UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

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

ÉRIC MAINVILLE
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)
JUIN 2000

© Éric Mainville, 2000.

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.

0-612-57417-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

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

présenté par : MAINVILLE Éric
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DESJARDINS Raymond, M.Ing., président
M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche
M. GAUTHIER Vincent, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont appuyé dans la réalisation de ce projet de recherche.

D'abord, j'exprime ma reconnaissance à mon directeur Claude Marche qui, tout au long de ce projet, m'a fait confiance et à Vincent Gauthier qui m'a permis de raffiner mes démarches intellectuelles au cours de nombreux entretiens.

Je remercie particulièrement Daniel Lavalée, qui fut une source généreuse et intarissable de conseils et de bons propos.

Merci également à toute l'équipe du laboratoire d'hydrodynamique et à l'équipe de la Chaire en eau potable, notamment à Antonio, Denis, Jacynthe, Julie et Patrice.

Finalement, merci à mes amis, qui ont su me procurer un support moral et intellectuel, plus spécialement à Lune, qui m'a apporté, du loin de son inaccessibilité, un soutien inestimable lors de mes longues nuits de rédaction.

RÉSUMÉ

Les réservoirs d'eau potable sont une partie essentielle des réseaux de distribution de l'eau potable. Utilisés pour répondre à la demande, maintenir la pression dans le réseau, optimiser le temps de pompage, fournir une réserve d'incendie et fournir une réserve en cas d'urgence (par ex.: panne à l'usine ou bris d'équipement), ils ont été longtemps considérés comme des installations qui avaient peu ou pas d'effet sur la qualité de l'eau. Maintenant, il est reconnu que les réservoirs d'eau potable peuvent avoir un effet significatif sur la qualité de l'eau qui y séjourne.

L'effet des réservoirs d'eau potable sur la qualité de l'eau est attribuable à l'interaction entre divers paramètres chimiques, microbiologiques, physiques et hydrauliques. Plusieurs études portent sur ce sujet. Elles ont démontré que l'effet de ces paramètres était lié aux temps de séjour de l'eau à l'intérieur des réservoirs. Le temps de séjour étant le temps que met une particule qui entre dans le réservoir pour en ressortir. Ainsi, le temps de séjour, peut servir, s'il est connu avec suffisamment de précision, à évaluer l'effet d'un réservoir sur la qualité de l'eau qui y séjourne.

Il existe plusieurs techniques pour déterminer les temps de séjour d'un réservoir d'eau potable. Le but de cette recherche est d'améliorer l'une de ces techniques, l'essai de traçage. L'utilisation d'un essai de traçage se limitant au régime permanent, il faut, pour obtenir de bons résultats, effectuer une série d'essais sous plusieurs conditions d'utilisation des réservoirs (en variant les niveaux et les débits, notamment). De plus, un essai de traçage ne peut être reconduit avant que la concentration du traceur ait atteint une concentration d'équilibre à la sortie du réservoir. Ce temps correspond à environ 3 à 4 fois le temps de séjour moyen (T) du réservoir tracé.

L'amélioration proposée vise à permettre l'utilisation d'un essai de traçage en continu et en régime non-permanent. Ceci permet de déterminer l'effet des réservoirs tracés sur la

qualité de l'eau en temps réel. Cette nouvelle approche devrait permettre de détecter les variations de temps de séjours qu'entraîneront des modifications faites sur les réservoirs, telles que des changements de débit ou modifications de la température de l'eau. Du même coup, les gestionnaires du réseau seront informés des implications de ces modifications sur la qualité de l'eau.

Pour ce faire, nous adaptons 2 techniques du traitement du signal aux essais de traçage dans les réservoirs d'eau potable, la corrélation croisée et l'analyse temps-fréquence.

La corrélation croisée est une application linéaire qui permet d'évaluer l'évolution de la similitude entre deux signaux dans le temps. À partir de celle-ci, il est possible de déterminer la distribution des temps de séjour d'un réservoir. Cette technique a été testée numériquement. De ces essais il est ressorti que :

- les fréquences utiles pour un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé sont celles qui sont inférieures à 1/(70% T) et à 1/(30% T) pour le cas d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston;
- la détection dans le signal de sortie, des fréquences émises à l'entrée du réservoir, est plus aisée lorsque l'on soustrait de celui-ci le signal de sortie dû à signal rectangulaire correspondant;
- la méthode de la corrélation croisée n'est pas utile lors d'essais de traçage dans les réservoirs d'eau potable, car elle requiert des données chronologiques bien supérieures à 4T, pour donner des résultats acceptables.

Ensuite, la technique d'analyse temps-fréquence a été adaptée au traçage dans les réservoirs d'eau potable. L'analyse temps-fréquence est l'étude de la variation des composantes fréquentielles d'un signal en fonction du temps. Cette analyse permet de déterminer le moment d'apparition et de disparition d'une ou d'un groupe de fréquences

dans un signal complexe. Elle a été testée à l'aide d'essais numériques et laboratoires. Les essais numériques ont montré que cette technique :

- permet de déterminer la distribution des temps de séjour en régime permanent avec des erreurs inférieure à 10 % sur le T_{10}, T_{50} et T_{90} et d'identifier à l'aide de fréquences, l'information qui sert à établir cette distribution;
- peut être répétée à tous les 1,5 T, permettant d'approcher l'évaluation des temps de séjour en continu et en régime non-permanent.

Les essais en laboratoire ont montré, quant à eux, que cette technique :

- permet de déterminer la distribution des temps de séjour en régime permanent avec des erreurs inférieure à 50% sur le T_{10}, T_{50} et T_{90} et d'identifier à l'aide de fréquence, l'information qui sert à l'établir;
- peut être répétée à tous les 2,5 T, permettant d'approcher l'évaluation des temps de séjour en continu et en régime non-permanent.

Il semble possible de ramener la qualité de ses résultats au niveau de ceux obtenus numériquement en modifiant la méthode d'injection du traceur et en employant, à l'une des étapes de la méthode, un modèle mathématique mieux adapté aux réservoirs d'eau potable.

D'autres essais au laboratoire s'imposent pour pouvoir établir un véritable protocole d'utilisation de la méthode. Plusieurs paramètres restent à quantifier (balise de la portion d'analyse, seuils de détection et de confirmation des fréquences) et à automatiser (lissage du signal de sortie).

ABSTRACT

Drinking water storage tanks are an essential part of drinking water distribution systems. Used to respond to consumer demand, to maintain water pressure in the system, to optimise pumping time, to offer a fire reserve and an emergency reserve (in case of plant failure or broken equipment, for instance), they have long been considered as installations with little or no impact on water quality. It is now recognised that drinking water tanks have a significant effect on the quality of residing water.

The effect of drinking water tanks on water quality is attributable to interactions among varied chemical, microbiological, physical and hydraulic parameters. Numerous studies have been realised on this subject. They have demonstrated that the effects of these parameters were linked with water residence time within the tanks, residence time being the time an entering particle takes to exit the tank. If known with sufficient precision, the residence time can thus be used to evaluate the effect of tanks on the quality of residing water.

There exist many techniques to determine water residence time in a drinking water tank. The object of this research is to improve one of these techniques: the tracer study. Since the use of tracer studies is limited to steady state flows, good results can be obtained only after performing a series of tests under different conditions of tank use (by varying levels, and flows, for instance). In addition, a tracer study cannot be reiterated until the concentration has reached an equilibrium state at tank exit. This time corresponds to approximately three to four times the mean residence time (T) of the traced tank.

The proposed improvement aims to favour the use of tracer studies in a continuous and unsteady flow. This would permit to determine in real time the effect of the traced tanks on water quality. This new approach should allow the detection of variations in residence times engendered by tank modifications, such as flow and temperature

changes. At the same time, system managers will be informed of the modifications' impact on water quality.

In order to do so, we will adapt two techniques of signal analysis for tracer studies in drinking water tanks: cross correlation and time-frequency analysis.

Cross correlation is a linear application that allows us to evaluate the evolution of similarities between two signals over time. Based on that evaluation, it is possible to determine the distribution of residence times in a tank. This technique has been tested numerically. These testings have shown that:

- useful frequencies are those below 1/(70% T) for a tank behaving like a completely mixed reactor and those below 1/(30% T) in the case of a plug-flow reactor;
- the detection, in the of outgoing signal, of frequencies emitted at tank entry is made easier by subtracting from it an output signal due to a corresponding rectangular signal;
- the cross-correlation technique is not suitable to tracer studies in drinking water tanks, since it requires chronological data superior to 4T to give acceptable results.

Then, the time-frequency analysis was adapted to tracer studies in drinking water tanks. Time frequency analysis is the study of the variation of a signal's frequency components over time. Using this analysis allows us to determine the time of the advent and disappearance of a frequency or group of frequencies in a complex signal. This technique has been tested numerically and in laboratory. The numerical testings have shown that this technique:

- makes it possible to determine the distribution of residence times in a steady state flow with an error smaller than 10% on T10, T50 et T90, and, by using frequencies, to identify the information necessary to establish this distribution;
- can be replicated every 1,5T, thus allowing to approximate the measurement of residence times in a permanent and steady flow regime.

As for the laboratory testings, they have demonstrated that this technique:

- makes it possible to determine the distribution of residence times in a steady state flow with an error smaller than 10% on T10, T50 et T90, and, by using frequencies, to identify the information necessary to establish this distribution;
- can be replicated every 2,5T, thus allowing to approximate the measurement of residence times in a permanent and steady flow regime.

It seems possible to bring these results up to the quality of those obtained numerically by modifying the tracer injection method and by using, at one stage of the method, a mathematical model better adapted to drinking water. Further laboratory tests are needed to establish an actual method utilisation protocol. Several parameters still have to be quantified, such as the analysis portion marker and the thresholds for frequency detection and confirmation. Others, such as the smoothing of the exiting signal, remain to be automated.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES TABLEAUX xiii

LISTE DES FIGURES xv

LISTE DES ANNEXES xix

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE 3

1.1 Évolution de la qualité de l'eau de distribution 3
1.2 Le temps de séjour : indicateur de qualité 4
1.3 Les réservoirs d'eau potable 4
1.3.1 Comportements idéaux 5
1.3.2 Influence des réservoirs sur la qualité de l'eau 6
1.3.3 Facteurs qui influencent le temps de séjour dans les réservoirs d'eau 8
potable 8
1.3.4 Détermination des temps de séjour dans les réservoirs 9
1.4 Vers une nouvelle technique de traçage 16

CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES 18

2.1 Théorie du signal et de son traitement 18
2.1.1 Le signal 18
2.1.2 Le traitement du signal 19
2.1.3 L'analyse spectrale 19
2.1.4 La corrélation croisée 20
2.1.5 Représentation temps-fréquence d'un signal 20
2.2 Les simulations numériques 21
2.2.1 Le modèle numérique 21
2.3 Les essais en laboratoire 23
2.3.1 Le montage expérimental 23

CHAPITRE III : LA CORRÉLATION CROISÉE 28

3.1 Méthode d'analyse par corrélation croisée 29

3.2 Les essais numériques 30
3.2.2 Réacteur piston et signal aléatoire 33
3.2.3 Corrélation croisée sur les phases 2 36
3.2.4 Corrélation croisée sur des signaux soustraits de leur énergie moyenne 40
3.2.5 Corrélation croisée, signaux optimisés et considérations pratiques 45
3.2.6 Corrélation croisée sur une période maximale de 4 T 49
3.3 Appréciation de la méthode 51

CHAPITRE IV : ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE 53

4.1 Méthode 54
4.1.1 Méthode en régime permanent 54
4.1.2 Méthode en régime non-permanent 55
4.2 Développement de la méthode par les essais numériques 56
4.2.1 Choix des fréquences 57
4.2.3 Fréquence d'échantillonnage 57
4.2.4 Calcul de la distribution des temps de séjour 58
4.2.5 La portion d'analyse 59
4.2.6 Centrer le signal de sortie 61
4.2.7 Déterminer le moment d'apparition de la fréquence injectée 62
4.2.8 Exemple numérique en régime permanent 63
4.2.9 Exemple numérique en régime non-permanent 65
4.3 Essais au laboratoire 71
4.3.1 Exemple d'essai au laboratoire en régime permanent 71
4.3.2 Exemple d'essai au laboratoire en régime non-permanent 74
4.3.3 Discussion des résultats laboratoires 79

CHAPITRE V : DISCUSSION ET PERSPECTIVE 84

5.1 Forces de la méthode 84
5.2 Faiblesses de la méthode 85
5.3 Développement et perspectives 85

CONCLUSION 87

RÉFÉRENCE 90

ANNEXES 97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Erreurs entre la courbe théorique de la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un R.C.M. 33

Tableau 3.2 : Erreurs entre la courbe théorique de la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un réacteur piston. 35

Tableau 3.3 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée. 38

Tableau 3.4 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux centrés à l'aide de l'amplitude moyenne de la phase 2 39

Tableau 3.5 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un R.C.M 42

Tableau 3.6 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston 44

Tableau 3.7 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux optimisés pour un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé 48

Tableau 3.8 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston 48

Tableau 3.9 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un réacteur piston et une durée de l'analyse de 4T 51

Tableau 4.1 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour calculée et la théorique. 64

Tableau 4.2 : Principales caractéristiques de l'essai de traçage du 9 décembre 1999 71

Tableau 4.3 : Principales caractéristiques de l'essai de traçage du 15 février 2000 75

Tableau 4.4 : Erreurs sur les valeurs du T10, T50 et T90 en fonction du décalage 80

Tableau 4.5 : Erreurs sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} en fonction du meilleur ajustement possible du modèle et du décalage exacte..... 82

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Représentation schématique du comportement d'un réacteur en a) complètement mélangé et en b) piston 5
Figure 1.2 : Exemple de distribution des temps de séjour 10
Figure 1.3 : Distributions de temps de séjour d'un réacteur piston et d'un réacteur complètement mélangé 14
Figure 2.1 : Le montage expérimental 24
Figure 2.2 : Le système d'injection (plan) 25
Figure 2.3 : Le système d'injection (élévation) 26
Figure 3.1 : Un signal se propageant à travers des chemins différents 28
Figure 3.2 : a) Signal aléatoire à l'entrée d'un R.C.M. b) Réponse à la sortie du réservoir 31
Figure 3.3 : a) Corrélation croisée entre le signal à l'entrée et la signal à la sortie d'un R.C.M b) Distribution théorique des temps de séjour d'un R.C.M. 33
Figure 3.4 : a) Signal aléatoire à l'entrée d'un réservoir ayant le comportement d'un réacteur piston b) Réponse à la sortie du réservoir 34
Figure 3.5 : a) Corrélation croisée entre le signal à l'entrée et le signal à la sortie d'un réacteur piston b) Distribution théorique des temps de séjour d'un réacteur piston . 35
Figure 3.6 : a) Signal d'entrée soustrait de la valeur moyenne de son amplitude b) Signal de sortie soustrait de la valeur moyenne de son amplitude lors de la phase 2 37
Figure 3.7 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée et le signal de sortie b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé 37
Figure 3.8 : a) Signal d'entrée soustrait de la valeur moyenne de son amplitude b) Signal de sortie soustrait de la valeur moyenne de son amplitude lors de la phase 2 39
Figure 3.9 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée et le signal de sortie b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé 39

Figure 3.10 : a) Sea et serc d'un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé b) Ssa, ssrc et ss d'un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé 41

Figure 3.11 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie centré b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé (41) . 42

Figure 3.12 : a) Sea et serc d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston b) Ssa, ssrc et ss d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston 43

Figure 3.13 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie soustrait b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé 43

Figure 3.14 : a) Spectre d'un signal d'entrée aléatoire b) Spectre du signal de sortie produit par le signal d'entrée c) Agrandi de b) 46

Figure 3.15 : a) Spectre d'un signal d'entrée aléatoire b) Spectre du signal de sortie produit par le signal d'entrée c) Agrandi de b) 47

Figure 3.16 : a) Signal à l'entrée d'une durée de 4 T, b) Signal à la sortie d'une durée de 4 T plus le décalage du réservoir 50

Figure 3.17 : a) Fonction obtenue par la corrélation croisée sur une période de 4 T, b) Distribution théorique des temps de séjour de réservoir essayé 51

Figure 4.1 : Distribution théorique des temps de séjour du réservoir utilisé lors des essais numériques 57

Figure 4.2 : Exemples de portions d'analyse 59

Figure 4.3 : Évolution de l'erreur sur le T_{10}, T_{50}, T_{90} en fonction de la fréquence d'injection, pour différentes valeurs de la portion d'analyse 61

Figure 4.4 : a) Signal d'entrée, b) Signal de sortie du réservoir 63

Figure 4.5 : Distribution des temps de séjour calculée et théorique 64

Figure 4.6 : Signal de sortie, signal calculé et signal soustrait 65

Figure 4.7 : Énergie associée à la fréquence de 0.058 Hz 65

Figure 4.8 : a) Signal à l'entrée et b) signal à la sortie d'un réservoir en régime non-permanent 66

Figure 4.9 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour la première portion d'analyse 67
Figure 4.10 : Énergie des deux fréquences injectées première portion d'analyse 67
Figure 4.11 : Signal résultant de la soustraction de la première portion analysée du signal de sortie 68
Figure 4.12 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour la seconde portion d'analyse 69
Figure 4.13 : Énergie des deux fréquences injectées dans un réservoir en fonction du temps dans la première portion d'analyse 70
Figure 4.14 : Signal d'entré et de sortie de l'essai de traçage du 9 décembre 1999 72
Figure 4.15 : Signal de sortie de l'essai de traçage du 9 décembre 1999 et son lissage .. 73
Figure 4.16 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour l'essai du 9 décembre 1999 73
Figure 4.17 : Énergie associée à la fréquence de 0.0019 Hz en fonction du temps pour l'essai du 9 décembre 1999 74
Figure 4.18 : a) Signal à l'entrée et b) signal à la sortie de réservoir lors de l'essai 15 février 2000 76
Figure 4.19 : Distribution des temps de séjour calculée par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour l'essai du 15 février 2000 76
Figure 4.20 : Énergie associée à la fréquence de 0.00126 Hz en fonction du temps pour l'essai du 15 février 2000 77
Figure 4.21 : Distribution des temps de séjour calculé et distribution des temps de séjour théorique pour la seconde portion de l'essai du 15 février 2000 78
Figure 4.22 : Énergie associée à la fréquence de 0.00086 Hz en fonction du temps pour l'essai du 15 février 2000 79

Figure 4.23 : Modification proposée au signal d'injection à l'entrée du réservoir 80
Figure 4.24 : Meilleur ajustement possible entre la distribution des temps de séjour du réservoir expérimental et le modèl numérique utilisé 81
Figure A2.1 : Exemple d'une feuille de calcul 102

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Principales fonctions programmées 97
ANNEXE II : Exemple d'une feuille de calcul 101

INTRODUCTION

Les réservoirs d'eau potable sont une partie essentielle des réseaux de distribution de l'eau potable. Ils sont traditionnellement utilisés pour répondre à la demande, maintenir la pression dans le réseau, optimiser le temps de pompage, fournir une réserve d'incendie et fournir une réserve en cas d'urgence (panne à l'usine, bris d'équipement, etc.). Ils ont été longtemps considérés comme des installations qui avaient peu ou pas d'effet sur la qualité de l'eau. Maintenant, il est reconnu, que les réservoirs d'eau potable peuvent, et souvent ont un effet significatif sur la qualité de l'eau qui y séjourne (Kirmeyer *et al.*, 1998).

L'effet des réservoirs d'eau potable sur la qualité de l'eau est dû à l'interaction entre divers paramètres chimiques, microbiologiques, physiques et hydrauliques. Plusieurs études portent sur ce sujet. Elles ont démontré que l'effet de ces paramètres est lié aux temps de séjour de l'eau à l'intérieur des réservoirs. Le temps de séjour étant le temps que met une particule qui rentre dans le réservoir pour en ressortir. Chaque particule possède un temps de séjour qui lui est propre. Ainsi, s'il est connu avec suffisamment de précision, le temps de séjour peut servir à déterminer l'effet d'un réservoir sur la qualité de l'eau qui y séjourne.

Il existe plusieurs techniques afin de déterminer les temps de séjour de l'eau dans les réservoirs d'eau potable : modèle numérique, modèle réduit et essais de traçage. Ces différentes techniques ont toutes leurs avantages et leurs inconvénients.

Le but de cette recherche est d'améliorer l'une de ces techniques, l'essai de traçage. Les essais de traçage actuels ont une application limitée car leur utilisation ne peut se faire que sur une base ponctuelle en régime permanent. L'amélioration proposée vise à permettre son utilisation en continu et en régime non-permanent. Ceci permettra de déterminer l'effet des réservoirs sur la qualité de l'eau en temps réel. Cette nouvelle

approche devrait permettre de détecter les modifications faites sur les réservoirs (changement de débit, modification de la température de l'eau, etc.) car elles se traduiront par de nouveaux temps de séjour. Du même coup, les gestionnaires du réseau seront informés sur les implications de ces modifications sur la qualité de l'eau.

Pour ce faire, nous tenteons d'adapter certaines techniques du traitement du signal aux essais de traçage dans les réservoirs d'eau potable. Plus spécifiquement, la technique de la corrélation croisée et de l'analyse temps-fréquence sont utilisées. Ces techniques sont bien établies, bien documentées et ont été appliquées, avec succès, à plusieurs domaines.

Dans un premier temps, des essais numériques ont été réalisés pour adapter et valider les nouvelles méthodes. Dans un second temps, la méthode la plus prometteuse, l'analyse temps-fréquence, a été testée au laboratoire.

Chacune de ces méthodes est développée, présentée et discutée individuellement. Et finalement, des recommandations pour le développement futur de la méthode temps-fréquence sont présentées.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les réservoirs d'eau potable sont une partie intégrante de la plupart des systèmes de distribution d'eau potable. Ils sont utilisés pour équilibrer la pression dans le réseau, pour minimiser le temps de pompage, pour fournir une réserve pour combattre les incendies, une réserve d'urgence, et une réserve de production (Brière 1994).

Toutefois, ces réservoirs peuvent avoir une influence sur la qualité de l'eau qui y séjourne. Pour pouvoir mesurer l'ampleur de cette influence, plusieurs projets de recherche ont été réalisés. Dans le présent chapitre, le recensement des plus importants est effectué afin de permettre la mise en contexte du présent projet de recherche.

Dans un premier temps, les facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution sont exposés. Le rôle historique des réservoirs dans les réseaux de distribution et l'impact qu'ils peuvent avoir sur la qualité de l'eau sont également expliqués. Dans un second temps, les techniques qui existent actuellement pour évaluer cet impact sont décrites. Finalement, les fondements de la présente recherche sont indiqués.

1.1 Évolution de la qualité de l'eau de distribution

La qualité de l'eau traitée peut changer considérablement durant son transport et sa distribution. Les facteurs qui influencent ces changements sont nombreux. Ils sont une combinaison des conditions physico-chimiques, biologiques et hydrauliques du réseau.

Plus précisément, les facteurs qui affectent la qualité de l'eau dans le réseau de distribution sont : la qualité chimique et biologique de l'eau en sortie d'usine, les matériaux et l'état des conduites, des pompes, des vannes, et des réservoirs qui

constituent le réseau et le temps de séjour. L'eau dans le réseau peut subir des modifications provoquées par : une contamination via des connexion croisées ou par des fuites dans les joints, la corrosion des conduites en acier et le dissolution du plomb et du cuivre provenant des conduites, une perte de désinfectant résiduel dans les réservoirs provoquée par de long temps de séjour, des réactions des désinfectants avec la matière organique et inorganique (ce qui conduit à la formation de goûts et d'odeurs), une recroissance bactérienne, une augmentation de la turbidité par la présence de particule remise en suspension et la formation de sous produit de désinfection (soupçonnés cancérigène). (Clark et Coyle, 1990; Kerneïs *et al.*, 1995; Dukan *et al.*, 1996; Lu *et al.*, 1998; Frateur *et al.*, 1999; Gauthier *et al.*, 1999; Mays *et al.*, 2000) .

1.2 Le temps de séjour : indicateur de qualité

Le temps de séjour peut être défini, comme étant, le temps nécessaire à une particule d'eau qui sort de l'usine, pour parvenir au consommateur. Chaque particule possède un temps de séjour qui lui est propre. L'ensemble de ces temps de séjour se nomme la distribution des temps de séjour. La plupart des paramètres biologiques, chimiques et hydrauliques qui régissent la qualité de l'eau distribuée sont reliés aux temps de séjour (LeChevalier *et al.* 1988; Servais *et al.* 1994; Kerneïs *et al.*, 1995; Boulos *et al.*, 1996). De longs temps de séjour dans le réseau peuvent entraîner une diminution de désinfectant résiduel, une augmentation des sous-produits de désinfection, une augmentation du risque de nitrification et de prolifération bactérienne et une dégradation esthétique de l'eau (goût, odeur et apparence) (Boulos *et al.*, 1996; Mays et *al.*, 2000). C'est pourquoi le temps de séjour, s'il est connu avec suffisamment de précision, peut devenir un indicateur de la qualité de l'eau.

1.3 Les réservoirs d'eau potable

Les réservoirs d'eau potable, sont des réservoirs situés à l'intérieur du réseau de distribution de l'eau potable. Ils ne participent pas au traitement de l'eau. Ces réservoirs

étaient conçus sur des bases fonctionnelles et esthétiques. Ces critères étaient principalement : répondre à la demande; maintenir la pression dans le réseau; minimiser le temps de pompage; fournir une réserve d'incendie et fournir une réserve en cas d'urgence (panne à l'usine, bris d'équipement, etc.). Ces réservoirs étaient considérés comme des éléments ayant peu ou pas d'effet sur la qualité de l'eau. Maintenant, il est reconnu, que ces ouvrages peuvent avoir, et souvent ont, un effet significatif sur la qualité de l'eau (Kirmeyer *et al.*, 1998).

1.3.1 Comportements idéaux

Il existe deux comportements théoriques idéaux pour décrire le comportement hydraulique des réservoirs d'eau potable : le comportement de type réacteur complètement mélangé et le comportement de type réacteur piston (Mays *et al.*, 2000). Le réacteur complètement mélangé assume que toutes les particules du fluide qui entre dans le réacteur sont instantanément dispersées dans tout le volume du réacteur. Le réacteur piston, lui, assume que les particules du fluide qui passent dans le réacteur sont évacuées dans le même ordre que leur admission (Tchobanoglous et Schroeder, 1987). Ces comportements idéaux ne sont jamais atteints dans les réservoirs d'eau potable. La figure 1.1 schématise ces comportements.

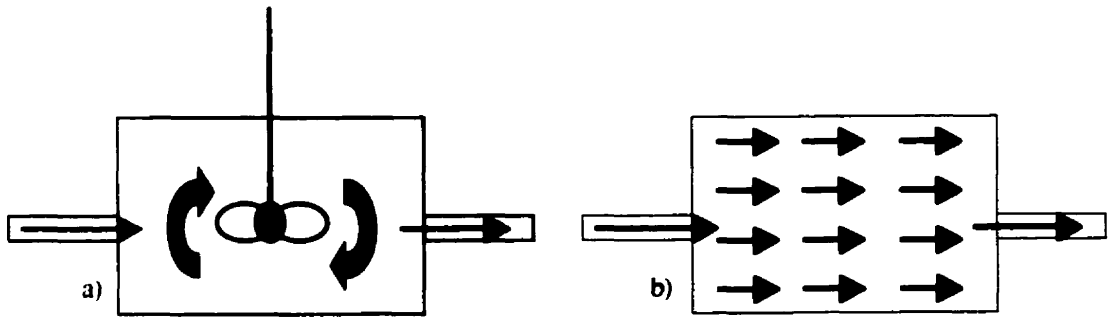


Figure 1.1 : Représentation schématique du comportement d'un réacteur a) complètement mélangé et b) piston

Généralement, d'un point de vue de la qualité, les réservoirs ayant un comportement d'un réacteur complètement mélangé sont considérés moins dommageables que ceux ayant un

comportement de type piston. Car ils ont tendance, dans les mêmes conditions d'utilisation, à dégrader les désinfectants résiduels plus lentement (Mays *et al.*, 2000). Plusieurs études récentes tentent d'identifier les facteurs, spécifiques aux réservoirs, qui influent sur la qualité de l'eau (Amblard *et al.*, 1996; Boulos *et al.*, 1996; Clark et Coyle 1990; Clark *et al.*, 1996; Douki *et al.*, 1999; Grayman et Clark 1993; Grayman *et al.*, 1996 et Kennedy *et al.*, 1993). La prochaine section présente ces facteurs.

1.3.2 Influence des réservoirs sur la qualité de l'eau

De même que dans le réseau de distribution en général, la qualité de l'eau dans les réservoirs d'eau potable est influencée par une combinaison des conditions chimiques, microbiologiques et physiques qui y règne (Mays *et al*, 2000).

Dans cette section, les principales conditions qui peuvent influencer la qualité de l'eau dans les réservoirs sont brièvement présentées.

1.3.2.1 Conditions chimiques

Les conditions chimiques qui influencent la qualité de l'eau dans les réservoirs, comprennent, mais ne sont pas limitées à : la perte de chlore résiduel, la formation de sous-produit de chloration, la formation de goût et d'odeur, augmentation du pH, la corrosion, la présence d'hydrogène sulfuré et interactions avec le revêtement intérieur. Toutes ces conditions, sauf la dernière, sont influencées par le temps de séjour (Mays *et al.*, 2000).

1.3.2.2 Conditions microbiologiques

Les principales conditions microbiologiques qui affectent la qualité de l'eau sont : l'introduction de micro-organismes par l'alimentation du réservoir ou par toute autre

source, la recroissance bactérienne et la nitrification. Ces deux dernières sont influencées par le temps de séjour dans le réservoir (Mays *et al.*, 2000).

Amblard *et al.* (1996) font remarquer que le réservoir qu'ils ont échantillonné se comportait comme un véritable écosystème avec des communautés de micro-organismes bien établies et structurées. Et que l'abondance de ces micro-organismes était régulièrement plus élevée à la sortie du réservoir qu'à son entrée.

De plus, Clark *et al.* (1996) attribuent la propagation d'une maladie, dans le réseau d'eau potable d'une ville américaine, à une contamination par des oiseaux qui nicheaient dans un réservoir d'eau potable du réseau.

1.3.2.3 Conditions physiques

Les conditions physiques qui peuvent causer une perte de la qualité de l'eau sont principalement : dépôt de sédiments (dû aux faibles vitesses dans les réservoirs), entrée de contaminants et changement de température de l'eau dans le réservoir. Encore une fois, toutes ces conditions, sauf l'entrée de contaminants, sont reliées au temps de séjour (Mays *et al.*, 2000).

Gauthier *et al.* (1999) montrent que la présence de sédiments dans les réservoirs d'eau potable et dans le réseau en général, peut influencer la qualité de l'eau qui y séjourne, en offrant un lieu de protection pour les micro-organismes contre le désinfectant résiduel et en consommant une partie de ce désinfectant.

1.3.3 Facteurs qui influencent le temps de séjour dans les réservoirs d'eau potable

Les principaux facteurs qui influencent le temps de séjour dans les réservoirs sont : les cycles de remplissage-vidange, la géométrie et la température de l'eau.

1.3.3.1 Cycles de remplissage-vidange

Le temps de séjour de l'eau dans les réservoirs est directement affecté par la fréquence des cycles de remplissage-vidange et par les changements volumétriques qui ont lieu durant chaque cycle. L'importance de ces changements est relative à la taille du réservoir et à la demande en eau (Kennedy et al. 1993). Plusieurs auteurs (Grayman et Clark, 1993 et Rossman *et al.*, 1995) montrent, à l'aide de modèles numériques, que les variations de l'importance et de la fréquence des cycles conduisent à des changements importants de la qualité de l'eau dans les réservoirs. De plus, Gauthier *et al.* (2000) parviennent à diminuer de façon significative les temps de séjour d'un réservoir d'eau potable simplement en modifiant ses cycles de remplissage et de vidange.

1.3.3.2 La géométrie

La configuration géométrique interne d'un réservoir (la forme, l'emplacement et le nombre de structures d'entrées et de sortie, la présence de chicanes, etc.) influence les écoulements qui s'y produisent et ainsi les temps de séjour.

Kennedy *et al.* (1993), font remarquer que la forme du réservoir conditionne le comportement hydraulique et donc la distribution des temps de séjour dans celui-ci. En effet, les réservoirs de forme cubique et sphérique possèdent généralement un comportement hydraulique se rapprochant d'un réacteur complètement mélangé. Alors que les réservoirs ayant un rapport hauteur/largeur ou hauteur/diamètre élevé possède généralement un comportement hydraulique se rapprochant d'un réacteur piston.

De plus, le comportement hydraulique interne peut être affecté par la disposition des structures d'entrée et de sortie du réservoir (Boulos *et al.*, 1996; Rossman et Grayman, 1999), par la présence de chicanes (Hannoun *et al.*, 1998) et par toute autre structure présente dans les réservoirs.

1.3.4 Détermination des temps de séjour dans les réservoirs

Comme on l'a vu précédemment, la connaissance des temps de séjour peut servir d'indicateur de la qualité de l'eau qui chemine dans le réseau en général et dans les réservoirs en particulier. Parce que les réservoirs sont le siège de long temps de séjour il existe plusieurs méthodes pour les évaluer : essais de traçage usuels, modèles numériques et modèle réduit. Ces méthodes sont explicitées dans la présente section. Mais auparavant, la théorie des temps de séjour va être exposée.

1.3.4.1 Théorie de la distribution des temps de séjour

C'est Danckert (1953) qui, le premier, a proposé le concept de distribution des temps de séjour. Cette distribution est une fonction qui décrit le comportement hydraulique d'un réacteur de façon statistique en associant à chaque fraction du fluide un temps de séjour dans le réacteur. La distribution des temps de séjour $E(t)$ est telle que $E(t)dt$ représente la fraction du fluide sortant du réacteur, qui possède un âge compris entre t et $t+dt$. L'aire sous la courbe de cette fonction est, par définition, égale à 1. La figure 1.2 présente une distribution des temps de séjour typique.

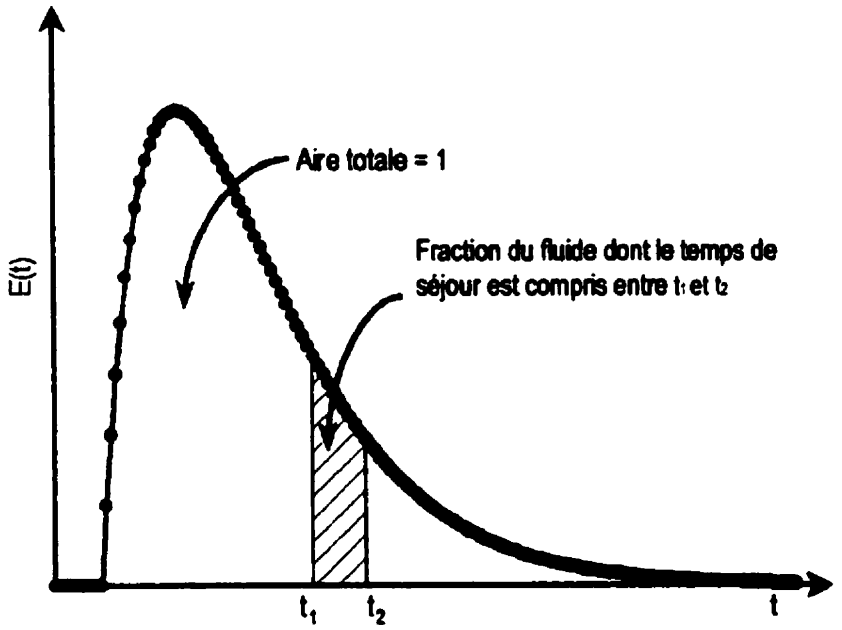


Figure 1.2 : Exemple de distribution des temps de séjour

D'une telle distribution, plusieurs indices peuvent être déduits. Ces indices servent à caractériser le comportement hydraulique du réacteur. Les principaux sont T, T_{10}, T_{50} et T_{90}. Ils sont définis comme suit :

$$T = \int_0^{\infty} tE(t)dt \tag{1.1}$$

$$F(T_{10}) = \int_0^{T_{10}} E(t)dt = 0.1 \tag{1.2}$$

$$F(T_{50}) = \int_0^{T_{50}} E(t)dt = 0.5 \tag{1.3}$$

$$F(T_{90}) = \int_0^{T_{90}} E(t)dt = 0.9 \tag{1.4}$$

1.3.4.2 Essais de traçage

Une façon simple d'obtenir directement la distribution des temps de séjour dans un réacteur existant, c'est d'effectuer un essai de traçage. L'essai débute par l'ajout d'une substance chimique non-réactive, appelée traceur, à l'entrée du réservoir. Ensuite, le changement de la concentration de cette substance en fonction du temps est observé à la sortie du réservoir. La forme du changement de la concentration en fonction du temps permet d'obtenir la distribution des temps de séjour. L'essai prend fin lorsque la concentration du traceur a atteint une valeur d'équilibre. Ceci commande que l'essai soit effectué en régime permanent. Il existe deux types d'essais de traçage : le traçage à injection instantanée et traçage à injection constante (AWWA, 1996).

Injection instantanée

Un essai de traçage par injection instantanée s'effectue en ajoutant une masse connue de traceur immédiatement à l'entrée du réservoir. Le traceur est ajouté au débit entrant en un temps très court. L'enregistrement de la concentration du traceur à la sortie du réservoir débute au même instant. La courbe de traçage ainsi obtenue peut être directement interprétée comme étant la distribution des temps de séjour du réservoir tracé. Pour faciliter la comparaison entre les différents essais effectués à l'aide de cette méthode, les axes de la courbe de traçage sont normalisés. L'axe temporel est divisé par le temps de séjour moyen (T) du réservoir tracé. L'axe de la concentration est divisé, lui, par le rapport de la masse de traceur ajoutée (m_t) et du volume du réservoir tracé (V_r) : $m_r V_r$. Le nom usuel de cette courbe est : courbe C.

Injection constante

Un essai de traçage par injection constante est effectué en ajoutant un traceur à concentration constante (C_o) directement à l'entrée du réservoir. Cette injection doit durer suffisamment longtemps pour que la concentration à la sortie du réservoir soit constante. L'enregistrement de la concentration à la sortie du réservoir débute en même

temps que l'injection. Pour la même raison que plus haut, les axes de cet enregistrement sont normalisés. L'axe temporel est divisé par le temps de séjour moyen (T) alors que la concentration est divisée par la concentration initiale du traceur (C_o). Le nom usuel de cette courbe est : courbe F.

L'information que l'on tire de ces deux types d'essais est équivalente. Une courbe F peut être obtenue en intégrant la courbe C correspondante et de la même façon une courbe C peut être obtenue en dérivant la courbe F correspondante.

L'utilisation d'un essai de traçage se limitant au régime permanent, il faut effectuer, pour obtenir de bons résultats, une série d'essais sous plusieurs conditions d'utilisation des réservoirs (niveaux différents, débits minimal, moyen et de pointe, etc.). Les distributions des temps de séjour ainsi obtenues ne peuvent nous renseigner directement sur les implications hydrauliques (temps de séjour minimal et maximal, zone morte, etc.) d'un changement précis de la consommation. Ces essais doivent être repris, s'il y a des modifications physiques à effectuer sur le réservoir (AWWA, 1996).

Finalement, un essai de traçage ne peut être reconduit, dans le cas d'une injection instantanée, avant que tout le traçeur soit sorti du réservoir ou, dans le cas d'une injection constante, avant que la concentration du traceur ait atteint la concentration d'équilibre. Ce temps correspond dans les deux cas à environ 3 à 4 fois le temps de séjour moyen (T) du réservoir tracé, sauf dans le cas des réservoirs pistons où ce temps est beaucoup plus court.

1.3.4.3 Estimation des temps de séjour par des modèles numériques

Il existe deux classes principales de modèles numériques pour modéliser le comportement de l'eau traitée dans les réservoirs d'eau potable : les modèles hydrodynamiques et les modèles systèmes.

Modèles hydrodynamiques

Les modèles hydrodynamiques utilisent des équations mathématiques qui tentent de décrire les écoulements tridimensionnels qui ont lieu dans les réservoirs. Ces équations sont basées sur la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. De plus, ils incorporent à l'aide d'équations paramétriques d'autres phénomènes, qui ne sont pas couverts par ces équations, tels la turbulence, la diffusion, les écoulements biphasé et les changements de phase dus à l'écoulement (Grayman *et al.*, 1996).

Ces modèles divisent le domaine de l'écoulement (le réservoir) en un ensemble de nœuds et d'éléments, appelés maillage. Cette division est basée sur la géométrie du domaine. Les équations sont alors ajustées pour décrire l'activité du fluide à l'entrée et à la sortie de chaque maille. De façon générale, plus les mailles sont fines, plus la précision des résultats et le temps de calcul sont élevés.

Ce type d'approche est applicable à presque toutes les situations d'utilisations d'un réservoir. On l'utilise pour faire la conception des ouvrages, la mesure de la performance des réservoirs déjà installés et l'évaluation des impacts d'éventuelles modifications.

Cette approche a été utilisée, avec succès dans plusieurs travaux de recherche (Brocard *et al.*, 1998; Hannoun *et al.*, 1998 et Ta, 1998) pour déterminer le comportement hydraulique de réservoirs d'eau potable, sous différentes conditions d'utilisation en régime permanent. Ces simulations ont permis de déterminer quelles conditions influent sur la qualité de l'eau. Seul Ta (1998) effectue des simulations en régime non-permanent ce qui lui permet de montrer que les variations de la demande affectent de façon significative la distribution des temps de séjour dans le réservoir.

Toutefois de tels modèles comportent les inconvénients suivants : ils sont sensibles aux conditions initiales et aux conditions frontières; les caractéristiques de l'écoulement

peuvent impliquer certains phénomènes qui sont mal décrit par les modèles théoriques (par exemple : turbulence et écoulement biphasé); les coûts sont élevés pour acquérir ou pour développer un modèle; ils nécessitent des gens qualifiés pour calibrer le modèle et interpréter leurs résultats et les temps de simulation demeurent élevés (Grayman et al. 1996).

Modèles systèmes

Les modèles systèmes tentent d'établir des liens entre l'entrée et la sortie du système. Les processus qui ont lieu dans le réservoir ne sont pas décrits explicitement dans l'espace (modèles de type boîte noire). Ils sont représentés par des relations statistiques ou empiriques. Les 2 modèles système les plus communs sont le réacteur complètement mélangé et le réacteur piston. La figure 1.3 présente la distribution des temps de séjour de ces deux modèles.

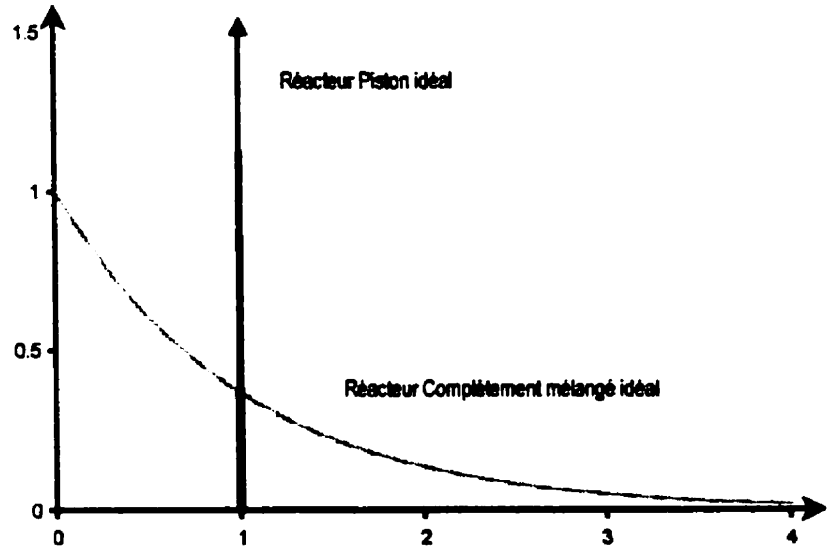


Figure 1.3 : Distributions de temps de séjour d'un réacteur piston et d'un réacteur complètement mélangé

Un modèle système plus élaboré peut contenir un ensemble de systèmes élémentaires représentant divers comportements d'un réservoir : zones mortes, court-circuit,

écoulement piston etc. Ces systèmes élémentaires peuvent être assemblés soit en série, soit en parallèle ou en série et en parallèle (Brumo *et al.*, 1972).

En utilisant un modèle système à plusieurs compartiments (de 1 à 5 selon le cas), plusieurs auteurs (Clark et Boulos, 1996; Grayman et Clark, 1993 et Mau *et al.*, 1995) ont caractérisé avec succès le comportement hydraulique de différents réservoirs d'eau potable.

Ces modèles systèmes sont, de par leur simplicité, des modèles qui demandent peu de temps de calcul. Conséquemment, ils peuvent être inclus dans des modèles de simulation de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution.

Cependant, pour établir les paramètres qui régissent un modèle, il faut effectuer une série d'analyses sur un réservoir particulier ou posséder une bonne base de données expérimentale. Une fois ces paramètres établis, il faut être prudent lors de l'utilisation du modèle, car ils peuvent être liés à la température de l'eau ou à d'autres phénomènes particuliers. Ainsi, si les conditions d'utilisation diffèrent significativement des conditions qui ont servi à l'élaboration du modèle, celui-ci peut être tout simplement inadéquat. De même, toutes modifications physiques apportées à un réservoir peut rendent le modèle caduc (Clark et Boulos, 1996; Grayman et Clark, 1993 et Mau *et al.*, 1995).

1.3.4.4 Estimation des temps de séjour par les modèles réduits

Les modèles réduits sont simplement une représentation à l'échelle d'un système réel. Les principes qui régissent les modèles réduits sont bien établis, ils sont basés sur le concept de similitude. De tels modèles peuvent être utilisés pour analyser le comportement d'un réservoir sous diverses conditions, notamment, pour étudier l'effet de nouvelles constructions dans un réservoir. De plus, ils ont l'avantage de donner une

représentation tangible du comportement hydraulique du réservoir étudié. Ils peuvent également servir à dériver des paramètres pour des modèles numériques.

Cette approche a été utilisée par plusieurs auteurs (Grayman *et al.*, 1996; Rossman et Grayman, 1999 et Woodward *et al.*, 1998) pour évaluer l'impact de modifications physiques sur des réservoirs d'eau potable. Selon ces auteurs, cette méthode demeure d'une utilité appréciable pour valider les différentes configurations d'aménagement d'un réservoir.

Toutefois, ces modèles coûtent généralement cher et sont sujets aux facteurs d'échelle. Ceci peut conduire à une mauvaise représentation des phénomènes en jeux dans le réservoir modélisé, comme, par exemple, dans l'étude de Woodward (1998).

1.4 Vers une nouvelle technique de traçage

Comme on l'a vu, il existe plusieurs techniques pour déterminer la distribution des temps de séjour dans un réservoir d'eau potable. Chacune d'elles possède des avantages et des inconvénients. Dans cette recherche, nous nous proposons d'améliorer l'une de ces techniques : les essais de traçage. Le but est de rendre possible l'utilisation de cette technique en régime non-permanent et de pouvoir l'utiliser en continu. Cette technique, rappelons-le, ne peut être utilisée qu'en régime permanent et ne peut être reconduite qu'à tous les 3 à 4 fois le temps de séjour moyen (T) du réservoir étudié.

Ainsi, cette nouvelle technique permettrait de déterminer la distribution des temps de séjour d'un réservoir en temps réel, afin de détecter rapidement les impacts de toutes les modifications qu'il subit. Par exemple, un bris de pompe ou un changement dans les cycles de remplissage et de vidange du réservoir pourrait induire de long temps de séjour dans le réservoir et mettre en péril la qualité de l'eau qui y séjourne. Une modification de la demande ou simplement un changement de température de l'eau qui entre dans le

réservoir, pourraient avoir les mêmes conséquences. Mais, avec la distribution des temps de séjour en main, il serait possible d'intervenir et d'éviter le prolongement d'une telle situation. De plus, cette technique pourrait être couplée à un système de simulation de la qualité de l'eau pour l'ensemble du réseau de distribution.

Pour atteindre ce but, nous allons utiliser les techniques du traitement du signal. Ces techniques, qui ont d'abord été élaborées en électronique, ont été développées pour caractériser un système (par exemple : une puce électronique), seulement en étudiant les réactions de celui-ci, à un signal d'entrée. Ces techniques sont bien établies, bien documentées et ont été appliquées, avec succès, à plusieurs domaines (Bendat et Piersol, 1993). Ainsi, l'approche utilisée dans cette recherche consiste à enrichir le signal produit lors d'un essai de traçage pour que celui-ci puisse être analysé à l'aide de ces outils.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La mise au point d'une nouvelle technique de traçage en régime non-permanent, en utilisant les techniques de traitement du signal, a nécessité de nombreux essais. Dans une première étape, deux techniques du traitement du signal ont été adaptées et testées à l'aide de simulations numériques: la corrélation croisée et la représentation temps-fréquence du signal. Cette dernière s'étant montrée la plus prometteuse, elle a été essayée au laboratoire pour confirmer les résultats obtenus.

Ce chapitre expose la procédure utilisée pour la mise en œuvre de ces essais ainsi que la théorie sous-jacente, en prenant soin d'établir les liens entre la théorie et son application au domaine du traçage dans les réservoirs.

D'abord quelques éléments théoriques du traitement des signaux sont définis. Ces éléments constituent la base des techniques d'analyses utilisées dans ce travail et sont détaillées aux chapitres 3 et 4. Ensuite, le modèle numérique et son mode de fonctionnement sont décrits. Finalement, le montage expérimental et les étapes pour réaliser les essais au laboratoire sont présentés.

2.1 Théorie du signal et de son traitement

2.1.1 Le signal

Un signal est la représentation physique de l'information qu'il transporte d'une source à une destination (de Coulon 1990). Dans le cadre du traçage dans les réservoirs, le signal est la variation de la concentration d'un traceur en fonction du temps. L'information qu'il transporte est la forme de cette variation. Sa source est le point d'injection et sa destination le point d'échantillonnage du signal.

2.1.2 Le traitement du signal

Le traitement des signaux est la discipline technique qui a pour objet l'interprétation des signaux porteurs d'informations (de Coulon 1990). Ces techniques sont multiples. Dans ce travail deux de ces techniques ont été utilisées et adaptées au traçage dans les réservoirs : la corrélation croisée et la représentation temps-fréquence du signal. Mais, avant de pouvoir les décrire il faut d'abord définir l'analyse spectrale.

2.1.3 L'analyse spectrale

L'analyse spectrale est la décomposition d'une grandeur variant en fonction du temps en ses composantes fréquentielles (de Coulon 1990). Dans le cas du traçage dans les réservoirs, l'analyse spectrale est effectuée sur la variation de la concentration du traceur en fonction du temps.

Cette analyse s'effectue à l'aide d'un opérateur mathématique : *la transformée de Fourier*. La transformée de Fourier d'un signal temporel $x(t)$ est définie par la relation suivante :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{(-2\pi f t)} dt \qquad (2.1)$$

Ainsi, la nouvelle fonction $X(f)$, appelée spectre, décrit la répartition de l'énergie du signal $x(t)$ en fonction de la fréquence f. Pour réintégrer le domaine temporel il suffit d'utiliser l'opérateur inverse :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi f t} df \qquad (2.2)$$

Ces opérateurs s'évaluent facilement numériquement. Il existe plusieurs algorithmes de résolution (Cartwright 1990; de Coulon 1990). Ces algorithmes sont inclus dans la plupart des logiciels de mathématique dont celui utilisé pour ce travail : MATLAB.

2.1.4 La corrélation croisée

La corrélation croisée est une fonction qui mesure la similitude entre deux fonctions décalées dans le temps. Elle se définit comme suit :

$$\varphi_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t)y(t+\tau)dt \qquad (2.3)$$

La fonction ainsi obtenue traduit l'évolution de la similitude entre *x(t)* et *y(t)* en fonction du paramètre de translation relative τ. La fonction *x*(t)* est la conjuguée de *x(t)*. Dans le cas du traçage dans les réservoirs, la fonction *x(t)* peut représenter la variation de la concentration d'un traceur en fonction du temps à l'entrée du réservior et la fonction *y(t)* peut représenter la variation de la concentration du traceur à la sortie du réservoir. Alors la fonction obtenue par la corrélation croisée peut s'interpréter comme étant l'évolution de la similitude entre les deux signaux en fonction d'un décalage temporel τ.

Toutefois cette fonction est difficile à évaluer dans le domaine temporel. Mais si on décompose les deux fonctions à corréler selon leurs composantes fréquentielles, la corrélation croisée exprimée en fonction des fréquences devient simplement :

$$\Phi_{xy}(f) = X^*(f)Y(f) \qquad (2.4)$$

Pour obtenir la fonction désirée $\phi_{xy}(t)$ il suffit d'exprimer $\Phi_{xy}(f)$ en fonction du temps en utilisant la transformée inverse de Fourier (Cartwright 1990; de Coulon 1990).

2.1.5 Représentation temps-fréquence d'un signal

La représentation temps-fréquence d'un signal décrit la variation du contenu spectral d'un signal en fonction du temps (Boudreaux-Bartels 1996). Plusieurs techniques

permettent d'atteindre ce résultat : le spectrogramme et la distribution de Wigner. Le spectrogramme est la technique la plus simple et la plus utilisée (Cohen 95). C'est la technique qui a été retenue pour le traitement des essais de traçage dans les réservoirs.

La technique du spectrogramme consiste concrètement à calculer le spectre d'un signal sur une série de *fenêtres temporelles* et à exprimer ces résultats en fonction du temps. Une fenêtre temporelle est simplement un segment du domaine temporel total du signal.

2.2 Les simulations numériques

Le but des simulations numériques est de représenter numériquement la propagation d'un traceur dans un réservoir. C'est-à-dire que le modèle doit avoir la capacité de traiter le signal résultant de l'injection d'un traceur à l'entrée du réservoir et de produire le signal de sortie associé à celui-ci. Une fois en possession du signal d'entrée et du signal de sortie, les différentes méthodes de traitement des signaux peuvent être adaptées et appréciées.

2.2.1 Le modèle numérique

Le modèle numérique utilisé est un modèle système constitué de J réacteurs complètement mélangés en série. Il indique la concentration d'un traceur injecté instantanément en fonction du temps à la sortie d'un réacteur. Cette concentration est définie par :

$$C_s(t) = E(t) = \frac{m_o}{V}\frac{J^J}{(J-1)!}\left(\frac{(t-d)}{T}\right)^{J-1} e^{-J\frac{(t-d)}{T}} \qquad (2.5)$$

où $C(t)$ représente la concentration du traceur en fonction du temps t (cette fonction est la distribution des temps de séjour $E(t)$), m_o la masse de traceur injectée, V le volume des J réacteurs, T le temps de séjour moyen et d le décalage ou le temps minimale de

transfert (Tchobanoglous et Schroeder, 1987). Cette équation est valide seulement pour une impulsion et en régime permanent.

Pour décrire la concentration d'un traceur injecté sous une forme quelconque, à l'entrée d'un réacteur, il suffit d'effectuer le produit de convolution entre la fonction (2.5) et celle qui décrit le signal injecté à l'entrée du réservoir. Cette nouvelle fonction, se défini comme suit :

$$C_s(t) = \int_0^t C_e(u)E(t-u)du \qquad (2.6)$$

où $C_e(u)$ est la concentration du traceur à l'entrée du réservoir en fonction du temps u.

Cette équation a été programmée dans le logiciel de programmation et de mathématique MATLAB® version 5 sous le nom de *rcmg_vc()*. L'algorithme de cette fonction se trouve en annexe. Pour faire une simulation, il faut spécifier les paramètres qui décrivent le réacteur soit : le décalage entre l'émision du signal d'entrée et sa réception à la sortie du réservoir (en seconde), le nombre de réacteur complètement mélangé et le temps de séjour moyen du réservoir (en seconde). Il faut décrire également le signal d'entrée.

Le signal d'entrée, qui représente la variation de la concentration du traceur en fonction du temps à l'entrée du réservoir, est généré dans le logiciel MATLAB® à partir de la bibliothèque de fonctions prédéfinies incluse dans celui-ci. Les principales fonctions prédéfinies qui ont été utilisées sont la fonction *rand()* pour les signaux aléatoires et la fonction *sin()* pour les signaux sinusoïdaux.

Finalement, une fois ces paramètres spécifiés, le signal de sortie est directement généré par le modèle numérique.

2.3 Les essais en laboratoire

Le but des essais laboratoire est de valider les résultats obtenus lors des essais numériques et de permettre d'effectuer les ajustements nécessaires à la méthode d'analyse. La méthode d'analyse va être ainsi confrontée à des conditions plus sévères d'utilisation que lors des essais numériques.

Les essais de traçage ont été réalisés sur un réservoir à échelle réduite du laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal. Ce réservoir a un volume théorique de 0,5 m^3. Le traceur utilisé est la rhodamine WT. Il est détectable à faible dose, conservatif et économique. L'échantillonnage s'effectue par prélèvement direct à la sortie du bassin. L'analyse s'effectue ensuite à l'aide d'un spectrophotomètre.

2.3.1 Le montage expérimental

Le montage expérimental doit permettre de reproduire à échelle réduite l'injection et la propagation d'un traceur dans un réservoir. Le système d'injection doit permettre l'injection de signaux sinusoïdaux à fréquences variables à l'entrée du réservoir.
Ce montage expérimental est présenté à la figure 2.1, il est composé :

- d'un point d'injection;
- d'un système d'injection;
- d'une conduite d'entrée;
- d'un réservoir muni de chicanes;
- d'une conduite de sortie;
- d'un point d'échantillonnage.

L'alimentation en eau du montage est assurée par le réseau de distribution de l'eau potable de l'école via la conduite d'entrée. Le débit est mesuré par un débitmètre et la

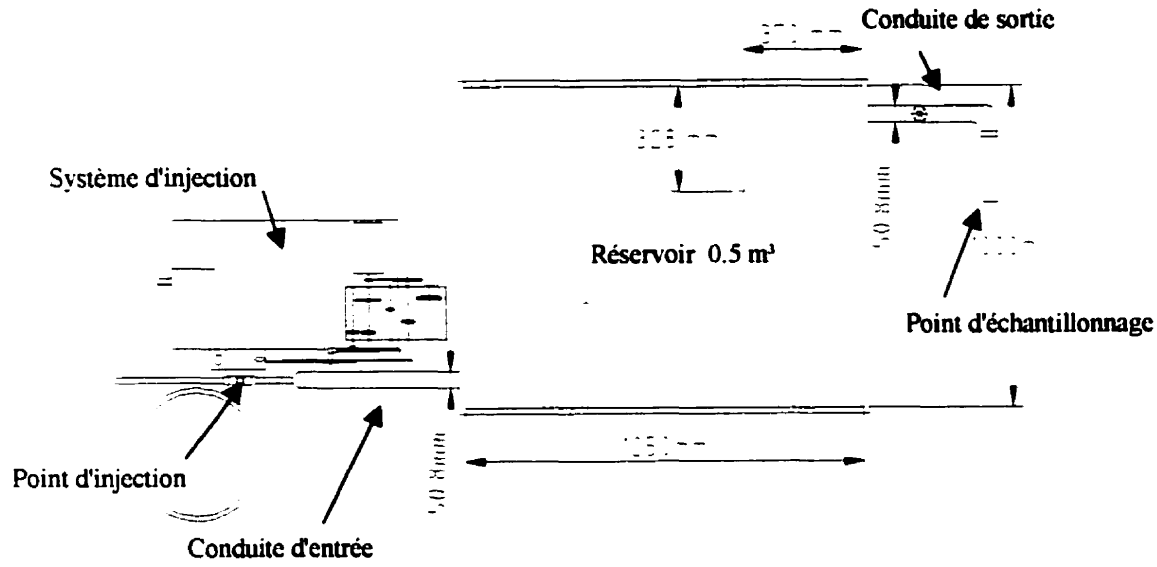


Figure 2.1 : Le montage expérimental

pression est maintenue constante grâce à un régulateur de pression. Ces appareils sont situés en amont du point d'injection. Le niveau de l'eau dans le réservoir est maintenu par une vanne située sur la conduite de sortie.

2.3.1.1 Le système d'injection

Le système d'injection doit permettre l'injection de signaux sinusoïdaux dans le réservoir. La fréquence des ces signaux doit être variable ainsi que leur amplitude. Ce système d'injection est présenté aux figures 2.2 et 2.3, il est composé :

- d'un réservoir de solution traçante;
- d'une pompe;
- d'un orifice rectangulaire de 2 mm de hauteur et de 10 cm de largeur;
- d'un entonnoir;
- d'une roue de 20 cm de diamètre ayant un axe de rotation excentré longitudinalement de 5 cm.

- d'un moteur à courant continu.
- d'un démultiplicateur;
- d'une glissière;
- d'un potentiomètre.

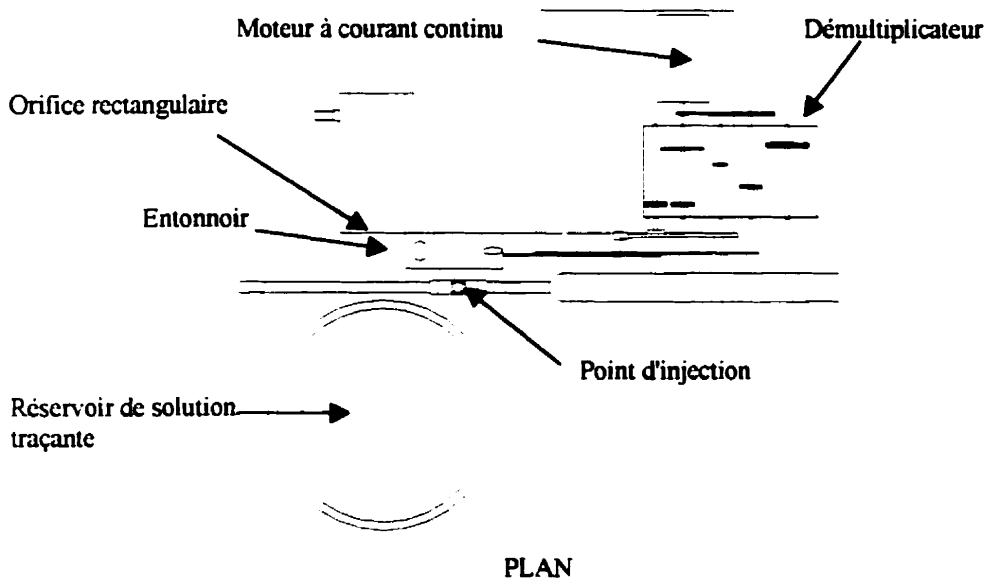


Figure 2.2 : Le système d'injection (plan)

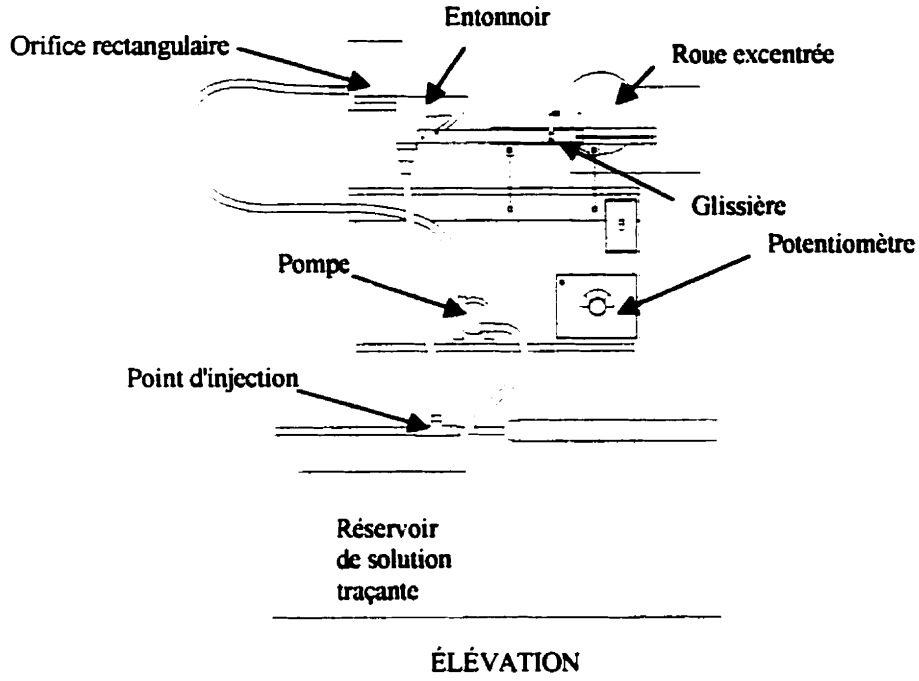


Figure 2.3 : Le système d'injection (élévation)

Ce système permet d'injecter la solution traçante sous la forme d'un signal sinusoïdal. De la façon suivante :

1. D'abord, la pompe alimente en régime permanent l'orifice rectangulaire en solution traçante;
2. Ensuite, la roue en tournant déplace la glissière qui à son tour entraine l'entonnoir selon un mouvement sinusoïdal;
3. Ainsi, l'entonnoir en présentant sous l'orifice une section qui varie sinusoïdalement dans le temps, collecte une portion du débit de la solution traçante, qu'il achemine vers le point d'injection. Le surplus est recyclé.

La fréquence du signal est déterminée par la vitesse de rotation de la roue qui est elle-même réglée par le potentiomètre. L'amplitude du signal injecté est déterminée par la concentration et par le débit de la solution traçante.

2.3.1.2 Réalisation d'un essai

Les étapes à suivre pour réaliser un essai de traçage en laboratoire sont les suivantes :

1. Préparation de la solution de traçage. La concentration minimale qui peut être utilisée est celle établie par l'appareil de détection. Dans notre cas, la concentration minimale est de 2 x 10^{-07} partie par litre (p/l) (car, la concentration initiale de la solution mère est inconnue);
2. Ajustement du débit moyen dans le système d'injection. Ce débit varie de 0.02 à 0.1 l/s selon les essais;
3. Ajustement du débit dans le réservoir à tracer. Ce débit varie de 0.3 à 0.4 l/s selon les essais. Ce qui donne des temps de rétention hydraulique situés entre 1000 et 1330 s;
4. Ajustement du potentiomètre selon la fréquence choisie. Cette fréquence est située entre 0.008 Hz et 0.012 Hz;
5. Démarrage de l'injection du traceur et démarrage de l'échantillonnage. L'échantillonage consiste en un prélevement d'un échantillon du signal de sortie directement dans la conduite de sortie à toutes les 30 s. Pour ce faire, les cellules qui seviront à l'analyse à l'aide du spectrophotomètre, sont directement utilisés;
6. Arrêt de l'injection;
7. Arrêt de l'échantillonnage après une période double du temps de rétention hydraulique du bassin suivant l'arrêt de l'injection;
8. Analyse des échantillons au laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre (Spectronic 1001 plus, de Milton Roy) fonctionnant sous une longueur d'onde d'absorption spectrale de 560 nm.

Les résultats obtenus sont ensuite traités avec les techniques d'analyse du traitement du signal.

CHAPITRE III

LA CORRÉLATION CROISÉE

La corrélation croisée est une application linéaire qui permet d'évaluer l'évolution de la similitude entre deux signaux dans le temps (de Coulon 1990). Elle peut être utilisée pour déterminer le temps de propagation d'un signal à travers plusieurs chemins parallèles et distincts. Cette technique est principalement utilisée en acoustique et en vibration (Bendat 1993). La figure 3.1, tirée de Bendat (1993) montre une représentation schématique d'un tel système. Le signal $x(t)$ se propage à travers n chemins. Chacun de

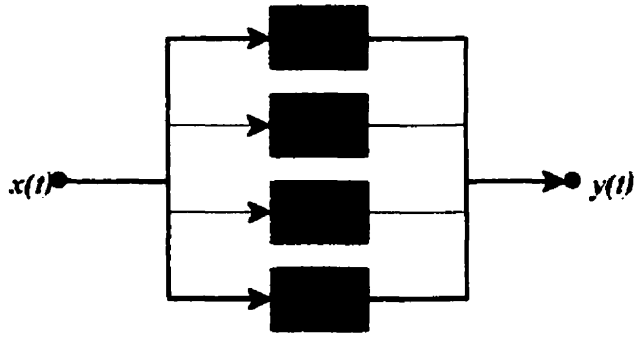


Figure 3.1 : Un signal se propageant à travers des chemins différents

ces chemins modifie le signal selon une fonction qui le caractérise, $H_n(f)$. Le signal $y(t)$ est constitué de la somme de ces modifications. Ainsi, si la corrélation croisée est appliquée aux signaux $x(t)$ et $y(t)$, ses sommets peuvent servir à identifier le temps de propagation et l'importance énergétique de chaque chemin. Pour que cela soit possible, il faut que le décalage entre chaque chemin soit suffisamment grand pour permettre une identification nette de chaque sommet (Bendat 1993).

Or, un réservoir d'eau potable peut être considéré comme étant constitué d'un grand nombre de chemins indépendants. Ces chemins sont parcourus par les particules du fluide. Le temps de propagation d'une certaine quantité de ces particules selon un

chemin est le temps de séjour de celui-ci. L'importance énergétique d'un chemin peut être assimilée au débit passant par ce chemin.

Cependant, une condition essentielle pour obtenir de bon résultat par la corrélation croisée n'est pas respectée : les chemins, dans un véritable réservoir, sont inter-reliés. Ce qui implique ceci : le décalage entre les chemins ne permet pas une identification nette de chacun des chemins. Les réponses dues aux chemins vont interférer. Ainsi, en appliquant la méthode de la corrélation croisée au traçage dans les réservoirs, nous faisons l'hypothèse que la fonction obtenue sera analogue à la distribution des temps de séjour du réservoir étudié.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle peut être utilisée en régime non-permanent. En effet, lorsque cette méthode est appliquée sur deux séries temporelles (signaux $x(t)$ et $y(t)$) elle fournit une image de la distribution des temps de séjour dans le réservoir pour la période analysée. Si cette méthode est répétée à $t+i$, une nouvelle distribution des temps de séjour sera obtenue. Ainsi en répétant continuellement la méthode, la distribution des temps de séjours se modifiera et reflétera les modifications de régime dans le réservoir tracé. La méthode de traçage usuelle permet un taux de rafraîchissement à tous les 4 T. Avec la méthode d'analyse par corrélation croisée, peut-être est-il possible de faire mieux.

Ce chapitre présente d'abord la méthode d'analyse. Ensuite, il présente les différents essais numériques ainsi que l'analyse de leurs résultats. Finalement, l'appréciation générale de la méthode est donnée.

3.1 Méthode d'analyse par corrélation croisée

La méthode consiste à appliquer numériquement l'équation 2.3 au traçage dans les réservoirs. La fonction $x(t)$ représente le signal à l'entrée du réservoir et $y(t)$ le signal

obtenu à sa sortie. L'équation 2.3 est calculée par 2.4 en utilisant les fonctions prédéfinies de MATLAB pour la transformée de Fourier et de son inverse: *fft()* et *ifft()*. La fonction *jcorrel3()*, fournie en annexe, systématise ce calcul.

Ensuite, la fonction résultant de la corrélation croisée est normalisée. C'est-à-dire que son amplitude est divisée par l'aire sous sa courbe afin qu'elle soit associée à la distribution des temps de séjour du réservoir analysé.

La qualité des résultats obtenus varie beaucoup selon le signal d'entrée utilisé. Plus le signal transporte de l'information et plus les résultats sont probants. Le signal idéal est celui qui comporte une quantité infinie d'information (fréquences, amplitudes et phases distinctes) répartie aléatoirement sur un domaine temporel infini (de Coulon 1990, Cohen 1995 et Bendat et Piersol 1993). Évidemment, un tel signal, est physiquement irréalisable.

3.2 Les essais numériques

Les essais numériques ont été effectués sur des réservoirs théoriques ayant le comportement hydraulique de 2 types de réacteurs idéaux dont on connaît la réponse : le réacteur complètement mélangé (R.C.M.) et le réacteur piston. Le comportement réel d'un réservoir est situé entre ces deux extrêmes. Ainsi, les résultats de ces essais numériques peuvent servir de balise pour apprécier la performance de la méthode face à un réservoir quelconque.

Dans le cadre de ce projet, les essais ont été réalisés en régime permanent, afin de mettre au point la méthode d'analyse. Lorsqu'elle aura fait ses preuves en régime permanent, elle pourra être appliquée à un régime non-permanent.

3.2.1 Réacteur complètement mélangé et signal aléatoire

Le premier cas essayé est celui d'un réacteur idéal complètement mélangé fonctionnant en régime permanent. Une particule de solution traçante injectée dans ce réservoir se mélange instantanément avec le contenu total du réservoir. Ce réservoir est simulé par la fonction *rcmg_vc()* avec les paramètres suivants : temps de rétention hydraulique (T) de 1500 sec., décalage (dec) de 0 sec. et nombre de réacteur complètement mélangé (J) égale 1. Le signal à l'entrée du réservoir est un signal aléatoire généré dans MATLAB® à l'aide de la fonction *signal_666()*, fournie en annexe. Les figures 3.2 a) et b) montrent respectivement ce signal et la réponse du réservoir.

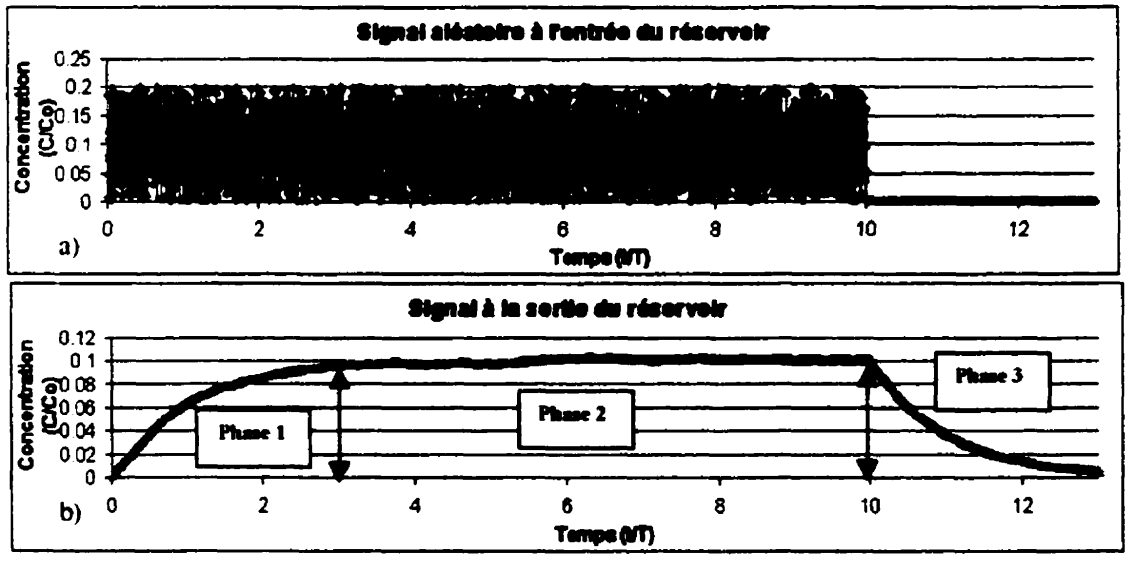


Figure 3.2 : a) Signal aléatoire à l'entrée d'un R.C.M. b) Réponse à la sortie du réservoir

Le comportement de la réponse du réservoir peut être divisé en 3 phases (indiquées à la figure 3.2 b) :

1) Croissance de la concentration du temps t/T = 0 à environ t/T = 3;
2) Équilibre ou faible variation de la concentration de t/T = 3 à t/T = 10;
3) Décroissance de la concentration pour t/T = 10 à t/T = 13.

Dans la première phase, le réservoir semble détruire la quasi-totalité de l'information du signal d'entrée. En effet, l'amplitude de la concentration augmente constamment vers la concentration moyenne du signal d'entrée, sans égard aux extrémums de celui-ci. Ceci

indique que les fréquences employées dans le signal aléatoire sont trop rapides pour être transmises au réservoir dans cette phase. Ce point sera traité en détail à la section 3.2.5.

Dans la seconde phase, l'augmentation de la concentration du traceur se stabilise vers la valeur moyenne de la concentration du signal d'entrée. Cependant, l'amplitude de la concentration semble varier selon les mêmes fréquences que le signal d'entrée. Ceci n'est pas visible sur la figure 3.2 par contre, les données numériques montrent bien ce phénomène. Cette variation demeure toutefois très faible. Mais, elle indique que dans cette phase, l'information est mieux préservée que dans la première.

Dans la troisième phase, toute l'information semble être détruite. La concentration du traceur décroît constamment.

En somme, une partie importante de l'information contenue dans le signal d'entrée est détruite par ce type de réservoir. Maintenant, il faut vérifier si, malgré tout, la corrélation croisée peut nous informer sur la distribution des temps de séjour dans ce réservoir.

La corrélation croisée est appliquée directement sur l'ensemble des points des signaux d'entrée et de sortie à l'aide de la fonction *jcorrel3()*. La fonction obtenue est présentée à la figure 3.3 a). Cette fonction comporte très peu de similitude avec la distribution théorique des temps de séjour qui est présentée à la figure 3.3 b). Elle présente cependant un maximum au temps de séjour moyen du réservoir ($\tau / T = 1$).

Si la fonction obtenue par la corrélation croisée est considérée analogue à une distribution des temps de séjour, elle révèle un T_{10} = 0.575 t/T, T_{50} = 2.980 t/T et un T_{90}

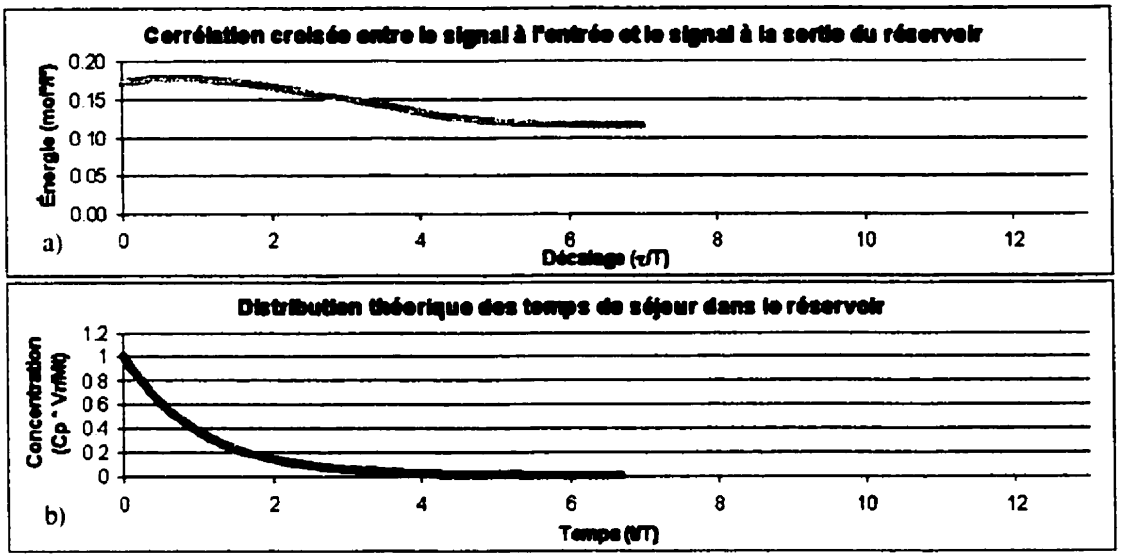


Figure 3.3 : a) Corrélation croisée entre le signal à l'entrée et la signal à la sortie d'un R.C.M
b) Distribution théorique des temps de séjour d'un R.C.M.

= 6.125 t/T. Ceci correspond à des erreurs de 442 %, 330 % et 167 % respectivement, par rapport à la distribution théorique des temps de séjour. Le tableau 3.1 présente le détail de ces résultats médiocres.

Tableau 3.1 : Erreurs entre la courbe théorique de la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un R.C.M.

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur (%)
T_{10}	0.106	0.575	442%
T_{50}	0.693	2.980	330%
T_{90}	2.292	6.125	167%

3.2.2 Réacteur piston et signal aléatoire

Le second cas analysé est celui d'un réacteur idéal piston. Un réservoir qui a un comportement de ce type provoque une simple translation temporelle du signal d'entrée, comme s'il s'agissait d'une conduite sans friction. Ce comportement a été simulé à l'aide

de la fonction *rcmg_vc()* avec les paramètres suivants : temps de rétention hydraulique (T) de 1500 sec., décalage (dec) de 0 sec. et le nombre de réacteurs complètement

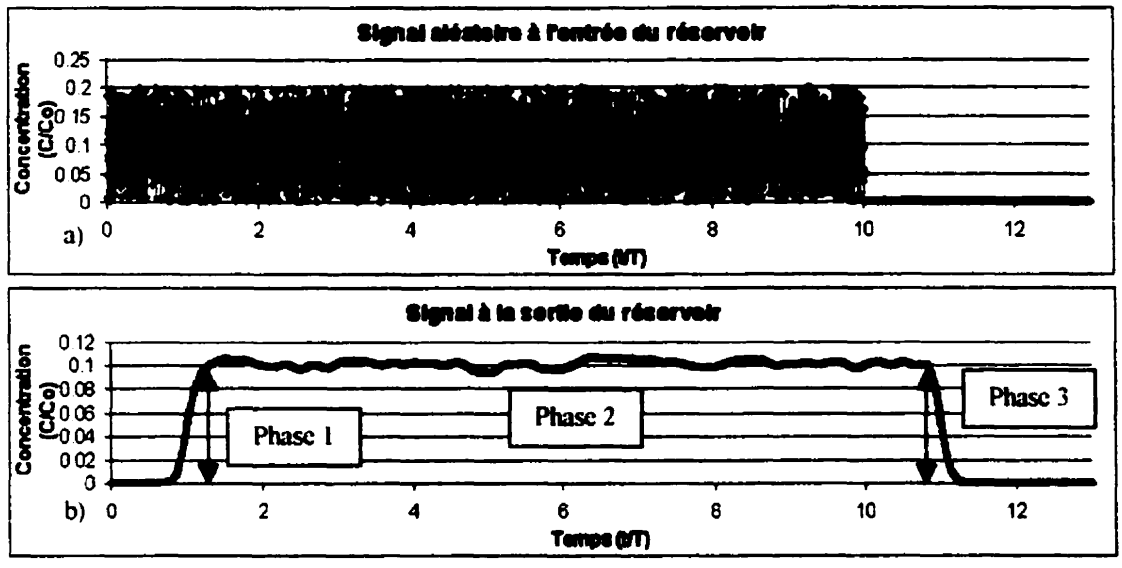


Figure 3.4 : a) Signal aléatoire à l'entrée d'un réservoir ayant le comportement d'un réacteur piston
b) Réponse à la sortie du réservoir.

mélangés (J) de 100 (pour un véritable réacteur piston J = infini). Le signal à l'entrée du réservoir est le même que celui utilisé à la section 3.2.1. La figure 3.4 a) montre ce signal alors que la figure 3.4 b) montre la réponse du réservoir à ce signal.

Comme à la section 3.2.1, le signal de sortie peut être divisé en trois phases (présentées à la figure 3.4 b) :

1. Croissance de la concentration de t/T = 0.77 à t/T = 1.35;
2. Équilibre ou faible variation de la concentration de t/T = 1.35 à t/T = 10.8;
3. Décroissance de la concentration pour t/T = 10.8 à t/T =11.3.

Les remarques de la section 3.2.1 s'appliquent dans le cas du réacteur piston. Seule la longueur des phases varie. Les phases 1 et 3 sont beaucoup plus courtes. En fait, dans un cas vraiment idéal (J=infini) ces phases n'existent plus. Ceci est intéressant, car elles correspondent à des endroits où l'information est particulièrement altérée. De même, la longueur de la phase 2, phase où la qualité de l'information est de meilleure qualité, est plus longue pour le cas du réacteur piston. De plus, la variation de l'amplitude dans cette

phase est légèrement plus importante que dans le cas d'un réacteur complètement mélangé.

Ces considérations semblent indiquer que la corrélation croisée appliquée au signal d'entrée et au signal de sortie, devrait donner de meilleurs résultats que ceux obtenus en 3.2.1.

De la même façon qu'a la section 3.2.1, la corrélation croisée a été appliquée à la totalité des signaux d'entrée et de sortie et ensuite, elle a été analysée comme étant une distribution des temps de séjour. La figure 3.5 a) présente la fonction obtenue, alors que la figure 3.5 b) présente la distribution théorique des temps de séjour du réservoir.

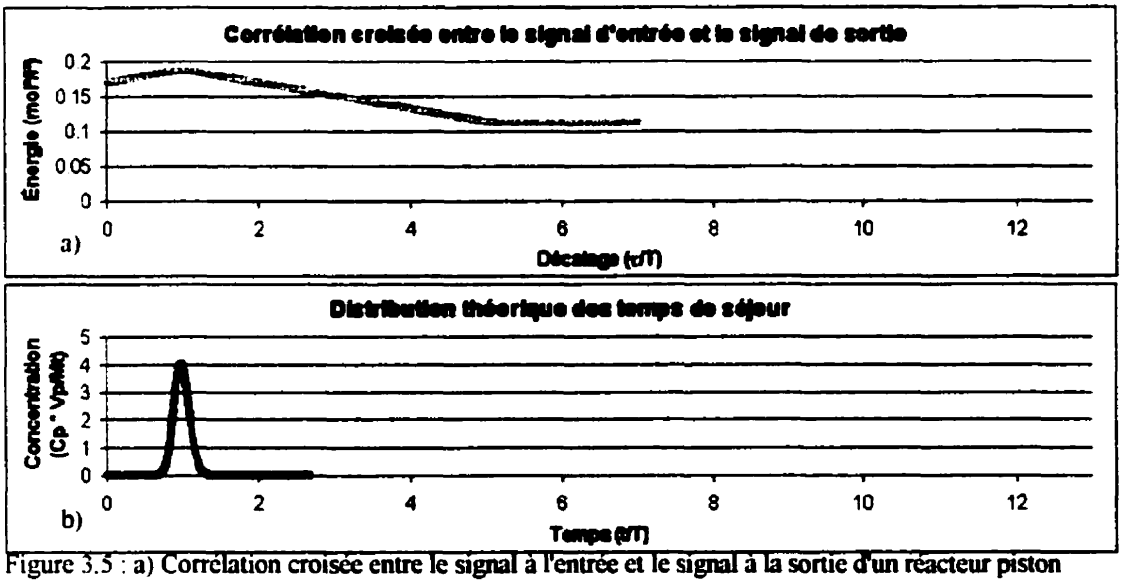


Figure 3.5 : a) Corrélation croisée entre le signal à l'entrée et le signal à la sortie d'un réacteur piston
b) Distribution théorique des temps de séjour d'un réacteur piston

Le tableau 3.2, montre les valeurs obtenues pour les T_{10}, T_{50} et T_{90} de ces deux courbes.

Tableau 3.2 : Erreurs entre la courbe théorique de la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un réacteur piston.

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.874	0.576	34%
T_{50}	0.997	2.906	191%
T_{90}	1.130	6.107	440%

Les résultats obtenus pour ce réacteur sont meilleurs que ceux obtenus à la section 3.2.1, mais ils demeurent très décevants.

Afin d'améliorer ces résultats une série de modifications fût effectuée sur la méthode d'analyse. Dans les prochaines sections ne sont présentées, que celles qui semblent avoir un certain intérêt.

3.2.3 Corrélation croisée sur les phases 2

Afin d'améliorer les résultats obtenus précedement, la corrélation croisée est appliquée à la partie informative du signal de sortie : la phase 2 et à la partie équivalente du signal d'entrée. Cette partie équivalente est simplement le signal d'entrée sous tendu par le domaine temporel de la phase 2. En procédant ainsi, l'analyse peut être réalisée sur des signaux centrés. Ce qui devrait contribuer à améliorer les résultats (Bendat 1993, de Coulon 1990 et Cohen 1995). Toutefois, toute modification effectuée sur un signal détruit une partie de l'information qu'il contient (de Coulon 1990).

3.2.3.1 Réacteur complètement mélangé

Les signaux analysés sont les mêmes qu'à la section 3.2.1. Il s'agit encore d'un signal d'entrée aléatoire d'une durée de 10 T et d'un signal de réponse analogue à celui d'un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé ayant un T = 1500 sec. et fonctionnant en régime permanent.

Par contre, le signal d'entrée analysé est le signal d'entrée soustrait de la valeur moyenne de son amplitude et amputé des phases 1 et 3. Alors que le signal de sortie analysé est le signal de sortie amputé des phases 1 et 3 et soustrait de la valeur moyenne de l'amplitude du signal amputé. La figure 3.6 montre ces signaux.

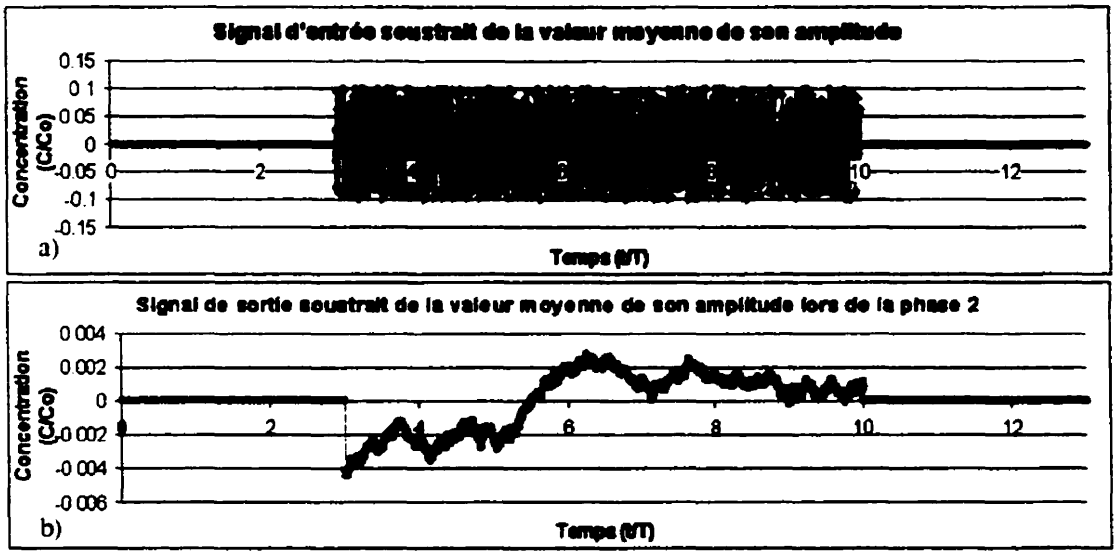


Figure 3.6 : a) Signal d'entrée soustrait de la valeur moyenne de son amplitude b) Signal de sortie soustrait de la valeur moyenne de son amplitude lors de la phase 2

C'est sur ces signaux que la corrélation croisée est appliquée. La figure 3.7 montre le résultat obtenu ainsi que la distribution théorique des temps de séjour du réservoir.

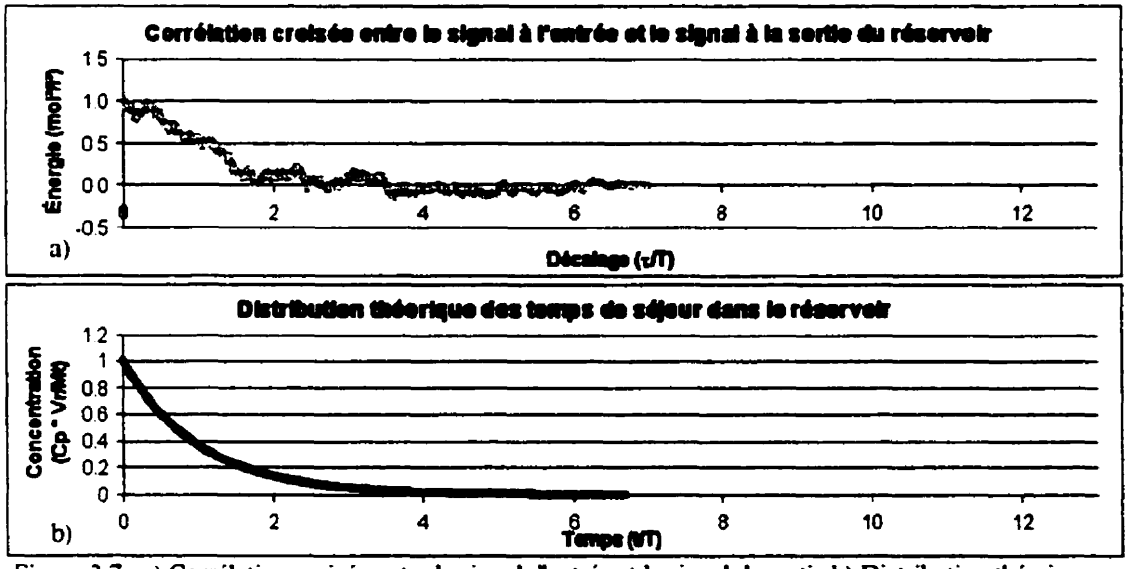


Figure 3.7 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée et le signal de sortie b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé

Si la fonction obtenue par la corrélation croisée est considérée comme étant analogue à la distribution des temps de séjour du réservoir, les erreurs obtenues pour le T_{10}, T_{50}, et T_{90} sont de 1, 18 et 44 % respectivement. Le tableau 3.3 détail ces résulats.

Tableau 3.3 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée.

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.106	0.105	1%
T_{50}	0.693	0.569	18%
T_{90}	2.292	1.273	44%

3.2.3.2 Réacteur piston

Les signaux utilisés sont les mêmes que la section 3.2.1.. Le signal d'entrée est un signal aléatoire d'une durée de 10 T et le signal réponse d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston ayant un T = 1500 sec. fonctionnant en régime permanent.

Cependant, un des signaux analysés est le signal d'entrée duquel la valeur moyenne de son amplitude a été soustraite et dont l'équivalent des phases 1 et 3 du signal de sortie a été amputé. L'autre signal analysé est le signal de sortie amputé des phases 1 et 3 et duquel la valeur moyenne de l'amplitude du signal amputé a été soustraite. La figure 3.8 montre ces signaux.

La corrélation croisée est appliquée sur ces signaux modifiés. Le résultat est présenté à la figure 3.9 ainsi que la distribution théorique des temps de séjour du réacteur piston essayé. Il est aisé de constater que la fonction obtenue est meilleure que celle obtenue à la section 3.2.2. Les erreurs obtenues par rapport aux valeurs théoriques du T_{10}, T_{50} et T_{90} sont de 14 %, 2% et 1%. Le tableau 3.4 présente ces résultats.

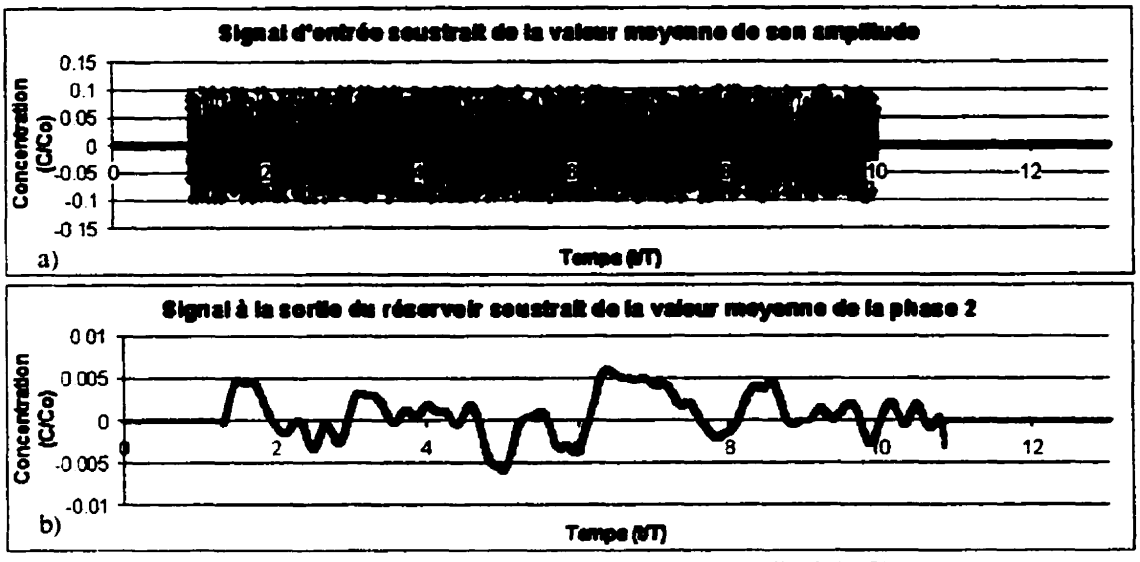


Figure 3.8 : a) Signal d'entrée soustrait de la valeur moyenne de son amplitude b) Signal de sortie soustrait de la valeur moyenne de son amplitude lors de la phase 2

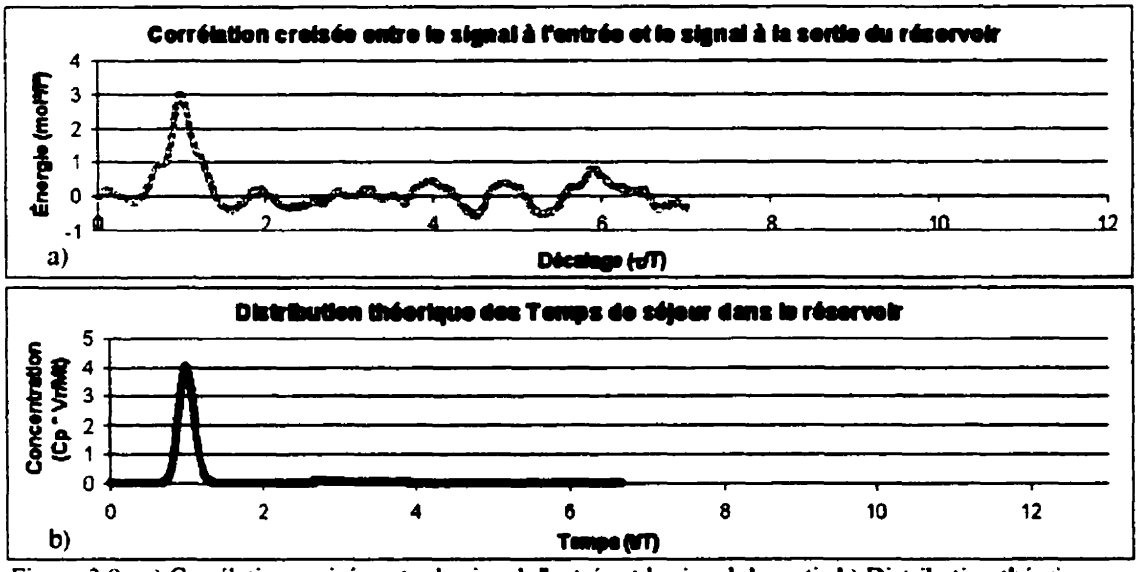


Figure 3.9 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée et le signal de sortie b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essavé

Tableau 3.4 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux centrés à l'aide de l'amplitude moyenne de la phase 2

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.874	0.750	14%
T_{50}	0.997	0.976	2%
T_{90}	1.130	1.137	1%

3.2.3.3 Conclusion

Centrer les signaux, lors de l'analyse par corrélation croisée d'un essai de traçage dans un réservoir semble améliorer nettement la qualité des résultats obtenus, quel que soit le comportement hydraulique du réservoir. Par contre, la technique utilisée prive systématiquement l'analyse d'une partie de l'information disponible soit celle contenue dans les phases 1 et 3.

3.2.4 Corrélation croisée sur des signaux soustraits de leur énergie moyenne

Il semble que centrer les signaux d'entrée et de sortie d'un réservoir améliore la qualité de la fonction qui décrit les temps de séjour. Pour ce faire, à la section 3.2.3 il a fallu suprimer une partie de l'information du signal de sortie et par le fait même du signal d'entrée. Or, ceci implique théoriquement une baisse de la qualité des résultats. Afin d'éviter cela, les signaux sont centrés d'une autre façon dans cette section.

En admettant que l'on puisse déterminer le signal de sortie produit par un signal d'entrée rectangulaire ayant la même énergie (c'est-à-dire la même aire sous la courbe dans le domaine temporel) que le signal aléatoire injecté, et que l'on puisse soustraire ce signal du signal de sortie engendré par le signal aléatoire, le résultat sera un signal de sortie ayant la même information que l'original mais étant centré. Cette nouvelle technique a été essayée, comme précédemment, sur un réservoir ayant un comportement d'un réacteur complètement mélangé et sur un réservoir ayant le comportement d'un réacteur piston.

3.2.4.1 Réacteur complètement mélangé

Les signaux analysés sont les mêmes qu'à la section 3.2.2. Le signal rectangulaire ayant la même énergie que le signal aléatoire à l'entrée est produit dans MATLAB® . Le signal

de sortie généré par ce signal est obtenu à l'aide de la fonction *rcmg_vc()* avec les paramètres suivants : temps de rétention hydraulique (T) de 1500 sec., décalage (dec) de 0 sec. et le nombre de réacteur complètement mélangé (J) de 1. La figure 3.10 montre en a) le signal d'entrée aléatoire (sea) et le signal rectangulaire corespondant (src) et en b) le signal de sortie dû au signal aléatoire (ssa), le signal de sortie dû au signal rectangulaire corespondant (ssrc) et le signal soustrait (ss).

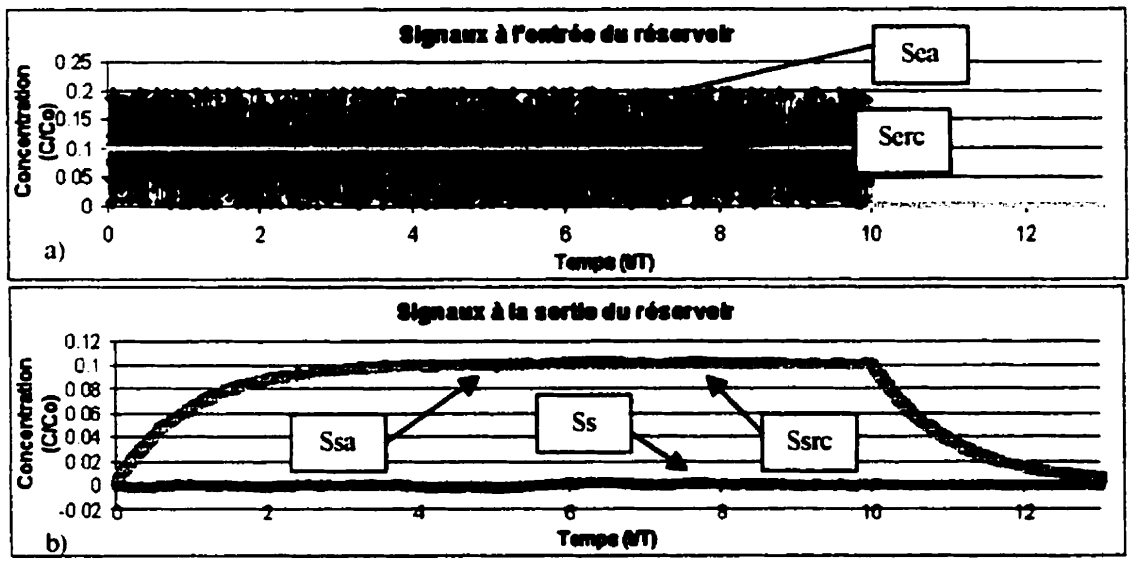


Figure 3.10 : a) Sea et serc d'un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé
b) Ssa, ssrc et ss d'un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé

La corrélation croisée est appliquée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie soustrait. La fonction résultante est présentée à la figure 3.11. Cette fonction s'approche davantage de la distribution théorique des temps de séjour que précedemment. En effet, la distance euclidienne entre la courbe théorique qui a été obtenue à la section 3.2.3.1 est de 9.389 alors que pour celle-ci elle est de 9.358. De même, les erreurs sur le T_{10}, T_{50} et T_{90} sont de 8%, 2% et 43%. Ces résultats sont présentés, dans le tableau 3.5.

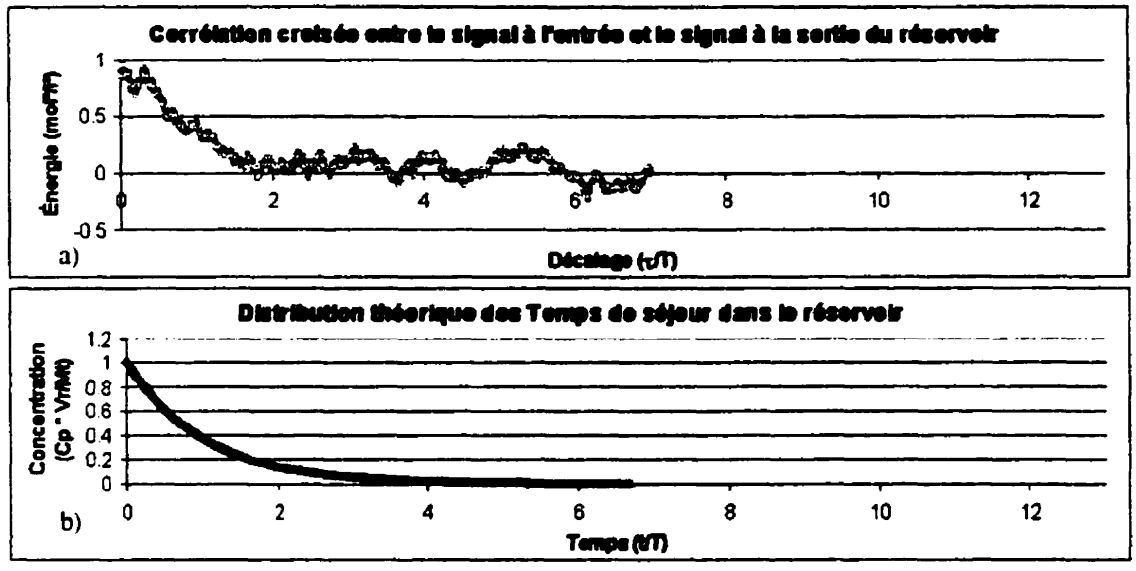


Figure 3.11 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie centré
b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé

Tableau 3.5 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un R.C.M.

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.106	0.115	8%
T_{50}	0.693	0.676	2%
T_{90}	2.292	3.268	43%

3.2.4.1 Réacteur piston

Lors de cet essai, les signaux analysés sont les mêmes qu'à la section 3.2.2. Le signal rectangulaire de même énergie que le signal aléatoire à l'entrée est produit dans MATLAB®. Le signal de sortie généré par ce signal est obtenu à l'aide de la fonction *rcmg_vc()* avec les paramètres suivants : temps de rétention hydraulique (T) de 1500 sec., décalage (dec) de 0 sec. et le nombre de réacteurs complètement mélangés (J) de 100. La figure 3.12 montre en a) le signal d'entrée aléatoire (sea) et le signal rectangulaire corespondant (src) et en b) le signal de sortie dû au signal aléatoire (ssa), le signal de sortie dû au signal rectangulaire corespondant (ssrc) et le signal soustrait (ss).

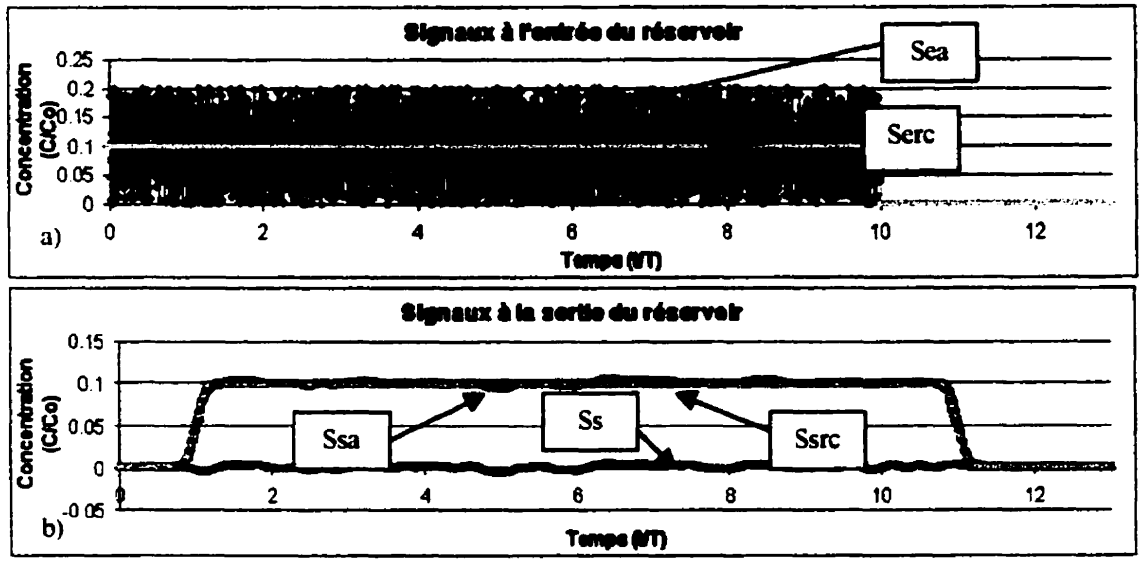


Figure 3.12 : a) Sea et serc d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston b) Ssa, ssrc et ss d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston

La corrélation croisée est effectuée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie soustrait. Le résultat est présenté à la figure 3.13. Si la fonction obtenue est considérée

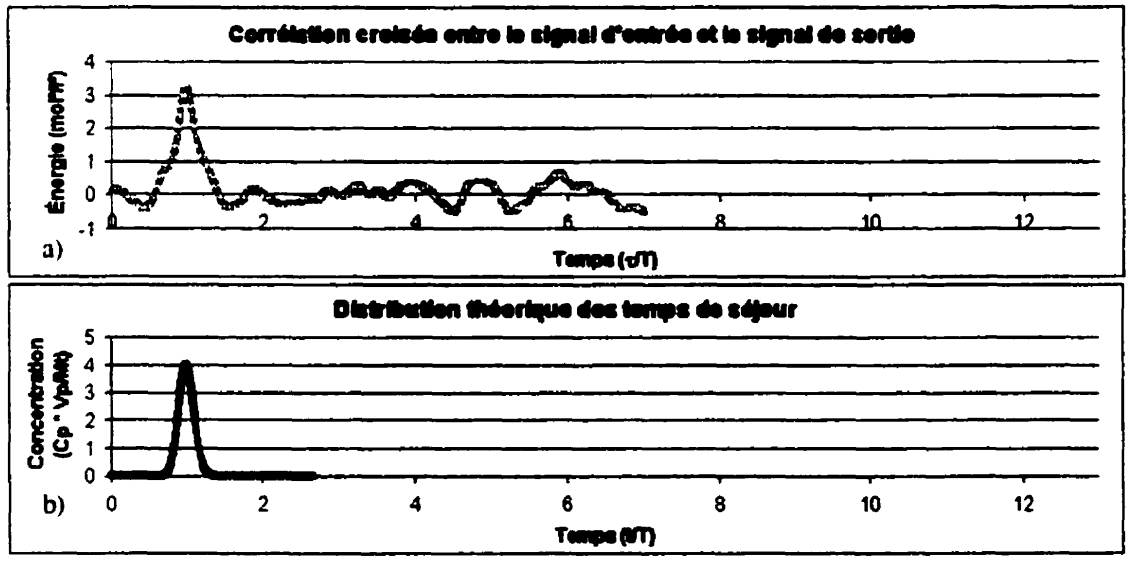


Figure 3.13 : a) Corrélation croisée entre le signal d'entrée centré et le signal de sortie soustrait
b) Distribution théorique des temps de séjour dans le réservoir essayé

comme étant la distribution des temps de séjour du réservoir essayé, les erreurs ainsi obtenues sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} sont de 4 %, 1% et de 6%. Ces résultats sont présentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.874	0.839	4%
T_{50}	0.997	1.002	1%
T_{90}	1.130	1.195	6%

3.2.4.3 Conclusion

La technique qui utilise le signal rectangulaire équivalent pour centrer le signal de sortie, semble améliorer sensiblement la qualité de la distribution des temps de séjour obtenue par la corrélation croisée. En effet, l'erreur obtenue pour les valeurs du T_{10} et T_{50} est sous les 10%, pour les deux comportements idéaux d'un réservoir. Comme précédemment l'analyse du réacteur piston est plus aisée : l'erreur sur le T_{90} est de 6% comparativement à 43% pour celle du réacteur complètement mélangé.

Jusqu'à maintenant, la principale faiblesse de la fonction obtenue par la corrélation croisée est ses oscillations : elle n'a pas lisse. Pour améliorer cette situation, il faut augmenter la quantité d'information présente dans le signal d'entrée. Il y a trois possibilités : augmenter la durée du signal d'entrée; répéter l'expérience avec un autre signal aléatoire et faire la moyenne des deux fonctions obtenues; ou augmenter la qualité de l'information présente dans le signal d'entrée. Les deux premières options sont à rejeter pour les raisons qui suivent.

Tout d'abord l'augmentation de la durée du signal d'entrée augmentererait d'autant la durée nécessaire pour l'analyse. Dans les cas analysés, la durée était de 10 T. C'est-à-dire que la distribution des temps de séjour serait actualisée seulement à tous les 10 T. Ce qui est loin du 4 T que permet d'obtenir la méthode de traçage conventionnelle.

De même, répéter l'expérience comme suggéré par Bendat 1995, n'est pas une voie possible. Il faudrait effectuer au-moins 2 essais de traçage pour obtenir une seule distribution des temps de séjour qui soit valable. Ce qui est incompatible avec l'objectif d'effectuer un traçage en régime non-permanent.

Ainsi, la seule option viable est de parvenir à encoder l'information du signal d'entrée de façon telle qu'elle ne soit pas fortement altérée durant son passage dans le réservoir. Cette option fait l'objet de la prochaine section.

3.2.5 Corrélation croisée, signaux optimisés et considérations pratiques

L'information véhiculée par un signal de concentration est altérée par son passage à travers un réservoir. Dans la section 3.2.1, il est montré qu'un réservoir peut détruire une grande partie de l'information contenue dans le signal d'entrée. Quelles sont les fréquences qui sont ainsi détruites ? Cette question est très importante car, si les fréquences qui ne franchissent pas le réservoir sont identifiées, elles pourront être retranchées du signal d'entrée et remplacées par d'autres qui elles franchiront avec succès le réservoir.

Afin d'identifier ces fréquences, le spectre du signal d'entrée aléatoire utilisé dans les sections précédentes a été calculé ainsi que celui du signal de sortie pour les deux comportements idéaux d'un réservoir.

Une fois ces fréquences identifiées, elles sont supprimées et remplacées dans le signal d'entrée lors d'essai mené sur des réservoirs se comportant comme un réacteur complètement mélangé et comme un réacteur piston.

3.2.5.1 Spectre des signaux

Le spectre d'un signal est sa décomposition en ses composantes fréquentielles. Pour ce faire la fonction *autocorrel_spec()* qui est fournie en annexe, a été utilisée. La figure 3.14 présente en a) le spectre du signal d'entrée et celui du signal de sortie en b) et c).

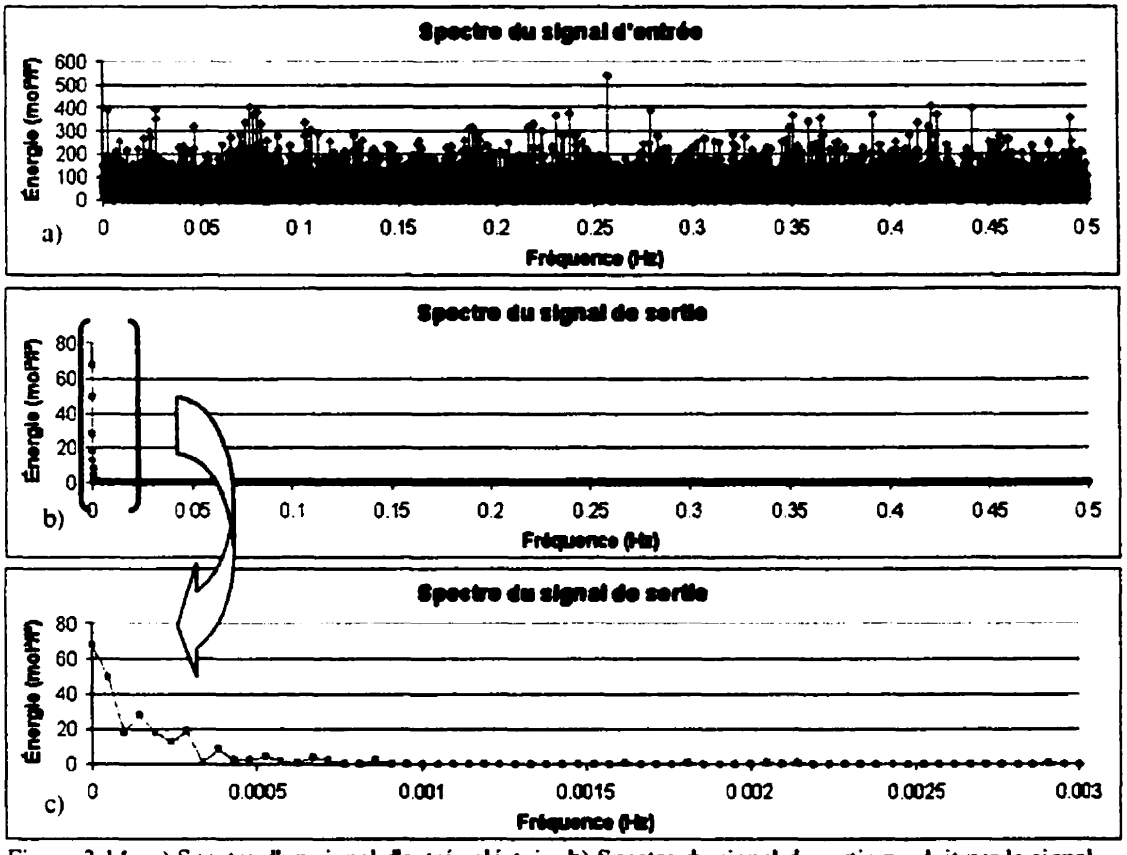


Figure 3.14 : a) Spectre d'un signal d'entrée aléatoire b) Spectre du signal de sortie produit par le signal d'entrée c) Agrandi de b)

Alors que la figure 3.15 présente en a) le spectre du signal d'entrée pour un réservoir ayant le comportement d'un réacteur piston et en b) et c) le spectre du signal de sortie.

Dans les deux cas, ces figures et surtout les données numériques qui ont servi à construire ces figures, confirment qu'une partie importante de l'information est altérée, mais non détruite. En effet, le spectre du signal d'entrée est riche en information : les fréquences sont multiples et leurs énergies élevées. Lors du passage de ce signal dans

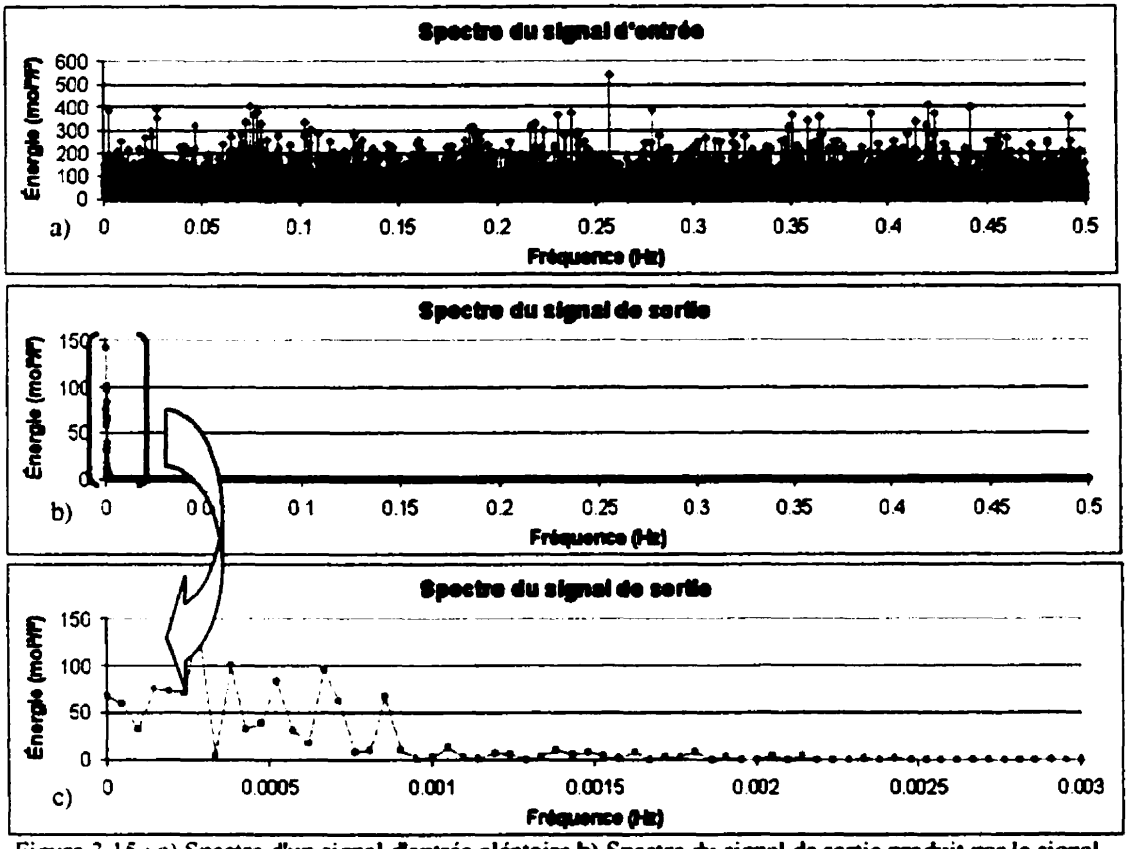


Figure 3.15 : a) Spectre d'un signal d'entrée aléatoire b) Spectre du signal de sortie produit par le signal d'entrée c) Agrandi de b)

l'un ou l'autre des réservoirs simulés, les énergies de ces fréquences sont grandement atténuées. Mais elles demeurent non-nulles.

Ainsi, les fréquences plus grandes que 0.001 Hz ne franchissent que très difficilement le réservoir qui se comporte comme un réacteur complètement mélangé. Pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston le seuil se situe à environ 0.0025 Hz. Ces valeurs représentent une période (1/fréquence) de respectivement 67.7% et 26.7% du temps de séjour moyen (T) des réservoirs essayés. Ces valeurs ont été établies dans des conditions idéales, c'est-à-dire sans dispersion ni diffusion. En ce sens, ces valeurs surestiment la réalité.

3.2.5.2 Signaux optimisés

Une portion de l'information comprise dans le signal d'entrée n'arrive pas à franchir les réservoirs théoriques idéaux. Cette information correspond aux fréquences supérieures à 0.001 Hz pour un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé et de 0.0025 Hz pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston.

Les résultats qui sont présentés aux tableaux 3.7 et 3.8 ont été obtenus avec des signaux d'entrée qui comportent seulement des fréquences égales ou plus petites que ces valeurs. La technique d'analyse est celle utilisée à la section 3.2.4.

Tableau 3.7 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux optimisés pour un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.106	0.114	8%
T_{50}	0.693	0.455	34%
T_{90}	2.292	0.819	64%

Tableau 3.8 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour le cas de signaux soustrait de leure énergie moyenne pour un réservoir se comportant comme un réacteur piston

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.874	0.539	38%
T_{50}	0.997	0.846	15%
T_{90}	1.130	1.020	10%

Les erreurs obtenues sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} sont de 8%, 34% et 64% respectivement pour le réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé. Ce qui constitue un recul par rapport aux valeurs obtenues à la section 3.2.4. qui étaitent de 8%, 2% et 43%. Le même constat est fait pour les valeurs obtenues avec le réservoir se comportant comme un réacteur piston. Les erreurs qui étaient de 4%, 1% et 6% à la section 3.2.4 sont maintenant de 38%, 15% et 10% pour les valeurs calculées du T_{10}, T_{50} et T_{90} respectivement.

Pourtant, l'information utilisée dans la présente section est optimisée. C'est-à-dire que toute l'information véhiculée par le signal d'entrée est transmise au signal de sortie. Ce qui devrait se traduire par une amélioration des résultats. Toutefois, il faut prendre en considération que les essais étudiés sont des essais numériques. Or, l'information transmise par les fréquences les plus élevées, quoique très faible en énergie, est prise en considération par les calculs. Ce gain d'information semble plus important que le gain fait par l'utilisation de fréquences plus basses. Notamment, parce que les signaux utilisés sont d'une longueur finie. Ainsi, l'utilisation de fréquences faibles se traduit par une baisse de la densité d'information par unité de temps.

Par contre, lors d'essais dans un réservoir physique, l'information contenue dans les fréquences élevées ne sera vraisemblablement pas détectée. Ceci a été confirmé par les essais effectués au laboratoire pour la méthode d'apparition-disparition des fréquences, qui est l'objet du prochain chapitre.

Les essais présentés dans cette section sont plus près d'essais physiquement réalisables que ceux présentés dans les sections précédentes. Et les résultats obtenus sont forts décevants, compte tenu de la longueur des signaux analysés. En effet, ces essais ont été réalisés avec des signaux d'une durée de 10 T. Pour être d'un intérêt pratique la durée du signal analysé doit être d'au plus 4 T. Ce qui représente le taux d'actualisation qu'il est possible d'obtenir avec la méthode de traçage usuelle. Afin de confirmer l'inadéquation de la méthode d'analyse par la corrélation croisée, la période d'analyse est réduite à cette valeur maximale.

3.2.6 Corrélation croisée sur une période maximale de 4 T

La méthode d'analyse par la corrélation croisée doit, pour être d'un intérêt pratique, fournir des résultats fiables pour des périodes d'analyse ne dépassant pas 4 T. Or, avec une période d'analyse de 10 T et des fréquences optimisées, les résultats obtenus ne sont

pas convaincants. Malgré cela, un dernier essai a été réalisé. En fait, il s'agit du même essai qu'à la section précédente, seulement l'analyse porte sur une période de 4 T au lieu de 10 T.

Cet essai a été réalisé sur le réservoir se comportant comme un réacteur piston. Car c'est le seul cas qui permet encore un quelconque espoir pour l'utilisation de la méthode d'analyse par la corrélation croisée en régime non-permanent. Ainsi, la figure 3.16 présente les signaux qui sont analysés. La figure 3.17 présente la fonction obtenue par la corrélation croisée et la distribution théorique des temps de séjour pour le bassin étudié.

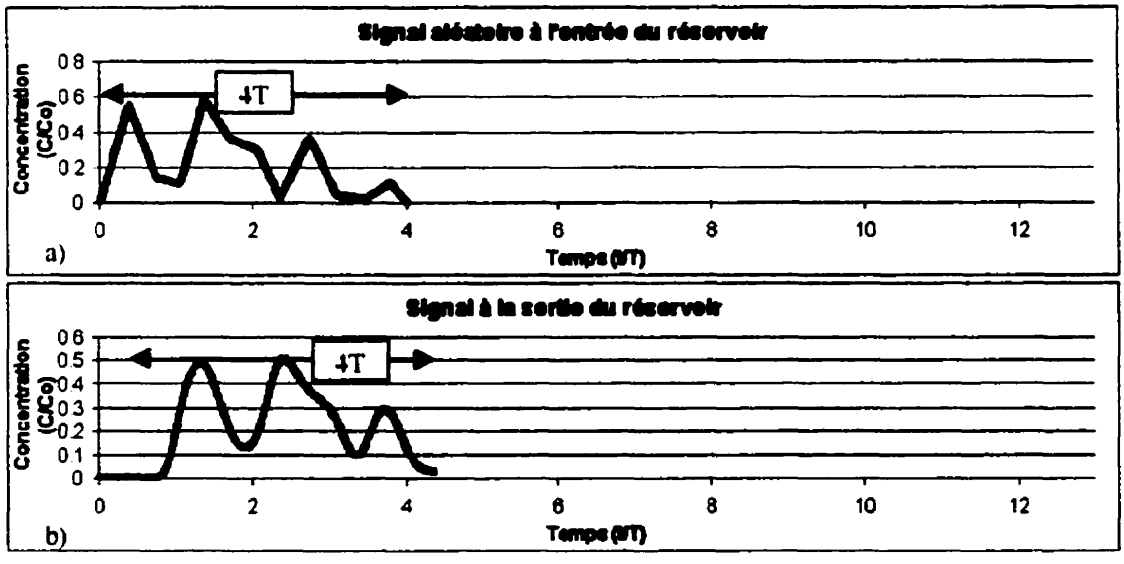


Figure 3.16 : a) Signal à l'entrée d'une durée de 4 T. b) Signal à la sortie d'une durée de 4 T plus le décalage du réservoir

La méthode d'analyse est celle utilisée à la section 3.2.4. Si la fonction obtenue par la corrélation croisée est considérée comme étant équivalente à la distribution des temps de séjour du réservoir étudié, alors les erreurs effectuées sur le T_{10}, T_{50} et le T_{90} sont de 95%, 12% et 19% respectivement. Ces valeurs, qui sont regroupées au tableau 3.9, ne sont pas très satisfaisantes car elles caractérisent le comportement d'un réservoir piston.

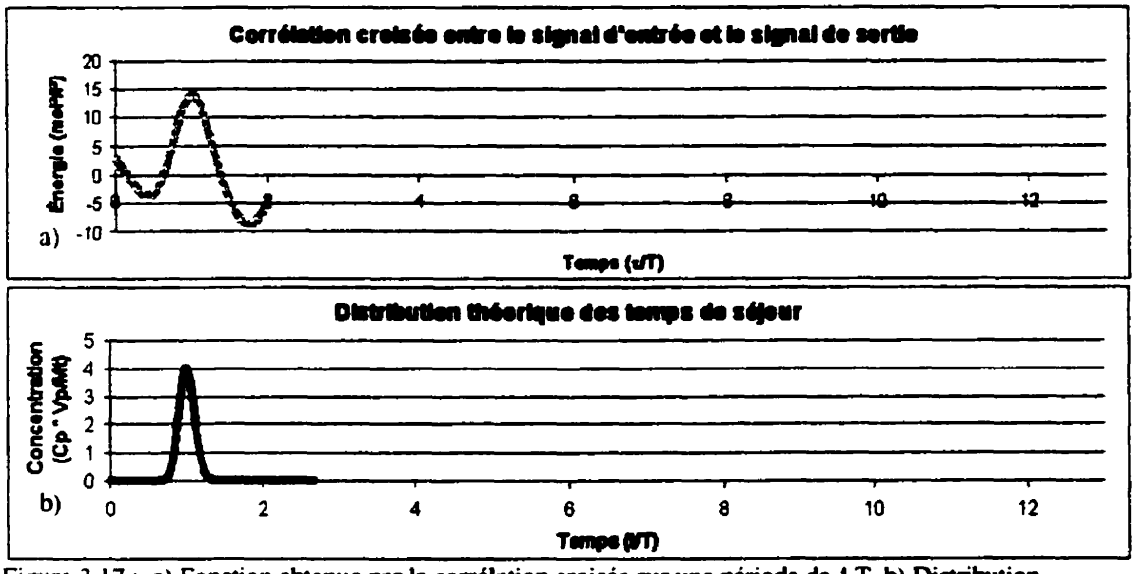


Figure 3.17 : a) Fonction obtenue par la corrélation croisée sur une période de 4 T. b) Distribution théorique des temps de séjour de réservoir essayé

Tableau 3.9 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour et la fonction obtenue par la corrélation croisée, pour un réacteur piston et une durée de l'analyse de 4T

	Théorique (t/T)	Corrélation Croisée (t/T)	Erreur
T_{10}	0.106	0.043	95%
T_{50}	0.693	0.879	12%
T_{90}	2.292	0.912	19%

Et ce type de réacteur, comme il a été montré dans les sections précédentes, est celui qui conserve le mieux l'information véhiculée par le signal d'entrée. Ceci implique que tout autre réservoir tracé de cette façon va produire de moins bons résultats.

3.3 Appréciation de la méthode

La méthode d'analyse par la corrélation croisée appliquée au traçage dans les réservoirs semble donner des résultats à peine acceptables, pour les types de comportements étudiés : le réacteur complètement mélangé et le réacteur piston, lorsqu'elle est utilisée en régime permanent et que la période d'analyse est longue (10 T ou plus).

Toutefois, pour que cette méthode soit d'un intérêt pratique pour le traçage en régime non-permanent il faudrait qu'elle puisse donner des résultats fiables pour un période d'analyse inférieure à 4T, ce qui n'est pas le cas. Pour cette raison, cette méthode ne sera pas investiguée davantage à l'échelle expérimentale dans le cadre de cette étude.

CHAPITRE IV

ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE

L'analyse temps-fréquence est l'étude de la variation des composantes fréquentielles d'un signal en fonction du temps. Cette analyse permet de déterminer le moment d'apparition et de disparition d'une ou d'un groupe de fréquences dans un signal complexe. La fréquence sert d'étiquette pour le signal qui la transporte.

Au chapitre I, lors de la discussion sur la méthode de traçage conventionnel, on a vu qu'il était possible de tirer la distribution des temps de séjour d'un réservoir fonctionnant en régime permanent à l'aide d'un essai de traçage à injection constante. Il était impossible de répéter l'exercice avant que la concentration du traceur soit stabilisée à un niveau constant (identique à l'entrée), sinon, l'information contenue dans une seconde injection interférerait, au niveau du signal de sortie, avec la première, créant une ambiguïté quant au moment d'injection de l'information. Le délai nécessaire, avant d'obtenir une nouvelle distribution des temps de séjour dans le réservoir, est d'environ quatre fois le temps de séjour moyen du réservoir (4T) (AWWA, 1996).

Au chapitre III, il a été montré que lorsque des fréquences élevées (par rapport au temps de séjour) étaient injectées dans un réservoir, elles modifiaient peu la forme générale du signal de sortie. En effet, le signal de sortie se comportait comme s'il était soumis à une injection quasi-constante de traceur correspondant au signal injecté moyen.

Dans ce chapitre, il sera question de l'application de l'analyse temps-fréquence sur les signaux de sortie provenant d'une injection contenant des fréquences. L'objectif de cette application est d'obtenir la distribution des temps de séjour en continu et en régime non-permanent, ce que ne peut faire la méthode conventionnelle.

Pour débuter, les différentes étapes de la méthode seront présentées. Ensuite suivront les essais numériques effectués en régimes permanent et non-permanent. Et pour finir, les essais effectués au laboratoire en régimes permanent et non-permanent.

4.1 Méthode

La méthode consiste, à partir d'un essai de traçage, à déterminer la distribution des temps de séjour tout en identifiant l'information qui a servi à l'établir. Une fois cette information identifiée il n'y a plus d'ambiguïté possible quant à la signification de la distribution des temps de séjour. Cette démarche s'effectue en plusieurs étapes.

D'abord ces étapes sont détaillées pour l'utilisation de la méthode en régime permanent. Ensuite, elles le sont pour l'utilisation en régime non-permanent.

4.1.1 Méthode en régime permanent

Les différentes étapes de l'analyse en régime permanent sont les suivantes:

1. Injection durant un temps défini d'une fréquence à l'entrée du bassin. Cette fréquence doit correspondre à certains critères qui seront définis lors dans la section concernant les essais numériques;
2. Mesure du signal de sortie;
3. Calcul de la distribution des temps de séjour. Pour ce faire, il faut déterminer, d'une façon ou d'une autre, le signal de sortie que produirait un signal carré de même énergie que le signal injecté en 1. La méthode employée sera explicitée à la section 4.2.3. Une fois ce signal obtenu, il suffit de calculer sa dérivée pour obtenir la distribution des temps de séjour;
4. Centrer le signal de sortie en soustrayant le signal calculé en 3) du signal de sortie;
5. Déterminer le moment d'apparition de la fréquence injectée;
   5.1. Définir une fenêtre temporelle;

5.2. Calculer le spectre du signal dans cette fenêtre;

5.3. Vérifier si dans ce spectre la fréquence est présente;

5.4. Déplacer la fenêtre d'un pas de temps;

5.5. Répéter de 5.2 à 5.4 jusqu'à ce que le temps d'apparition de la fréquence soit clairement identifiée.

5.6. Noter ce moment.

Une fois la fréquence retrouvée, la distribution des temps de séjour est associée à un moment précis d'injection. Ainsi, la distribution des temps de séjour calculé correspond à celle du reservoir lors de ce moment.

4.1.2 Méthode en régime non-permanent

La méthode en régime non-permanent est sensiblement la même que celle en régime non-permanent. En fait, elle en est la généralisation. Elles ont été séparées pour en faciliter la compréhension.

1. Injection de plusieurs fréquences à l'entrée du bassin. Chaque fréquence est injectée avec une concentration maximale différente. L'injection s'effectue en continu;
2. Mesure du signal de sortie;
3. Analyse d'une portion du signal de sortie. Cette portion, appelée *portion d'analyse*, est délimitée par la durée d'injection d'une fréquence précise augmentée du décalage du signal d'entrée. De cette portion d'analyse on tire la distribution des temps de séjour comme précédemment;
4. Centrer le signal de sortie en soustrayant le signal calculé en 3) du signal de sortie;
5. Déterminer la fréquence présente dans la portion du signal de sortie et son moment d'apparition;

   5.1. Définir une fenêtre temporelle;

   5.2. Calculer le spectre du signal dans cette fenêtre;

   5.3. Vérifier si dans ce spectre l'une des fréquences injectées est présente;

   5.4. Déplacer la fenêtre d'un pas de temps;

5.5. Répéter de 5.2 à 5.4 jusqu'à ce que la fréquence soit clairement identifiée;

5.6. Noter ce moment;

6. Soustraire du signal de sortie la partie analysée ainsi que sa décroissance.

Une fois la fréquence retouvée, la distribution des temps de séjour est associée à un moment précis d'injection. Ensuite, les étapes 2 à 5 sont répétées, produisant de nouvelles distributions de temps séjour qui évoluent dans le temps. Plus la portion d'analyse est courte, plus les distributions calculées seront proches dans le temps, décrivant mieux l'évolution de la distribution des temps de séjour dans le réservoir.

4.2 Développement de la méthode par les essais numériques

Plusieurs essais numériques ont été réalisés pour mettre au point les différents paramètres et conditions d'utilisations de la méthode de traçage par l'analyse temps-fréquence. Dans cette section, ces choix seront discutés à la lumière des essais numériques. Ensuite, des exemples numériques de l'utilisation de cette méthode en régime permanent et en régime non-permanent seront présentés.

D'abord, il faut spécifier que tous les signaux d'entrée sont de forme sinusoïdale. La raison de ce choix est simple, ce signal ne comporte qu'une seule fréquence ce qui évite la présence de fréquences secondaires ou *parasites* qui compliqueraient l'analyse. De plus, des essais numériques, ont permis de mettre en évidence la faiblesse des signaux de formes carrée et triangulaire, par rapport aux signaux sinusoïdaux, lors de la détermination des temps de séjour et de la détection des fréquences.

Spécifions que les essais numériques présentés ici, sauf indication contraire, ont été réalisés avec la fonction *rcmg_vc()* avec les paramètres suivants : temps de rétention hydraulique (T) de 30 sec., décalage (dec) de 10 sec. et un nombre de réacteur complètement mélangé (J) égal à 2. Ces valeurs ne correspondent pas à un réservoir réel,

seul le rapport de ces valeurs avec les fréquences utilisées a un sens physique. La figure 4.1 présente la distribution théorique des temps de séjour de ce réservoir.

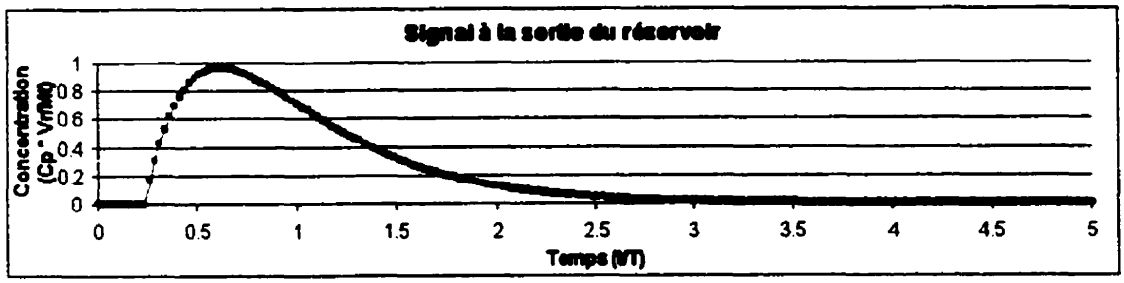


Figure 4.1 : Distribution théorique des temps de séjour du réservoir utilisé lors des essais numériques

4.2.1 Choix des fréquences

Le choix d'une fréquence s'effectue selon deux critères :

1. sa capacité de franchir le réservoir avec le moins de pertes d'énergie possible, afin de faciliter sa détection dans le signal de sortie;
2. sa capacité à ne pas perturber l'enveloppe du signal de sortie qu'elle engendre, afin de permettre la détermination de la distribution des temps de séjour par la méthode conventionnelle.

Comme il a été vu au chapitre III, les fréquences qui franchissent avec un minimum de perte d'énergie un réservoir, sont celles qui sont faibles. Alors que les fréquences qui perturbent le moins le signal de sortie sont celles qui sont élevées. Ces critères sont donc antagonistes. Ce point sera repris à la section 4.2.4.

4.2.3 Fréquence d'échantillonnage

La fréquence d'échantillonnage (fe) doit être suffisament élevée pour permettre l'expression de la plus haute fréquence injectée (fi) dans le réservoir. Pour ce faire, le principe de Nyquist, doit être respecté :

$$fe > 2fi$$

Les fréquences injectées étant faibles, ce critère est rarement restrictif. Ainsi, la règle pour établir la fréquence d'échantillonage demeure celle qui s'applique dans les essais de traçage usuels. C'est-à-dire qu'elle doit permettre de décrire la courbe de traçage adéquatement, ceci nécessite un minimum de 30 points (pour plus d'information consulter : AWWA (1996)).

4.2.4 Calcul de la distribution des temps de séjour

La distribution des temps de séjour d'un réservoir peut se calculer par la dérivée du signal de sortie provenant d'un essai de traçage à concentration constante (voir chapitre I). Toutefois, le signal de sortie disponible est un signal provenant d'une injection où la concentration varie dans le temps (signal d'entrée sinusoïdale). La dérivée de ce signal n'est donc pas la distribution des temps de séjour du réservoir. Cependant, comme il a été vu au chapitre III, le signal de sortie d'un réservoir soumis à un signal d'entrée à concentration cyclique, tend vers la concentration moyenne de ce signal. Ainsi, pour obtenir un signal de sortie équivalent à celui obtenu par une injection constante, on ajuste, par la méthode des moindres carrés, un modèle numérique du signal de sortie qui correspond à l'évolution d'un traceur lors d'une injection constante, dans le signal de sortie. Le choix du modèle affecte les résultats de l'analyse. Ceci sera discuté à la section 4.3.3.2.

Le modèle utilisé dans la présente méthode est celui décrit à la section 2.2.1. Ce modèle comporte plusieurs paramètres, qui sont a priori inconnus : le temps de séjour moyen du réservoir (T), le décalage du réservoir, et le nombre de réacteurs complètement mélangés. De ces paramètres, seul le décalage peut être déterminé par l'analyse directe des signaux d'entrée et de sortie du réservoir analysé. En effet, la valeur de ce décalage est simplement celle qui est observée entre le début de l'injection du traceur dans le réservoir et l'apparition de celui-ci à la sortie du réservoir. Les deux autres paramètres sont déterminés à l'aide du solveur d'Excel.

Pour ce faire, l'utilisateur doit entrer les valeurs du signal de sortie dans une feuille de calcul. Dans la colonne suivante, la dérivée du signal est calculée numériquement. Car le modèle que décrit l'équation 2.5 est valable pour une impulsion et non pour une injection constante de traceur. Ce signal est comparé à celui obtenu avec l'équation 2.5. Le solveur d'Excel minimise la distance euclidienne entre les deux fonctions en faisant varier les deux paramètres inconnus : le temps de rétention hydraulique et le nombre de réacteurs complètement mélangés. La solution obtenue permet le calcul direct de la distribution des temps de séjour du réservoir étudié par l'équation 2.5.

4.2.5 La portion d'analyse

La portion d'analyse est la portion du signal de sortie sur laquelle s'effectue l'analyse. Elle est confinée par un changement brusque de la concentration du traceur. Ce changement peut être le résultat d'une modification de la concentration du traceur injecté (accompagnée d'une changement de fréquence) ou d'une modification importante du régime hydraulique (changement de débit). La figure 4.2 présente un exemple d'un signal de traçage comportant deux portions d'analyses.

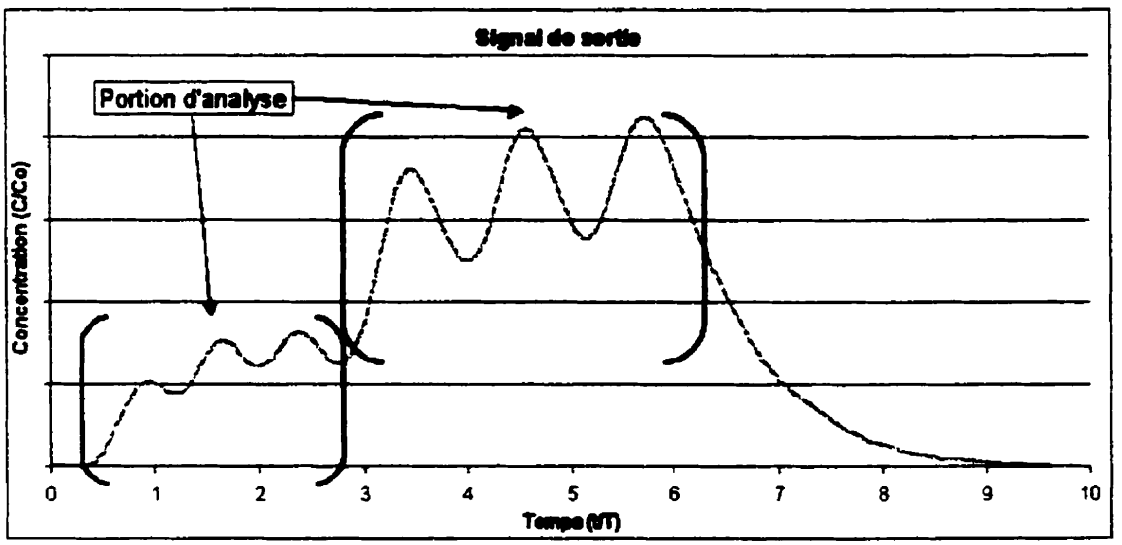


Figure 4.2 : Exemples de portions d'analyse

La portion d'analyse influence beaucoup les résultats. D'abord, elle définit le taux de rafraîchissement de la distribution des temps de séjour. Ainsi, elle se doit, pour que la méthode comporte quelque avantage face à la méthode usuelle, d'être inférieure à 4 T.

Ensuite, la portion d'analyse influence le calcul de la distribution des temps de séjour, par son effet sur l'ajustement de l'équation 2.5 dans le signal de sortie (étape 3). Plus elle est longue, plus il y a de points de références pour l'ajustement et meilleur est celui-ci.

La figure 4.3 présente les résultats de plusieurs essais numériques effectués avec différentes portions d'analyses. Les erreurs représentent la différence entre les valeurs théoriques du T_{10}, T_{50} et T_{90} par rapport à celles calculées.
Ces résultats mettent en évidence ceci :

- plus la fréquence est élevée, meilleurs sont les résultats;
- pour une portion d'analyse comprise entre 1.5 T et 4 T les erreurs varient peu;
- pour une portion d'analyse d'au-moins 1.5 T et des fréquences d'injection plus rapide que 1/(96% T), la méthode donne des résultats considérés comme bon (c'est-à-dire des erreurs < 10 %).

Ceci représente un taux de rafraîchissement au-moins 2 fois plus rapide que la méthode conventionnelle.

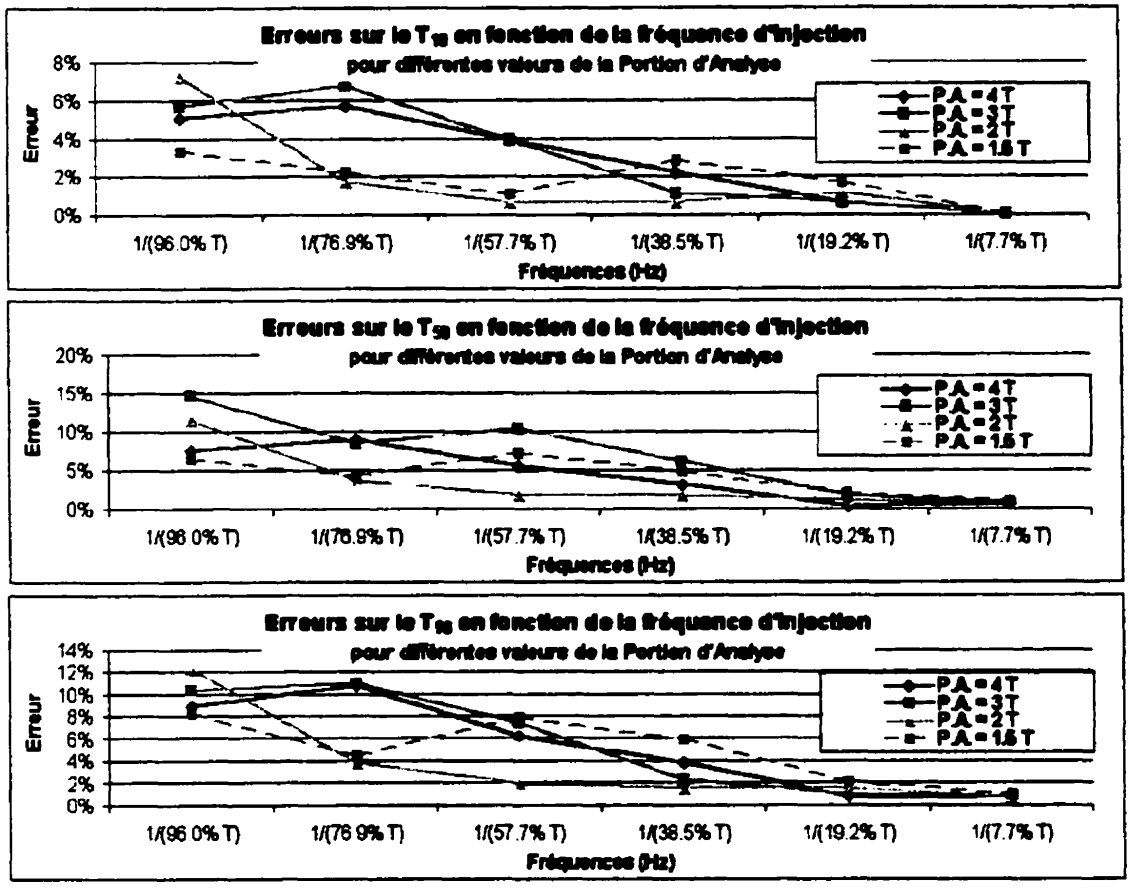


Figure 4.3 : Évolution de l'erreur sur le T_{10}, T_{50}, T_{90} en fonction de la fréquence d'injection, pour différentes valeurs de la portion d'analyse.

4.2.6 Centrer le signal de sortie

Avant de déterminer le moment d'apparition de la fréquence injectée, il faut d'abord centrer le signal. Au chapitre III, on a montré que les fréquences sont beaucoup plus faciles à détecter lorsque le signal de sortie est centré à l'aide d'un signal de sortie correspondant à une injection constante de même énergie que le signal d'entré. Ce signal correspond au signal ajusté de l'étape 3.

4.2.7 Déterminer le moment d'apparition de la fréquence injectée

La recherche de la fréquence injectée s'effectue sur un secteur limité, appelée fenêtre, de la portion d'analyse. Plus la fenêtre est étroite, plus la précision sur le moment de détection de la fréquence est élevée et plus la précision sur la fréquence est faible (ceci est dû à la dualité temps-fréquence, pour plus de précision voir Bendat et Piersol (1993). Ainsi, la plus petite fenêtre d'analyse utile est égale à la période du signal sinusoïdal afin d'englober au moins un cycle complet de ce signal.

Sur cette fenêtre, le spectre du signal est calculé et la valeur de l'énergie de la fréquence recherchée dans ce spectre est notée. Ensuite, la fenêtre est déplacée d'un pas de temps, égale à la période d'échantillonnage du signal de sortie. En parcourant tout le signal de sortie, un graphique de l'énergie de la fréquence recherchée en fonction du temps est obtenu. L'énergie dans le temps comporte des phases ascendantes et descendantes. Le moment où la phase ascendante coupe la valeur-seuil (cette valeur est définie lors des essais laboratoires) est défini comme étant le moment d'apparition de la fréquence. De même, le moment où la phase descendante coupe la valeur-seuil est défini comme le temps de disparition.

Tous ces calculs sont systématisés dans la fonction *appdispfg()*. Cette fonction, fournie en annexe, a été programmée dans le logiciel MATLAB.

4.2.8 Exemple numérique en régime permanent

Étapes 1 et 2

Le réservoir analysé est le réservoir décrit à la section 4.2. La fréquence utilisée est de 0.058 Hz (1/(57.7%*T)) et la portion d'analyse est de 45 secondes (2 T). La figure 4.3 présente en a) le signal à l'entrée de ce réservoir et en b) le signal de sortie.

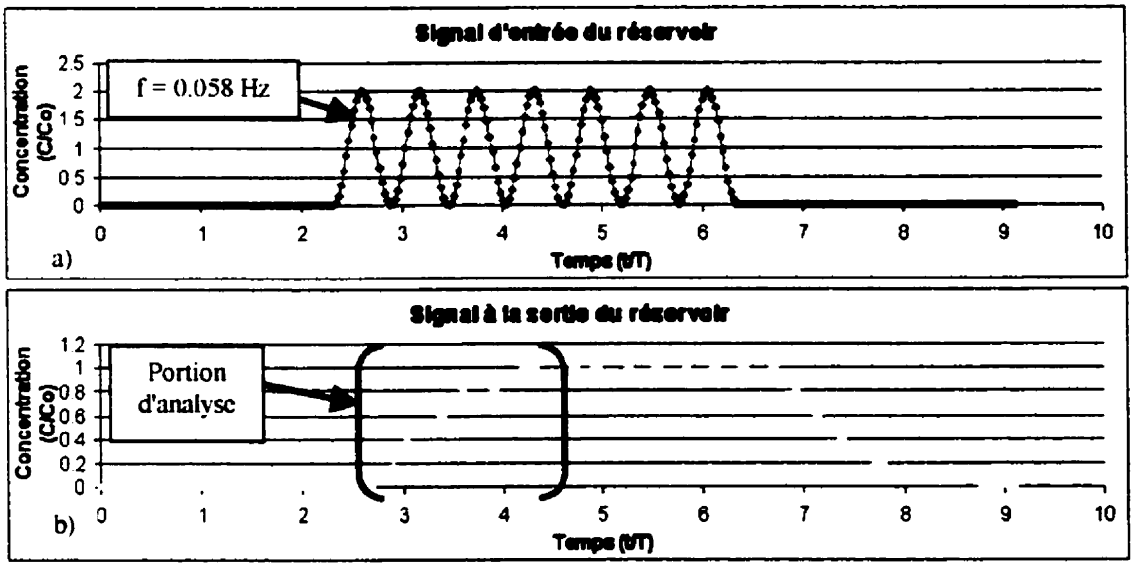


Figure 4.4 : a) Signal d'entrée, b) Signal de sortie du réservoir

Étape 3

Le signal de sortie qui est échantillonné, dans cet exemple, à toutes les secondes, est transféré dans les deux premières colonnes d'une feuille de calcul de Microsoft Excel. La partie supérieure de cette feuille est présentée et expliquée en annexe. L'utilisateur doit spécifier la valeur du décalage. Ensuite, il doit activer le solveur d'Excel, en spécifiant les conditions initiales des variables : un estimé du temps de rétention hydraulique moyen et du nombre de réacteurs complètement mélangés. Le solveur met environ 1 seconde (Pentium III, 450 MHz) à trouver les valeurs de ces deux paramètres, qui minimise la distance euclidienne entre la dérivée du signal de sortie et le modèle.

Une fois ces paramètres définis, la distribution des temps de séjour est déterminée. Celle obtenue lors du présent exemple est présentée et comparée à la distribution théorique, à la figure 4.5. Les erreurs obtenues, lorsque la distribution des temps de séjour calculée est comparée à la distribution théorique, sont respectivement pour les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} de 0.56%, 1.71% et 1.47%. Ces valeurs sont détaillées au tableau 4.1.

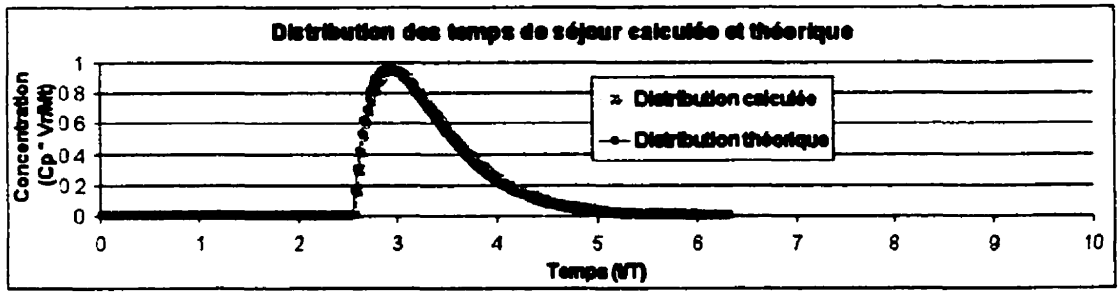


Figure 4.5 : Distribution des temps de séjour calculée et théorique

Tableau 4.1 : Erreurs entre la distribution des temps de séjour calculée et la théorique

	Théorique (t/T)	Calculée (t/T)	Erreur (%)
T_{10}	2.770	2.772	0.56%
T_{50}	3.205	3.221	1.71%
T_{90}	4.052	4.077	1.47%

Une fois la distribution obtenue, il faut déterminer le moment d'injection de l'information qui a permis de déterminer cette distribution.

Étape 4

L'intégrale de la distribution des temps de séjour calculée plus haut, est une fonction qui représente l'effet d'une injection constante à l'entrée du bassin. Soustaire ce signal au signal de sortie permet de mettre en évidence les fréquences présentes dans celui-ci. La figure 4.6 présente le signal de sortie, le signal calculé et le signal soustrait.

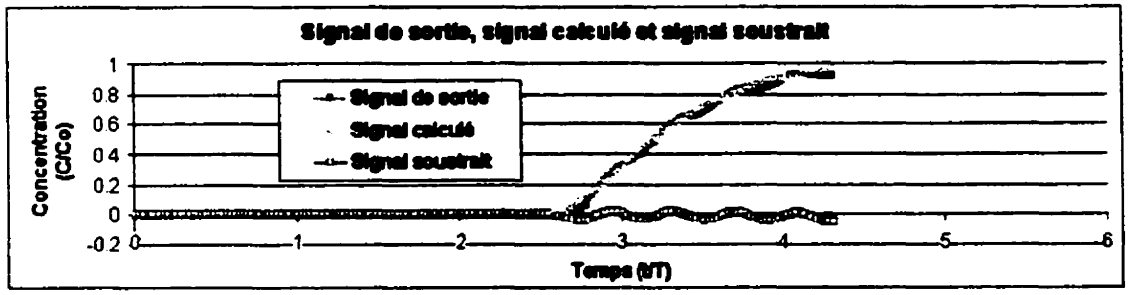


Figure 4.6 : Signal de sortie, signal calculé et signal soustrait

Étape 5

Ensuite, le signal soustrait est entré dans la fonction *appdispfg()* ainsi que la fréquence recherchée pour déterminer l'énergie associée à cette fréquence en fonction du temps. La figure 4.7 présente le résultat obtenu à l'aide de cette fonction.

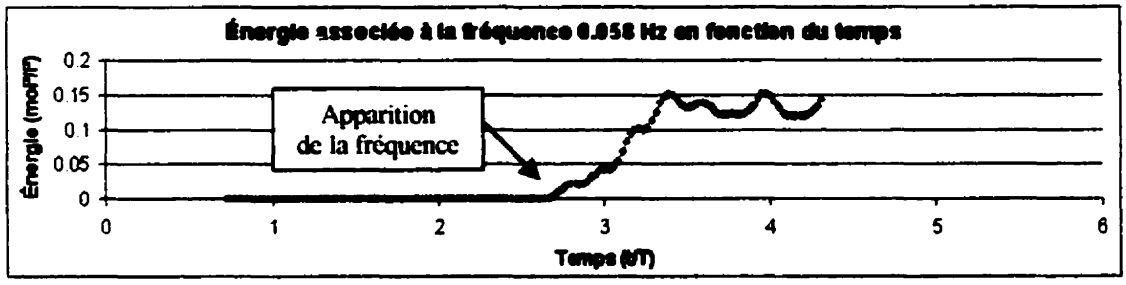


Figure 4.7 : Énergie associée à la fréquence de 0.058 Hz

Ainsi, la fréquence recherchée, possède une énergie suffisante pour être détectée (1% de l'énergie maximum) à partir de t = 2.667 T. Ceci indique que l'information analysée à l'étape 3, pour obtenir la distribution des temps de séjour, provient d'une injection qui a eu lieu à t = 2.667 T - 0.256 T (le décalage) = 2.411 T. Le temps réel de l'injection étant de 2.308 T, l'erreur commise est de 4.5 %. En somme, la distribution des temps de séjour a été déterminée et l'information, qui a servi à l'établir, identifiée.

4.2.9 Exemple numérique en régime non-permanent

Dans cet exemple, le réservoir étudié est modélisé dans un premier temps comme un réacteur ayant les paramètres suivants : un temps de rétention hydraulique (T_1) de 769

secondes, un nombre de réacteurs complètement mélangés (J_1) de 2 et un décalage (dec_1) de 169 secondes. Après une période de 1333 s, le débit d'entrée diminue. À partir de ce moment le réservoir se comporte comme un réacteur ayant les caractéristiques suivantes : un temps de rétention hydraulique (T_2) de 1500 secondes, un nombre de réacteurs complètement mélangés (J_2) de 2 et un décalage (dec_1) de 200 secondes.

Étapes 1) et 2)

Le signal d'injection à l'entrée est un signal sinusoïdal ayant d'abord, une amplitude de 1 mol/l et une fréquence de 0.0003 Hz soit environ 43% T_1 et puis une amplitude de 2 mol/l et une fréquence de 0.0015 Hz soit environ 44% T_2. Le changement de fréquence et d'amplitude a lieu au même moment que le changement de débit (cette coïncidence du changement de débit et du changement du signal d'entrée n'est pas nécessaire pour le fonctionnement de la méthode). La figure 4.8, présente ce signal d'entrée et le signal de sortie résultant.

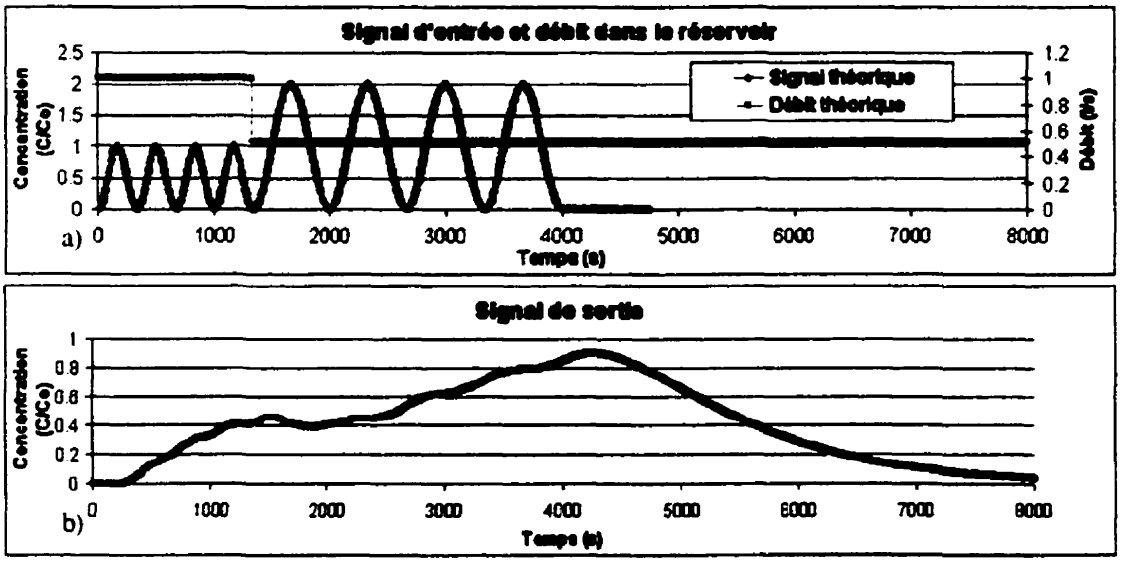


Figure 4.8 : a) Signal à l'entrée et b) signal à la sortie d'un réservoir en régime non-permanent

Étape 3, première fréquence

La première portion du signal de sortie à analyser est délimitée par le temps qui marque le début de l'injection et par la durée de l'injection de la première fréquence, augmentée

du décalage du réservoir. Dans le présent exemple, la première fréquence a été injectée de 0 à 1333 s. Le décalage observé dans le signal de sortie est de 171 s. Alors, la portion d'analyse est de 171 à 1504 s. De cette portion d'analyse on tire la distribution des temps de séjour comme lors de l'essai en régime permanent. La figure 4.9 présente la distribution des temps de séjour obtenue et la distribution théorique.

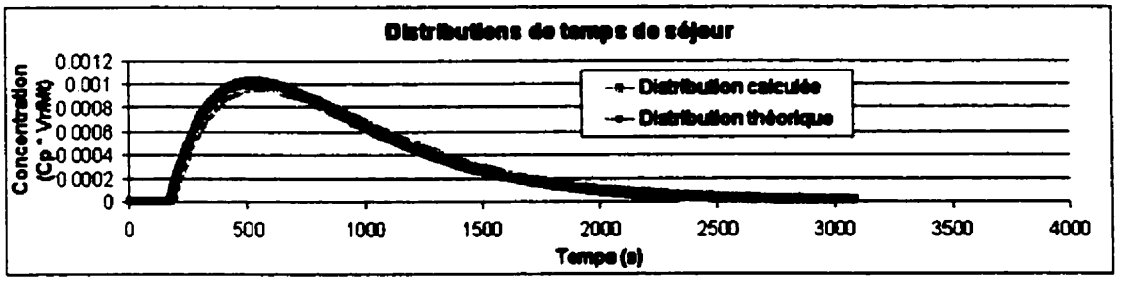


Figure 4.9 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour la première portion d'analyse

Étape 4, première fréquence

La première portion du signal de sortie se centre de la même façon que lors de l'exemple en régime permanent.

Étape 5, première fréquence

De la même façon que précédemment, le signal centré est entré dans la fonction *appdispfg()*. Il faut rechercher toutes les fréquences injectées. Dans le présent exemple, il y a deux fréquences qui ont été injectées, alors on fait la recherche de ces deux fréquences. La figure 4.10 présente l'énergie des fréquences de 0.0003 Hz et de 0.015 Hz en fonction du temps.

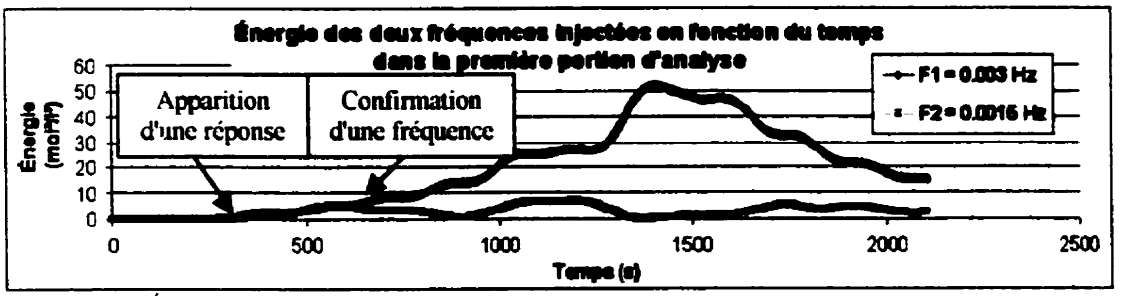


Figure 4.10 : Énergie des deux fréquences injectées première portion d'analyse

Le temps d'apparition des deux fréquences est le même (t = 172 s). Pourtant, seulement une fréquence correspond à la portion analysée. Il faut donc, que l'une de ces courbes soit seulement du bruit. Ce bruit provient du fait que, contrairement à un signal sinusoïdal continu, le signal étudié est discontinu (il est numérique). De plus, les fréquences injectées dans le présent exemple, sont multiples l'une de l'autre ce qui augmente le bruit. Cependant, à partir du temps t = 629 s, il est possible de départir quelle fréquence est véritablement présente. En effet, l'énergie de la fréquence de 0.0015 Hz diminue alors que l'énergie associée à celle de 0.003 Hz continue à augmenter.

Étape 6, première fréquence

Maintenant que l'information contenue dans la première portion d'analyse a été exploitée, Il faut soustraire du signal de sortie cette partie pour faire ressortir la deuxième portion. Pour ce faire, il suffit de soustraire la portion analysée plus sa décroissance (sa phase III) du signal de sortie. La décroissance est obtenue par calcul à partir des paramètres calculés à l'étape 3. La figure 4.11 présente la portion analysée et sa décroissance, le signal de sortie et le signal résultant.

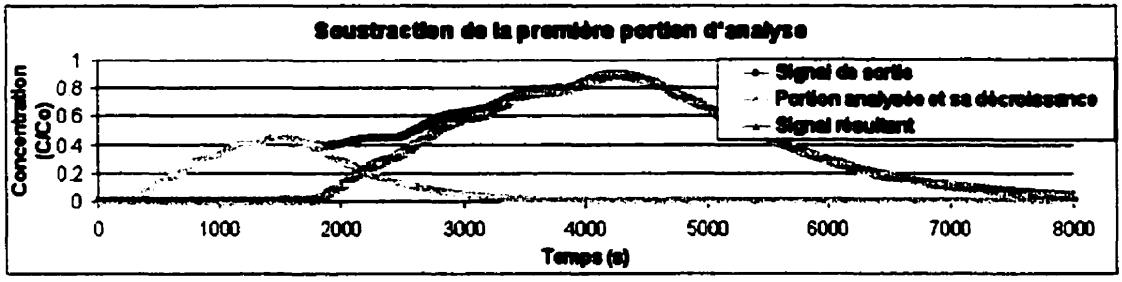


Figure 4.11 : Signal résultant de la soustraction de la première portion analysée du signal de sortie

Étape 3, deuxième fréquence

La seconde portion d'analyse débute où la première se termine (t = 1504 s) et elle est d'une grandeur égale à la durée de la seconde portion de l'injection (durée = 2664 s). Ainsi cette portion est comprise entre t = 1503 s et 4167 s. La valeur du décalage est

prise égale au moment du décrochage du signal de sortie avec le signal de décroissance. La figure 4.12 présente la distribution des temps de séjour obtenue et la distribution théorique.

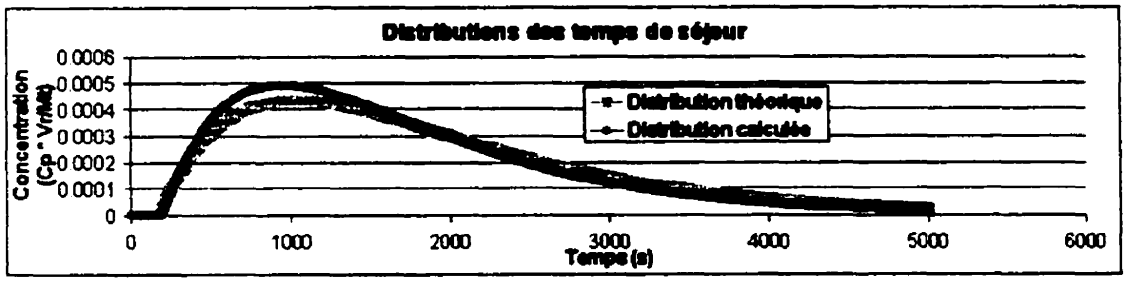


Figure 4.12 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour la seconde portion d'analyse

Les erreurs sont plus importantes que celles observées précédemment. Ceci résulte de l'incertitude sur le décalage qui est plus grande. Toutefois, cette incertitude ne peut pas se propager plus loin que la montée abrupte de la concentration qui délimite les portions d'analyses.

De plus, l'influence du décalage a été vérifiée par une série d'essais numériques, dans lesquels cette valeur était intentionnellement faussée. Ces essais ont montré qu'une erreur de plus ou moins 10% sur la valeur du décalage produit une variation de l'erreur moyenne entre la distribution des temps de séjour calculé et théorique de moins de 2%.

<u>Étape 4, deuxième fréquence</u>

La portion du signal de sortie qui est analysée est centrée de la même façon que précédemment.

Étape 5, deuxième fréquence

La recherche de la fréquence s'effectue de la même façon qu'a l'étape 5 précédente. La figure 4.13 présente l'énergie des fréquences de 0.0003 Hz et de 0.0015 Hz en fonction du temps.

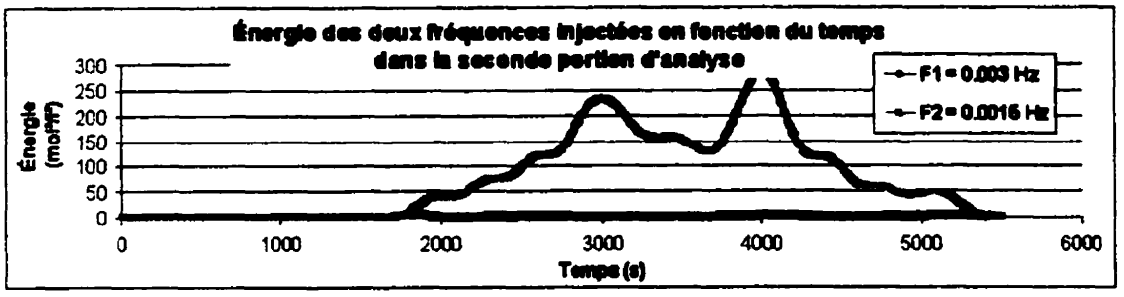


Figure 4.13 : Énergie des deux fréquences injectées dans un réservoir en fonction du temps dans la première portion d'analyse

Comme plus tôt, il y a présence d'un certain bruit, mais à partir du temps t = 1753 s, la fréquence recherchée est clairement identifiée. Dans cet exemple, il est possible d'affirmer sans ambiguïté que cette réponse de la fonction d'apparition de la fréquence est associée à du bruit, et non à une éventuelle interférence entre le première fréquence injectée et la seconde. Car l'équation utilisée pour construire le signal de sortie est une application linéaire. Ce qui signifie que le signal de sortie est constitué de la somme du signal produit par la première fréquence et celui obtenu pour la seconde. Étant donné qu'à l'étape 6, le signal dû à la première fréquence a été soustrait du signal de sortie, il ne reste dans celui-ci que la seconde fréquence.

Par contre, dans un cas réel, il est plausible que cette réponse soit autre chose que du bruit. Par exemple, la présence réelle d'une portion d'un train de fréquence autre que celle recherchée, qui aurait empruntée un autre chemin. Mais si tel est le cas, il sera impossible de le savoir.

4.3 Essais au laboratoire

Afin de valider les résultats obtenus lors des essais numériques, une série d'essais en laboratoire a été entreprise. Ces essais ont été effectués dans le laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal. Le montage qui a été utilisé est celui qui est décrit au chapitre II.

Dans cette section, un exemple d'essai en régime permanent et un en régime non-permanent sont présentés et discutés.

4.3.1 Exemple d'essai au laboratoire en régime permanent

L'essai présenté a été effectué le 9 décembre 1999. Le tableau 4.2 en présente les principales caractéristiques. Cet essai a été réalisé à l'aide du montage décrit à la section 2.3.1.1.

Tableau 4.2 : Principales caractéristiques de l'essai de traçage du 9 décembre 1999

Fréquence :	***0.00119***	***Hz soit 54.8% du Trh***
Traceur :	Rhodamine	WT
Volume de traceur :	88	Litres
Concentration moyenne :	0.0000114	C/C_o*
Volume du réservoir :	550	Litres
Débit moyen à l'entrée :	0.3585	litre/secondes
Débit d'injection maximal :	0.077	litre/secondes
Temps de rétention hydraulique :	1535	Secondes
Durée :	5040	Secondes

* C_o : Concentration de la solution mère

Étape 1 et 2

L'injection du traceur s'effectue à l'aide du montage décrit à la section 2.3.1.1. La figure 4.12 présente le signal d'entrée et de sortie du réservoir. Le signal d'entrée montré est un signal théorique, car le signal réel n'étant pas requis pour l'analyse, il n'a pas été

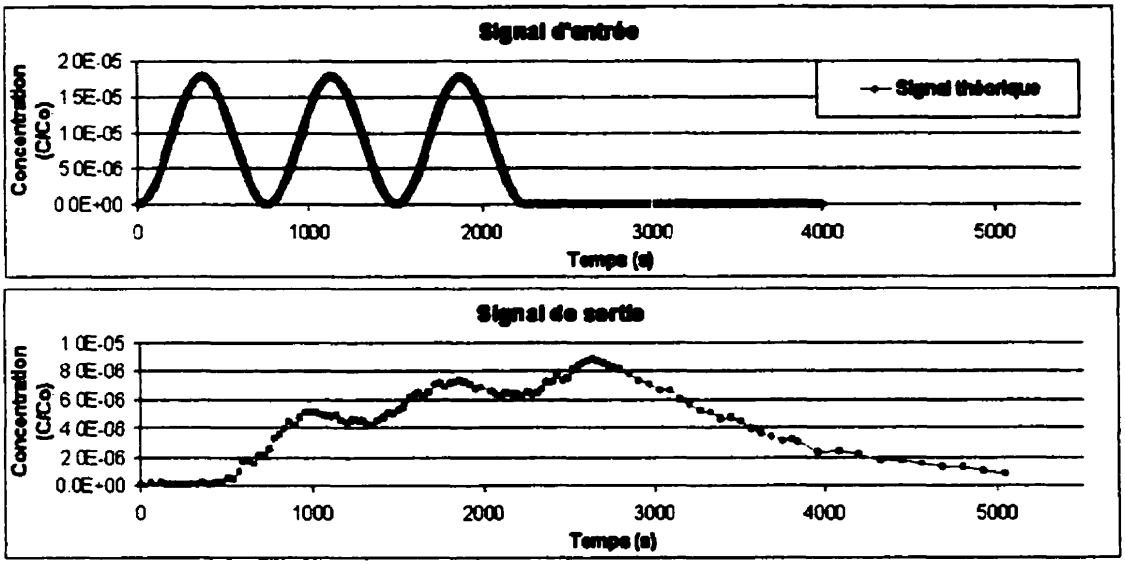


Figure 4.14 : Signal d'entré et de sortie de l'essai de traçage du 9 décembre 1999

échantillonné. Le signal de sortie diffère de ceux obtenus par essais numériques par ses petites variations présentes entre les points de mesure. Ceci entraîne une étape supplémentaire : le lissage des données. Car ces mesures servent au calcul de la dérivée numérique du signal de sortie, une opération mathématique très sensible à de telles variations faibles, mais rapides.

Ainsi le lissage est effectué dans MATLAB par la fonction prédéfinie *csaps()*. Cette fonction effectue le lissage en utilisant une sommation d'une série de splines cubiques. Ce qui a pour avantage d'assurer la continuité de la dérivée de la fonction. Toutefois l'utilisation de cette fonction nécessite l'intervention de l'utilisateur : un certain paramètre de lissage, qui ne peut être obtenu par calcul, doit y être indiqué.

La figure 4.15 présente le signal de sortie et le signal lissé. C'est ce dernier qui est analysé.

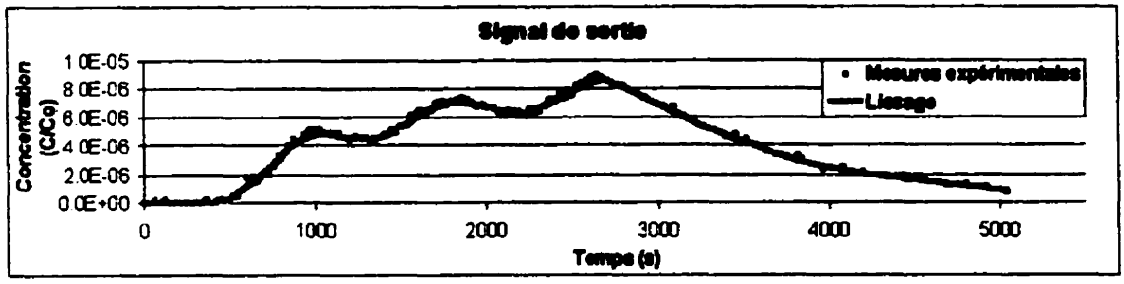


Figure 4.15 : Signal de sortie de l'essai de traçage du 9 décembre 1999 et son lissage

Étape 3)

La distribution des temps de séjour est déterminée de la même façon que précédemment. Toutefois, il y a une difficulté supplémentaire : le décalage est difficilement identifiable avec précision. En effet, les variations des mesures expérimentales, ne permettent pas de discerner clairement de faibles augementations de concentration à travers le bruit. Ainsi, le décalage devient un nouveau paramètre à résoudre par le solveur d'Exel, ce qui ajoute de l'imprécision aux résultats. La figure 4.16 présente la distribution obtenue et la distribution expérimentale de référence du réservoir (elle a été obtenue par un essai de traçage par impulsion sous des conditions similaires) pour une portion d'analyse d'environ 3 T.

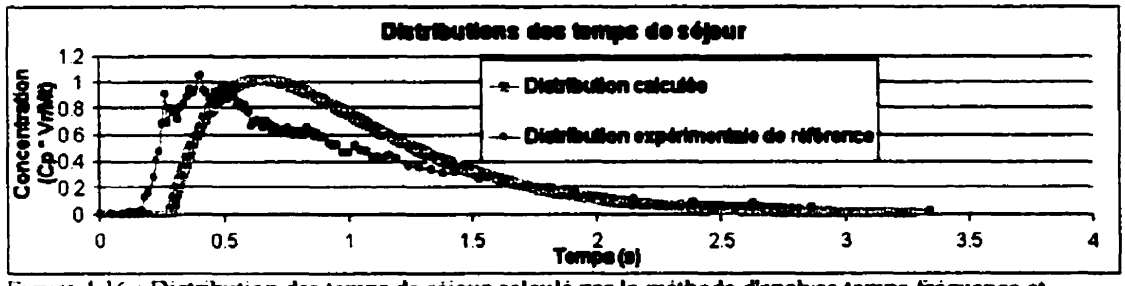


Figure 4.16 : Distribution des temps de séjour calculé par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour théorique pour l'essai du 9 décembre 1999

Les erreurs commises sur les valeurs de T_{10}, T_{50} et T_{90} sont, respectivement de 38.8 %, 6.6% et de 16.3%. Ces résultats seront discutés à la section 4.3.3.

Étape 4

La première portion du signal de sortie se centre de la même façon que lors de l'exemple en régime permanent.

Étape 5

Ensuite, le signal soustrait est entré dans la fonction *appdispfg()* ainsi que la fréquence recherchée. La figure 4.17 présente le résultat obtenu à l'aide de cette fonction.

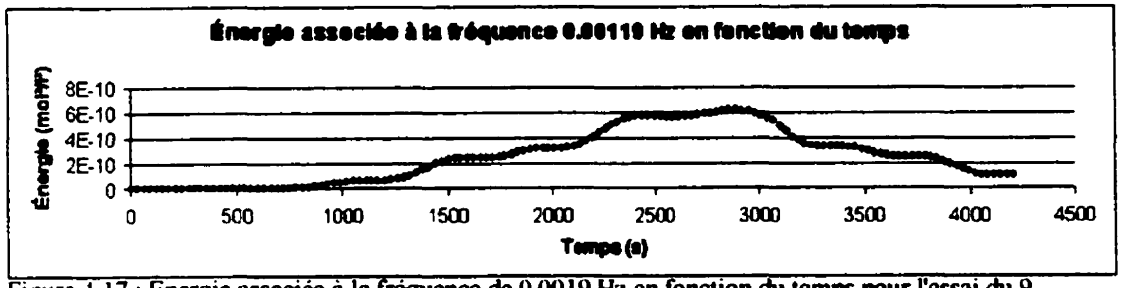


Figure 4.17 : Energie associée à la fréquence de 0.0019 Hz en fonction du temps pour l'essai du 9 décembre 1999

Ainsi, la fréquence recherchée, possède une énergie non nulle à partir de t = 390 s. Ce qui indique que l'information analysée plus haut, pour obtenir la distribution des temps de séjour, provient d'une injection qui a eu lieu à t = 390 s - 301 s (le décalage) = 89 s. Cette injection eu lieu à t = 0 s. Cette différence indique clairement qu'il y a une déficience au niveau de l'identification du décalage à l'étape 3.

Cependant, l'essai présenté ci-dessus se comporte dans son ensemble comme lors des essais numériques : il est possible de déterminer la distribution des temps de séjour malgré la présence des fréquences; ces fréquences demeurent détectables après leur passage dans le réservoir, sans être détruites par les phénomènes de dispersion-diffusion et elles permettent d'identifier la provenance de l'information.

4.3.2 Exemple d'essai au laboratoire en régime non-permanent

L'essai présenté a été effectué le 15 février 2000. Il a été réalisé sur le montage décrit à la section 2.3.1. Il s'est déroulé de la façon suivante:

- de 0 à 1550 secondes : injection de deux cycles de fréquence f_1 à une concentration C_{01}; le débit dans le réservoir est de Q_1;
- de 1550 à 2325 secondes : le débit passe subitement de Q_1 à Q_2 à l'entrée du réservoir; injection d'un troisième cycle de fréquence f_1 à une concentration C_{02} (ce changement de concentration est uniquement dû au changement de débit dans le réservoir);
- de 2325 à 5640 secondes : injection de trois cycles de la deuxième fréquence f_2 à une concentration C_{03}; le débit dans le réservoir demeure constant à Q_2.

Le tableau 4.3 résume les principales caractéristiques de cet essai.

Tableau 4.3 : Principales caractéristiques de l'essai de traçage du 15 février 2000

Traceur :	Rhodamine WT				
Fréquence 1:	0.00126	Hz soit 44.9% du Trh	Fréquence 2:	0.00086	Hz soit 54.8% du Trh
Traceur :	75	litres	Traceur :	120	litres
C_{01} :	1.50E-05	C/C_o*	C_{03} :	3.5E-05	C/C_o*
Volume :	593	litres	Volume :	593	litres
Q_1 :	0.3	l/s	Q_2 :	0.4	l/s
Q d'inj. Max.:	0.077	l/s	Q d'inj. Max.:	0.077	l/s
Trh :	1770	s	Trh :	1360	s
Durée :	2325	s	Durée :	3315	s

Étape 1 et 2

Comme précédemment, l'injection du traceur s'effectue à l'aide du montage décrit à la section 2.3.1.1. La figure 4.18 présente le signal d'entrée et de sortie du réservoir.

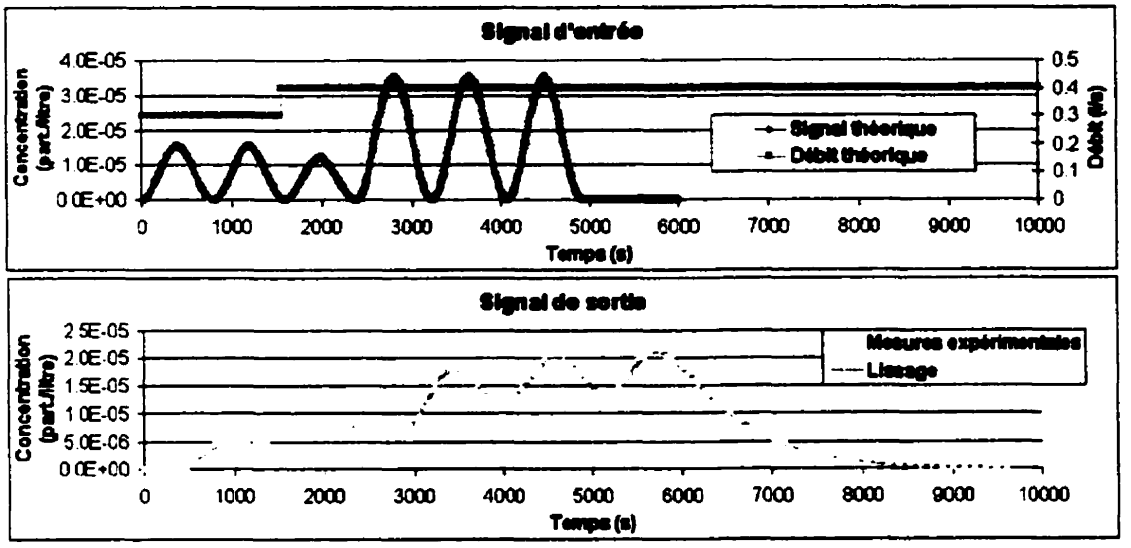


Figure 4.18 : a) Signal à l'entrée et b) signal à la sortie de réservoir lors de l'essai 15 février 2000

Étape 3, première fréquence

Comme plus haut, la première portion du signal de sortie à analyser est délimitée par le temps qui marque le début de l'injection et par la durée de l'injection de la première fréquence augmentée du décalage du réservoir. Dans cet exemple, la fréquence f_1 a été injectée de 0 à 2325 s. Le décalage observé dans le signal de sortie est d'environ de 300 s. Alors, la portion d'analyse est de 0 à 2625 s. De cette portion d'analyse on tire la distribution des temps de séjour comme lors de l'essai en régime permanent. La figure 4.19 présente la distribution des temps de séjour obtenue et la distribution théorique.

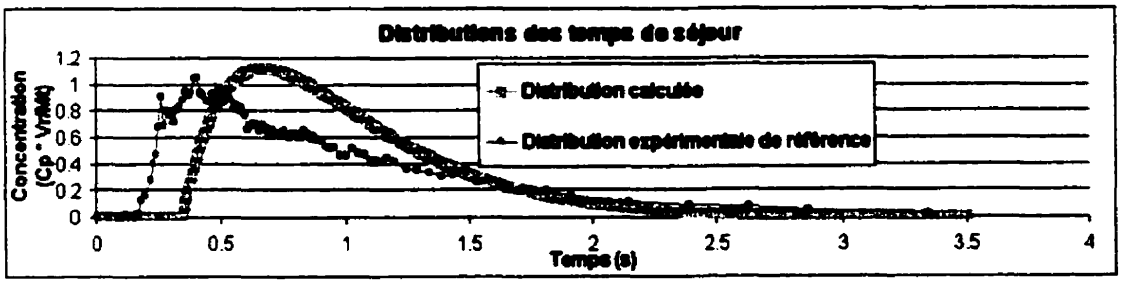


Figure 4.19 : Distribution des temps de séjour calculée par la méthode d'analyse temps-fréquence et distribution des temps de séjour de référence pour l'essai du 15 février 2000

Ainsi les erreurs sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} sont, respectivement de 51.6 %, 7.4% et de 19.2%. Ces résultats seront discutés à la section 4.3.3.

Étape 4, première fréquence

La première portion du signal de sortie se centre de la même façon que lors de l'exemple en régime non-permanent.

Étape 5, première fréquence

La fréquence recherchée est inconnue. Il faut donc rechercher toutes les fréquences injectées. La figure 4.20 présente l'énergie des fréquences de 0.00126 Hz et de 0.00086 Hz en fonction du temps. Le fréquence apparaît lorsque l'énergie qui lui est associée

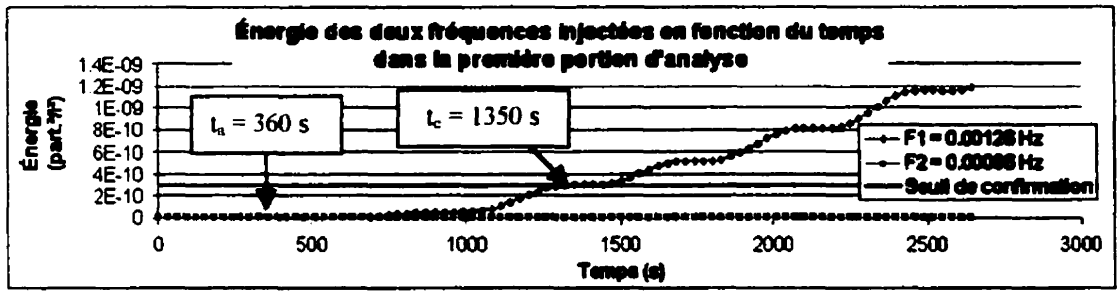


Figure 4.20 : Énergie associée à la fréquence de 0.00126 Hz en fonction du temps pour l'essai du 15 février 2000

franchit un certain seuil. Ce seuil sert à départir la réponse du bruit inhérant aux mesures expérimentales. Il est de 0.1 % de l'énergie produit par un signal d'un cycle ayant l'amplitude maximale du signal analysé et la même fréquence. Ensuite, le fréquence est confirmée lorsque son énergie franchit le seuil de confirmation. Ce seuil sert à départir le bruit produit par l'analyse. Il est de 75 % de l'énergie produit par un signal d'un cycle ayant l'amplitude maximale du signal analysé et la même fréquence. Ainsi, le temps d'apparition est de t_a = 360 s et le temps de confirmation est de t_c = 1350 s.

Les valeurs des seuils qui viennent d'être définis, ont été établies dans le cadre de l'essai étudié et n'ont pas de portée générale.

Étape 6, première fréquence

Comme précédemment, il faut soustraire du signal la première portion d'analyse pour faire ressortir la deuxième portion.

Étape 3, deuxième fréquence

Ensuite, la seconde portion est analysée. Cette portion est comprise entre t = 2640 s et 6060 s. La figure 4.21 présente la distribution des temps de séjour obtenue et la distribution de référence.

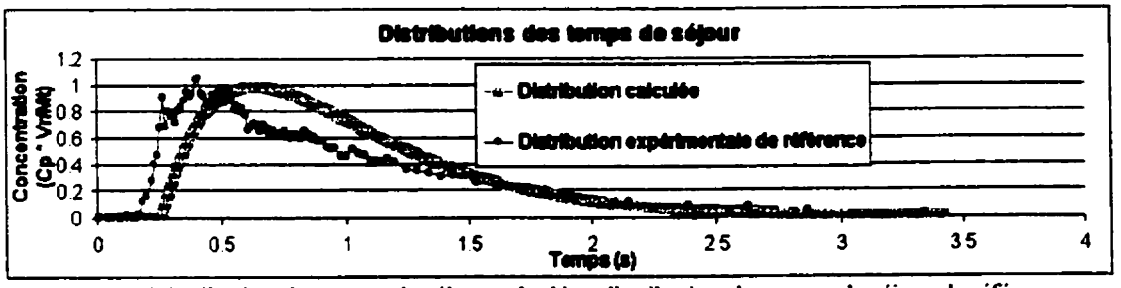


Figure 4.21 : Distribution des temps de séjour calculé et distribution des temps de séjour de référence pour la seconde portion de l'essai du 15 février 2000

Les erreurs ainsi faites sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} sont respectivement de 33.3%, 6.0% et 15.1%.

Étape 4, deuxième fréquence

La portion du signal de sortie qui est analysée est centrée.

Étape 5, deuxième fréquence

La recherche de la fréquence s'effectue de la même façon qu'auparavant. La figure 4.22 présente l'énergie des fréquences de 0.00126 Hz et de 0.00086 Hz en fonction du temps. Selon le seuil défini plus haut, le temps de d'apparition de la fréquence f_2 est de 3390 s et son temps de confirmation est de 4140 s.

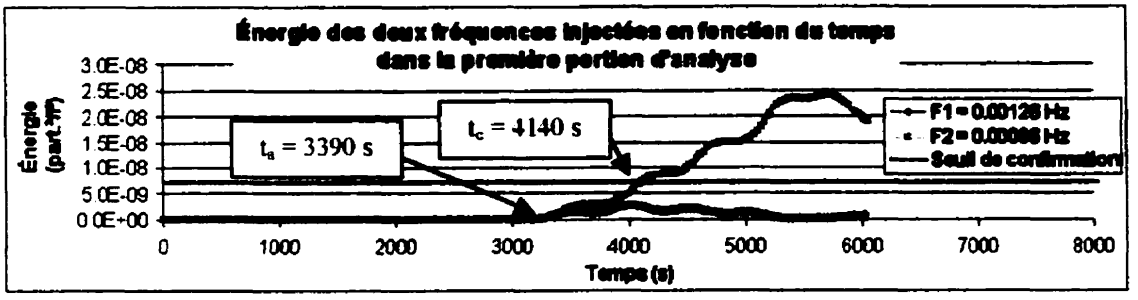


Figure 4.22 : Énergie associée à la fréquence de 0.00086 Hz en fonction du temps pour l'essai du 15 février 2000

4.3.3 Discussion des résultats laboratoires

La première chose qui frappe lors de la comparaison des essais effectués au laboratoire et ceux obtenus lors des essais numériques est la qualité des distributions des temps de séjour observée. En effet, les erreurs commises sont environ 2 fois plus importante en laboratoire que lors des essais numériques. Ceci s'explique principalement par deux choses : la difficulté de déterminer avec précision le décalage et les limites du modèle utilisé pour l'ajustement (étape 3). Ces deux points sont discutés dans cette section.

4.3.3.1 Déterminer le décalage

Lors des essais numériques, le décalage se détermine par l'apparition, dans le signal de sortie, d'une concentration différente de zéro. Alors que dans les essais laboratoires, les valeurs des concentrations sont toutes différentes de zéro à cause du bruit. En effet, avec la méthode d'échantillonnage employée, les erreurs sur la lecture des faibles concentrations sont importantes. De plus, le signal injecté à l'entrée du réservoir débute avec une concentration nulle qui augment lentement suivant une sinusoïde.

En conséquence, nous proposons de débuter l'injection dans une zone de la sinusoïde où le taux d'injection du traceur est maximal. Ainsi, le décalage va être marqué par une plus grande modification de la concentration au niveau du signal de sortie. La figure 4.23 présente le signal d'injection qui a été utilisé lors des essais laboratoires et le signal proposé.

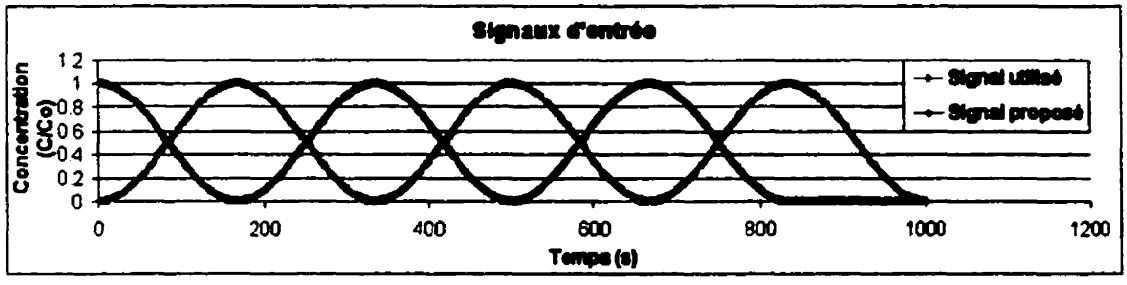


Figure 4.23 : Modification proposée au signal d'injection à l'entrée du réservoir.

Afin de mettre en évidence l'importance du décalage dans le calcul de la distribution des temps de séjour, l'analyse des essais en laboratoire a été reprise en utilisant les décalages expérimentaux obtenus par des essais de traçage par impulsion. Les erreurs sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} ainsi obtenues deviennent respectivement de 8.2%, 4.5% et 22.3% pour la première zone et de 11.0%, 4.8% et 22.6% pour la seconde. Ceci constitue un gain important. La tableau 4.4 résume ces résultats.

Tableau 4.4 : Erreurs sur les valeurs du T10, T50 et T90 en fonction du décalage

	ERREURS		
Première portion	**Résultats expérimentaux**	**Décalage corrigé**	**Gain**
T_{10}	49.5%	8.2%	41.3%
T_{50}	7.9%	4.5%	3.4%
T_{90}	30.1%	22.6%	7.7%
Seconde portion			
T_{10}	31.4%	11.0%	20.4%
T_{50}	6.5%	4.8%	1.7%
T_{90}	26.6%	22.6%	4.0%

4.3.3.2 Les limites du modèle numérique

Le modèle numérique qui est utilisé pour effectuer l'ajustement à l'étape 3 est-il approprié pour décrire le réservoir tracé ? Pour répondre à cette question, l'ajustement de ce modèle a été effectué sur un essai de traçage par impulsion réalisé sur le réservoir expérimental. Les distributions obtenues sont présentées à la figure 4.24. Cet ajustement

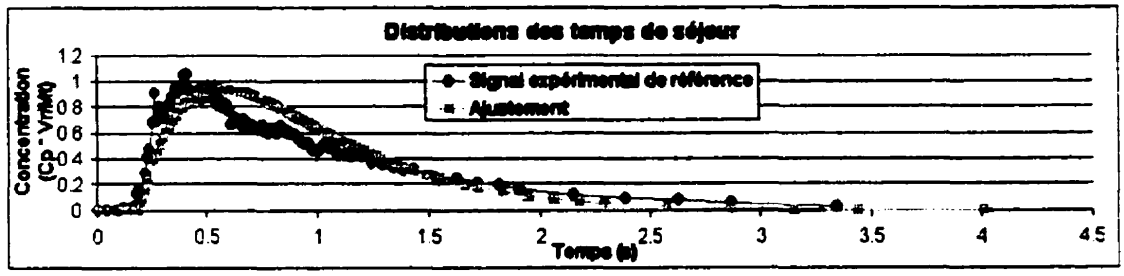


Figure 4.24 : Meilleur ajustement possible entre la distribution des temps de séjour du réservoir expérimental et le modèl numérique utilisé.

est le meilleur, au sens des moindres carrées, qu'il est possible d'obtenir pour le réservoir expérimental. Les valeurs obtenus par cet ajustement, sur le T_{10}, T_{50} et le T_{90} sont érronées de 14.2%, 1.9% et 17.1% respectivement. Ce qui constitue une source non-négligeable d'erreur. Ainsi, cette distribution est la meilleure qu'on puisse obtenir en utilisant ce modèle, à l'étape 3, de notre méthode. Si l'on compare les résultats expérimentaux avec cette distribution les erreurs sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} deviennent respectivement de 31.0%, 5.9% et 15.7% pour la première portion d'analyse et de 15.1%, 4.5% et 11.4% pour la seconde. De plus, si le décalage exact est utilisé ces valeurs sont réduites à 5.2%, 2.5% et 6.2% pour la première portion d'analyse et de 5.3%, 6.5% et 9.0% pour la seconde. Ces résultats sont présentés au tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Erreurs sur les valeurs du T_{10}, T_{50} et T_{90} en fonction du meilleur ajustement possible du modèle et du décalage exacte.

	Erreurs			Erreurs	
Première portion	**Résultats expérimentaux**	**Meilleur ajustement**	**Gain**	**Meilleur ajustement et décalage corrigé**	**Gain**
T_{10}	49.2%	31.0%	18.2%	5.2%	44.0%
T_{50}	7.9%	5.9%	2.0%	2.5%	5.4%
T_{90}	30.1%	15.7%	14.4%	6.2%	23.9%
Seconde portion					
T_{10}	31.4%	15.1%	16.3%	5.3%	26.1%
T_{50}	6.5%	4.5%	2.0%	6.5%	2.0%
T_{90}	26.6%	11.4%	15.2%	9.0%	17.6%

Finalement, il existe d'autres modèles systèmes qui décrivent le comportement hydraulique d'un réservoir. Ces modèles pourraient, sans difficulté, s'inscrire à l'étape 3 de l'analyse (c'est-à-dire que leurs paramètres seraient déterminés, comme présentement, pour chaque portion d'analyse), et possiblement, améliorer les performances de la méthode d'analyse temps-fréquence.

4.3.3.2 Autres limites de la méthode

La méthode comporte plusieurs autres limites. Dans cette section, les principales sont abordées.

D'abord, le critère qui sert à établir les portions d'analyse, *une variation brusque de la concentration*, est un critère qualitatif. Ce qui empêche son automatisation. Ainsi, une version quantitative de ce critère, qui pourrait bien être basé sur la dérivée du signal de sortie, reste à établir. De même que les implications de celui-ci sur la précision des résultats.

Ensuite, la méthode ne peut tenir compte d'une forte variation du débit dans le réservoir. Car cette forte variation aurait pour effet d'induire une variation brusque de la

concentration du traceur dans le réservoir. Ce qui délimiterait une portion d'analyse, avec, possiblement, pas suffisamment d'information, pour établir la distribution des temps de séjour. Dans ce cas, il faut attendre la délimitation d'une autre portion d'analyse attribuable à un changement de fréquence (qui est toujours accompagné d'un changement important de la concentration).

De plus, comme mentionnés plus haut, les seuils de détection et d'apparition des fréquences ont été élaborés à partir d'un seul essai. Pour établir des seuils ayant une portée générale, il faudrait réaliser une batterie d'essais pour couvrir la majorité des cas de bruit et d'interférence.

Enfin, le lissage du signal de sortie, n'est pas encore une opération automatisable. Toutefois, il serait possible d'établir un critère quantitatif pour ce lissage. Rappelons que le lissage sert à faire disparaître les discontinuités du signal de sortie. Ainsi, il est possible d'établir un critère en se basant sur la qualité de la dérivée du signal de sortie. Ce critère quantitatif reste à établir.

CHAPITRE V

DISCUSSION ET PERSPECTIVE

La méthode de traçage par analyse temps-fréquence a été développée dans le but de déterminer en continu la distribution des temps de séjour dans les réservoirs d'eau potable. Dans ce chapitre, nous allons discuter de la réalisation de cet objectif, en faisant ressortir les forces et les faiblesses de cette méthode. Ensuite, nous allons tenter de relever d'autres domaines d'application pour cette méthode.

5.1 Forces de la méthode

Comme il a été montré au chapitre IV, la méthode de traçage temps-fréquence a permis de déterminer lors d'essais numériques, avec une précision acceptable (erreurs < 10%), la distribution des temps de séjour dans un réservoir, en régime permanent et d'identifier, à l'aide de fréquences, le moment d'injection de l'information servant à l'analyse. Cette méthode, peut être répétée à tous les 1,5 T environ, ce qui permet d'approcher une connaissance de la distribution des temps de séjour en régime non-permanent et en continu 2 fois plus rapidement que la méthode conventionnelle.

La transposition de ces essais en laboratoire a permis de mettre en évidence une faiblesse dans la méthode d'injection du traceur. Cette faiblesse se traduit par une imprécision sur l'un des paramètres de la méthode, le décalage. Ainsi, les distributions de temps de séjour calculées sont de moins bonne qualité que lors des essais numériques (erreur jusqu'à 50 %). De même que précédemment, le moment de l'injection a été identifié grâce aux fréquences. Cette méthode a été répétée, avec succès après 2.5 T, ce qui a permis de calculer une nouvelle distribution des temps de séjour 1,4 fois plus rapidement que la méthode conventionnelle.

De surcroît, en corrigeant la méthode d'injection et en utilisant un modèle numérique plus approprié pour le réservoir tracé, il est permis de croire que la précision sur les distributions des temps de séjour pourra atteindre le niveau de celles obtenues lors des essais numériques.

De plus, étant basée sur un essai de traçage en continu, cette méthode permet de tenir compte des modifications apportées à la gestion de l'ouvrage (changememts de débit), des variations des paramètres physiques qui peuvent affecter l'eau et les écoulements (changement de température, changement de densité, etc.) et des modifications physiques du réservoir.

5.2 Faiblesses de la méthode

La principale faiblesse de la méthode de traçage temps-fréquence est qu'elle a été élaborée en laboratoire à partir d'un faible nombre d'essais (3 en régime permanent et 1 seul en non-permanent). D'autres essais en laboratoires s'imposent pour pouvoir établir un véritable protocole d'utilisation de la méthode. Notamment, pour déterminer les différents paramètres qui restent à quantifier (balise pour la portion d'analyse, seuils de détection et de confirmation des fréquences) et à automatiser (lissage du signal de sortie). Ces essais en laboratoires devraient être suivis par des essais en réseaux afin de valider les résultats obtenus. De plus, la méthode n'est valable, dans sa forme actuelle, que pour un réservoir ayant une seule entrée et une seule sortie. Sa généralisation aux réservoirs ayant plusieurs entrées et sorties, reste à effectuer.

5.3 Développement et perspectives

Une fois la méthode affranchie de ses faiblesses, il sera possible de généraliser son utilisation à des réservoirs aussi complexes que ceux utilisés dans les réseaux de distribution. Son intégration à un système de modélisation de la qualité de l'eau dans le

réseau de distribution est également à envisager. Ceci permettrait un meilleur suivi de la qualité de l'eau dans le réseau et en bout de conduite une meilleure eau pour le consommateur.

Une autre application sera son extension aux filtres dans les usines de traitement de l'eau potable. Pour ce faire, il suffira de se servir de l'évolution de la distribution des temps de séjour du filtre comme indicateur de sa performance.

CONCLUSION

L'effet des réservoirs d'eau potable sur la qualité de l'eau peut s'évaluer en déterminant leur temps de séjour. Plusieurs techniques existe pour déterminer ces temps de séjour : modèle numérique, modèle réduit et essais de traçage.

Le but de cette recherche était d'améliorer l'une de ces techniques, l'essai de traçage. L'utilisation d'un essai de traçage usuel se limitant au régime permanent, il faut effectuer, pour bien caractériser un réservoir une série d'essais sous plusieurs conditions d'utilisation. Car un réservoir d'eau potable fonctionne rarement en régime permanent. De plus, ces essais ne peuvent être reconduits, avant que la concentration du traceur à la sortie du réservoir ait atteint l'équilibre. Ce temps correspond à environ 3 à 4 fois le temps de séjour moyen (T) du réservoir tracé (AWWA, 1996).

Les améliorations proposées visaient à permettre l'utilisation en continu et en régime non-permanent de cette technique, afin de déterminer l'effet des réservoirs tracés sur la qualité de l'eau en temps réel.

Pour ce faire la technique de la corrélation croisée a été adaptée au traçage dans les réservoirs d'eau potable. Ensuite, elle a été testée numériquement. De ces essais il est ressorti que :

- les fréquences utiles pour un réservoir se comportant comme un réacteur complètement mélangé sont celles qui sont inférieures à 1/(70% T);
- et 1/(30% T) pour le cas d'un réservoir se comportant comme un réacteur piston;
- la détection dans le signal de sortie, des fréquences émises à l'entrée du réservoir, est plus aisée lorsque l'on soustrait de celui-ci le signal de sortie dû à signal rectangulaire correspondant;

- la méthode de la corrélation-croisée n'est pas utile lors d'essais de traçage dans les réservoirs d'eau potable, car elle requiert des données chronologiques bien supérieures à 4T, pour donner des résultats acceptables.

Après le rejet de cette technique, la méthode d'analyse temps-fréquence a été adaptée au traçage dans les réservoirs d'eau potable. Elle a été testée à l'aide d'essais numériques et laboratoires. Les essais numériques ont montré que cette technique :

- permet de déterminer la distribution des temps de séjour en régime permanent avec des erreurs inférieure à 10 % sur le T_{10}, T_{50} et T_{90}, et d'identifier à l'aide de fréquences, l'information qui sert à établir cette distribution;
- peut être répété à tous les 1,5 T, permettant d'approcher la connaissance des temps de séjour en continu et en régime non-permanent.

Les essais en laboratoire ont montré, quant à eux, que cette technique :

- permet de déterminer la distribution des temps de séjour en régime permanent avec des erreurs inférieure à 50% sur le T_{10}, T_{50} et T_{90}, et d'identifier à l'aide de fréquence, l'information qui sert à l'établir;
- peut être répété à tous les 2,5 T, permettant d'approcher la connaissance des temps de séjour en continu et en régime non-permanent.

Toutefois, il semble possible de ramener la qualité de ses résultats au niveau de ceux obtenus numériquement en modifiant la méthode d'injection du traceur et en employant un modèle mathématique mieux adapté aux réservoirs d'eau potable.

De plus, d'autres essais au laboratoire s'imposent pour pouvoir établir un véritable protocole d'utilisation de la méthode. Plusieurs paramètres restent à quantifier (définition de la portion d'analyse, seuils de détection et de confirmation des fréquences) et à automatiser (lissage du signal de sortie).

En somme, les techniques du traitement du signal, qui ont été utilisées dans ce travail, s'adaptent aux essais de traçage dans les réservoirs d'eau potable. Toutefois, la nature même des réservoirs (long temps de séjour, présence de dispersion) fait en sorte que les fréquences utilisables sont faibles et conséquemmement peu énergétiques. Ce qui diminue grandement la souplesse et de ces techniques. Malgré cela, la technique temps-fréquence demeure prometteuse.

RÉFÉRENCE

AMBLARD, C., BOURDIER, G., CARRIAS, J.-F., MAURIN, N. et QUIBLIER, C. (1996). Évolution saisonnière de la structure des communautés microbienne dans un réservoir d'eau potable. Water Research, 30(3), 613-624.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, R. F. (1995). Full-scale ozone contactor study, AWWA Research Fondation and American Water Work Association, Denver. 180 p.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, R. F. (1996). Tracer studies in water Treatment Facilities : A protocol and case studies, AWWA Research Foundation, Denver. 152 p.

BENDAT, J. S. et PIERSOL, A. G. (1993). Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, New York. 458 p.

BOCCELLI, D. L., TRYBY, M. E., UBER, J. G., ROSSMAN, L. A., ZIEROLF, M. L. et POLYCARPOU, M. M. (1998). Optimal Scheduling of Booster Disinfection in Water Distribution Systems. Journal of Water Resources Planning and Manegement, 124(2), 99-111.

BOULOS, P. F., GRAYMAN, W. M., BOWCOCK , R. W., CLAPP, J. W., LEWIS, R. A., CLARK, R. M., DEININGER, R. A. et DHINGRA, A. K. (1996). Hydraulic mixing and free chlorine residual in reservoirs. Journal of the American Water Works Association, 88(07), 48-59.

BRAEKMAN, T., SERVAIS, P. et ADRIANA, A. (1995). Dynamique bactérienne dans les réservoirs et les réseaux d'eau potable. , Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatique, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

BRIÈRE, F. G. (1994). Distribution et collecte des eaux, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. 355 p.

BROCARD, D., VANDEVENTER, L., PIZZI, N. et SARROUH, S. (1998). Optimization of Tank Design Using CFD Modeling. Water Quality Technology Conference, San Diego, 10 p.

BRUMO, G. W. (1972). Interpretation of Tracer Tests on Sedimentation Tanks. Tappi, 55(7), 1097-1102.

CARTWRIGHT, M. (1990). Fourier methods for mathematicians, scientists end engineers, Ellis Horwood, Nottingham. 250p .

CHAN HILTON, A. B., MCGILLIVARY, D. L. et ADAMS, E. E. (1998). Residence time of freshwater in Boston's inner harbor. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering(March/April), 82-89.

CHAUDRY, M. H. (1993). Open-channel flow, Prentice-Hall, New Jersey. 483 p.

CHEN, L. et HU, G.-H. (1993). Applications of a statistical theory in residence time distributions. AIChE Journal, 39(9), 1558-1562.

CLARK, R. M., ABDESAKEN, F., BOULOS, P. F. et MAU, R. (1996). Mixing in Distribution System Storage Tanks : Its Effect on Water Quality. Journal of Environmental Engineering, 122(9), 814-821.

CLARK, R. M. et COYLE, J. A. (1990). Measuring and modeling variations in distribution system water quality. Journal of american water works association, 82(08), 46-53.

CLARK, R. M. et GRAYMAN, M. (1992). Distribution system quality : A trade-off between public health and public safety. Journal of the American Water Works Association, 84(07), 18 p.

COHEN, L. (1995). Time-Frequency Analysis, Prentice Hall, New Jersey. 299 p.

DANCKWERTS, P. V. (1958). Continuous Flow Systems, Distribution of Risidence Time. Chemical Engineering science, 2(1), 1-13.

DE COULON, F. (1990). Théorie et traitement des signaux, Presses Polytechniques romandes, Lausanne. 547 p.

DOUKI, J. (1999). Sediments characterization and water quality variation in storage tanks. AWWA -WQTC, Tampa.

FEDERATION, W. E. ET ENGINEERS, A. S. O. C. (1998). Design of Municipal Wastewater Treament Plants, 1000 p.

FORTIN, A. (1995). Analyse numérique pour ingénieurs, Éditions de l'école Polytechnique de Montréal, Montréal. 448 p.

GAUTHIER, V., BESNER, M.-C., BARBEAU, B., MILLETTE, R. et PRÉVOST, M. (2000). Storage Tank Management to Improuve Drinking Water Quality : Case Study. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 126(4).

GAUTHIER, V., GÉRARD, B., PORTAL, J.-M., BLOCK, J.-C. et GATEL, D. (1999). Organic Matter as Loose Deposits in a Drinking Water Distribution System. Water Research, 33(4), 1014-1026.

GRAYMAN, W. M. et CLARK, R. M. (1993). Using computer models to determine the effect of storage on water quality. Journal of the American Water Works Association, 85(07), 67-77.

GRAYMAN, W. M., DEININGER, R. A., GREEN, A., BOULOS, P. F., BOWCOCK, R. W. et GODWIN, C. C. (1996). Water quality and mixing models for tanks and reservoirs. Journal of the American Water Works Association, 88(07), 60-73.

HANNOUN, I. A., BOULOS, P. F. et LIST, J. E. (1998). Using hydraulic modeling to optimize contact time. Journal of the American Water Works Association, 90(08), 77-87.

KENNEDY, M. S., MOEGLING, S., SARIKELLE, S. et SURAVALLOP, K. (1993). Assessing the effects of storage tank design on water quality. Journal of the American Water Works Association, 85(07), 78-88.

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

KIRMEYER, G. J., KIRBY, L., NORAN, P. F., MARTEL, K. D., LUND, T. W., ANDERSON, J. L., MEDHURST, R. et CAPRARA, M. (1998). Maintaining Water Quality in Finished Water Storage Facilities. Water Quality Technology Conference, San Diego, 24.

KREYSZIG, E. (1993). Advanced engineering mathematics, John Wiley & sons, Columbus. 1271 p.

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

LU, W., KIÉNÉ, L. et LÉVI, Y. (1999). Chlorine Demand of Biofilms in Water Distribution Systems. Water Reasearch, 33(3), 827-835.

MAU, R. E., BOULOS, P. F., CLARK, R. M., GRAYMAN, W. M., TEKIPPE, R. J. et TRUSSELL, R. R. (1995). Explicit Mathamatical Models of Distribution Storage Water Quality. Journal of Hydraulic Engineering, 121(10), 699-709.

MAX, J. (1972). Méthodes et techniques de traitement du signal et apllications aux mesures physiques, Masson et Cie, Paris. 331 p.

MAX, J. (1981). Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, Mason et Cie, Paris. 238 p.

MAYS, L. W. (2000). Water distribution systems handbook, McGraw-Hill, New York. 600 p.

MUNSON, R. B., YOUNG, D. F. et OKIISHI, T. H. (1994). Fundamentals of fluid Mechanics, John Wiley & sons. 893 p.

REBHUN, M. et ARGAMAN, Y. (1965). Evaluation of Hydraulic Efficiency of Sedimentation Basins. Journal of the Sanitary Engineering Division, 91(SA5), 37-45.

RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1980). Ondes, optiques et physique moderne, Éditions du Renouveau Pédagogique, Ottawa. 411 p.

ROSSMAN, L. A. et GRAYMAN, W. M. (1999). Scale-Model Studies of Mixing in Drinking Water Storage Tanks. Journal of Environmental Engineering, 125(8), 755-761.

ROSSMAN, L. A., UBER, J. G. et GRAYMAN, W. M. (1995). Modeling Disinfectant Residuals in Drinking-Water Storage Tanks. Journal of Environmental Engineegring, 121(10), 752-755.

SAPATARU, A. (1987). Fondements de la théorie de la transmission de l'information, Presses polytechniques romandes, Lausanne. 605 p.

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

TA, C. T. (1998). Computational Fluid Dynamic Tools for Treated Water Reservoir Mixing studies. Water Quality Technology Conference, San Diego, 12.

TCHOBANOGLOUS, G. et SCHROEDER, E. D. (1985). Water Quality, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 768 p.

VYGODSKI, M. (1990). Aide-mémoire de mathématiques supérieures, Der-Mégréditchian, G., translator, Édition de Moscou, Moscou. 846 p.

WANG, H. et FALCONER, R. A. (1998). Numerical Modeling of Flow in Chlorine Disinfection Tanks. Journal of Hydraulic Engineering, 124(9), 918-931.

WANG, H. et FALCONER, R. A. (1998). Simulating Disinfection Processes in Chlorine Contact Tanks Using Various Turbulence Models and High-Order Accurate Difference Schemes. Water Research, 32(5), 1529-1543.

WOODWARD, D., CESARIO, L. et GERTIG, K. (1998). Scale Modeling of Water Storage Tanks to Improve Flow Circulation. Water Quality Technology Conference, San Diego, 21 p.

ANNEXE I

PRINCIPALES FONCTIONS PROGRAMMÉES

```
function [ss] = rcmg_vc(sc,trhM,J,decamod);
% Fonction qui simule le passage d'un traceur dans un réservoir
% défini par trhM, J et decamod
% sc = matrice qui représente le signal d'entrée
% ss = matrice qui représente le signal de sortie
% trhm    : Temps de retension hydraulique du modèle
% J       : Nombre de réacteur complètement mélangé du réacteur modélisé
% decamod : Paramètre d'ajustement du réacteur
inter   = sc(2,1) - sc(1,1); % Détermine le pas de temps du signal d'entrée
m       = length(sc); % Détermine la longueur du signal d'entrée
ss      = zeros(size(sc)); % Initialise le signal de sortie
ideca   = find(sc(:,1)==decamod); % Détermine la position du décalage dans sc
aug     = zeros(length([0:inter:sc(ideca-1,1)]),1);
nsc     = [aug;sc(:,2)];
nsc     = nsc(1:m);
nsc     = [sc(:,1) nsc];
for u=1:m
  sst    = rcm5_vc(nsc(u,2),sc(:,1),J,sc(u,1),trhM); % Calcul de la propagation d'une particule
  ss(:,2) = ss(:,2) + sst(:,2); % Sommation des propagations de toutes les particules
end
ss(:,1) = sc(:,1);


function [ss] = rcm5_vc(sc,t,J,dec,trhM);
% trhM : temps de retension hydraulique du modèle
% J : nombre de réacteur completement mélangé
% dec : décalage ou temps de réponse du réacteur
% t : plage temporel sur laquelle est compté l'exponentielle decroissante
% sc : amplitude de la concentration du traceur
dt = t(2)-t(1); % pas de temps
h  = length(t); % détermine la longueur du vecteur t
ic  = find(t==dec); % Trouve le point de coupure
tc  = t(ic:h); % Détermine le domaine temporel qui sera utilisé pour les calculs
ss  = sc .* (J.^J)/(prod(1:J-1)).*((tc-dec)/trhM).^(J-1) .* exp(-J.*(tc-dec)/trhM);
% Fonction de transfère
ss  = ss ./ trhM;
ss  = ss .* dt; % Pour que les aires soient correspondantes il faut * par dt
manque  = h - length(tc); % Calcul la quantité de points manquants
sm      = zeros(manque,1); % Crée une matrice de zéros de la taille du manque
ss      = [sm;ss]; % Et l'associe au ss
ss      = [t ss]; % Ajoute le vecteur t au ss
```

```
function [cc_xy]=jcorrele3(t,se,ss);
% Fonction qui calcule la corrélation croisée entre deux sigaux temporel : se et ss
int = t(2)-t(1); % Détermine le pas de temps des signaux, il doit être constant
n  = length(se); % Détermine la longueur du signal d'entrée
freq = frequence(t); % Fonction qui cacule le domaine frequentiel d'une série temporel
X = fft(se); % Calcul la transformée de Fourier du signal d'entrée
Y = fft(ss); % Calcul la transformée de Fourier du signal de sortie
CC_xy = Y .* conj(X); % Calcul de la corrélation croisée spectrale
cc_xy = ifft(CC_xy); % Calcul de la corrélation croisée
cc_xy = real(cc_xy); % Retrait de la partie imaginaire de cc_xy;
cc_xy = [t(1:floor(n/2)) cc_xy(1:floor(n/2))]; % Coupe la partie redontante de la C.C.


function [f]=frequence(t);
% Fonction qui calcul le domaine fréquentiel associé au domaine
% temporel de vecteur t
int = t(2)-t(1); % Incrément temporel
n = length(t); % Longueur du vecteur temporel
freq = 0:1/(n*int):1/int; % Calcul du domaine fréquentiel
lf = length(freq); % Longueur du vecteur fréquentiel
f = [freq(1:lf-1)]'; % Transposée du vecteur fréquentiel


function [Vs]=signal_666(K,t,t2,dt);
% Fonction qui calcul un signal d'amplitude et de fréquence aléatoire
% K = l'amplitude maximale du signal
% t = temps maximal ou l'amplitude du signal est différente de zéro
% t2 = Durée maximale du signal
% dt = Pas de temps du signal
t1  = 0:dt:t; % Crée le vecteur temporel ou le signal est non nul
t1  = t1'; % Transposé du vecteur ligne t1
ft = K*rand(size(t1)) -0.5; % Crée un vecteur aléatoire centré de meme dimension qui t1
t2 = (t+dt):dt:t2; % Crée le vecteur temporel ou le signal est nul
t2 = t2'; % Transposé du vecteur ligne t2
o = zeros(size(t2)); % Crée un vecteur nul de meme dimension que t2
Vo = [t2 o]; % Crée une matrice Vo ayant comme 1er colonne t2 et comme 2ieme o
Vs = [t1 ft]; % Crée une matrice Vs ayant comme 1ere colonne t1 et comme 2ieme ft
Vs = [Vs;Vo]; % Crée une matrice Vs ayant comme 1 ere partie Vs et comme 2ième partie Vo

function [Sxx] = autocorrel_spec(x,G); % Fonction qui calcul l'autocrorrélation spectral d'une x(t)
lx    = length(x);
npp=lx;
X    = fft(x(:,2));
Xp   = conj(X);
Sxx  = Xp .* X;
jus  = floor(npp/2);
Sxx  = Sxx(1:jus);
f    = frequence(x(:,1));
f    = f(1:jus);
Sxx  = [f Sxx];
if G == 1
  gra(Sxx);
end;
```

```
function [couple,def,fenetre]=appdispfg(ss,fo,fenetre);
% ss : Signal de sortie
% fo : Matrice contenant les fréquences initiales à reconaître
% dtana : Pas de temps pour l'analyse d'apparition et disparition de la frequence
% fenetre : Fenetre d'analyse
% ssa    : signal qui va être analyser
% ok     : interrupteur
dt = ss(2,1) - ss(1,1); % Pas de temps de calcul initiale
%[ff1] = filtrebb(ss,0.5*1/dt);
ssa = ss; % Initialise la variable de sortie
mp = []; % Initialise mp
couple = []; % Initialise couple
ok = 0; % Initialise l'interrupteur
dtana = dt;
inc1 = dtana/dt; % Increment pour l'analyse
idice1 = 1; % idice1 et idice2 représentent les valeurs des indices qui définissent la fenêtre glissante
%fenetre = floor(2 ./ fo); % Largueur minimale de la fenêtre pour que la frequence en question puisse
apparaître à l'analyse

while ok == 0
    idice2 = floor(fenetre/dt) + 1; % Idice indique le nombre de point dans la fenetre
  freq  = [0:1/(idice2*dt):1/dt]'; % Calcul du champ frequentiel obtenu pour le nombre de point dans la
fenestre
  pol   = pluspres(fo,freq); % Donne la position de la fréquence la plus près de la frequence injectée
  resolution = abs(freq(pol) - fo) ./ fo; % Calcul l'erreur de cette frequence par rapport à celle recherché
  if resolution > 0.05 % Si cette erreur est plus grande que 0.1 alors...
    fenetre = fenetre + dt; % On augmente la fenetre de dt
  else
    ok = 1;
  end
end
lss   = length(ssa); % Longueur de la fonction d'analyse
while idice2 <= lss
  fa = []; % Initialise la variable fa
  Sfa = []; % Initialise Sfa
  fa = ssa(idice1:idice2,:); % Fonction qui va être analysée
  [Sfa] = autocorrel_spec(fa,0); % Fonction d'autocorrelation de fa
  [ff1] = filtrecarre2(Sfa(:,2),1,0.1*fo,fo,Sfa(:,1)); % Filtre carre
        0-1 centré à fo avec une largeueur de bande =
  position = pluspres(fo,Sfa(:,1));
  position = position(1);
  coupleT = [ssa(idice2,1) Sfa(position,1) ff1(position)];
  couple = [couple;coupleT];
  idice1 = idice1 + inc1;
  idice2 = idice2 + inc1;
end % while
if isempty(couple)
  couple = [0 0 0];
end % if
else
  mat = zeros(lss,3);
```

```
  lc  = length(couple);
  mat(1:lc,:) = couple(1:lc,:);
  couple = mat;
end % if
def = [couple(:,1) couple(:,3)];
imper('def1',def);
imper('onde_s',onde_s);
```

ANNEXE II

EXEMPLE D'UNE FEUILLE DE CALCUL

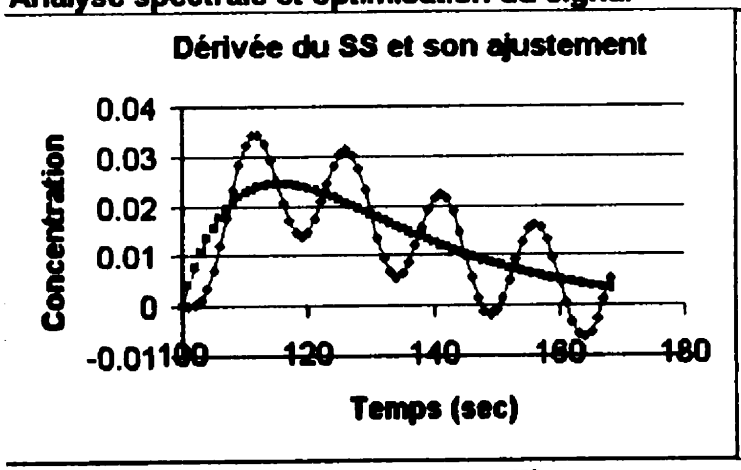
La figure A2.1 présente un exemple de feuille de calcul utilisée pour déterminer la distribution des temps de séjour à partir d'une portion d'analyse. Dans les deux premières colonnes on y retrouve la portion d'analyse. Cette portion d'analyse provient d'un signal de sortie d'un réservoir ayant subi un signal d'entrée sinusoïdale. Elle est illustrée par la courbe *mauve* du graphique «SS de sortie et intégral de son optimisation». La dérivée du signal est effectuée dans la colonne suivante, afin de permettre l'ajustement du modèle numérique. Cette dérivée est illustrée par la courbe en *mauve* du graphique «Dérivée du SS et son ajustement».

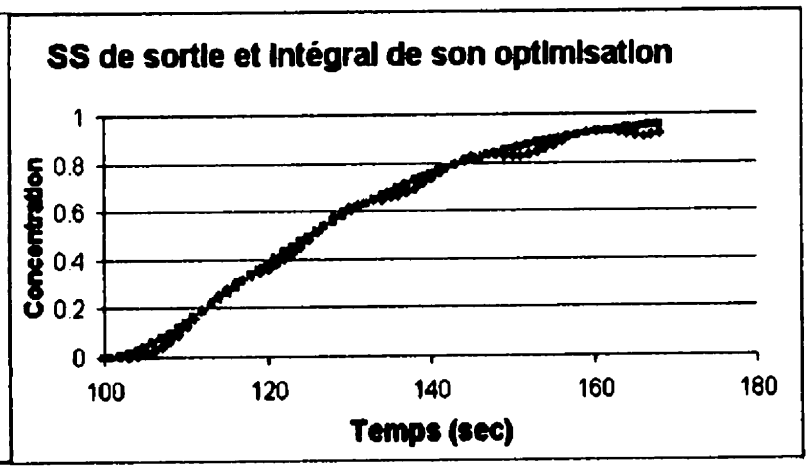
Une fois la dérivée en main, les 5 autres colonnes de la feuille de calcul s'établissent automatiquement. Ces colonnes représentent les différents paramètres nécessaires à l'ajustement au sens des moindres carrés du modèle (le modèle utilisé est celui décrit par l'équation 2.5). De ces colonnes on établit la nouvelle fonction (colonne suivante) en utilisant les valeurs des paramètres du modèle, décalage (dec.), le temps de séjour moyen (Tsm) et le nombre de réacteurs complètement mélangé (J). Cette nouvelle fonction est représentée par la courbe *rose* du graphique «Dérivée du SS et son ajustement».

Ensuite, on calcule l'intégrale de cette nouvelle fonction. Cette fonction est représentée par la courbe *rose* du graphique «SS de sortie et intégral de son optimisation». Après, on établit la distance euclidienne entre le signal original (les deux premières colonnes) et cette fonction.

Finalement, le solveur d'Excel minimise la distance euclidienne en variant les différents paramètres du modèle.

Analyse spectrale et optimisation du signal





dt := 1 doc.: 100 sec. **C1 :** 0.13437077 **Tsm :** 30.4735552 sec.

FONCTION OBSERVÉ J = 2

temps	amplitude	dérivée	u_i	e^{-2u}	$y_i u_i e^{-2u}$	e^{-4u}	u^2	$u_i^2 e^{-4u}$	Nouvelle F	F(Nouvelle F)	distance : 0.18150325
100	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
101	0.0000228	0.0000228	0.03281534	0.93647656	7.0066E-07	0.87698854	0.00107685	0.00094438	0.00412932	0.002064661	4.16919E-06
102	0.0002462	0.0002234	0.06563068	0.87698854	1.2858E-05	0.76910891	0.00430739	0.00331285	0.00773403	0.007996334	6.00646E-05
103	0.0015091	0.0012629	0.09844601	0.82127931	0.00010211	0.6744997	0.00969162	0.00653699	0.0108641	0.017295398	0.000249207
104	0.0050756	0.0035665	0.13126135	0.76910891	0.00036005	0.59152851	0.01722954	0.01019177	0.0135653	0.0295101	0.000597045
105	0.0123352	0.0072596	0.16407669	0.72025254	0.00085792	0.51876372	0.02692116	0.01396572	0.01587949	0.044232496	0.001017438
106	0.0244884	0.0121532	0.19689203	0.6744997	0.00161399	0.45494984	0.03876647	0.0176368	0.01784492	0.061094702	0.001340021
107	0.042273	0.0177846	0.22970736	0.63165323	0.00258046	0.3989858	0.05276547	0.02105267	0.01949658	0.079765454	0.001405684
108	0.065777	0.023504	0.2625227	0.59152851	0.00364993	0.34990598	0.06891817	0.02411488	0.02086639	0.099946941	0.001167585
109	0.0943693	0.0285923	0.29533804	0.55395264	0.00467779	0.30686353	0.08722456	0.02676604	0.0219835	0.121371886	0.00072914
110	0.1267615	0.0323922	0.32815338	0.51876372	0.00551426	0.2691158	0.10768464	0.02897964	0.02287448	0.143800878	0.00029034
111	0.1611873	0.0344258	0.36096871	0.48581012	0.00603699	0.23601148	0.13029841	0.03075192	0.0[illegible]56356	0.167019901	3.40192E-05
112	0.1956694	0.0344821	0.39378405	0.45494984	0.00617754	0.20697936	0.15506588	0.03209644	0.02407279	0.190838077	2.33417E-05
113	0.228328	0.0326586	0.42659939	0.42604991	0.00593579	0.18151853	0.18198704	0.03303402	0.02442224	0.215085594	0.000175361
114	0.2576748	0.0293468	0.45941473	0.3989858	0.00537927	0.15918967	0.21106189	0.03359887	0.02463016	0.239611793	0.000326272
115	0.2828438	0.025169	0.49223006	0.37364089	0.00462901	0.13960752	0.24229044	0.03382557	0.02471311	0.264283424	0.000344488
116	0.3037174	0.0208736	0.5250454	0.34990598	0.00383483	0.12243419	0.27567267	0.03375176	0.02468613	0.288983043	0.000217101
117	0.3209257	0.0172083	0.55786074	0.32767878	0.00314566	0.10737338	0.3112086	0.03341552	0.02456286	0.313607539	5.35556E-05
118	0.3357195	0.0147938	0.59067608	0.30686353	0.00268148	0.09416523	0.34889823	0.03285408	0.02435564	0.338066787	5.50976E-06
119	0.3497378	0.0140183	0.62349141	0.28737054	0.0025117	0.08258183	0.38874154	0.03210299	0.02407562	0.362282416	0.000157367
120	0.3647109	0.0149731	0.65630675	0.2691158	0.00264459	0.07242331	0.43073855	0.03119551	0.0237329	0.38618668	0.000461209

Figure A2.1 : Exemple d'une feuille de calcul