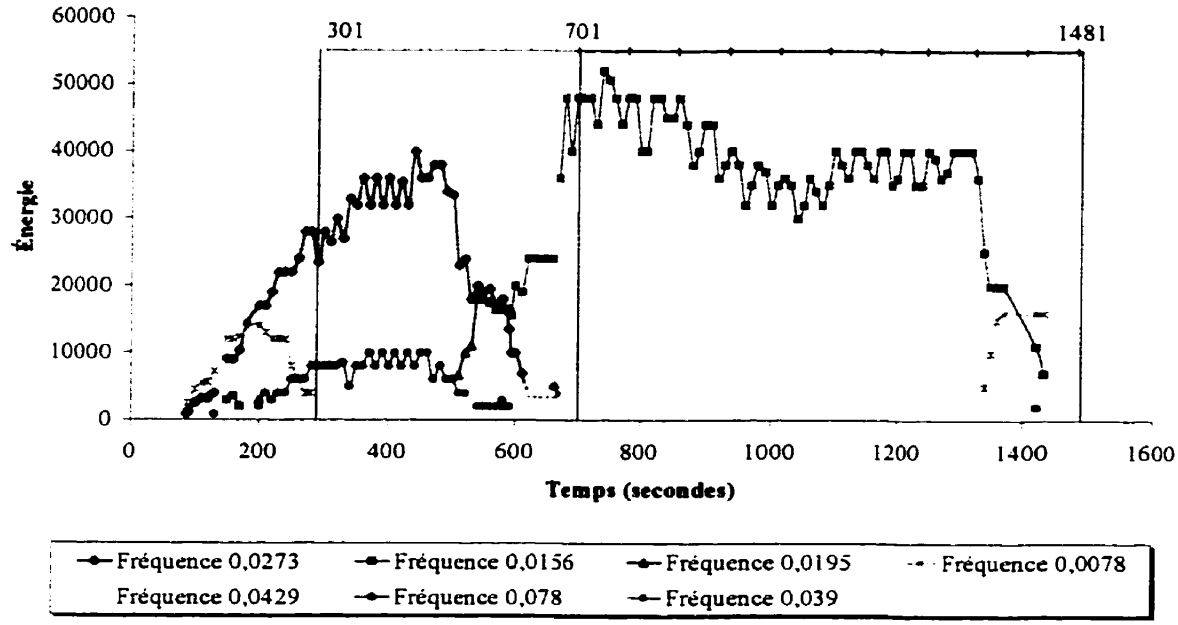


Figure 5.4: Évolution spectrale au point d'injection

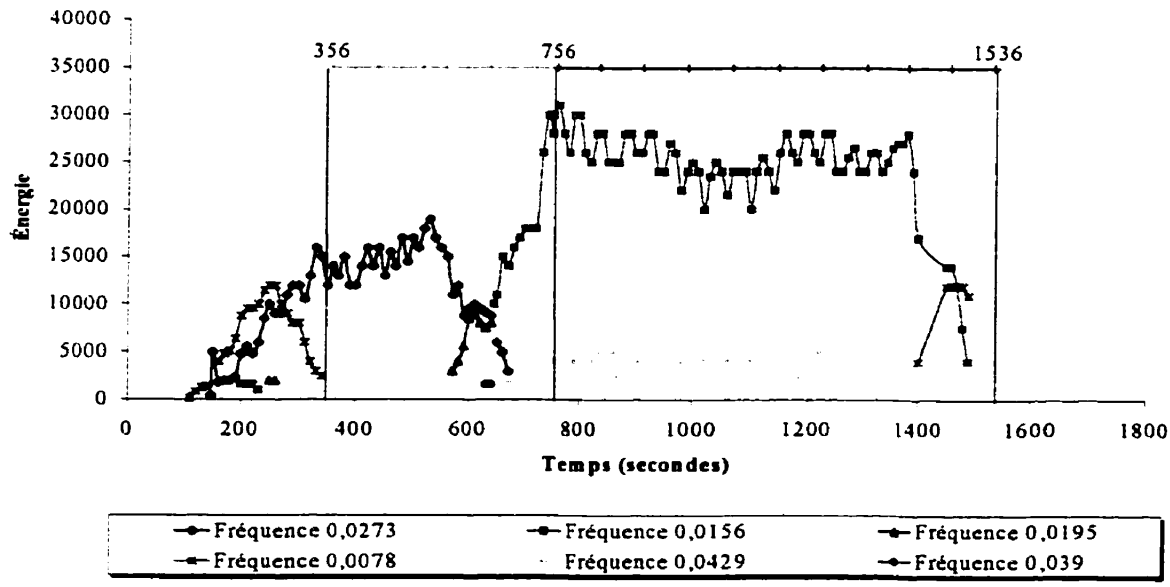


Figure 5.5: Évolution spectrale à la sonde 2 (alimentée par un seul chemin)

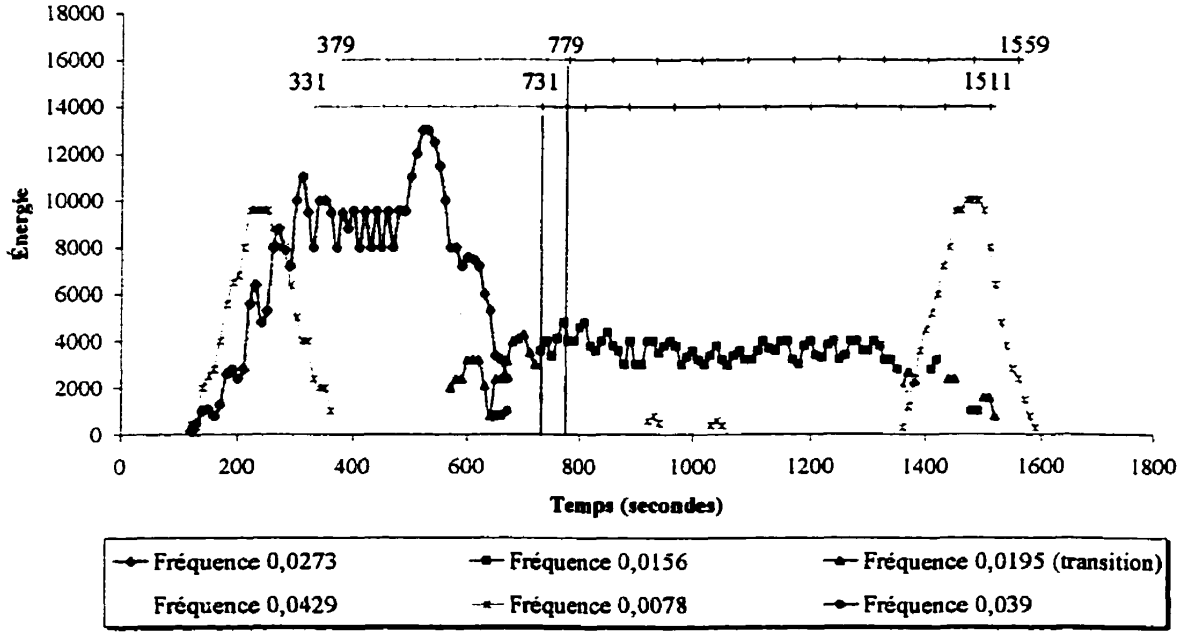


Figure 5.6: Évolution spectrale à la sonde 3 (alimentée par 2 chemins)

Les figures 5.4, 5.5 et 5.6 montrent l'évolution spectrale du point d'injection et des points de mesure. La ligne graduée orange et bleu qu'on retrouve sur chacune des figures est un guide pour montrer à quel moment les fréquences devraient apparaître et à quel moment elles devraient disparaître et ce, pour chacun des chemins. Chaque graduation représente une période et nous permet de juger l'évolution spectrale en fonction des périodes comprises dans une fourchette d'analyse.

Point d'injection (sonde1)

En étudiant l'évolution spectrale du point d'injection, on voit apparaître les fréquences cherchées, soit 0,0273 et 0,0156 hertz, avec une énergie forte par rapport aux autres fréquences qui apparaissent dans l'analyse de Fourier. Ces fréquences indésirables peuvent être dues au bruit qui peut être causé par la turbulence de l'eau dans les canalisations, la sensibilité des sondes, la transmission des données au système

d'acquisition et par le calcul des fréquences. Non seulement le bruit peut provenir de toutes ces sources, mais il peut également être le résultat de la combinaison de ces sources. Son caractère aléatoire et ses multiples causes en font un élément difficile à éliminer. Les fréquences indésirables qui apparaissent dans l'évolution spectrale peuvent surtout provenir des harmoniques qui sont associés, dans le domaine fréquentiel, à l'onde carrée et qui, dans notre cas, peuvent également être considérés comme étant du bruit parce qu'elles gênent l'analyse. Par contre, le niveau d'énergie de ces fréquences reste faible et ne gène pas l'analyse. On remarque toutefois la présence de la fréquence 0,0195 hertz à la jonction des deux fréquences d'intérêt. Cette fréquence semble être le début de l'évolution de la fréquence 0,0156, mais son énergie, partagée avec la fréquence 0,0273, plafonne et disparaît. La fréquence 0,0156 apparaît ensuite et semble vraiment être le prolongement de la fréquence 0,0195. Cette fréquence, qu'on appellera fréquence de transition, est effectivement le début de la fréquence 0,0156. Cette petite imprécision dans le calcul de la transformée de Fourier peut être due à une convolution moins performante étant donné la présence de deux fréquences à forte énergie à l'intérieur de la même fourchette d'analyse. On considère donc la fréquence de transition comme étant le début de l'apparition de la fréquence 0,0156. On remarque également que le niveau d'énergie de la fréquence 0,0156 est supérieur au niveau d'énergie de la fréquence 0,0273. Cette différence est normale étant donné qu'au niveau théorique, le niveau d'énergie associé à une fréquence est d'autant plus élevé que sa période est longue et que son amplitude est grande. Le niveau d'amplitude des périodes injectées est le même, mais la période associée à la fréquence 0,0156 est presque deux fois plus longue que la période associée à la fréquence 0,0273.

Point n°2 (sonde 2)

L'évolution spectrale de la sonde 2, montrée à la figure 5.5, se comporte de la même façon que l'évolution spectrale de l'injection. Le niveau d'énergie des fréquences est plus élevé pour le point d'injection parce que l'amplitude de l'onde injectée est plus élevée puisqu'elle n'a pas subi de dilution et de dispersion par le passage à travers différents

chemins. La différence majeure entre l'évolution spectrale du point d'injection et du point 2 est le décalage du moment d'apparition des fréquences, qui permettra la déduction des temps de séjour.

Point n°3 (sonde 3)

L'évolution spectrale de la sonde 3, montrée à la figure 5.6, fait aussi apparaître les fréquences cherchées, soit 0,0273, 0,0156 et la fréquence de transition 0,0195. On remarque que l'énergie associée à l'évolution de la fréquence 0,0156 est beaucoup plus faible que pour la fréquence 0,0273, alors que ses périodes devraient lui conférer une énergie plus grande. En étudiant la figure 5.3c) et le guide gradué d'apparition et de disparition des fréquences, on remarque que la superposition des périodes associées à la fréquence 0,0156 déforme le signal et par le fait même, atténue l'énergie qui lui est associée. La déformation du signal est plus importante pour la deuxième série de périodes que pour la première étant donnée la différence entre les périodes et les superpositions d'onde qui en découlent. La fréquence étant conservative, on arrive à détecter la fréquence 0,0156, mais en énergie beaucoup plus faible que s'il n'y avait pas de superposition ou que si la superposition déformait moins le signal.

L'observation des évolutions spectrales au point d'injection et à chacun des points de mesure montre l'apparition de la fréquence 0,0078, en début et en fin de traçage. Elle représente la fréquence bruit la plus importante dans l'eau non tracée. Ce bruit provient probablement des petites oscillations de conductivité causées par la turbulence de l'eau, mais peut également provenir de la sensibilité des sondes ou de la transmission des données au système d'acquisition.

Étapes 5., 6., 7. et 8. Identification et ajustement du moment d'apparition et de disparition des fréquences et identification des temps de séjour

L'analyse des évolutions spectrales permet l'identification des temps de début et de fin de contribution des fréquences. L'ajustement des moments d'apparition et de disparition des fréquences se fait selon la méthode établie plus haut, qui est rappelée ici:

Apparition: Tdébut+N-T

Disparition: Tfin+T

Les moments d'apparition et de disparition des fréquences et les temps de séjour qui en découlent sont synthétisés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1: Apparition, disparition des fréquences et temps de séjour

Essai laboratoire

	FRÉQUENCE 0,0273					
	Moment d'apparition (s.)		Moment de disparition (s.)		Durée (s.)	Temps de séjour (s.)
	Observé	Ajusté	Observé	Ajusté		
Point 1	90	306	664	704	398	-
Point 2	147	363	670	710	347	57
Point 3	121	337	670	710	373	31
	FRÉQUENCE 0,0156					
	Moment d'apparition (s.)		Moment de disparition (s.)		Durée (s.)	Temps de séjour (s.)
	Observé	Ajusté	Observé	Ajusté		
Point 1	510	688	1400	1478	790	-
Point 2	570	748	1460	1538	790	60
Point 3	550	728	1480	1558	810	40 et 80

Les temps de séjour peuvent être difficiles à discerner les uns des autres s'ils sont très près les uns des autres. C'est le cas de l'essai qui est étudié ici. En effet, l'étude des courbes de concentration nous montre qu'il y a environ 48 secondes de différence entre les deux chemins. Les temps de séjour sont également très courts par rapport à la durée

de l'injection (environ 20 minutes) et il y a superposition sur presque l'ensemble de l'enregistrement au point 3. Malgré ces difficultés, on retrouve les temps de séjour des deux chemins avec une erreur relativement faible. Le tableau 5.2 montre les écarts entre les moments d'apparition, de disparition des fréquences et de temps de séjour.

Tableau 5.2: Écarts entre valeurs observées et obtenues par analyse spectrale
Essai laboratoire

	Apparition de fréquence		Disparition de fréquence		Temps de séjour
	0,0273	0,0156	0,0273	0,0156	
Point 1	1,6 %	1,9 %	0,4 %	0,2 %	-
Point 2	1,9 %	1,1 %	6,1 %	0,1 %	3,5 %
Point 3	1,8%	0,4 %	8,9 %	0,1 %	Ch1 3,2 % Ch2 2,5%

Ch = chemin

Puisque les essais se font dans un environnement restreint, le traceur est peu affecté par la dispersion. On peut donc comparer les temps de séjour déduits par la translation de la courbe de traçage et les temps de séjour obtenus par analyse spectrale pour chacun des points de mesure. L'étude du tableau ci dessus montre que l'erreur sur les temps de séjour obtenus par analyse spectrale par rapport aux temps de séjour théoriques est faible. Les plus grandes erreurs concernent la disparition de la fréquence 0,0273, ce qui n'est pas surprenant puisqu'elle se trouve à la jonction de la fréquence 0,0156 qui est une fréquence à forte énergie. Pour les essais de traçage en réseau, un intervalle sans injection sera laissé entre les deux fréquences. De cette façon, on pourra limiter les problèmes de transition.

5.3 ESSAI RÉSEAU

Pour les essais en réseau réel, des périodes plus longues qu'au laboratoire ont été injectées pour limiter le plus possible les effets de la dispersion. Comme il a été suggéré lors de l'analyse de l'essai de laboratoire par analyse spectrale, un blanc a été laissé entre les fréquences d'injection pour permettre une évaluation plus facile de la disparition ou l'apparition d'une fréquence. L'essai réseau traité par analyse spectrale qui est présenté est l'essai du 17 février 1999, qui a été exploité au chapitre 4 par reconstitution de signaux. Les courbes de traçage de cet essai sont montrés à la figure 4.2.

Étape 1. Détermination du nombre de points compris dans la fourchette d'analyse:

Dans l'essai considéré ici, la plus longue période est de 1020 secondes (17 minutes) et la fréquence d'échantillonnage aux secondes, on doit donc avoir 2040 points dans l'analyse. Or 2040 n'est pas une puissance de deux, on devra alors considérer 2048 points dans la fourchette d'analyse.

Étape 2. Calcul de la précision de la transformée de Fourier

La précision de la transformée de Fourier est alors:

$$\frac{F_s}{N} = \frac{1}{2048} = 0{,}00049 = \quad f$$

Les fréquences que la transformée de Fourier peut détecter sont donc un multiple de 0,00049. Les fréquences cherchées sont 0,00278 (1/360) et 0,00098 (1/1020). On pourra donc retrouver, pour la fréquence 0,00278, les fréquences 0,0029 et 0,034. Et pour la fréquence 0,00098, on pourra retrouver les fréquences 0,00098 et 0,0014.

Étape 3. Calcul des transformées de Fourier par fourchette glissante

Dans les fichiers de données originaux, les données sont enregistrées aux minutes. Pour l'analyse, les données sont calculées aux secondes par interpolation linéaire. Tous les fichiers de données considérés pour l'analyse spectrale commencent à 10h. Dans la

détermination de l'heure d'apparition ou de disparition d'une fréquence, il faudra donc rajouter systématiquement 10h.

Étape 4. Construction des graphiques d'évolution spectrale

Les résultats d'évolution spectrale pour les points 2 et 3 et l'analyse des résultats sont présentés ci-dessous. L'injection a débuté à 11h25. La première fréquence a été injectée pendant 1440 secondes (de 11h25 à 11h49), un arrêt d'injection de 30 minutes a suivi, puis la seconde fréquence a été injectée pendant 4080 secondes (de 12h17 à 13h19).

La figure 5.7 montre l'évolution spectrale au point 2 de la zone 3 du réseau de la ville de Montréal. L'étude de l'évolution spectrale montre que les fréquences 0,0029 et 0,0034 représentent la fréquence 0,00278 qui a été injectée. Ce résultat est plausible puisque les fréquences que l'on pouvait prévoir avec la précision de calcul de la transformée de Fourier étaient de 0,0024 et 0,0029. Il n'y a en fait qu'un petit décalage de l'ordre de la précision de calcul, soit 0,00049, qui paraît acceptable.

L'étude de l'évolution spectrale montre également que de la deuxième fréquence injectée, soit 0,00098, semble être représenté par la fréquence 0,0014. La deuxième fréquence injectée est beaucoup plus nette et forte en énergie que la première parce que ses périodes sont plus longues. Toutefois, il peut y avoir confusion puisque la fréquence de l'eau non traçée est de 0,00098. On remarque en effet son apparition avant l'injection, après l'injection et au niveau de l'arrêt de l'injection. Toutefois, l'étude de l'évolution spectrale nous montre que la fréquence 0,0014 représente la deuxième fréquence d'injection et que la fréquence 0,00098 est la fréquence principale de l'eau non tracée.

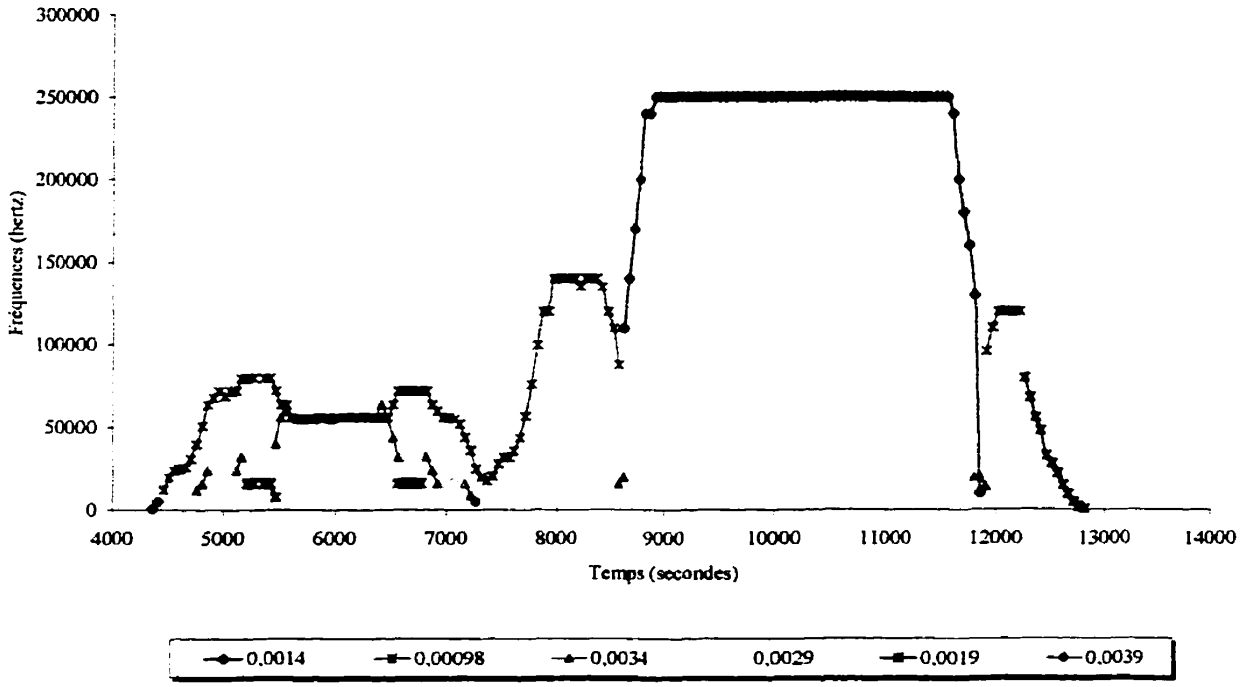


Figure 5.7: Évolution spectrale au point 2 de la zone 3 du réseau de la ville de Montréal. Traçage du 17 février 1999

La figure 5.8 montre l'évolution spectrale au point 3 de la zone 3 du réseau de la ville de Montréal. L'évolution spectrale montre les fréquences d'intérêt, qui avaient également été détectées au point 2. On remarque la présence de la fréquence de l'eau non tracée, soit 0,00098, avant l'arrivée de la première fréquence d'intérêt et après la deuxième fréquence d'intérêt. En effet, la superposition des signaux en provenance de différents chemins masque l'arrêt de l'injection entre les deux fréquences d'injection.

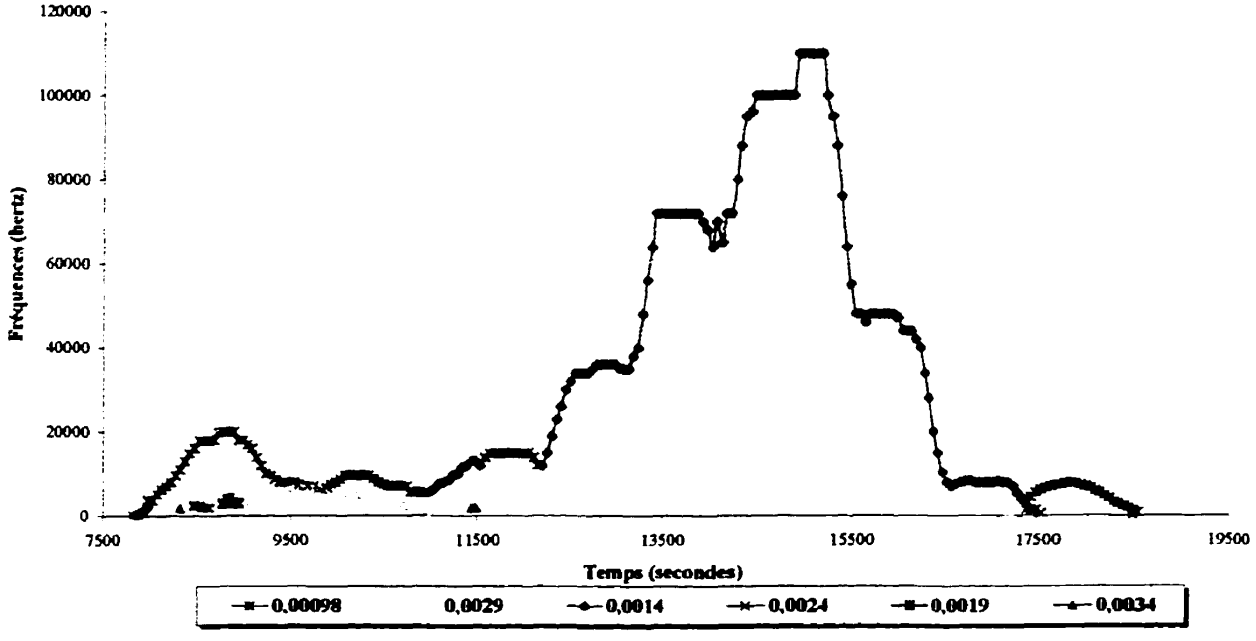


Figure 5.8: Évolution spectrale au point 3 de la zone 3 du réseau de la ville de Montréal Traçage du 17 février 1999

<u>Étapes 5., 6., 7. et 8. Identification et ajustement du moment d'apparition et de disparition des fréquences et identification des temps de séjour</u>

L'analyse des évolutions spectrales permet l'identification des temps de début et de fin de contribution des fréquences. Les moments d'apparition et de disparition des fréquences et les temps de séjour qui en découlent sont synthétisés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3: Apparition, disparition des fréquences et temps de séjour

Essai réseau

	FRÉQUENCE 0,0029					
	Moment d'apparition (s.)		Moment de disparition (s.)		Durée	Temps de séjour (s.)
	Observé	Ajusté	Observé	Ajusté		
Point 1		11h25		11h49		
Point 2	4761	11h47	7261	12h07	1170	22 min.
Point 3	8331	12h47	11481	13h17	1820	1h22
	FRÉQUENCE 0,0014					
	Moment d'apparition (s.)		Moment de disparition (s.)		Durée	Temps de séjour (h:min.)
	Observé	Ajusté	Observé	Ajusté		
Point 1		12h17		13h18		
Point 2	8611	12h40	11861	13h34	3240	23 min.
Point 3	12181	13h40	17331	15h05	5140	1h23 1h47

Pour déterminer l'heure d'apparition d'une fréquence, on calcule d'abord le moment d'apparition ajusté de la fréquence, puis on le converti en heure et on ajoute 10h, puisque tous les fichiers utilisés pour les analyses commencent à 10h. Connaissant l'heure d'émission d'une fréquence et son heure d'apparition à un point de mesure, on peut déduire le temps de séjour. On procède exactement de la même façon pour l'heure de disparition d'une fréquence.

Connaissant la durée d'émission des fréquences, il est possible de déduire l'existence de plusieurs chemins à temps de séjour différents si la durée d'enregistrement d'une fréquence à un point de mesure dépasse la durée d'émission de la fréquence de façon significative. On remarque que la durée de réception de la fréquence 0,0014 dépasse de plusieurs minutes la durée d'émission de cette fréquence au point d'injection. On peut

alors déduire l'existence d'un deuxième temps de séjour d'environ 1h47. Ce temps de séjour peut être vérifié par la reconstitution de signal faite au chapitre III. On remarque effectivement que le deuxième temps de séjour est d'environ 1h50. Toutefois, avec la première fréquence injectée, soit 0,0029, il n'est pas possible de déduire le temps de séjour d'un deuxième chemin. Ceci s'explique par le fait que cette fréquence est reçue en faible amplitude et n'a pas été détectée par l'analyse spectrale. L'analyse spectrale nous permet donc de déduire deux temps de séjour au point 3. Le tableau 5.4 montre les écarts entre les valeurs observées du traçage et les valeurs calculées par le traitement du signal. La comparaison est incomplète pour le point 3 étant donné sa complexité. Pour ce point, il est seulement possible d'observer l'arrivée du premier et du deuxième chemin pour la fréquence 0,0029.

Tableau 5.4: Écarts entre valeurs observées et obtenues par analyse spectrale

Essai réseau

	APPARITION DE FRÉQUENCE					
	Fréquence 0,00278			Fréquence 0,00098		
	Observé	Calculé	Écart (min.)	Observé	Calculé	Écart (min.)
Point 2	11h45	11h47	2	12h36	12h40	4
Point 3	12h43 13h16	12h47 -	4	-	13h40	-
	DISPARITION DE FRÉQUENCE					
	Fréquence 0,00278			Fréquence 0,00098		
	Observé	Calculé	Écart (min.)	Observé	Calculé	Écart (min.)
Point 2	12h07	12h11	4	13h40	13h34	6
Point 3	13h15	13h17	2	-	15h05	-
	TEMPS DE SÉJOUR					
Point 2	20 min.	22 min.	2 min.	20 min.	16 min.	4 min.
Point 3	1h18	1h22	4 min.	-	1h23 et 1h47	-

Puisqu'il y a toujours quelques minutes d'écart entre les observations et les valeurs calculées par analyse spectrale, les erreurs peuvent sembler élevées lorsque les temps de séjour sont courts. Par contre, l'erreur ne croît pas avec le temps de séjour, alors on peut dire que les erreurs sont très faibles, de l'ordre de quelques minutes tout au plus.

L'observation de la courbe de traçage du point 3 nous indique qu'il y a plusieurs chemins contribuants. Le traitement des données par analyse spectrale a permis la déduction de deux temps de séjour, qui représentent 60% du traceur originalement injecté. L'examen de la courbe de traçage nous montre également que les temps de séjour ne sont pas très différents les uns des autres. Dans de telles conditions il devient difficile d'évaluer tous les temps de séjour contribuants au point d'analyse. Il est toutefois possible de faire mieux. En effet, les périodes de la première fréquence injectée qui arrivent en deuxième au point 3 sont facilement visibles, mais n'ont pas été détectées par l'analyse spectrale. Ceci peut s'expliquer par la faible amplitude des périodes, à la présence d'une fréquence à très forte énergie dans la même fourchette d'analyse et par le bruit qui aurait pu masquer la détection de la fréquence. L'évolution spectrale du point 3 montre que la première fréquence injectée est en énergie très faible pour la première contribution et que l'énergie de l'eau non tracée est beaucoup plus élevée. On remarque également que la fréquence de l'eau non tracée apparaît à la suite de la première contribution, là où cette contribution devrait se poursuivre.

5.4 ÉVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS CHEMINS

L'objectif de ce travail est la détermination des temps de séjour en temps réel. La méthode de détermination des temps de séjour en réseau par traitement du signal nous a permis de déterminer des temps de séjour principaux dans un réseau de laboratoire et dans un réseau réel, sans en connaître la structure et les conditions hydrauliques. Une analyse complémentaire vise à évaluer les contributions des différents chemins en se basant sur ce qui est connu: les temps de séjour par chemins et les courbes de concentration au point d'injection et aux points de mesure. En faisant un bilan de masse

et avec l'aide de l'équation de continuité on peut dire que pour l'essai en laboratoire, au point 3:

$$Q_3\int_{t_0}^{t} C_3 dt = Q_1\int_{t_0-ts_1}^{t-ts_1} C_1 dt + Q_2\int_{t_0-ts_2}^{t-ts_2} C_1 dt$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

Où:

Q_3: Débit total

Q_2: Débit provenant du chemin 2

Q_3: Débit provenant du chemin 1

C_3 et C_1: Concentration dans la fourchette de temps considérée au point 3 et au point 1 respectivement

Il s'agit de choisir une fourchette d'analyse au point de mesure où on veut évaluer la proportion des débits provenant de chaque chemin. Dans les équations développées ci dessus, on considère une fourchette d'analyse (t_o à t) au point 3, qui est illustré à la figure 5.3c). La concentration C_3 comprise dans cette fourchette d'analyse est constituée de la superposition des concentrations émises au point d'injection 30 secondes plus tôt, dans la fourchette d'analyse t_o-30 à t-30, pour le chemin 1 et 78 secondes plus tôt, dans la fourchette d'analyse t_o-78 à t-78, pour le chemin 2. Ces concentrations ont été diluées selon la proportion du débit véhiculé dans chaque chemin. Le débit total et les concentrations étant connus, on peut déduire les débits contribuants dans chaque chemin en résolvant le système d'équation.

Pour une injection générée numériquement dans les mêmes conditions, on obtient, pour un débit total de 115 L/s, un débit de 58 L/s dans le chemin 1 et un débit de 57 L/s dans le chemin 2. Toutefois, on n'obtient pas de bons résultats avec les variations de concentration de l'essai. En effet, les fortes variations que l'on peut observer au point d'injection, illustré à la figure 5.2a), ne permettent pas une évaluation juste de la

concentration émise. Les concentrations sont surestimées et, de ce fait, on obtient des débits négatifs. Pour éviter ce genre de problème, la sonde qui enregistre les mesures au point d'injection devrait être placée après la zone de dispersion transversale et l'ensemble des sondes placées aux différents points de mesure doivent être de bonne qualité pour assurer une lecture stable et sensible des variations de conductivité.

On ne peut utiliser les plateaux d'énergie pour évaluer les contributions des différents chemins. En effet, tel que vu précédemment, le niveau d'énergie des fréquences varie en fonction des longueurs de périodes et de la façon dont les périodes se superposent.

CHAPITRE VI: ANALYSE COMPARATIVE DES MÉTHODES

Trois méthodes ont été présentées dans les chapitres précédents: reconstitution de signal, corrélation croisée et analyse spectrale. Ces méthodes, très différentes les unes des autres, ont toutes un but commun: déterminer la distribution des temps de séjour dans un réseau de distribution d'eau potable et la proportion de leur contribution et ce, en temps réel. L'application de chacune des méthodes nécessite, d'une part, une façon particulière de réaliser un traçage par le type d'injection et les fréquences qui y sont présente et, d'autre part, une façon particulière de traiter les données. Ce chapitre présente une analyse comparative des méthodes, tant au niveau de la mise en œuvre du traçage que de l'analyse des résultats.

6.1 COMPARAISON DES MÉTHODES D'ANALYSE

Les corrélations croisées sur une impulsion simple et la reconstitution de signal sur une impulsion simple, ne permettent pas la détermination des temps de séjour en temps réel. En effet, un traçage par impulsion simple implique l'injection d'un seul plateau: l'information relative à un traçage n'est alors disponible que ponctuellement.

La reconstitution de signal sur une impulsion simple reste pour sa part un outil utile pour évaluer à un point d'analyse la combinaison d'un signal continu émis au point d'injection, dont la superposition ne permet pas d'évaluer visuellement la distribution des temps de séjour et la proportion de leur contribution. La reconstitution de signal sur une onde continue permet la détermination des temps de séjour en temps réel parce que de l'information est émise en tout temps au point d'injection. Par contre, pour être efficace, la reconstitution de signal doit se faire en considérant la dispersion. L'évaluation des temps de séjour et la proportion de leur contribution peuvent en effet se révéler très différentes si la dispersion n'est pas prise en compte dans l'analyse. Dans le cas d'un petit secteur comme la partie surpressée de la zone 3 de la ville de Montréal, on peut

facilement déduire les lignes d'eau principales et ainsi caractériser structurellement les conduites qui composent ces lignes d'eau, ce qui n'est toutefois pas le cas pour un réseau de plus grande envergure. Un problème subsiste: il est très difficile, même connaissant la vitesse à l'entrée du réseau lors du traçage, de prévoir la vitesse résultante au point d'échantillonnage étudié parce que l'hydraulique du réseau n'est pas connue. Or, la vitesse est un paramètre important à connaître pour l'évaluation de la dispersion. L'analyse des résultats de la reconstitution de signal au chapitre 3 a montré que les chemins les plus rapides sont bien caractérisés par la dispersion qui est évaluée avec la ligne d'eau principale. Par contre, les chemins plus lents sont beaucoup moins bien définis par l'évaluation de la dispersion. Cet écart se fera beaucoup plus sentir dans un réseau de plus grande envergure dans lequel la dispersion est beaucoup plus difficile à évaluer et qui compte beaucoup plus de chemins. La reconstitution de signal reste toutefois un outil utile pour évaluer les temps de séjour principaux et l'importance de leur contribution.

Dans sa version actuelle, la reconstitution de signal se fait visuellement par l'usager. Le processus peut être automatisé avec le solveur d'Excel, la meilleure combinaison de temps de séjour-dilution serait alors évaluée par un processus itératif et jugée par l'écart type entre la courbe mesurée au point d'échantillonnage considéré et celle reconstituée par le programme. Toutefois, même dans la version automatisée, l'usager aurait à déterminer le nombre de chemins avant de lancer l'exécution du programme.

Les corrélations croisées sur une onde continue aléatoire et l'analyse spectrale permettent, théoriquement, la détermination des temps de séjour en temps réel. En effet, l'injection continue fournit un apport d'information en tout instant sur le réseau et permet, par le fait même, de déterminer les temps de séjour en tout instant.

La réalisation d'une onde aléatoire continue pour une analyse de corrélation croisée est toutefois très limitée au niveau de la mise en œuvre de l'injection du traceur et nécessite

de l'équipement spécialisé. En effet, des périodes assez longues doivent être utilisées pour éviter la disparition du signal par la dispersion. L'utilisation de si longues périodes limite considérablement le caractère aléatoire de l'injection. Aussi, pour avoir de meilleurs résultats, les amplitudes et la forme du signal doivent aussi être aléatoires. Finalement, Bendat et Piersol (1993) montrent au niveau théorique, et nos résultats le confirment, qu'il est très difficile d'obtenir de bons résultats par la corrélation croisée sur une onde aléatoire continue si le point d'analyse est alimenté par plus de trois chemins. La corrélation croisée est une méthode qui reste basée sur une reconnaissance de forme et de position: la superposition de signaux provenant de différents chemins complique alors considérablement l'analyse du traçage. Étant donné la complexité de la mise en œuvre d'un signal aléatoire, les limites du caractère aléatoire de l'injection et les difficultés liées à l'analyse, la méthode n'a pas été plus développée.

L'analyse spectrale semble être la méthode la plus prometteuse pour évaluer la distribution des temps de séjour en temps réel. La fréquence étant conservative, la dispersion et la superposition des chemins n'entraîneront pas une perte d'information significative, comme c'est le cas pour la reconstitution de signal et la corrélation croisée sur une onde aléatoire continue. L'analyse spectrale requiert une injection stable qui est facile à réaliser pour une onde carrée. La stabilité et la qualité de l'injection des périodes permet la bonne détection d'une fréquence au point d'échantillonnage. La principale difficulté relative à cette méthode est le choix de fréquences d'injection très différentes les unes des autres, en respectant les limites de période d'injection pour un traçage en réseau.

Pour chaque méthode, la qualité du signal d'injection est très importante pour d'une part, assurer un signal de qualité aux points d'échantillonnage et, d'autre part, parce que l'injection constitue la source d'information principale pour la déduction des temps de séjour. Pour assurer la détection des fréquences aux points d'échantillonnage, le traceur doit être injecté en amplitude suffisante. En effet, lorsque le signal subit des dilutions

successives, son amplitude diminue et il devient plus difficile de bien le détecter lors de l'analyse. Les périodes du traceur doivent également être suffisamment longues pour assurer la bonne détection du signal à tous les points d'échantillonnage et pour garder la fréquence conservative

6.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS

Tableau 6.1: Comparaison des résultats de temps de séjour

		CORRÉLATION CROISÉE		RECONSTITUTION DE SIGNAL		ANALYSE SPECTRALE
Essais	**Point**	**TS**	**% débit**	**TS**	**% débit**	**TS**
Essai de laboratoire	2	INJECTION NON ADAPTÉE		55 s.	-	57 s.
	3			30 s. 78 s.	-	31 s. 80 s.
17 février 1999	2	INJECTION NON ADAPTÉE		20 min.	1	22 min.
	3			1h15 1h48 2h34	0,43 0,25 0,09	1h23 1h47 -
25 mars 1999	2	17 min.	1	17 min.	1	INJECTION NON ADAPTÉE
	3	- 1h39 2h14 2h23 3h43 -	- 0,42 0,13 0,11 0,09 -	1h20 1h30 2h - 3h22 4h32	0,52 0,15 0,18 - 0,13 0,02	

NOTE: La mention injection non adaptée indique que l'injection n'est pas adaptée au type d'analyse considéré.

La comparaison des résultats de temps de séjour de l'essai de laboratoire par reconstitution de signal et par analyse spectrale donne, à quelques secondes près, les mêmes résultats. En effet, la dispersion n'affecte pas beaucoup les concentrations de

traceur et la dispersion est facile à évaluer parce qu'on connaît la structure du banc d'essai et les conditions d'écoulement à chaque point d'échantillonnage. Les erreurs de détermination de la dispersion sont alors limitées et la reconstitution du signal est faite avec peu d'erreur.

De la même façon, la reconstitution de signal et la corrélation croisée donnent les mêmes résultats pour l'essai réseau du 25 mars 1999 au point d'échantillonnage $n^0 2$. Le point est alimenté par un seul chemin et est très près du point d'échantillonnage, ce qui limite considérablement les effets de la dispersion. Il est donc aisé d'obtenir de bons résultats par la reconstitution de signal. La corrélation croisée donne également un excellent résultat et ce, pour les mêmes raisons: dispersion faible et pas de superposition pour gêner l'analyse.

Pour le même essai (25 mars 1999) au point d'échantillonnage $n^0 3$, l'analyse est déjà plus difficile. Les principaux temps de séjour donnent sensiblement les mêmes résultats, toutefois les résultats des deux analyses donnent lieu à des interprétations différentes. Dans la première contribution, la reconstitution de signal donne deux chemins (chapitre 3, figure 3.4) alors que la corrélation n'en donne qu'un (chapitre 4, figure 4.5). Quand on compare la durée de l'injection du plateau et la durée de la contribution reçue, il est effectivement possible qu'il y ait superposition de deux chemins ayant des temps de séjour très semblables (en l'occurrence 10 minutes de différence), mais il est également possible que la plus longue durée de la contribution soit due à la dispersion. Dans la reconstitution la dispersion est prise en compte, mais il reste qu'on fait des approximations de vitesse et qu'il est possible que l'estimation de la dispersion ne reflète pas fidèlement la réalité. La deuxième contribution est décrite par un seul chemin avec la reconstitution et donne deux maximums qui pourraient être interprétés comme deux chemins par la corrélation croisée sur la montée de traceur (chapitre 4, figure 4.5). La corrélation est basée sur une reconnaissance de forme et de position. Dans l'enregistrement original, il y a une variation qui, visuellement, pourrait être interprétée

par deux chemins. Cette variation peut aussi être due à une variation brusque des conditions d'écoulement, comme une importante consommation par exemple. Il semble plus probable que dans la deuxième contribution il y ait présence d'un seul chemin. La corrélation sur l'ensemble de l'injection pour sa part donne une bonne idée des temps de séjour principaux (chapitre 4, figure 4.4b). La corrélation, en considérant la montée de traceur, permet de garder toutes les variations qui sont présentes dans l'enregistrement et donc, d'avoir le même niveau d'information que l'observation visuelle, mais les résultats doivent être interprétés avec un œil critique. La troisième contribution est interprétée, tant par la reconstitution de signal que par la corrélation croisée, par un chemin et les temps de séjour sont à 14 minutes près. Cet écart n'est pas excessif, mais est probablement dû au fait que la dispersion n'est pas très bien décrite pour cette contribution. La dispersion approximative donne lieu à des erreurs sur les temps de séjour les plus longs. La reconstitution donne une dernière variation qui est ignorée par la corrélation croisée parce qu'elle est de trop faible amplitude.

Sur une impulsion simple, les corrélations croisées s'avèrent un outil utile pour déterminer les temps de séjour et l'importance de leur contributions. Le principal avantage par rapport à la reconstitution est qu'on a pas besoin de faire une estimation de la dispersion pour avoir de bons résultats. En revanche, lorsqu'il y a superposition la reconstitution est un outil plus performant pour déduire les différents chemins, si la dispersion est bien évaluée.

Les résultats de temps de séjour trouvés par reconstitution de signal et par analyse spectrale au point d'échantillonnage $n^0 3$ pour l'essai réseau du 17 février 1999 sont les mêmes à quelques minutes près. La reconstitution de signal permet de trouver un troisième chemin. Toutefois, la reconstitution n'est pas parfaite et s'est avérée difficile à faire puisque la dispersion n'est bien évaluée que pour le chemin le plus rapide et que la superposition des chemins rend la tâche difficile. Les deux chemins principaux, qui permettent de retrouver 80% de la masse de traceur, sont très bien définis par les deux

méthodes. Les autres chemins sont plus difficiles à trouver étant donnée la faible amplitude de traceur.

La corrélation croisée et la reconstitution de signal, on l'a vu plus haut, nécessitent un regard critique pour évaluer les temps de séjour et vérifier qu'il s'agit d'une contribution et non d'une variation d'écoulement. Puisque ces méthodes sont basées sur une reconnaissance de forme, la superposition des signaux et la dispersion compliquent l'analyse. L'analyse spectrale est basée sur la reconnaissance de l'information fondamentale d'un signal: la fréquence. Avec cette méthode on n'a pas à interpréter chaque variation dans le but de discriminer une variation d'écoulement d'un temps de séjour: tant que la fréquence injectée contribue au point d'analyse, on est en présence de l'arrivée d'un chemin. Cette méthode a aussi un énorme avantage: la fréquence étant conservative, les problèmes de dispersion et de superposition ne se posent pas.

6.3 DÉVELOPPEMENTS FUTURS PROBABLES

Chacune des méthodes présentées dans ce mémoire ont des avantages et des inconvénients, tout dépendant du niveau de réponse cherché pour l'évaluation des temps de séjour dans un réseau de distribution. Pour la détermination des temps de séjour en temps réel la méthode d'analyse spectrale est la plus prometteuse. Toutefois, la méthode développée dans ce mémoire n'est pas parfaite, tant au niveau de la mise en œuvre que de l'analyse. Ici sont présentées quelques lignes directrices pour le développement futur de la méthode.

6.3.1 Réalisation des essais

Premièrement, avant de poursuivre les essais en réseau, des essais pourraient être faits en laboratoire, cette fois sur un petit réseau comptant plusieurs chemins, mais de beaucoup plus petite envergure. En effet, le banc d'essai qui a été utilisé pour les essais en laboratoire est difficile d'accès et très difficile d'utilisation: il est difficile d'obtenir les

débits désirés dans les canalisations et les vannes sont peu maniables: il est donc difficile d'obtenir la distribution de temps de séjour désirée. Ces difficultés limitent les configurations de superposition et de temps de séjour que l'on peut tester et par le fait même, ne permettent pas de poser les limites de la méthode. Un petit réseau d'essai de plus petite envergure, mais qui compte plus de chemins, serait beaucoup plus facile d'utilisation, permettrait un raffinement de la méthode et de mieux en cerner les limites. Dans un tel réseau il ne serait pas possible de simuler les conditions d'écoulement qui prévalent dans un réseau, mais c'est sans importance puisque la fréquence est indépendante des conditions d'écoulement. Toutefois, pour s'assurer que les périodes sont assez longues pour ne pas être trop affectées par la dispersion, des essais préliminaires de périodes de traçage auraient avantage à être faits dans le réseau d'étude pour tester les périodes d'injection.

Les premières améliorations de la mise en œuvre d'un traçage en réseau seraient d'injecter des amplitudes plus élevées avec une pompe plus puissante de façon a injecter entre 100 mg/L et 150 mg/L et d'injecter des périodes plus longues. La longueur des périodes d'injection qu'il faut injecter est toutefois assez difficile à évaluer, d'autant plus que la longueur des périodes nécessaires dépend de l'étendue du réseau d'étude et de ses conditions d'écoulement, d'où l'importance de faire des tests préliminaires.

Lorsque toutes les composantes d'un traçage seront maîtrisées pour l'onde carrée, des essais pourraient être faits pour une onde sinusoïdale. On peut s'attendre à un gain significatif sur la réponse de l'analyse spectrale et son interprétation, grâce à la disparition des harmoniques. Le traçage se ferait de la même façon, sauf qu'un contrôleur relié à une pompe programmable permettrait l'injection d'une onde sinusoïdale, avec les fréquences choisies préalablement.

6.3.2 Équipement

Pour assurer une bonne détection de la conductivité aux points de mesure et limiter les erreurs, des sondes plus performantes et mieux adaptées à la mesure de conductivité dans des conduites sous pression pourraient être utilisées. Surtout, il serait préférable d'avoir le même type de sonde à l'injection et à tous les points d'échantillonnage. De cette façon, les chances que toutes les sondes réagissent de la même façon au passage du traceur sont plus élevées.

Les unités d'acquisition de données utilisées pour les essais réseau n'étaient pas, au départ, adaptées à la mesure de conductivité dans un réseau. L'adaptation des unités d'acquisition de données à la mesure de conductivité a pu contribuer à ajouter des erreurs ou du bruit. Une carte d'acquisition de données adaptée au problème permettrait, d'une part, d'avoir une acquisition de données adaptée et efficace et, d'autre part, dans une version plus avancée, le traitement des données pourrait se faire directement sur la carte d'acquisition. Dans sa version actuelle, le traitement des données par l'analyse spectrale n'est pas automatisé: le calcul à l'intérieur d'une fourchette de temps est automatique, mais le balayage et le traitement des données est manuel. L'automatisation de la procédure est facilement réalisable pour un programmeur. Dans une version encore plus poussée, non seulement le traitement des données pourrait se faire directement sur la carte d'acquisition, mais les données pourraient être transmise par modem. Finalement, lorsque toutes composantes d'un traçage seront pleinement maîtrisées en réseau pour appliquer la méthode d'analyse spectrale, une instrumentation permanente sur le réseau pourrait permettre des traçages répétés.

6.3.3 Application

Les données de temps de séjour obtenues par l'analyse spectrale pourront servir à la gestion de la qualité de l'eau dans les réseaux. Par exemple, les résultats de temps de séjour seront utiles pour le balancement de réseau. De plus, les résultats de temps de

séjour pourront être utilisés dans les modèles de prédiction de la qualité de l'eau (Sancho par exemple) ou dans un modèle géoréférencé.

Les applications sont multiples, l'intérêt de la méthode est certain, mais avant de pousser au maximum les limites de l'instrumentation, des essais doivent être faits pour cerner les limites de la méthode et par le fait même, en faire une utilisation la plus juste possible.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche était de développer une méthode de traitement de données de traçage pour obtenir en temps réel la distribution des temps de séjour et la proportion de leur contribution dans un réseau de distribution d'eau potable. Trois méthodes ont développées et testées: reconstitution de signal, corrélation croisée et analyse spectrale. Les principales conclusions sont présentées pour chaque méthode individuellement, puis pour l'analyse comparative des méthodes.

Les résultats de la reconstitution de signal sur les essais de traçages du 17 février et du 25 mars 1999 réalisés dans la partie surpressée de la zone 3 du réseau de la Ville de Montréal ont montrés que:

- Les résultats de temps de séjour obtenus sans dispersion sont très différents des résultats de temps de séjour obtenus avec dispersion. Cette différence est plus marquée pour les ondes continues. La dispersion doit donc être prise en compte pour avoir des résultats reflétant la réalité ;

- L'approximation de la dispersion est très bonne pour point d'échantillonnage n^{0}2 (essai du 25 mars et du 17 février 1999);

- L'approximation de la dispersion est très bonne pour le chemin le plus direct menant au point d'échantillonnage n°3 (essai du 25 mars et du 17 février 1999) ;

- Les chemins dans lesquels le temps de séjour est plus long sont moins bien définis par la dispersion. Dans certains cas, surtout pour les ondes continues, cette lacune

peut rendre la reconstitution plus difficile parce qu'on doit distinguer la sous-estimation ou la surestimation de la dispersion versus chemin ;

- La reconstitution sur une impulsion simple ne permet pas la détermination des temps de séjour en temps réel parce que l'information du traçage est ponctuelle. En revanche, la reconstitution sur l'onde continue le permet ;

- L'outil de reconstitution, même si son utilisation est limitée par la superposition et la dispersion, permet de faire l'évaluation des principaux temps de séjour. L'évaluation de la proportion des contributions est pour sa part est tributaire de la dispersion: comme la dispersion est une approximation, la proportion reste approximative.

Les résultats de corrélations croisées pour une impulsion simple ont montrés, pour l'essai réseau du 25 mars, que:

- La corrélation croisée sur l'ensemble de l'injection donne les principaux temps de séjour avec la proportion de leur contribution, qui est proportionnelle à l'amplitude du maximum;

- La corrélation croisée en considérant la montée de traceur permet d'aller chercher les variations qui sont visibles dans l'enregistrement du traçage. Il faut alors un œil critique pour discriminer une variation due à une variation hydraulique d'un chemin ;

- Les corrélations croisées sur une impulsion simple ne permettent par l'évaluation des temps de séjour en temps réel parce que l'information du traçage est ponctuelle.

Les résultats de corrélations croisées sur une onde aléatoire continue simulée ont montrés que:

- Les corrélations croisées sur une onde aléatoire continues ne donnent pas de bons résultats compte tenu des possibilités d'injection et théoriquement, ne donnent pas de bons résultats lorsque le point d'échantillonnage est alimenté par plus de trois chemins.

Les résultats d'analyse spectrale sur un essai en laboratoire et sur l'essai réseau du 17 février 1999 ont montrés que:

- Les fréquences sont conservatives ;

- La méthode permet de trouver le temps de séjour au point d'échantillonnage $n^0 2$ et les deux principaux temps de séjour au point d'échantillonnage $n^0 3$;

- Les faibles amplitudes des autres chemins n'ont pas permis la détection des fréquences d'intérêt pour ces chemins.

L'analyse comparative des méthode permet de conclure que:

- La reconstitution de signal sur une impulsion simple et la corrélation croisée n'apportent pas plus d'information qu'une analyse de traçage conventionnelle parce que les temps de séjour ne peuvent être évalués en temps réel ;

- La corrélation croisée sur une impulsion simple est plus rapide et plus facile à réaliser que la reconstitution de signal parce qu'on a pas besoin d'évaluer la dispersion ;

- Un regard critique est nécessaire pour évaluer les temps de séjour donnés par la reconstitution de signal et par la corrélation croisée par impulsion simple. Les

méthodes sont basées sur une reconnaissance de forme; il devient donc parfois difficile de discriminer une variation hydraulique pendant le traçage d'un chemin;

- L'analyse spectrale est la méthode la plus prometteuse parce qu'elle est basée sur la reconnaissance des fréquences contenues dans un signal, lesquelles sont indépendantes des conditions hydrauliques.

Avant de pousser plus avant la méthode d'analyse spectrale, des essais sur un petit réseau pourraient être faits pour pouvoir tester la méthode et en établir les limites. Ensuite, des tests de périodes devraient être faits pour définir les injections. Finalement, de l'équipement plus adapté pourrait permettre d'avoir une injection en amplitude suffisante, une réaction des sondes uniforme sur le réseau et une acquisition de données plus performante.

RÉFÉRENCES

APHA-AWWA-WPCF. (1990). Selected physical and chemical standard methods for students

AWWA. (1996a). Characterisation of chlorine decay in distribution system , AWWA Research Foundation, Denver.

AWWA. (1996b). Tracer studies in water treatment facilities: a protocol and case studies., AWWA Research Foundation, Denver.

BENDAT, J. S. et PIERSOL, A. G. (1993). Engineering applications of correlation and spectral analysis, John Wiley & sons inc., New York. 451 p.

BENRHANEM, M. (1996). Validation par un traçage des temps de séjour de l'eau dans un réseau de distribution d'eau potable, mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal. 209p.

BRAZOS, B. et O'CONNOR, J. T. (1989). Origin and control of bacteria in drinking water distribution system. Compte rendu du 12e symposium international sur les eaux usées, 4eme atelier sur l'eau potable, Montreal, Novembre 1989

BRIÈRE, F.G. (1994) Distribution et collecte de eaux, Éditions de l'école polytechnique de Montréal, Montréal, 365p.

CARTWRIGHT, M. (1990). Fourrier methods for mathematicians, scientists and engineers, , Nottingham, Angleterre. 250 p.

CHANTEREAU, J. (1980). Corrosion bactérienne bactérie de la corrosion, 2e édition, Technique et documentation Lavoisier, Paris, France. 262 p.

CHARAKLIS, W. G. et MARSHALL, K. C. (1990). Biofilm, J.Wiley and Sons Inc.,New York. N.Y.

CIGANA, J. (1997). Analyse statistique de sensibilité du modèle SANCHO, Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal.

DAMERON, F. J. (1996). Case study: City of Unalaska, Alaska, chlorine contact reservoir tracer test. Tracer studies in water treatment facilities: a protocol and case studies, AWWA Research Foundation, Denver, 151P.

DE COULON, F. (1990). Analyse et traitement des signaux, Jacques Neirynck, Lausanne. 548 p.

DESJARDINS, R. (1990). Le traitement de l'eau potable, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal 304 p.

DESJARDINS, R. (1994). Conception d'ouvrages de purification des eaux., École polytechnique de Montréal, Montréal.

DESJARDINS, R., JUTRAS, L. et PRÉVOST, M. (1997). Évolution de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution de la ville de Montréal. Revue des sciences de l'eau, 2, 167-184.

GRAF, W. H. et ALTIKAMAR, M. S. (1996). Hydraulique fluviale, René Walther, Lauzane. 373 p.

HASS, C. N., MEYER, M. A. et PALLER, M. S. (1983). Microbial Alteration in Water Distribution Systems and their Relationship to Physical-Chemical Characteristics. Journal AWWA, 475-481.

KENNEDY, M. S., SARIKELLE, S. et SURAVOLLOP, K. (1991). Calibrating Hydraulic Analyses of Distribution Systems Using Fluoride Tracer Studies. Journal AWWA, 83(7), 54-59.

KERNEÏS, A., NAKACHE, F. et DEGUIN, A. (1995). The Effects of Water Residence Time on the Biological Quality in a Distribution Network. Water Research, 29(7), 1719-1727.

LAVOIE, J. (1991) Étude des paramètres influençant l'évolution de la qualité de l'eau dans un réseau de distribution d'eau potable, Mémoire de Maîtrise, Université de Montréal, Montréal.

LAU, L. Y. et LIU, D. (1993). Effect of Flow Rate on Biofilm Accumulation in Open Channels. Water Research, 27(3), 355-360.

LECHEVALIER, M. W. (1990). Coliform regrowth in drinking water: a rewiew. Journal AWWA, 82(11), 74-86.

LECHEVALIER, M. W., CAWTHON, A. E. et Lee, R. G. (1988). Factors promoting survival of bacteria in chlorinated water supplies. Appl. Environ. Mocrobiol., 54, 649-654.

MARCHE, C. (1994). Programme d'aide à la datation en réseau d'eau. , École Polytechnique de Montréal, Montréal.

MARCHE, C. (1996). Programme d'amélioration aux techniques de traçage et d'analyse du temps de séjour en réseau d'eau potable. Proposition de recherche, école Polytechnique de Montréal.

MATHIEU, L. (1992). Matière organique biodégradable et stabilité biologique des eaux au cours de leur distribution, , Université de Nancy I, Nancy.

MAUL, A., VAGOST, D. et BLOCK, J. C. (1991). Stratégies d'échantillonnage pour analyse microbiologique sur réseaux de distribution d'eau, , Paris, France. 115 p.

MUNSEN. (1994). Fundamentals of fluid mechanics, , New York. p.

OMS. (1994). Directives pour la qualité de l'eau de boisson, Organisation mondiale de la santé, Genève. 202 p.

PRESS, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. et Vetterling, W. (1986). Numerical recipies, , New York. p.

SANTÉ CANADA (1990). Recommandation sur la nutrition au Canada, Ministre des Approvisionnements et Services, Canada.

SANTÉ CANADA. (1996). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, Ministre des Approvisionnements et Services, Canada. 102 p.

SERVAIS, P *et al.* (1992a). Étude de la colonisation bactérienne des réseaux de distribution. T.S.M. L'eau, 87(6), 321-326.

SERVAIS, P., LAURENT, P. et RANDON, G. (1992b). Mesure de la biomasse et de l'activité bactérienne dans l'eau de distribution. Revue des sciences de l'eau, 5(4), 473-488.

SERVAIS, P., LAURENT, P. et GATEL, D. (1994). Modelling bacterial dynamics in distribution systems. AWWA-WQTC annual conference, San Francisco.

VAN DER KOOIJ, D. (1990). Assimilable organic carbon (AOC) in drinking water. drinking water microbiology, McFeter G.A, ed., New York

ANNEXE I

ARGUMENTAIRE POUR LE CHOIX D'UN TRACEUR UTILISABLE DANS UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Dans le cadre de l'étude :

Détermination des temps de séjour dans le réseau de la ville de Montréal par analyse spectrale

Document préparé par

Anouk Desjardins
Vincent Gauthier
Claude Marche

Laboratoire d'Hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal
Chaire Industrielle en Eau Potable

LE 30 OCTORE 1998

RÉSUMÉ

L'étude de l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable est devenue un sujet de discussion et de recherche de plus en plus important, l'objectif étant de distribuer une eau de qualité optimale de l'usine jusqu'au robinet du consommateur. Le séjour de l'eau dans le réseau entraîne une modification de ses propriétés en fonction du temps, d'où l'utilité de la connaissance des temps de séjour locaux. Ceux-ci permettent de mieux comprendre l'interaction entre les paramètres physico-chimiques, chimiques et biologiques dans le réseau, et d'optimiser la qualité de l'eau distribuée.

Le temps de séjour de l'eau peut être mesuré par traçage ou par des logiciels de balancement hydraulique. Une étude menée en 1994 à la ville de Laval (Benrhanem, 1996) a démontré que les temps de séjour moyens qu'il est possible d'obtenir par les techniques conventionnelles sont très éloignés de la réalité en raison de plusieurs facteurs dont la complexité de certains réseaux de distribution, de la variabilité des écoulements dans les canalisations et de la dispersion/diffusion des particules d'eau. L'objectif du projet de recherche actuellement en cours est d'améliorer les techniques de traçage et d'analyse de temps de séjour en réseau d'eau potable en utilisant l'analyse spectrale pour traiter les données. Une première validation a été faite numériquement, puis sur une boucle d'essai du laboratoire d'hydrodynamique de l'école Polytechnique de Montréal. Pour compléter la validation, des essais en réseau réel sont nécessaires.

Pour réaliser ces essais, nous souhaitons tracer dans la zone 3 de la ville de Montréal, qui est alimentée par des pompes de surpression situées au réservoir Vincent d'Indy. Le traceur utilisé pour les essais doit respecter plusieurs critères :

Santé publique;
Confort du consommateur;
Stabilité dans réseau;
Détection du traceur aux points de mesures;
Disponibilité/coût;
Manipulation sécuritaire du produit concentré;
Utilisation antérieure dans le domaine de l'eau potable.

Après une étude exhaustive des différents traceurs utilisables en eau potable, nous avons sélectionné le chlorure de calcium $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. Le chlorure de calcium sera injecté à l'aide d'une pompe doseuse programmable à raison de 100 mg/l en résiduel à la sortie des pompes. À cette dose, toutes les recommandations (Québec, Santé Canada (SC), Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et U.S. Environmental Protection Agency (EPA)) sont respectées et les impuretés contenues dans le produit injecté sont négligeables. Toutes les mesures de sécurité seront observées lors de l'installation des équipement et de la mise en œuvre du traçage.

PROBLÉMATIQUE

De plus en plus, des efforts sont déployés pour comprendre les mécanismes de dégradation de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution. Le séjour de l'eau dans le réseau entraîne une altération de sa qualité en fonction du temps. La connaissance des temps de séjour locaux aide à mieux comprendre l'interaction entre les paramètres physico-chimiques, chimiques et biologiques dans le réseau, et à optimiser la qualité de l'eau livrée en tout point.

Le temps de séjour peut être mesuré par traçage, spécialement pour les réseaux simples, ou estimé par des logiciels de balancement hydraulique. L'analyse des résultats obtenus lors d'une campagne de traçage en réseau réalisée en 1994 (Benrhanem, 1996) à la ville de Laval a montré que le temps de séjour moyen évalué couramment par certains logiciels de balancement hydraulique reflète peu la réalité, qu'il ne donne pas l'ensemble de l'information nécessaire et que les concentrations de traceur aux points de mesures sont imprécises à cause de plusieurs phénomènes dont la dispersion/diffusion des particules d'eau lors de leur transit dans les canalisations.

Pour effectuer un traçage dans un réseau de distribution on doit s'assurer que le traceur n'est pas toxique, ne génère pas de goût, d'odeur, de couleur, qu'il est conservatif et qu'il n'encourage pas la croissance bactérienne. La méthode d'analyse des données par l'analyse spectrale requiert aussi des critères précis au niveau du traceur, de son injection et de sa mesure aux différents points d'échantillonnage. Dans ce qui suit sont présentés les différents traceurs qu'il est possible d'utiliser dans le cadre de cette étude, ainsi que les dispositifs d'injection pouvant permettre les injections de traceur.

I. PRINCIPE DE L'EXPÉRIMENTATION

La détermination des temps de séjour par traçage dans un réseau complexe est fastidieuse,une étude réalisée par Benrhanem (1996) le montre, et nécessite des techniques d'analyse fiables, rapides et automatisables pour déterminer les temps de séjour réels plutôt qu'estimer des temps de séjour moyens, effectivement peu utiles. Un projet de recherche est actuellement en cours à l'École Polytechnique de Montréal, en collaboration avec la ville de Montréal, dans le but d'améliorer les techniques de traçage et d'analyse de temps de séjour en réseau d'eau potable en utilisant l'analyse spectrale pour traiter les données. Une première validation a été faite numériquement et sur une boucle d'essai du laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal. Pour compléter la validation de la méthode, des essais en réseau réel doivent être réalisés.

Le principe de la méthode de traitement des données de traçage par l'analyse spectrale est basée sur l'analyse des fréquences. Connaissant le moment et les fréquences d'injection, l'obtention des fréquences au point de mesure permet la déduction du temps de séjour. Pour réaliser une telle analyse, la forme de la loi d'injection et la précision de la mesure de traceur aux différents points du réseau sont des paramètres très importants. La mesure du traceur doit pouvoir se faire de façon automatique, à une fréquence d'échantillonnage élevée, et les données transmises à un système d'acquisition de données. Le temps de réponse de l'appareil mesurant le traceur doit être court pour ne pas modifier le signal reçu à un point d'échantillonnage et toute interférence au niveau de la mesure doit être évitée. Enfin, les limites minimales, maximales d'injection de traceur et la précision de sa mesure doivent permettre une lattitude suffisante pour injecter des fréquences précises et assurer une concentration de traceur mesurable sur l'ensemble du réseau à l'étude.

II ZONE D'ÉTUDE

Pour réaliser les essais en réseau réel, nous souhaitons tracer dans la zone 3 de la ville de Montréal, laquelle est alimentée par des pompes de surpression situées au réservoir Vincent d'Indy. Le secteur est borné d'est en ouest par Vincent d'Indy et Gorman et du nord au sud par chemin de la Côte Ste-Catherine et la rue Mont-Royal. Ce secteur est idéal pour une première validation de la méthode de détermination des temps de séjour en réseau réel parce qu'il est relativement petit et complètement isolé des autres secteurs par des vannes de division. De plus :

le secteur est essentiellement résidentiel;
aucune industrie n'est desservie par ce secteur;
aucun hôpital n'est desservi par ce secteur.

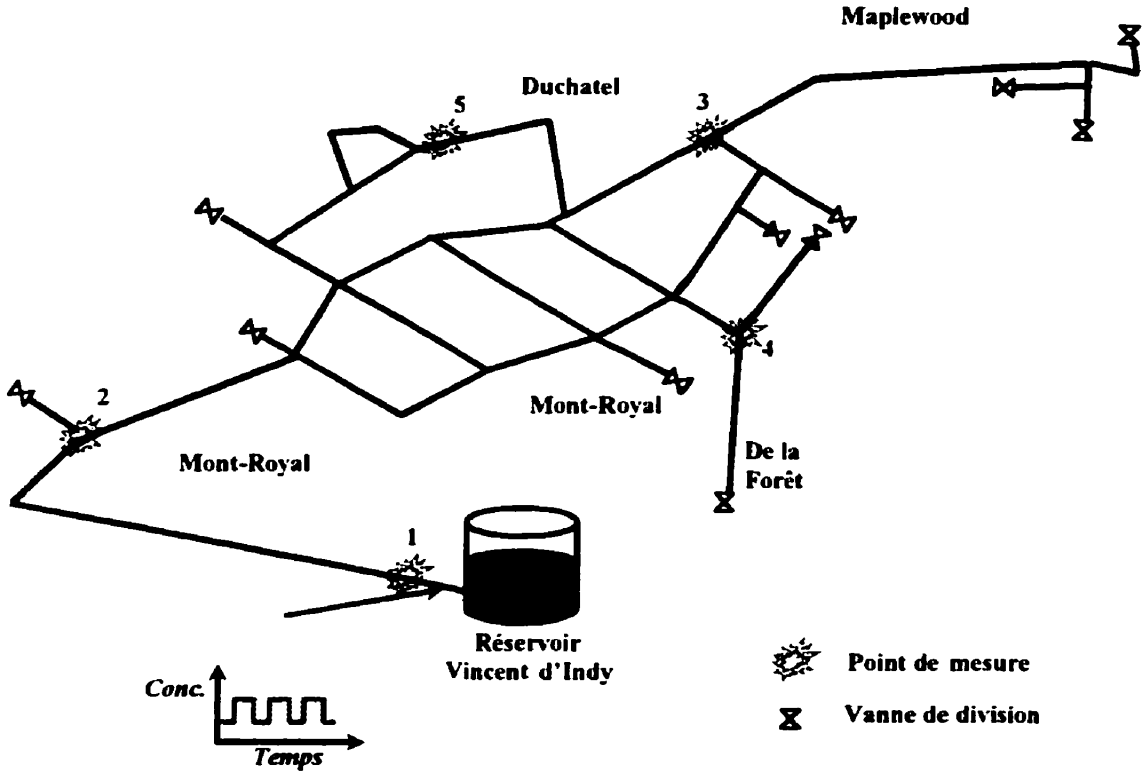


Figure 2.1 : Zone d'étude

III CRITÈRES POUR LE CHOIX D'UN TRACEUR

Pour réaliser un traçage dans un réseau de distribution d'eau potable, des considérations doivent être prises, tant au niveau des répercutions sur la qualité de l'eau potable que de la mise en œuvre du traçage. Elles sont présentées ci dessous, en ordre de priorité.

Santé publique : le traceur ne doit avoir aucun effet nocif pour la santé du consommateur, en particulier pour les populations sensibles, soit les nourrissons et les personnes âgées;

Confort du consommateur : le traceur ne doit pas provoquer de goût, d'odeur, de couleur ou de turbidité à l'eau qui pourrait incommoder le consommateur;

Stabilité dans le réseau : le traceur ne doit pas réagir avec l'eau ou les éléments constituant le réseau de distribution, ne pas encourager la recroissance bactérienne, la corrosion ou l'entartrage du réseau de distribution;

Détection du traceur aux points de mesure : la mesure du traceur doit pouvoir se faire en continu, à une fréquence d'échantillonnage élevée, et les données transmises à un système d'acquisition de données. Le temps de réponse de l'appareil mesurant le traceur doit être court pour ne pas modifier le signal reçu à un point d'échantillonnage;

Disponibilité/coût : le traceur et l'instrumentation nécessaire pour la mise en œuvre du traçage doivent être disponibles et ne pas entraîner des dépenses excessives;

Manipulation du produit concentré : la manipulation du traceur ne doit présenter aucun danger pour l'opérateur et les installations;

Utilisation antérieure dans le domaine de l'eau potable : le but de l'étude n'est pas de tester de nouveaux traceurs, mais d'utiliser un produit dont l'usage a déjà été validé dans le cadre de la distribution d'eau potable.

IV TRACEURS UTILISABLES

Plusieurs traceurs sont utilisables dans le domaine des eaux potables. Cette section présente ces traceurs et les méthodes disponibles pour les mesurer. La plupart des données présentées ci-dessous sont issues d'un rapport de l'American Water Works Association (AWWA, 1996a) sur des études de traçage réalisées dans le domaine de l'eau potable.

4.1 Fluor

Le fluor est un traceur économique, tant au niveau du coût des produits chimiques que du coût des analyses. Il est toutefois, lorsque concentré, très toxique et corrosif, ce qui impose des précautions particulières au niveau de l'entreposage et de la manipulation du produit.

Le fluor ne peut être utilisé en présence de coagulant comme l'alun, les sels ferriques et les polymères cationiques. La réaction entre le fluor et ces produits n'est pas instantanée et est réversible. Le fluor peut donc être accumulé dans les flocs et relâché quand les conditions d'équilibre changent. Il est alors impossible de déterminer si le changement de concentration du traceur est du à une adsorption/désorption ou à une évolution hydraulique.

Les ions fluorures peuvent être mesurés analytiquement par une méthode sélective d'ions par une électrode ou par la méthode SPADNS et en continu avec un analyseur d'ions fluorures. Avec la méthode sélective d'ions par une électrode on doit s'attendre à une erreur de ±0.1 mg/l pour chaque échantillon mesuré, la méthode SPADNS offre une précision plus importante. Les analyseurs en continu ne sont pas recommandés pour les temps de séjour courts et lorsque la concentration de traceur change fréquemment : l'analyseur demande 3 minutes pour s'ajuster et offrir une lecture stable à chaque changement de concentration. Le tableau 4.1 présente les propriétés chimiques des ions fluorures.

Les principales sources d'ions fluorures sont :

<u>Hexafluorosilicate de sodium (Na_2SiF_6)</u>
Ce produit est disponible en poudre ou en granule, contient 59.4% d'ions fluorures et peut être livré en sac de 50 kg.

<u>Fluorure de sodium</u>
Ce produit, disponible en poudre ou en granule, permet de produire une solution saturée à 4% stable à la température de la pièce. Sa forme granulaire a une densité variant de 1444 kg/m^3 à 1700 kg/m^3.

<u>Acide hexafluorosilicique</u>

ce produit est disponible sous forme liquide concentrée à 23%.

Le moins coûteux des produits énoncés ci-dessus est l'hexafluorosilicate de sodium, suivi de l'acide hexafluorosilicique et du fluorure de sodium. La forme liquide, quoi que légèrement plus coûteuse, est plus facile à manipuler et ne requiert aucune préparation ou équipement de préparation. Si un produit solide est utilisé, la forme granulaire est préconisée pour limiter l'émission de poussière toxique. Le fluorure de sodium est préparé dans un saturateur qui n'est pas recommandé pour des essais de traçage qui nécessitent une grande précision parce que la concentration d'ions fluorures dans une solution saturée peut varier légèrement.

Tableau 4.1 : Propriétés chimiques des ions fluorures

Formes disponibles	Hexafluorosilicate de sodium Na_2SiF_6 Fluorure de sodium NaF Acide hexafluorosilicique H_2SiF_6
Masse moléculaire	19 (79% de H_2SiF_6, 45% de NaF et 61% de Na_2SiF_6)
Coût	Environ 2$US/gal H_2SiF_6
Ions fluorures dans l'eau de Montréal	0.08 mg/l
Recommandation sur l'eau potable	<1.5 mg/l fluorose dentaire (OMS, SC, EPA)

4.2 Lithium

Les principaux avantages du lithium sont qu'il est non réactif, non toxique et qu'il n'existe pas en grande concentration dans les eaux naturelles. Par contre, il est très coûteux et les résultats ne peuvent être obtenus immédiatement ce qui exclue toute possibilité d'enregistrement en continu. Les limites de détection des méthodes analytiques (AA et ICP) sont de l'ordre de 8 µg/l à 50 µg/l, une quantité importante de lithium est donc nécessaire pour faire un traçage. Une attention particulière doit être portée lors de la dissolution du lithium dans l'eau parce que la réaction est exothermique et produit une quantité appréciable de chaleur. Le tableau 4.2 présente les propriétés chimiques du lithium.

Tableau 4.2 : Propriétés chimiques du lithium

Formes disponibles	chlorure de lithium sec LiCl
Masse moléculaire	42 (17% Li, 83% Cl)
Coût	50-150$ US/kg pour le produit chimique 20-45$ US par échantillon analysé

Lithium présent dans les eaux	Habituellement en dessous de 5 µg/l
Limites de détection	8 µg/l à 50 µg/l
Recommandations sur l'eau potable	Aucune mention (OMS, SC); inconnue (EPA)

4.3 Chlorures

Les chlorures sont des traceurs non réactifs, économiques et dont les analyses sont abordables. Les principales formes utilisées sont le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium ($CaCl_2$) et le chlorure de potassium (KCl). Ces traceurs ont la propriété de changer la conductivité de l'eau ce qui présente un avantage non négligeable puisque des sondes de conductivité permettent un enregistrement en continu, sont abordables et faciles d'utilisation. La limite des chlorures totaux recommandée dans les eaux de distribution est de 250 mg/l (SC, 1996; OMS, 1990). Si les eaux de distribution sont riches en chlorures, ces types de traceurs sont contre indiqués. Lors du traçage, il faut assurer un mélange suffisant entre le traceur et l'eau pour éviter les courants de densité (pour un traçage en bassin, par exemple, ces traceurs ne sont pas recommandés) et une stabilité de la température étant donné que la conductivité de l'eau varie avec la température. Les tableaux 4.3 et 4.4 présentent les propriétés chimiques du chlorure de sodium et du chlorure de calcium respectivement.

Tableau 4.3 : Propriétés chimiques du chlorure de sodium

Formes disponibles	chlorure de sodium NaCl
Masse moléculaire	58 (39 %Na, 61% Cl)
Solubilité	35.7 g NaCl/100 cm^3 d'eau froide
Coût	2-5$ US/lb
Na^+ et Cl^- présents dans les eaux de Montréal	Na^+ : 12 mg/l Cl^- : 21 mg/l
Recommandations sur l'eau potable	Na^+: 200mg/l goût (OMS, SC); 20 mg/l hypertension (EPA) $Cl^- < 250$ mg/l pour le goût et la corrosion (OMS, SC, EPA)

Tableau 4.4 : Propriétés chimiques du chlorure de calcium

Formes disponibles	chlorure de calcium $CaCl_2 \cdot 2H_2O$
Masse moléculaire	147 (27% Ca, 48% Cl)
Coût	15-30$ US/lb
Solubilité	74.5 g $CaCl_2$/100 cm^3 d'eau froide

Ca^{2+} et Cl^- présents dans les eaux de Montréal	Ca^{2+} : 34 mg/l Cl^- : 21 mg/l
Recommandations sur l'eau potable	Ca^{2+}: aucune limite (OMS, SC, EPA) $Cl^- < 250$ mg/l pour le goût et la corrosion (OMS, SC, EPA)

4.4 Variation de pH

Pour réaliser un traçage par variation de pH dans un réseau de distribution il faut d'abord s'assurer que le pH de l'eau reste stable dans la zone évaluée sur la durée de l'essai. Un traçage par cette technique peut être avantageux parce que les mesures de pH sont simples, précises et peuvent se faire en continu. Par contre, les ions H^+ responsables de la variation de pH peuvent réagir avec l'alcalinité et certains composés présents dans l'eau et affecter grandement les résultats. Le pH dans un réseau de distribution doit de plus être compris entre 6.5 et 8.5 (Santé Canada, 1996) ce qui restreint les possibilités d'injection.

V CHOIX DU TRACEUR

5.1 Choix et justification

Considérant les recommandations sur l'eau potable de Santé Canada (SC), de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et de l'Environmental Protection Agency (EPA) et les contraintes imposées par le projet à l'étude, notre choix s'est arrêté sur le chlorure de calcium. Ce traceur a été déjà été utilisé en réseau d'eau potable pour faire des essais de traçage en bassin pour l'évaluation de CT (Dameron, 1996). Le tableau 5.1 résume les critères d'acceptabilité pour chacun des traceurs étudiés.

Tableau 5.1 : Critères d'acceptabilité des traceurs

Critères	H_2SiF_6	LiCl	NaCl	$CaCl_2$	pH
Santé publique[1]	oui	oui	oui	oui	oui
Confort du consommateur	oui	oui	oui	oui	oui
Stabilité du réseau	oui	oui	oui	oui	non
Détection	non	non	non[2]	oui	non
Disponibilité/coût	non	non	oui	oui	oui
Manipulation du produit (sécuritaire)	non	non	oui	oui	oui
Utilisation antérieure en eau potable	oui	oui	oui	oui	non

[1] Pour les doses autorisées
[2] Détection difficile pour la dose (20mg/l) autorisée par l'EPA

Fluor (H_2SiF_6) éliminé : enregistrement en continu difficile ;
Chlorure de lithium (LiCl) éliminé : coût élevé, enregistrement en continu impossible ;
Chlorure de sodium (NaCl) éliminé : restriction de l'EPA ;
Variation de pH éliminé : pH instable dans le réseau ;
Turbidité éliminé : coûts très élevés, difficile à mettre en œuvre.

Chlorure de calcium ($CaCl_2$) retenu : Facile à mesurer et à manipuler. Santé Canada (Santé Canada, 1990) n'émet aucune limite supérieure pour son utilisation dans la nutrition, même pour les populations cibles (annexe I). Dans le domaine de l'eau potable, aucune limite n'est indiquée pour le calcium, tant que la dureté de l'eau reste dans les limites acceptables (SC, OMS et EPA annexes I et II) .Le calcium est un élément nutritif essentiel chez l'humain ; on pense même qu'un apport alimentaire adéquat de calcium peut retarder l'ostéoporose, prévenir le cancer de côlon et jouer un rôle d'agent antihypertensif (Santé Canada, 1996).

5.2 Description de l'injection de chlorure de calcium

L'étude nécessite trois essais de traçage, qui auront lieu à la même période. Les essais sont prévus pour le début du mois de décembre. Pour être capable de mesurer les concentrations de traceur sur l'ensemble du réseau à l'étude, nous souhaitons avoir un

résiduel 100 mg/l de chlorure de calcium à la sortie des pompes de surpression. Le temps d'injection de chlorure de calcium est de 30 minutes, à une concentration maximale en résiduel à l'entrée du réseau de 100 mg/l. Cette concentration se dilue rapidement avec la progression du traceur à travers les différents chemins du réseau. Les concentration de traceur sur le réseau seront mesurées pendant 24 heures par des sondes de conductivité (HANNA INSTRUMENTS HI8936C) reliées à une unité d'acquisition de données.. Le tableau 5.2 présente les paramètres pouvant être affectés par l'utilisation de chlorure de calcium.

Tableau 5.2 : Paramètres affectés par un apport de chlorure de calcium ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)

	Ca^{2+} (mg/l)	Cl^- (mg/l)	Dureté (mg/l $CaCO_3$)
Concentrations moyenne dans l'eau de Montréal	34	21	125
Concentration de traceur injectée (résiduel de 100 mg/l)	27.2	48.3	68
Concentration totale résultante	61.2	69.3	193
Canada (recommandations 1996)	-	<250 goût et corrosion	80 et 100 équilibre entre corrosion et entartrage >200 qualité médiocre pour un usage en continu, mais toléré par le consommateur >500 inacceptable pour usage domestique
OMS (1994)	-	<250 goût et corrosion	Pas de valeur guide
U.S. EPA	-	<250 goût et corrosion	

L'ajout de 100 mg/l de chlorure de calcium dans l'eau du réseau de la ville de Montréal fait passer les chlorures de 21 mg/l à 69.3 mg/l, soit 3.6 fois moins que les recommandations de SC, l'OMS et de l'EPA. La dureté totale passe de 125 mg/l $CaCO_3$ à 193 mg/l $CaCO_3$. Santé Canada (1996) recommande une dureté entre 80 et 100 mg/l, qui représente un équilibre entre la corrosion et l'entartrage des conduites du réseau, mais les traitements d'adoucissement restent réservés pour des eaux dont la dureté est supérieure à 150 mg/l (Desjardins 1990). Les essais de traçage étant ponctuels et de très courte durée (3 fois 30 minutes à 48 heures d'intervalle), la modification de la dureté de l'eau ne pourra causer de dommage au réseau. Aussi, il ne faut pas oublier que la concentration de traceur se dilue rapidement avec la progression de traceur à travers les différents chemins du réseau, minimisant ainsi les impacts du traceur. Le tableau 5.3 montre que les impuretés contenues dans le chlorure de calcium ont un impact négligeable à une dose de 100 mg/l.

Tableau 5.3 : Étude des impuretés contenues dans le $CaCl_2 2H_2O$, à une concentration de 100 mg/l

	Impureté ajoutées mg/l (100 mg/l $CaCl_2 2H_2O$)		Impureté ajoutées mg/l (100 mg/l $CaCl_2 2H_2O$)
NO_3	≤0.003	Magnésium	≤0.005
Sulfate	≤0.01	Potassium	≤0.01
Ammonium	≤0.005	Sodium	≤0.02

Baryum	≤0.005	Strontium	≤0.1
Plomb	≤0.0005		
Fer	≤0.0005		

VI MISE EN ŒUVRE DU TRAÇAGE

L'injection se fera sur la conduite de succion des pompes de surpression situées au réservoir Vincent d'Indy, à l'arrêt de corporation déjà présent;

L'injection sera commandée par une pompe doseuse programmable fournie par la ville de Montréal, habituellement utilisée pour le dosage du chlore dans les réserves d'eau potable. Pompe contrôlable également en mode manuel;

L'injection se fait sous surveillance continuelle;

Pour le raccordement de la pompe et des sondes, les procédures de désinfection standard de la ville de Montréal seront suivies;

Les installations hydrauliques et électriques de la pompe d'injection de traceur seront faites par la ville de Montréal;

Contrôle en continu du résiduel de chlorure de calcium injecté par ajustement de la dose en fonction du débit pompé dans la zone. De plus, une mesure in situ du résiduel injecté par une sonde de conductivité sera réalisée pour s'assurer que la concentration résiduelle ne dépasse jamais 100 mg/l à la sortie des pompes;

CONCLUSION

Le temps de séjour de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable est un paramètre très important à connaître parce qu'il est directement relié aux facteurs favorisant la dégradation de la qualité de l'eau dans les réseaux. Le but du projet de recherche actuellement en cours est d'améliorer les techniques de traçage en réseau en utilisant l'analyse spectrale pour traiter les données de traçage. Pour compléter la validation de la méthode, des essais en réseau réel sont nécessaires.

Une recherche sur les traceurs utilisables en eau potable a été réalisée dans l'optique d'un traçage dans une partie de la zone 3 de la ville de Montréal (zone alimenté par des pompes de surpression située au réservoir Vincent d'Indy). De cette recherche, il est ressorti que le chlorure de calcium $CaCl_2 2H_2O$ (résiduel de 100 mg/l à la sortie des pompe) peut être utilisé parce qu'il répond à toutes les exigences, soit :

Santé publique;
Confort du consommateur;
Stabilité du réseau;
Détection du traceur aux points de mesure en continu;
Disponibilité/coût;
Manipulation du produit concentré sécuritaire;
Utilisation antérieure dans le domaine de l'eau potable.

Toutes les recommandations (Santé Canada, Organisation Mondiale de la Santé et Environmental Protection Agency) concernant l'eau potable et l'alimentation sont respectées et les impuretés contenues dans le chlorure de calcium sont négligeables dans les conditions de dilution qui seront mises en oeuvre