

Titre: Validation par un traçage des temps de séjour de l'eau dans un
réseau de distribution d'eau potable

Auteur: Mounia Benrhanem
Author:

Date: 1996

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Benrhanem, M. (1996). Validation par un traçage des temps de séjour de l'eau
dans un réseau de distribution d'eau potable [Mémoire de maîtrise, École
Citation: Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8992/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8992/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Raymond Desjardins
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

VALIDATION PAR UN TRAÇAGE DES TEMPS DE SÉJOUR DE L'EAU
DANS UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

MOUNIA BENRHANEM

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

NOVEMBRE 1996

© Mounia Benrhanem, 1996.



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

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

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 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.

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.

0-612-26456-4

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

VALIDATION PAR UN TRAÇAGE DES TEMPS DE SÉJOUR DE L'EAU
DANS UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Présenté par : BENRHANEM, Mounia

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

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

Mme PRÉVOST, Michèle, Ph.D., présidente

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

M. MARCHE, Claude, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes dont la patience et le support m'ont aidé à mener à terme ce travail.

J'entends tout spécialement monsieur Claude MARCHE, qui en dépit de son temps limité ne m'a ravi ni support technique ni collaboration.

Je remercie aussi, très sincèrement, tous les responsables et techniciens du service de l'environnement de ville de Laval qui m'ont fourni les données de base nécessaires à l'élaboration de ce projet : monsieur Pierre LAMARRE et monsieur Yves BLONDEAU, ainsi que toutes les personnes qui m'ont fait part, outre leur aide, de leurs connaissances sur les réseaux de distribution d'eau potable : Stéphane PERRON et Sylvie DESAUTELS.

Je remercie aussi John CIGANA, étudiant à la maîtrise, pour son aide précieuse et surtout, je tiens à remercier mon directeur de recherche, monsieur Raymond DESJARDINS qui, de par ses conseils judicieux et son support permanent, a su me diriger dans la rédaction de ce mémoire.

Enfin, un merci tout spécial à madame Micheline ROBERGE pour sa tolérance, son soutien moral et sa générosité inépuisable.

RÉSUMÉ

Plusieurs des contrôles qualitatifs qu'effectue le service de l'environnement à travers le réseau de distribution d'eau de ville de Laval ont trait à la recroissance microbienne et à l'analyse du chlore résiduel en réseau. Ces contrôles sont tributaires de l'évaluation des temps de séjour de l'eau en réseau.

Le logiciel PICCOLO dont dispose ville de Laval pour la simulation du réseau n'est pas calibré pour le calcul des temps de séjour ; ces derniers sont donc peu fiables.

Le présent travail a pour but d'améliorer la précision des valeurs des temps de séjour. La méthode utilisée consiste à concevoir un programme de modélisation hydraulique (PADRE) qui simule un écoulement piston dans les conduites pour prédire les temps de séjour de l'eau depuis l'usine jusqu'à chacun des points d'échantillonnage. Cette idée de suivre l'eau à travers tous les chemins depuis la source jusqu'au point d'échantillonnage permet d'évaluer l'effet des chemins à forte contribution et ceux à faible contribution sur la qualité de l'eau.

Les données de vitesses et de pressions calculées par PICCOLO sont fournies à PADRE qui calcule les temps de séjour pour chaque chemin. Le traçage en réseau réalisé sur les réseaux de ville de Laval à l'aide des fluorures a permis de mesurer les temps de séjour aux différents points d'échantillonnage et de calibrer PADRE.

Ces résultats nous ont permis, pour chacun des points d'échantillonnage, de déterminer une plage qui devrait contenir le temps de séjour mesuré par traçage, les limites de cette plage peuvent être utilisées pour estimer le chlore résiduel en réseau.

Ces résultats permettent d'affiner le contrôle qualitatif mais ne constituent pas un moyen irréprochable ; en effet :

- Le régime permanent considéré pour cette étude n'est pas représentatif d'un réseau de distribution où les consommations fluctuent durant la journée.
- Les mesures de vitesses sont souvent entachées d'erreurs qui croissent dans les petites conduites.
- De plus, même si PADRE permet d'évaluer l'effet des chemins à faible circulation d'eau, la valeur du temps de séjour peut être remise en question dès que l'erreur sur la vitesse est comparable à la vitesse.

En définitive, ce travail a permis d'émettre des recommandations pour améliorer le traçage en réseau. Il a permis en outre de montrer les limites d'un suivi des temps de séjour dans un réseau de distribution maillé. Les temps de séjour calculés peuvent en effet être bien loin de la réalité.

ABSTRACT

A number of the qualitative controls applied by the Environment Department to the City of Laval's water distribution network have to do with microbial regrowth and with the analysis of residual chlorine in the network. These controls are ancillary to the evaluation of the residence times of the water in the network.

PICCOLO, the software used by the City of Laval to simulate the network, is not calibrated to calculate residence times, with the result that these figures are not very reliable.

The objective of this work is to improve the accuracy of residence time values. The method used in designing a hydraulic modeling program (PADRE) which will simulate a plug flow in the pipes in order to predict the residence times of the water flowing from the plant to each of the sampling points. This idea of following the water along all the channels between the source and the sampling points through which it flows will make it possible to evaluate the effect of high circulation and low circulation channels on water quality.

The velocity and pressure data calculated by PICCOLO are input to PADRE, which calculates the residence times for each channel. Tracing performed on the City of Laval networks using fluorides has enabled both measurement of the residence times at different sampling points and calibration of PADRE.

These results have in turn enabled us to determine, for each sampling point, a range which includes the residence time measured by tracing. The limits of this range can then be used to estimate the residual chlorine in the network.

The results have also enabled refinement of the qualitative controls ; however, they do not constitute an infallible means for doing so ; in effect,

- The steady state mode considered for this study is not representative of a distribution network where consumption fluctuates over the period of a day.
- The measured velocities are often contaminated with errors which increase in small pipes.
- As well, even though PADRE enables evaluation of the effect of low-circulation channels, the value of the residence time is questionable when error value becomes comparable to the velocity.

Finally, this work has made it possible to make recommendations for improving tracing in a network. It has, among other things, made it possible to show the limitations of residence time monitoring in a meshed distribution network - the calculated residence times can, in fact, be very far from accurate.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
AVANT - PROPOS	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1 Influence des réseaux de distribution dans l'évolution de la qualité de l'eau.....	5
1.2 Influence du temps de séjour	8
1.3 Modélisation de la qualité de l'eau	9
1.4 Théorie des balancements hydrauliques	10
1.4.1 Éléments de base d'un réseau de distribution maillé	10
1.4.2 Position du problème hydraulique	11
1.4.3 Formulation du problème.....	11
1.4.4 Les équations de base.....	13
1.5 Calibration des modèles de balancement hydraulique.....	15
1.5.1 Généralités	15
1.5.2 Calibration du logiciel PICCOLO	17
1.5.3 RINCAD vs PICCOLO.....	20
1.6 Traçage en réseau.....	23

CHAPITRE 2 : LA PRODUCTION ET LA DISTRIBUTION D'EAU À

VILLE DE LAVAL	26
2.1 Aperçu géographique	26
2.2 Description du réseau de distribution d'eau potable	26
2.3 Caractéristiques des eaux brutes	29
2.4 Unités de production d'eau potable : trois usines	30
2.4.1 Usine Ste-Rose	30
2.4.2 Usine Chomedey	32
2.4.3 Usine Pont-Viau	33

CHAPITRE 3 : BALANCEMENT HYDRAULIQUE DU RÉSEAU DE

VILLE DE LAVAL	34
3.1 Mise en situation	34
3.2 Le logiciel RINCAD	35
3.3 Le logiciel PICCOLO	35
3.4 Choix du logiciel de balancement hydraulique	37

CHAPITRE 4 : PROGRAMME D'AIDE À LA DATATION EN RÉSEAU.....39

4.1 Mise en situation	39
4.2 Principe de calcul du temps de séjour	41
4.3 Méthode de simulation	43
4.4 Sensibilité du programme PADRE	50

CHAPITRE 5 : TRAÇAGE EN RÉSEAU DE VILLE DE LAVAL.....52

5.1 Introduction	52
5.2 Choix du traceur	52
5.3 Le mode de traçage	53
5.3.1 Organisation du traçage	53

5.3.1.1 Caractéristiques attribuées à chacune des usines	53
5.3.2 Traçage des réserves des usines de traitement de ville de Laval	54
5.4 Les points d'échantillonnage	55
5.5 La préparation des points d'échantillonnage	56
5.6 Procédure d'échantillonnage.....	61
5.7 Analyse des échantillons en laboratoire.....	61
CHAPITRE 6 : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	63
6.1 Temps de séjour mesurés par traçage	63
6.1.1 Résultats des mesures	63
6.1.2 Analyse des courbes de traçage aux usines.....	65
6.1.2.1 Usine Pont-Viau.....	74
6.1.2.2 Usines Chomedey et Ste-Rose	77
6.1.3 Évaluation des temps de séjour.....	81
6.1.3.1 Analyse des courbes de traçage en réseau.....	81
6.1.3.2 Valeurs des temps de séjour mesurés.....	82
6.1.4 Vitesses et pressions recueillies par Flotote.....	85
6.1.4.1 Résultats des mesures par Flotote	85
6.2 Résultats obtenus par simulation avec PICCOLO	86
6.2.1 Mise en situation	86
6.2.2 Résultats de simulation	90
6.3 Résultats de la simulation avec PADRE.....	91
6.3.1 Mise en situation	91
6.3.2 Points de prélèvement particuliers	91
6.3.3 Simulation directe avec PADRE.....	97
6.3.4 PADRE vs PICCOLO.....	100

CHAPITRE 7 : ANALYSE DES RÉSULTATS ET VALIDATION DES	
TEMPS DE SÉJOUR	102
7.1 Analyse des résultats de vitesse et de pression	102
7.2 Analyse des temps de séjour	108
7.3 Validation des temps de séjour	109
7.3.1 Calcul direct avec PADRE.....	109
7.3.2 Correction des débits et calage des temps de séjour	110
7.3.3 Présentation des temps de séjour calibrés	112
CHAPITRE 8 : CONCLUSION	115
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	118
ANNEXES.....	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Coefficients de Hazen-Williams, réseaux de ville de Laval	37
Tableau 4.1	Caractéristiques des tronçons du réseau modèle	46
Tableau 4.2	Influence du pas de temps d'analyse sur la valeur du temps de séjour total.....	50
Tableau 5.1	Caractéristiques des points d'échantillonnage du réseau Pont-Viau	57
Tableau 5.2	Caractéristiques des points d'échantillonnage du réseau Chomedey	57
Tableau 5.3	Caractéristiques des points d'échantillonnage du réseau Ste-Rose	58
Tableau 6.1	Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage du réseau Pont-Viau (09/11/94)	65
Tableau 6.2	Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage du réseau Chomedey (16/11/94)	68
Tableau 6.3	Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage du réseau Ste-Rose (23/11/94)	71
Tableau 6.4	Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage du réseau Pont-Viau.....	83
Tableau 6.5	Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage du réseau Chomedey.....	84
Tableau 6.6	Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage du réseau Ste-Rose.....	84
Tableau 6.7	Conditions moyennes journalières aux usines pendant la période d'échantillonnage.....	87
Tableau 6.8	Résultats sur PICCOLO.....	88
Tableau 6.9	Conditions aux usines pendant la période de traçage (6h00 à 23h00).....	89

Tableau 6.10	Débit total aux usines et facteurs de pondération	90
Tableau 6.11	Documentation du point d'échantillonnage AP345 (Chomedey).....	95
Tableau 6.12	Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Pont-Viau)	97
Tableau 6.13	Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Chomedey)	98
Tableau 6.14	Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Ste-Rose)	99
Tableau 6.15	Écart entre les temps de séjour calculés par PICCOLO et PADRE	100
Tableau 7.1	Vitesses simulées et mesurées (Pont-Viau)	103
Tableau 7.2	Pressions simulées et mesurées (Pont-Viau)	104
Tableau 7.3	Vitesses simulées et mesurées (Chomedey)	104
Tableau 7.4	Pressions simulées et mesurées (Chomedey)	105
Tableau 7.5	Vitesses simulées et mesurées (Ste-Rose)	105
Tableau 7.6	Pressions simulées et mesurées (Ste-Rose)	106
Tableau 7.7	Écarts entre les débits simulés et les débits mesurés aux usines	106
Tableau 7.8	Facteurs de correction du débit (réseau Pont-Viau).....	111
Tableau 7.9	Facteurs de correction du débit (réseau Chomedey).....	111
Tableau 7.10	Facteurs de correction du débit (réseau Ste-Rose).....	112
Tableau 7.11	Temps de séjour minimal et maximal pour les points d'échantillonnage	114

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Zones d'influence des trois usines d'eau potable.....	27
Figure 2.2	Description de la filière de traitement de l'usine Ste-Rose.....	31
Figure 2.3	Description de la filière de traitement de l'usine Chomedey.....	32
Figure 2.4	Description de la filière de traitement de l'usine Pont-Viau.....	33
Figure 4.1	Schéma du réseau modèle	45
Figure 4.2	Fichier de données de PADRE (réseau modèle).....	47
Figure 4.3	Concentration transmise de traceur (réseau modèle)	48
Figure 5.1	Tubes insérés dans les conduites maitresses et pour conduites secondaires.....	60
Figure 6.1	Variations du traceur mesurées à Pont-Viau.....	75
Figure 6.2	Cycle de puisage de l'eau à Pont-Viau (09/11/94)	76
Figure 6.3	Variations du traceur mesurées à Chomedey	77
Figure 6.4	Cycle de puisage de l'eau à l'usine Chomedey (16/11/94).....	79
Figure 6.5	Variations du traceur mesurées à Ste-Rose.....	79
Figure 6.6	Cycle de puisage de l'eau à Ste-Rose (23/11/94)	80
Figure 6.7	Caractérisation du noeud AP345	96

LISTE DES ANNEXES

Annexe A.1	Formule de calcul du temps d'émission d'une particule	123
Annexe A.2	Formule de la concentration calculée en un point d'analyse.....	123
Annexe B.1	Contenu du fichier modèle1.res.....	124
Annexe B.2	Contenu du fichier modèle2.res.....	125
Annexe C.1	Simulation avec CACTUS (Ste-Rose)	126
Annexe C.2	Simulation avec CACTUS (Chomedey).....	127
Annexe C.3	Simulation avec CACTUS (Pont-Viau)	128
Annexe D	Protocole de mesure des fluorures.....	130
Annexe E.1	Courbes de traçage du réseau Pont-Viau	131
Annexe E.2	Courbes de traçage du réseau Chomedey	142
Annexe E.3	Courbes de traçage du réseau Ste-Rose	154
Annexe F	Profils de vitesses et de pressions mesurées dans les trois réseaux.....	165
Annexe G	Conditions moyennes horaires aux trois usines.....	193
Annexe H	Courbes de traçage simulées par PADRE	196

AVANT-PROPOS

Potaré, mot latin synonyme de potable désignait à l'origine toute eau buvable. De nos jours, la potabilité d'une eau exige que celle-ci réponde à des normes de plus en plus serrées en raison des besoins qualitatifs croissants du consommateur.

À ville de Laval, malgré la disparité des intérêts rattachés aux problèmes posés par les réseaux de distribution, les différents départements du service de l'environnement se regroupent autour d'une seule cause : résoudre les problèmes posés par la distribution d'eau en fournissant toutes les données disponibles.

J'espère pouvoir fournir à ces praticiens, à travers ce modeste travail, quelques éléments de réponse par le biais de quelques techniques de solution sous-jacentes à une théorie de base que je ne passerai pas sous silence.

INTRODUCTION

De nos jours, les aspects quantitatifs liés à la production et à la distribution d'eau potable ne posent que de rares problèmes. Par contre, les aspects qualitatifs demeurent moins maîtrisés et sont le sujet de nombreux travaux de recherche visant tous à satisfaire un consommateur de plus en plus exigeant. Une eau qui rencontre les normes de potabilité à la sortie de l'usine a tendance à perdre ses qualités physico-chimiques et microbiologiques. Celles-ci se dégradent au cours de son transfert dans le réseau. La maîtrise de la qualité de l'eau, au cours de la distribution, revient à contrôler la prolifération bactérienne et la formation de biofilms dans les conduites du réseau.

Les filières de traitement ont aussi un rôle à jouer dans les mutations de la qualité de l'eau surtout en ce qui concerne la recroissance bactérienne. Les filières classiques (coagulation -floculation - décantation - filtration) laissent un résiduel de carbone organique biodégradable et n'empêchent pas totalement le passage des microorganismes à travers les étapes de traitement. Cela peut favoriser la croissance de bactéries libres et d'un biofilm sur les parois des conduites du réseau de distribution. Les filières biologiques contribuent à la stabilité biologique des eaux injectées dans le réseau (Desjardins *et al.*, 1991).

Ainsi, un programme de recherche sur l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution a été entrepris en prenant en ligne de compte tous les paramètres susceptibles d'influencer la qualité de l'eau entre l'usine de production et le robinet du

consommateur. Le réseau de ville de Laval, où le contrôle de la qualité de l'eau est quasi permanent (Lafrance *et al.*, 1991), a été choisi pour l'étude.

Or, la prévision de la qualité de l'eau dans un réseau dépend largement de la maîtrise des temps de séjour qui y règnent, ce qui suggère une bonne connaissance de l'hydraulique du système. C'est à cet effet que le présent travail se distingue par son approche hybride. Il lie l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution à l'hydraulique y régissant les écoulements. Cette approche se base sur le suivi de la qualité de l'eau distribuée en fonction de son temps de séjour dans le réseau. Il est utile de rappeler que la crédibilité des résultats obtenus dépend largement de la précision de l'estimation des temps de séjour, elle-même tributaire des moyens théoriques et expérimentaux mis en jeu dans ce processus d'évaluation.

Le présent mémoire présente la démarche de modélisation entreprise pour l'évaluation du temps de séjour de l'eau ainsi que les techniques de traçage mises à l'oeuvre pour optimiser les mesures de temps de séjour sur le réseau pour enfin entreprendre une démarche d'ajustement des valeurs modélisées.

À ville de Laval, on s'intéresse depuis plus de deux ans à l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable ; les réseaux de cette ville ont donc été choisis pour la présente étude. Ceux-ci ont été modélisés dans le détail par le logiciel de balancement hydraulique PICCOLO. Le réseau détaillé comprend 1 282 654 conduites totalisant 1 283 km de longueur et 18 820 noeuds. Les diamètres des conduites varient de

moins 150 mm à 1 220mm, et leur coefficient de perte de charge (Hazen Williams) de 60 à 140.

Le traçage des réseaux de ville de Laval a été effectué dans le cadre du projet d'étude sur l'évolution de la qualité de l'eau potable dans les réseaux de distribution. C'est un projet réalisé en collaboration avec ville de Laval, l'École Polytechnique de Montréal et Vallé Lefebvre et Associés Inc. Un traceur, de l'acide hexafluorosilicique, a été injecté à la sortie des trois usines de traitement de ville de Laval ; par la suite, la courbe de concentration en fonction du temps a été mesurée à 33 points d'échantillonnage sur les réseaux de distribution.

Les résultats de la présente étude pourront aider les responsables de l'exploitation du réseau de distribution de la ville de Laval à mieux suivre la qualité de l'eau jusqu'au robinet du consommateur.

Nous allons exposer dans ce qui suit les différentes étapes suivies pour l'évaluation des temps de séjour aux différents noeuds d'échantillonnage.

Dans la première étape, nous allons décrire la procédure utilisée par le logiciel PICCOLO pour l'estimation des temps de séjours. Ce modèle est ensuite utilisé en régime permanent pour le balancement hydraulique du réseau afin d'estimer les pressions et les temps de séjour pour l'ensemble du réseau.

Le balancement hydraulique est effectué en utilisant les débits et les pressions mesurées à la sortie des usines lors des journées d'échantillonnage. Ainsi un débit total à la sortie des usines de 170 000 m³/d a été considérée comme débit de simulation. Cette

valeur correspond approximativement à la valeur moyenne enregistrée pendant la période d'échantillonnage.

La seconde étape consiste à améliorer le calcul des temps de séjour par la mise au point d'un programme d'aide à la datation en réseaux d'eau « PADRE » . Ce programme, développé pour un régime permanent, calcule les temps de séjour en simulant la propagation du traceur (fluorures) dans le réseau. Les débits et les vitesses d'écoulement sont calculés lors du balancement hydraulique réalisé à l'aide de PICCOLO. Il s'agit par la suite de comparer les temps de séjour calculés par PICCOLO avec ceux calculés par PADRE.

Pour terminer, nous apporterons certains éléments de justification aux écarts entre les temps de séjour simulés et mesurés, pour ensuite préciser l'ensemble des facteurs à prendre en ligne de compte dans l'ajustement des temps de séjour.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 INFLUENCE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DANS L'ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Un système d'approvisionnement en eau suscite actuellement l'intérêt de plusieurs chercheurs en ce qui a trait aux mutations de la qualité de l'eau à travers toutes les composantes d'un système de distribution depuis l'usine de traitement jusqu'au consommateur.

Les techniques de purification sont à même de produire des eaux potables à partir de n'importe quelle source d'eaux brutes. La qualité d'une chaîne de traitement est jugée en se basant surtout sur la qualité microbiologique de l'effluent. La désinfection est alors très importante ; elle est adéquate lorsqu'elle fournit une eau démunie de goûts et odeurs désagréables tout en contenant un résiduel de désinfectants, jusqu'aux derniers consommateurs.

Les études menées par Coallier *et al.* (1992, 1993), avaient pour but d'optimiser les méthodes de dénombrement bactériens à même de nous donner une évaluation fiable de la qualité bactériologique de l'eau potable. À la sortie des usines de traitement, l'eau contient encore des bactéries qui ne sont pas cultivables sur gélose ; les études menées par Prévost *et al.* (1992) le montrent. La qualité bactériologique de l'eau peut se

détériorer dans les réseaux de distribution d'eau potable. Cet aspect a été relevé lors de nombreuses études telles que celles menées par Brazos *et al.* (1989), LeChevallier *et al.* (1988), LeChevallier (1990), Characklis et Marshall (1990), Van Der Kooij (1992a). Les études les plus récentes sont celles entreprises par Mathieu *et al.* (1992) et Servais *et al.* (1992a et 1992b). Ces derniers, après avoir mesuré et évalué l'activité bactérienne dans l'eau distribuée, ont étudié la colonisation bactérienne dans les réseaux de distribution. Enfin, ils ont poussé leurs études (Servais *et al.* 1994) jusqu'à modéliser la dynamique de recroissance bactérienne dans les réseaux de distribution. Nous pouvons aussi citer l'étude de Prévost *et al.* (1992) sur la recroissance bactérienne dans les réseaux de distribution d'eau potable de ville de Laval.

Cette détérioration est le fruit de plusieurs facteurs. Certains travaux de recherche récents montrent le rôle des interactions entre les eaux dans les conduites et le substrat dans l'eau potable tel que le carbone organique biodégradable, Van Der Kooij a étudié plusieurs aspects de cette détérioration. (Van Der Kooij *et al.*, 1982 ; Van Der Kooij, 1990).

En effet, la nature, l'état de surface des conduites (matérialisé par le coefficient de rugosité) ainsi que leurs propriétés physiques superficielles (dont la polarisation électrique, etc) semblent influencer sur la fixation des matières organiques, les dépôts de tartres et l'apparition de formes de corrosion localisées (Hass *et al.*, 1983). Cette même corrosion joue un rôle important dans la recroissance bactérienne dans les réseaux : en effet, la corrosion fournit des surfaces d'attachement pour les bactéries et constitue une

gange de protection contre la désinfection (LeChevallier, 1990). De plus, la corrosion est encouragée par les bactéries qui s'accumulent sur les parois de conduites, consomment l'oxygène et donnent naissance à des zones anaérobies où peuvent se développer des bactéries sulfato-réductrices responsables de la corrosion biologique (Chantereau, 1980).

Les conditions hydrauliques du réseau influencent la qualité de l'eau distribuée dans la mesure où elles favorisent la formation du biofilm, la croissance d'organismes libres ou la solubilisation des matériaux des conduites. Les vitesses et les temps de séjour en représentent les principales variables.

La vitesse de l'eau influence la concentration de nutriments et le résiduel de désinfectant à l'interface eau-tuyau ainsi que la fixation ou le décrochage des bactéries à la paroi. Ainsi, une très faible vitesse de l'eau dans la conduite cause une diminution de la concentration de désinfectant ce qui favorise la croissance bactérienne. Lorsque les vitesses sont élevées, le régime d'écoulement devient turbulent et les forces de cisaillement importantes. Les résultats de Lau et Liu (1993) ont montré que l'accumulation de biomasse dans un biofilm dans de telles conditions d'écoulement est réduite. L'accumulation de biomasse est au contraire maximale lorsque la vitesse de l'eau est très faible.

De plus, les longues durées de séjour dans les réseaux peuvent favoriser une dégradation chronique de la qualité de l'eau distribuée. Cela est particulièrement vrai dans les zones de stagnation telles que les culs-de-sac. Cette dégradation peut se manifester sous forme d'une reviviscence bactérienne, d'une croissance de biofilm ou de corrosion

biologique. Le contrôle des temps de séjour dans le réseau est donc un paramètre important de la gestion de la qualité de l'eau.

1.2 INFLUENCE DU TEMPS DE SÉJOUR

Le temps de séjour de l'eau est défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau passe de l'usine de production jusqu'au point de mesure situé sur le réseau. Il y a donc autant de temps de séjour qu'il y a de points de mesures sur le réseau.

L'étude de Lavoie (1991) présente plusieurs paramètres qui influencent la qualité de l'eau dans les réseaux. On y distingue "un effet eau" matérialisé par la quantité de nutriments contenus dans l'eau à la sortie de l'usine, la concentration résiduelle de désinfectant, le pH, la température, la concentration d'oxygène dissous et la concentration de carbone organique, ainsi qu'un "effet réseau" incluant le matériau des conduites, leurs surfaces internes, le régime hydraulique et le temps de séjour.

Baribeau *et al.* (1994); Prévost *et al.* (1994); Servais *et al.* (1992b); LeChevallier *et al.* (1988) et Damez (1982) relèvent l'importance du temps de séjour comme facteur directement lié à l'évolution de la qualité bactériologique de l'eau. Plus particulièrement, Servais *et al.* (1992a) ont établi une corrélation entre le diamètre de conduite et la concentration de CODB ; ces valeurs se sont avérées plus faibles dans les petites conduites. Ce sont souvent les plus éloignées là où le temps de séjour est théoriquement le plus élevé et vice versa. En outre, la plupart des modèles mis au point

pour prédire l'évolution des paramètres déjà cités et par la même occasion permettre la prédiction de la qualité de l'eau dans les réseaux, utilisent le temps de séjour de l'eau dans le réseau comme paramètre. La connaissance du temps de séjour de l'eau dans les conduites constitue donc une des données essentielles à la prédiction de la qualité de celle-ci à son arrivée chez le consommateur.

1.3 MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Depuis la dernière décennie, l'attention portée à la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution a augmenté. Cet intérêt concerne plus particulièrement les changements de la qualité de l'eau à l'intérieur des réseaux de distribution, ce qui a amené au développement des modèles de qualité. Ces modèles sont en mesure de tracer l'évolution de paramètres de qualité à l'intérieur des réseaux de distribution. Ils sont aussi utilisés pour évaluer l'âge moyen de l'eau, pour simuler la diminution du chlore résiduel ou encore retracer le mouvement d'un contaminant lors d'une contamination accidentelle.

Les modèles de qualité développés en régime permanent sont utiles pour la prédiction de la qualité moyenne de l'eau. Or, les débits et les charges dans les réservoirs fluctuent constamment dans la plupart des systèmes de distribution d'eau ; c'est pour cela que des modèles de qualité ont aussi été développés pour le régime non permanent afin de mieux calculer les temps de séjour et de là obtenir une meilleure prédiction de l'évolution

de la qualité de l'eau. Cette analyse permet entre autre de préciser les valeurs de vitesse, de débit et de temps de séjour de l'eau à différents emplacements du réseau.

1.4 THÉORIE DES BALANCEMENTS HYDRAULIQUES

Un réseau de distribution d'eau potable est un système complexe. Les problèmes qui y sont liés ont suscité depuis longtemps l'intérêt de plusieurs chercheurs, et on dispose actuellement d'une multitude de méthodes adaptées au calcul sur ordinateur pour les résoudre. On s'intéresse plus particulièrement aux comportements des réseaux maillés.

Dans cette section, on commencera par définir les éléments de base qui entrent dans le développement d'un réseau de distribution d'eau potable pour ensuite définir le problème hydraulique et le formuler.

1.4.1 ÉLÉMENTS DE BASE D'UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION MAILLÉ

Un système maillé de distribution d'eau potable comprend plusieurs éléments : des tronçons, des noeuds, des mailles, des réservoirs, des pompes, des vannes, des réducteurs de pression, des clapets, des poteaux d'incendie. Chaque point de jonction de deux tronçons est un noeud, le lien entre un tronçon et une autre composante est aussi appelé un noeud. L'espace clos que forment plusieurs conduites est appelé maille.

1.4.2 POSITION DU PROBLÈME HYDRAULIQUE

Le problème hydraulique posé par un système de distribution d'eau consiste à en déterminer les performances. Cela revient à évaluer les débits d'eau circulant dans chacun des tronçons entre deux noeuds. Cette évaluation est faite à partir des paramètres physiques du réseau (diamètres, longueurs, coefficients de rugosité, saignées et hauteurs piézométriques aux noeuds), et à partir des variables à l'usine de production d'eau potable (débits, pressions)

1.4.3 FORMULATION DU PROBLÈME

La résolution du problème hydraulique exige la solution d'un système d'équations de base qui décrivent les écoulements dans le réseau. Ces équations lient les caractéristiques physiques du réseau et les variables qui sont représentées par les débits, les vitesses et les pressions (AQTE, 1974).

Cependant, un tel modèle mathématique demeure un outil dont la validité des résultats dépend de la qualité des données de base qu'on lui fournit. Les données de base utilisées dans toute étude de balancement doivent être définies avec soin afin d'être conformes à la réalité. Elles comprennent:

- Les paramètres physiques :

Les éléments physiques du réseau sont constitués des diamètres, longueurs, matériaux et coefficients de Hazen Williams des conduites ; les types de noeuds, les coordonnées et les altitudes ; ainsi que les singularités utilisées dans la plupart des logiciels de balancement hydraulique tels que les pompes, les bornes-fontaines, les clapets et les vannes.

- Les variables de la demande en eau :

La demande en eau totale des usagers est représentée par la somme des saignées aux différents noeuds du réseau. Habituellement, les saignées sont des valeurs moyennes. Les consommations extrêmes (pointes horaires, journalières, hebdomadaires ou saisonnières) sont obtenues en multipliant les saignées moyennes par un facteur de pointe correspondant.

- Les composantes dynamiques du réseau :

Elles comprennent les débits transitant dans les différents tronçons du réseau et les pressions enregistrées aux différents noeuds.

1.4.4 LES ÉQUATIONS DE BASE:

L'élaboration des relations fonctionnelles régissant les écoulements dans les réseaux de distribution donne un système d'équations algébriques non linéaires dont le nombre dépend de la taille du réseau. La non linéarité de ces équations dicte des méthodes de résolution approximatives.

Quelle que soit la méthode de résolution, le système d'équations repose sur deux lois principales:

- La première, exprimant la continuité des débits, stipule que la somme algébrique des débits à un noeud est nulle, soit :

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n Q_{ij} + C_i \right) = 0 \quad (1)$$

où, n : est le nombre de noeuds dans le réseau

C_i : la consommation au noeud i

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

($Q_{ij} = 0$ s'il n'y a pas de lien entre i et j)

- La deuxième est la loi des mailles. Elle stipule que la somme algébrique des pertes de charge autour d'une maille est nulle, soit :

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n H_{ij} = 0 \quad (2)$$

où, k : est le nombre de mailles dans le réseau

n : le nombre de liens constituant la maille i

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

La relation fonctionnelle entre le débit et la perte de charge s'exprime souvent par la formule de Hazen-Williams. Cette formule s'exprime pour une conduite donnée telle que :

$$H = (K * L * Q^{1.852}) / (C^{1.852} * D^{4.87}) \quad (3)$$

où K : est une constante qui dépend des unités des autres termes

dans la formule de Hazen-Williams

L : la longueur de la conduite

Q : le débit dans la conduite

C : le coefficient de Hazen-Williams

D : le diamètre de la conduite

Le système d'équations ainsi généré (équations 1 et 2) est souvent résolu par la méthode de Newton modifiée qui est réputée pour être l'une des plus efficaces pour le balancement hydraulique d'un réseau de distribution d'eau potable.

1.5 CALIBRATION DES MODÈLES DE BALANCEMENT HYDRAULIQUE

1.5.1 GÉNÉRALITÉS

Les modèles mathématiques de balancement de réseaux de distribution sont formulés et utilisés pour prédire le comportement des réseaux sous différentes sollicitations. La précision des prévisions d'un modèle de balancement hydraulique est évaluée par l'écart entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées sur le terrain. Cette comparaison peut être faite pour les débits à la sortie de l'usine de production, pour les vitesses ou pour les pressions aux noeuds du réseau.

Si l'écart relevé est grand, un ajustement des valeurs modélisées s'impose : ce processus est appelé calibration du modèle de balancement hydraulique. Plusieurs auteurs définissent la calibration de façon différente. Ainsi, selon Bhave (1988) on doit vérifier si l'écart entre les débits et les pressions calculés par le modèle et ceux mesurés sur le réseau n'est pas trop grand. Shamir et Howard (1977) définissent la calibration comme le procédé qui consiste à déterminer les caractéristiques physiques et opérationnelles du réseau à modéliser afin de former les données d'entrée du modèle qui permettent de produire des résultats conformes à la réalité.

Cesario et Davis (1984) définissent la calibration comme le processus d'ajustement de plus en plus fin du modèle jusqu'à ce que celui-ci prédise les valeurs réelles rencontrées sous n'importe quel type de conditions .

Walski (1983a), définit la calibration comme un processus qui comprend deux étapes. La première consiste à comparer les pressions et les débits prédits par le modèle avec les pressions et débits mesurés pour des conditions de service connues du réseau, à savoir, la pression de pompage, les niveaux de l'eau dans les réservoirs et l'état des vannes. La deuxième consiste à corriger les données de base fournies au modèle afin d'ajuster les valeurs prédites aux valeurs ajustées.

Selon Walski (1986), il est préférable de juger de la qualité d'une calibration sur la base du rapport de la pression observée par rapport à celle simulée. Selon Bhawe (1988), un tel indicateur est plus significatif que la différence entre la valeur simulée et mesurée dans la mesure où il est indépendant des unités utilisées.

Les principales données de calibration sont constituées des consommations aux nœuds du réseau et les coefficients de perte de charge (Kennedy *et al.*, 1991).

L'estimation précise des consommations aux différents nœuds du réseau (appelées communément saignées) n'est pas chose facile. Les taux de consommation dépendent des types d'usagers desservis par un nœud (résidentiel, commercial ou autre) ainsi que des heures dans la journée. Celles-ci doivent donc être ajustées lors de la calibration.

La sélection des coefficients de perte de charge (souvent le coefficient de Hazen-Williams) constitue une des tâches les plus difficiles de la calibration. Les valeurs disponibles demeurent souvent indicatives dans la mesure où le coefficient de perte de charge est une variable composée qui dépend de plusieurs facteurs (Eggner et

Polkowski, 1976). Cette variable représente la perte de charge causée aussi bien par les frottements aux niveau des parois de conduites que par d'autres singularités telles que les vannes, les joints, les coudes de dérivation des écoulements. Ce coefficient dépend aussi de la vitesse d'écoulement.

Plusieurs techniques de calibration ont été récemment développées ; elles sont classées en deux catégories. La première comprend toutes les techniques qui ajustent uniquement les coefficients de perte de charge, la deuxième comprend les techniques qui ajustent simultanément les coefficients de perte de charge et les saignées aux noeuds. Une bonne technique de calibration, selon Kennedy *et al.* (1991), doit considérer simultanément tous les paramètres à ajuster, de décider des noeuds où l'ajustement est nécessaire et de permettre ainsi au modèle d'étendre l'ajustement à l'ensemble du réseau.

1.5.2 CALIBRATION DU LOGICIEL PICCOLO

Le réseau de la ville de Laval est modélisé à deux niveaux. Le premier niveau représente l'ossature principale formée de l'ensemble des conduites maitresses et compte 925 noeuds. Le second niveau modélise tous les éléments de l'ossature détaillée du réseau et compte 18 820 noeuds.

Les noeuds du modèle sont localisés aux intersections, aux changements de diamètres et de direction de toute conduite du réseau. Le réseau comprend également des vannes et des poteaux d'incendie. Une liste de correspondances entre les noeuds des deux

modèles relativement aux deux ossatures est établie et permet la mise à jour continue. Le balancement des deux niveaux du réseau à l'aide du logiciel PICCOLO est donc possible.

La démarche entreprise par les responsables de la gestion du réseau de la ville de Laval pour la modélisation du réseau de distribution d'eau comprend plusieurs tâches :

- La première consiste à numéroté tous les noeuds et toutes les singularités.

L'ossature détaillée du réseau comprend de nombreuses singularités matérialisées soit par un noeud, un poteau d'incendie ou une vanne. La numérotation des noeuds se fait par feuillet. Chaque feuillet porte un numéro (09.00 par exemple) qui correspond à un code alphabétique (soit par exemple A pour le feuillet 09.00). Le noeud 1 du feuillet 09.00 est le noeud A1. La numérotation des noeuds débute à 300 pour chacun des feuillets.

Les poteaux d'incendie possèdent des numéros qui sont utilisés comme numéros de noeuds. Ces numéros ont été assignés par la division des plans directeurs. On définit ainsi des noeuds poteaux d'incendie qui correspondent aux points sur le réseau où sont raccordés des poteaux d'incendie. Leurs numéros sont compris entre 1 et 299. Les vannes sont aussi numérotées grâce à une démarche similaire.

- La deuxième étape comprend la codification du réseau détaillé de la ville de Laval. Cela consiste à déterminer les caractéristiques physiques des noeuds et des liens (coordonnées, diamètre, coefficient de perte de charge, etc) et à constituer le fichier de données correspondant.

• Une troisième étape comprend la détermination des consommations aux noeuds de l'ossature détaillée afin de les transférer dans le même modèle. En effet, la prédiction réaliste du comportement du réseau de distribution d'eau potable est directement liée à la connaissance détaillée de la structure de consommation. C'est dans cette optique que des études entreprises par la division des plans directeurs du service de l'environnement à ville de Laval ont permis de définir le plus précisément possible les taux de consommation par type d'usager et les facteurs de pondération relatifs à diverses sollicitations du réseau (nocturne, journalière maximale et journalière minimale). Selon ces taux unitaires, la production aux usines se répartit de la façon suivante :

Résidentiel.....	41,4 %
Commercial.....	12,8 %
Industriel	7,8 %
Institutionnel	0,7 %
Institutions gouvernementales	4,3 %
Services publics	0,8 %
Edifices gouvernementaux.....	0,2 %
Usages municipaux	10,0 %
Pertes.....	22,0 %

Les saignées sont calculées en deux étapes principales. D'abord, un dénombrement des usagers selon leur catégorie et leur consommation mesurée au compteur (s'il y a lieu) est effectuée. On définit ensuite la zone d'attribution nodale

rattachée à chaque noeud du modèle de balancement détaillé. La consommation à chaque noeud est alors calculée à partir du dénombrement compris dans une zone d'attribution nodale, multiplié par un taux unitaire attribué à chaque type d'usagers.

Les données relatives à la consommation sont introduites dans une base de données ORACLE, qui est constamment mise à jour.

- La dernière étape consiste à valider le modèle hydraulique détaillé. Cette validation commence par une étude des données de demande en eau enregistrée aux usines. Ensuite on mesure les débits et les pressions sur le réseau et on compare ces valeurs avec les résultats du modèle hydraulique.

1.5.3 RINCAD VS PICCOLO

L'étude menée par Poulin (1993) avait pour but essentiel de comparer les résultats de simulations effectuées avec les deux logiciels de balancement hydraulique, RINCAD ET PICCOLO et de calibrer le modèle PICCOLO avec les mesures de pression et de vitesses relevées sur le réseau à différents noeuds, afin de montrer les améliorations apportées par PICCOLO. Au début, les mesures relevées étaient ponctuelles ; peu après, des systèmes d'acquisition de données "data-loggers" ont permis un enregistrement des mesures relevées à toutes les quinze minutes.

Les données sont recueillies à certains noeuds lors de journées d'échantillonnages réparties sur 18 mois. Pour chacune des journées, l'un ou l'ensemble des réseaux (Pont-

Viau, Chomedey et Ste-Rose) est échantillonné. Chaque journée d'échantillonnage (la période d'échantillonnage s'étalant de 6h à 22h) aux différents noeuds constitue une campagne datée d'échantillonnage, les résultats de quatorze campagnes d'échantillonnage ont été exploités.

Lors de chaque campagne d'échantillonnage, on relève le débit pompé, le niveau dans les réserves d'eau traité et la pression d'eau pompée aux usines à toutes les dix minutes.

La comparaison des performances des deux logiciels de balancement est basée sur les résultats de simulations. Une simulation avec PICCOLO est réalisée pour chacune des journées d'échantillonnage en considérant le débit moyen pour la période d'échantillonnage.

Les résultats de cette simulation sont comparés aux résultats d'une seule simulation réalisée avec RINCAD avec un débit de consommation total de 250 000 m³/d. Les résultats des deux types de simulations sont alors comparés aux mesures effectuées sur le terrain pour chacune des journées d'échantillonnage.

Certaines journées pour lesquelles le débit moyen de la période d'échantillonnage est semblable ont été regroupés afin de réduire le nombre de simulations. Six simulations ont été retenues pour la modélisation par PICCOLO soit les débits pompés de : 214 000, 226 300, 235 000, 243 000, 282 000 et 292 000 m³/d.

Pour chacune des journées d'échantillonnage, les écarts entre les valeurs de pression et de vitesse mesurées et les valeurs simulées par PICCOLO ont été calculés

pour les trois réseaux. Ces mêmes écarts entre les valeurs simulées avec le logiciel RINCAD et les valeurs mesurées ont été calculés uniquement pour le réseau de Chomedey. Il est indispensable de signaler que plusieurs données manquaient soit lors de l'échantillonnage (soit à cause de difficultés d'accès ou de mesures erronées) ou lors de la simulation (liste de noeuds manquants ou comportant des erreurs) , ont réduit le champs d'étude.

Ainsi, l'analyse statistique des résultats de vitesse a révélé que près des deux tiers des valeurs simulées par PICCOLO sont évaluées en moyenne à plus ou moins 70,0 % des valeurs mesurées sur le terrain pour l'ensemble des trois réseaux.

De même, l'analyse des données de pression pour l'ensemble des réseaux a révélé que celles-ci étaient évaluées, en moyenne, à plus ou moins 6,5 %.

Une comparaison sur la base des vitesses, des pression et des temps de séjour simulés sur le réseau, entre les deux logiciels a été difficile puisque les débits imposés n'ont pas été les mêmes lors des simulations. Pourtant, des tendances générales ont été identifiées : ainsi, les valeurs calculées par RINCAD et par PICCOLO paraissent identiques au niveau des conduites maîtresses, alors qu'une différence surgit dans les petites conduites. Cette différence est due à plusieurs facteurs dont la technique de calcul. La technique utilisée par RINCAD introduit beaucoup plus d'erreurs que celle utilisée par PICCOLO. En effet, les nombreux transferts de résultats d'un secteur à l'autre, requis par RINCAD engendrent une erreur cumulative non négligeable. Ces transferts sont requis

parce que RINCAD ne peut prendre en compte l'ensemble du réseau de ville de Laval en une seule simulation.

L'étude a permis de conclure pour toutes ces raisons que les valeurs prédites par PICCOLO sont plus justes que celles simulées par RINCAD.

Cependant, les données recueillies sur le terrain lors des échantillonnages n'ont pas permis de calibrer le modèle PICCOLO à cause de facteurs d'erreur importants qui sont liés aux mesures des vitesses sur le réseau. En effet, la précision des mesures, le moment de la prise des mesures, la variation des conditions prévalant sur le réseau et la différence entre les débits simulés et relevés aux usines, sont tous des éléments qui influent grandement sur les mesures de vitesse et de pression.

1.6 TRAÇAGE EN RÉSEAU

Du moment que les méthodes de traçage et de calibration des temps de séjour dans les réseaux représentent des techniques nouvelles, peu d'études ont été documentées dans ce domaine.

Un traçage en réseau consiste à suivre l'évolution d'un traceur, dans les réseaux de distribution connaissant sa loi d'injection ou de soustraction à l'entrée du réseau afin de prédire les temps de séjour dans le réseau. Le traceur choisi est souvent une substance inerte. Cela est important surtout pour les points de prélèvement où le temps de séjour s'élève à plusieurs heures voire plusieurs jours.

Dans les réseaux de distribution, le traceur injecté ou soustrait ne doit en aucun cas compromettre la santé du consommateur. Les ions fluorures, qui constituent une substance généralement inerte sous les conditions qui prévalent dans la plupart des réseaux de distribution, satisfont à cette exigence.

Plusieurs études (Kennedy *et al.*, 1991) ont été entreprises pour vérifier l'efficacité des fluorures dans le traçage des réseaux de distribution. Il ont aussi montré comment peuvent être utilisés les résultats de traçage pour calibrer un modèle de balancement hydraulique. En effet, le temps de séjour d'un tronçon peut être défini comme le temps nécessaire à un traceur pour se déplacer d'une extrémité à l'autre du tronçon. Ce temps, entre deux noeuds, dans un réseau de distribution est directement proportionnel à la vitesse de l'eau dans le tronçon.

La plupart des modèles hydrauliques considèrent un écoulement en piston dans les tronçons et un mélange parfait aux noeuds. Sous de telles conditions, le profil de diminution du traceur au point de mesure est identique à celui qu'on obtient à la source. Dans la réalité, on assiste à une distorsion de la courbe de diminution du traceur due à la dispersion du traceur.

Le temps de séjour estimé par traçage est souvent défini comme le temps nécessaire pour que 50 % de la concentration de traceur disparaisse (Kennedy *et al.*, 1991). Une telle estimation du temps de séjour n'est pas toujours valable car la distorsion des profils est souvent accentuée.

L'échantillonnage des réseaux peut être accompli selon plusieurs approches. L'une des approches consiste à prélever des échantillons sur une multitude de points pendant plusieurs jours (Maul *et al.*, 1991). Mathieu (1992) a montré que la qualité de l'eau potable variant à l'usine et sur le réseau pendant cette longue durée d'échantillonnage, les résultats des mesures sont difficiles à interpréter. L'autre consiste à suivre l'eau durant son parcours dans le réseau. Cela revient à fixer les points d'échantillonnage en fonction du temps de séjour. C'est cette approche, validée par une étude de Lavoie (1991), qui a été adoptée dans cette étude.

CHAPITRE 2

LA PRODUCTION ET LA DISTRIBUTION D'EAU À VILLE DE LAVAL

2.1 APERÇU GÉOGRAPHIQUE

La ville de Laval est l'intégration de quatorze ex-villes et municipalités. Ainsi, on distingue le secteur Saint-François à l'Est de l'Île qui est alimenté par deux conduites maîtresses, alors qu'à l'Ouest trois conduites maîtresses alimentent les quartiers Laval-sur-le-lac, Laval Ouest, Îles-Laval et Sainte-Dorothée.

2.2 DESCRIPTION DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Afin de faire face à la demande grandissante en eau potable, la ville de Laval, qui abrite actuellement plus de 300 000 habitants, s'est dotée d'un réseau de distribution complètement maillé (18 820 noeuds) long de près de 1 300 km. Ce réseau est alimenté par trois usines de production. Chaque usine influence une partie importante du réseau soit:

- le sud ouest de l'île de Laval est alimenté par l'usine Chomedey dont la capacité de production est de 180 000 m³/d.
- le nord est alimenté par l'usine Ste-Rose dont la capacité de production est de 110 000 m³/d.

- le sud-est est alimenté par l'usine Pont-Viau dont la capacité de production est de 135 000 m³/d.

La figure 2.1 présente les frontières approximatives de ces trois zones.

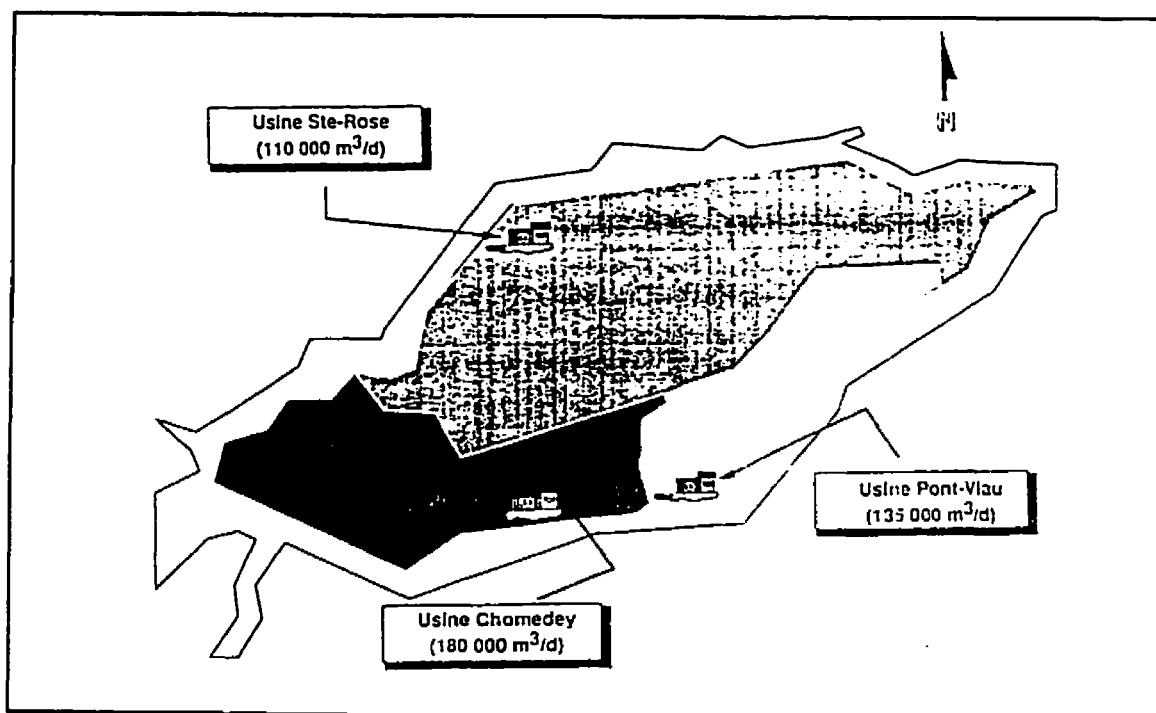


Figure 2.1 : Zones d'influence des trois usines d'eau potable (Ville de Laval)

Les vannes du réseau étant habituellement ouvertes, les limites de ces zones se déplacent légèrement au gré de variations de pression ou de consommation. Il est à noter qu'il n'y a pas de réservoir ou de station de pompage sur le réseau de distribution. Il est important de signaler certaines particularités du réseau.

Chomedey alimente sa zone d'influence via deux conduites principales, la première est située sur le boulevard Lévesque, elle a un diamètre de 1 220 mm. La seconde conduite a des diamètres successifs de 1 220 mm, de 915 mm et de 600 mm ; elle se dirige vers le nord jusqu'au boulevard Dagenais. Dans le modèle hydraulique, la première conduite est alimentée par la sortie portant le numéro de noeud AV343, la deuxième est alimentée par la sortie portant le numéro de noeud AV375 ; une vanne lie les noeuds AV369 et AV370. Le feuillet 06.00 joint en document annexe détaille la sortie de l'usine Chomedey.

L'usine Pont-Viau alimente sa zone d'influence par le biais de deux conduites maitresses. La première a un diamètre de 1 067 mm ; elle part de l'usine parallèlement à la rue St-Hubert, dévie parallèlement au boulevard Lévesque pour suivre ensuite la rue Alexandre. Elle débute au noeud E410. L'autre conduite débute par le noeud E348, elle longe la rue St-Hubert et continue le long du boulevard des Laurentides avec un diamètre de 607 mm. Les deux conduites maitresses sont liées par une chambre de vannes liant les noeuds E409 et E406. Le feuillet 10.00 présenté comme document annexe en donne les détails.

L'usine Ste-Rose dessert aussi sa zone d'influence au moyen de deux conduites. Les deux conduites partent d'une même sortie de l'usine, cette sortie porte le numéro AM324. La première conduite est formée de tronçons de 1 067 mm et 600 mm, elle longe la rue Hotte. La deuxième conduite lie deux tronçons de 1 067 mm et 915 mm et s'étend jusqu'au boulevard Ste-Rose (feuillet 08.07).

Certaines particularités du réseau sont importantes à signaler pour fins de modélisation des réseaux de distribution d'eau. Pour la simulation hydraulique de la présente étude et pour obtenir des résultats représentatifs de la réalité, nous avons essayé de représenter le plus fidèlement possible l'état du réseau pendant la période des échantillonnages. Ainsi, on s'est assuré qu'aucune vanne à influence majeure sur les écoulements n'a été fermée.

En outre, nous avons surveillé de façon particulière la conduite maitresse de 400 mm de diamètre qui a été mise en opération en Juin 1993. Cette conduite située sur le boulevard René-Laennec, a une influence sur les sens d'écoulement dans les conduites du secteur. Cela a été précisé dans une étude d'impact de cette conduite menée par la division des plans directeurs (Novembre 1993).

2.3 CARACTÉRISTIQUES DES EAUX BRUTES

Toute la ville de Laval puise son eau brute dans la rivière des Prairies (usines Pont-Viau et Chomedey) et dans la rivière des Mille-Iles (usine Ste-Rose). Ces rivières sont alimentées presque exclusivement par la rivière des Outaouais.

La qualité de l'eau de ces rivières n'est pas significativement différente (Tékeu *et al.*, 1979) sauf en ce qui concerne la qualité bactériologique qui est moins bonne pour la rivière des Mille-Iles qui alimente l'usine Sainte-Rose.

2.4 UNITÉS DE PRODUCTION D'EAU POTABLE : TROIS USINES

Les usines de traitement à la ville de Laval fournissent un débit nominal total de 425 000 m³/d. La production de chacune des usines est mesurée à l'aide de débitmètres installés à leur sortie. Les relevés des débitmètres sont transmis par télémétrie et enregistrés directement dans l'ordinateur HP1000 situé dans les locaux du service de l'environnement.

Pour l'étude de traçage qui sera détaillée plus loin, l'emplacement des points de dosage et d'échantillonnage des fluorures revêt une importance particulière pour fixer les temps d'arrêt de la fluoruration et pour l'analyse des résultats obtenus.

2.4.1 USINE SAINTE-ROSE

C'est la seule usine de production d'eau potable en Amérique du Nord qui comprend un traitement biologique. La figure 2.2 présente la description de cette filière.

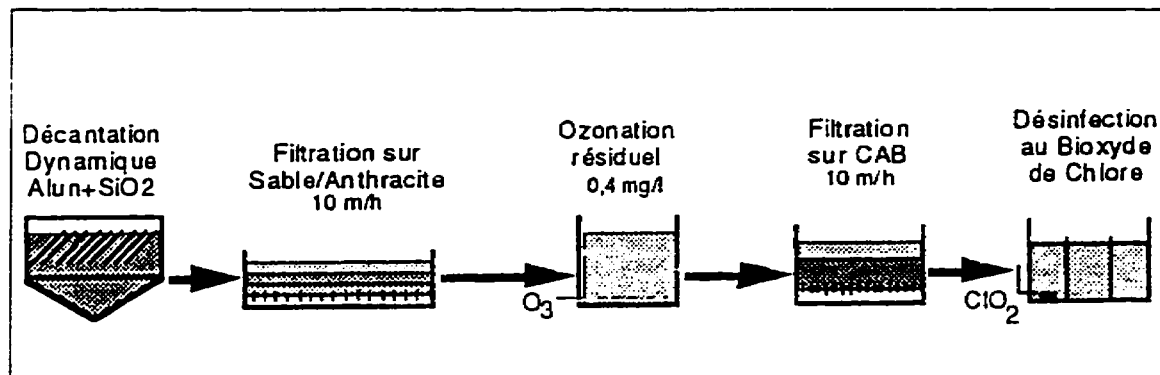


Figure 2.2 : Description de la filière de traitement de l'usine Sainte-Rose (filière biologique)

La qualité de l'eau dans le réseau est largement influencée par l'effet de ce traitement biologique. En effet, l'ozonation a pour effet de favoriser la fraction biodégradable du carbone organique dissous (CODB). Cette fraction est ensuite enlevée dans les filtres au charbon actif biologique (CAB) (Prévost *et al.*, 1990c). De plus, l'étude menée par Prévost *et al.* (1990a) a démontré que la filtration biologique diminue d'une façon significative la demande en chlore et le CODB.

Le plan numéro 83-077-2 (service de l'environnement de ville de Laval), détaille le sens des écoulements dans les réserves d'eau traitée, précise l'emplacement du point de dosage des fluorures dans la section R-16 de la réserve d'eau filtrée. Le point d'échantillonnage des fluorures à l'usine pour fin de traçage est situé près des pompes haute pression.

2.4.2 USINE CHOMEDEY

L'usine Chomedey satisfait 42 % de la demande en eau potable de ville de Laval. Elle utilise une filière de traitement classique pour l'enlèvement de la matière organique. La figure 2.3 relate les étapes de la filière de traitement de cette usine. Le dosage des fluorures se fait au niveau de la section de reserve R-11 tel que montré sur le plan 1 096 (service de l'environnement à ville de Laval) . Le point d'échantillonnage des fluorures lors du traçage est fixé près des pompes haute pression.

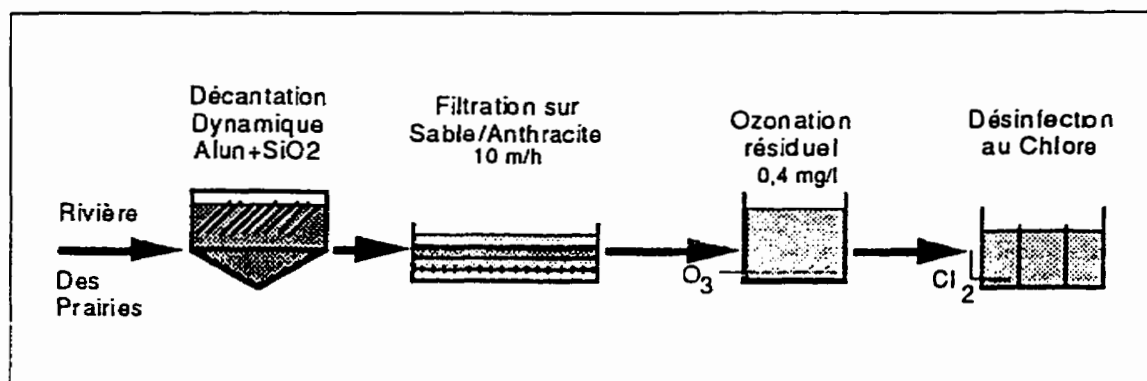


Figure 2.3 : Description de la filière de traitement de l'usine Chomedey (filière classique)

2.4.3 L'USINE PONT-VIAU

La figure 2.4 présente la description de la filière de traitement de l'usine de production d'eau Pont-Viau.

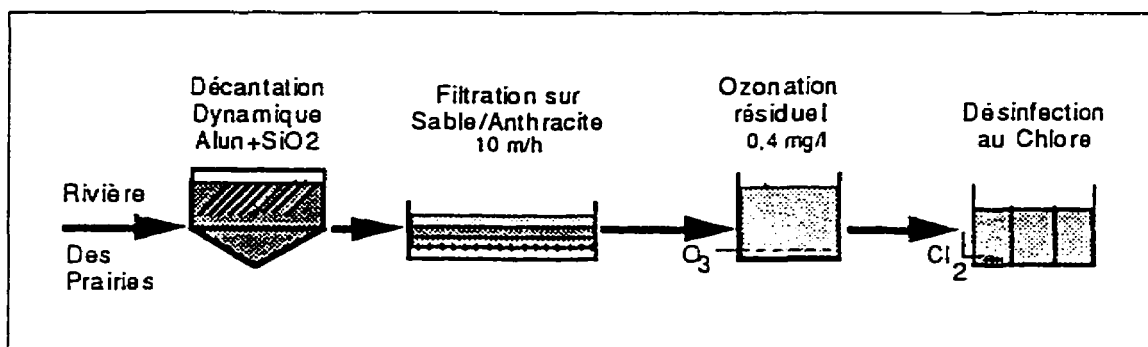


Figure 2.4 : Description de la filière de traitement de l'usine de production d'eau Pont-Viau

C'est une filière de traitement classique dans laquelle l'enlèvement de la matière organique se produit surtout au niveau de la coagulation-décantation. Elle est constituée de deux usines installées en parallèle. Ces dernières versent leur production dans un même réservoir. La fluoruration se fait, pour chacune des usines, au niveau des tuyaux de collecte d'eau vers ces réservoirs. Comme l'indique le plan 1364-3 le point de dosage des fluorures est situé presque à la sortie de l'usine. Pour l'étude du traçage, le point d'échantillonnage est situé près des pompes haute pression.

CHAPITRE 3

BALANCEMENT HYDRAULIQUE DU RÉSEAU DE VILLE DE LAVAL

3.1 MISE EN SITUATION

La gestion d'un réseau de distribution d'eau potable de l'ampleur de celui de ville de Laval nécessite des outils analytiques importants. Ville de Laval dispose de deux logiciels de balancement hydraulique, RINCAD puis PICCOLO (incluant un module qualité). Tous ces logiciels permettent de calculer le temps de séjour moyen, lorsqu'on suppose un régime hydraulique permanent.

PICCOLO permet de déterminer la pression et le débit dans chaque conduite, connaissant le diamètre, la longueur et le coefficient de Hazen-Williams de celle-ci. Il permet, en plus par rapport à RINCAD, de déterminer les temps de séjour à chaque noeud, de même que les zones d'influence de chaque source d'approvisionnement. Il permet de travailler en mode statique (permanent), dynamique (avec variations dans le temps) ou qualitatif. Dans ce dernier mode, il permet de connaître les temps de séjour et les concentrations de certains produits dans le temps après calibration hydraulique du modèle.

Il est à noter que les consommations horaires varient considérablement ; les temps calculés par ces logiciels ne reflètent donc pas la situation réelle.

3.2 LE LOGICIEL RINCAD

RINCAD a été le premier logiciel de balancement, disponible avant 1992, qui permettait de balancer un réseau contenant plus de 18 000 noeuds. Il a d'abord été utilisé pour choisir les routes et les points d'échantillonnage. Il a ensuite permis de calculer les premiers temps de séjour. C'est à cette occasion qu'une modélisation complète du réseau a été mise au point : toutes les conduites et les accessoires (vannes, poteaux d'incendie et drains) ont été nommés, selon la procédure détaillée au chapitre 1 (Désignation alphanumérique : AV328, TE310). Il est cependant important de noter que la capacité réduite du logiciel (4 500 noeuds) ne permettait pas de simuler l'ensemble du réseau en une seule fois. Ainsi, ce dernier a été divisé en neuf sous sections. De plus, ce logiciel ne pouvait simuler le comportement hydraulique du réseau qu'en mode statique. Une simulation était donc fastidieuse, elle nécessitait plusieurs heures de calcul et introduisait des erreurs non négligeables.

3.3 LE LOGICIEL PICCOLO

Le logiciel RINCAD a été remplacé par le logiciel PICCOLO. Ce dernier offre une grande capacité de résolution (22 602 noeuds, 24 104 conduites et 752 réservoirs) ce qui permet d'effectuer le balancement hydraulique complet du réseau d'eau potable de la ville de Laval en quelques minutes. Le balancement hydraulique du réseau détaillé ne

demande qu'une minute pour son achèvement lorsque la simulation est faite en régime permanent.

Il a été calé pour le calcul des vitesses et des pressions aussi bien en mode statique qu'en régime dynamique. Cependant, il ne peut fournir les temps de séjour aux différents noeuds du réseau qu'en régime permanent, d'où l'idée d'un traçage en réseau pour vérifier les temps de séjour calculés.

La méthode de résolution utilisée par PICCOLO est hybride, émanant de l'optimisation des méthodes de résolution des systèmes d'équations non linéaires; elle est basée :

- sur la formulation du problème hydraulique qui comprend, d'une part, une première série d'équations linéaires stipulant que la somme algébrique des débits à chaque noeud est nulle et, d'autre part, une deuxième série d'équations non linéaires stipulant que la somme des pertes de charge autour d'une boucle est nulle. La formule permettant de calculer les pertes de charge est celle de Hazen-Williams.

La méthode de calibration utilisée par PICCOLO fixe les valeurs du coefficient de perte de charge et des consommations aux noeud de façon à produire les valeurs de vitesse et de pression sur le réseau qui soient conformes le plus possible à la réalité.

Les coefficients de perte de charge qui sont souvent estimés par corrélation avec l'âge de la conduite sont définis pour la ville de Laval en fonction des diamètres de conduites pour chacun des réseaux (voir tableau 3.1).

Diamètre de conduite D (mm)	Coefficient de Hazen-Williams		
	Pont-Viau	Chomedey	Ste-Rose
D > 405	120	140	140
305 < D < 405	100	140	140
D = 250	95	120	120
150 < D < 250	95	80	80
D < 150	80	60	60

Tableau 3.1 : Coefficients de Hazen Williams, Réseaux de ville de Laval

D'autre part, des études détaillées ont permis de fixer les structures de consommation en fonction de la population desservie par chaque noeud (cf chapitre 1).

- La méthode de résolution utilisée par PICCOLO pour résoudre le système d'équations non linéaires que génère la formulation du problème hydraulique est la méthode de newton modifiée.

3.4 CHOIX DU LOGICIEL DE BALANCEMENT HYDRAULIQUE

Suite aux résultats de l'analyse faite par Poulin (1993), PICCOLO s'est avéré le meilleur choix entre ces deux logiciels pour deux raisons majeures :

- le temps d'analyse requis par PICCOLO est beaucoup plus court que celui requis par RINCAD.
- le transfert des résultats d'un secteur à l'autre du réseau, lors des calculs au niveau des petites conduites par RINCAD, induit des erreurs non négligeables.

De plus, le modèle PICCOLO a été calibré à l'aide de mesures de pression réparties sur l'ensemble du réseau de distribution (plus de 9 points de mesure de pression), et le sens d'écoulement qu'il prédit a été vérifié à plusieurs endroits. En outre, les données recueillies lors d'interventions sur le réseau concordent relativement bien avec les résultats de simulation.

Actuellement, le logiciel PICCOLO est à même, à partir d'une situation hydraulique réelle, d'ajuster les valeurs de rugosité et de consommations en fonction de ces mesures ; PICCOLO a donc été choisi comme logiciel de balancement lors de cette étude.

Cependant, si PICCOLO permet le calage automatique du modèle au réseau étudié, il n'est pas en mesure de fournir des valeurs de temps de séjour conformes à la réalité.

CHAPITRE 4

PROGRAMME D'AIDE À LA DATATION EN RÉSEAU : PADRE

4.1 MISE EN SITUATION

Un réseau de distribution d'eau demeure un système complexe et il est ardu de calculer la valeur exacte du temps de séjour, cependant on peut largement minimiser l'erreur en utilisant une meilleure méthode de calcul que celle de PICCOLO.

En effet, pour le calcul d'un temps de séjour à un point donné, PICCOLO considère les temps de séjour des différents chemins pour se rendre au point considéré. Ensuite, il fait une moyenne pondérée en fonction du débit dans les différentes conduites. Le temps de séjour au point suivant est calculé à partir de cette valeur moyenne pondérée. On a donc d'abord pensé, à améliorer ce calcul en élaborant un programme, qui calcule les temps de séjour en tout point du réseau, en se basant sur les chemins complets depuis l'origine ou en d'autres termes depuis la sortie de l'usine.

Il s'agira dans ce chapitre, seulement, d'expliquer les méthodes de calcul de chacun des programmes de simulation utilisés, alors que les résultats de simulations seront présentés au chapitre 7.

Le Dr. Claude Marche, professeur au département de génie civil de l'École Polytechnique, a mis au point un programme d'aide à la datation en réseau d'eau (PADRE) (Marche, 1994). Ce programme prédit la courbe d'évolution de la concentration

d'un traceur en un point d'un réseau. Ce réseau est alimenté à la source par une eau contenant une concentration connue de traceur. Ce programme est conçu pour un régime permanent, il suppose donc un débit constant durant toute la simulation.

L'étude de l'évolution d'un produit inerte revient à étudier les concentrations en traceur d'un mélange de différentes eaux. On déduit facilement que la concentration du traceur ne dépend que de la répartition des débits dans le réseau. À partir du profil de concentration du traceur à la sortie de l'usine, PADRE trace le profil de concentration en tout point d'analyse. Il suit les déplacements de l'eau depuis sa sortie de l'usine jusqu'au point de mesure.

On désignera désormais par chemin toute succession de tronçons de conduites par laquelle l'eau arrive depuis sa sortie de l'usine jusqu'au point d'échantillonnage. Souvent, l'eau suit une multitude de chemins depuis l'usine jusqu'au point de prélèvements, chacun transportant une portion du débit total qui transite par le noeud d'échantillonnage considéré.

Une seule version de ce programme a été mise au point avec deux formes différentes de fichiers résultats. Le programme suppose un régime d'écoulement permanent, il est basé sur des formules de calcul que nous expliciterons dans ce chapitre, et repose pour ses calculs sur un fichier de données. Pour le premier type de fichiers des résultats, PADRE évalue le temps pendant lequel l'eau a séjourné dans les conduites et prédit la courbe de concentration pour chacun des chemins menant au point d'analyse. Le

deuxième type de fichiers des résultats donne uniquement la courbe de concentration totale au point d'échantillonnage considéré.

4.2 PRINCIPE DE CALCUL DU TEMPS DE SÉJOUR

Le programme met en valeur l'influence des conditions hydrauliques sur le temps de séjour de l'eau dans les conduites. Cette dernière variable peut avoir un effet important sur la qualité de l'eau. Le calcul des temps de séjour dans le réseau s'avère plus facile dans les conduites maîtresses où les sens d'écoulement sont, le plus souvent, connus et où les points d'échantillonnage sont alimentés par un faible nombre de conduites. Le calcul des temps de séjour est plus compliqué pour les petites conduites. Les débits y sont moins sûrs, de plus le nombre de conduites qui alimentent le point de mesure est, presque toujours, beaucoup plus élevé.

L'eau au point d'analyse est donc un mélange d'eau d'origines diverses, de temps de séjour différents et de qualités différentes. Cela se matérialise lors d'un traçage par des concentrations de traceurs différentes.

Les informations requises par PADRE sont :

- Les différents chemins empruntés par l'eau depuis la source jusqu'au point d'analyse;
- Les longueurs et les sections des éléments de tuyauterie constituant chaque chemin;

- Les débits (calculés ou mesurés) dans les éléments de chaque chemin;
- La loi de variation de la concentration du traceur en fonction du temps. Dans notre cas, c'est la courbe de concentration en fonction du temps mesuré à la sortie de l'usine de traitement des eaux.

Le programme se base sur un concept simple: en tout point d'analyse (pt) des eaux ayant emprunté des chemins différents se mélangent; chaque chemin est caractérisé par un parcours précis (ch) et un temps de séjour qui lui est propre $TS(pt, ch)$ et apporte une proportion P_{ch} du débit total à ce point d'analyse (Q); ce débit est le débit minimal instantané observé sur l'une des canalisations du chemin (Q_{min}) divisé par la somme des débits minimaux dans tous les chemins.

En considérant cet ensemble de données, PADRE calcule le temps de séjour d'une particule d'eau dans un réseau de la façon suivante :

- 1 Il suppose un débit moyen au point d'analyse sur toute la période d'observation.
- 2 Ce débit est ensuite comparé à la somme des débits minimaux dans tous les chemins, afin de vérifier la conservation du débit

$$\sum P_{ch} = Q \div (\sum Q_{min}) = 1 \quad (4)$$

- 3 Avec les caractéristiques des différents tronçons (aires et longueurs) et les débits, il calcule le temps de séjour $TS(ch, pt)$ de chaque chemin en sommant les temps de séjour dans chaque tronçon du chemin passant par le point d'analyse pt.

- 4 Avec le temps d'analyse T_{an} (moment où l'analyse de l'eau est faite) et le temps de séjour de l'eau dans un chemin TS (ch,pt), il calcule le temps d'émission d'une particule d'eau depuis la source. Selon l'expression donnée en annexe A.1.
- 5 Avec les temps d'émissions respectifs de chaque chemin menant au point pt, la concentration observée est calculée comme la superposition directe et pondérée des concentrations émises à la source (en usine). Elle est donnée par l'expression décrite à l'annexe A.2. L'ensemble des valeurs de concentrations C (pt, T_{an}) calculées à chaque temps d'analyse T_{an} constitue la courbe de concentration prédite par PADRE.
- 6 Le temps de séjour global au point (pt), TS_{pt} , est alors calculé comme la moyenne pondérée des temps de séjour des différents chemins relativement à leurs concentrations respectives en traceur, selon leur pourcentage de débit.

4.3 MÉTHODE DE SIMULATION

Le programme PADRE a été écrit en Fortran 77 ; il utilise des fichiers de données et de résultats ASCII générés par l'éditeur de MS.DOS.

Le fichier d'entrée contient sept sections de données. Le fichier de résultats comporte un rappel des éléments constituant les différents chemins d'alimentation du point d'analyse, la proportion de leur contribution au débit du point d'analyse, la concentration d'origine de chacun des débits et la concentration résultante calculée au

point d'analyse. Les résultats sont complétés par une impression des temps de séjour observés selon chaque chemin.

Afin d'illustrer la méthode de calcul de PADRE, nous nous servons d'un réseau-modèle qui comprend deux chemins tel qu'illustré à la figure 4.1. L'eau part d'une source et se dirige vers un point d'échantillonnage (point d'analyse).

L'eau passe par deux chemins différents, possédant chacun des caractéristiques différentes quant à la proportion de débit, au temps de séjour et à la qualité de l'eau (matérialisée par la portion de traceur apportée).

Sur la base des données décrivant le réseau modèle (tableau 4.1), le fichier de données de PADRE (modèle.DAT) est préparé tel qu'illustré à la figure 4.2. Il permet de suivre l'évolution d'un traceur dans un réseau qui comporte sept éléments et où le point d'analyse est alimenté par deux chemins totalisant respectivement 860 et 1 200 m.

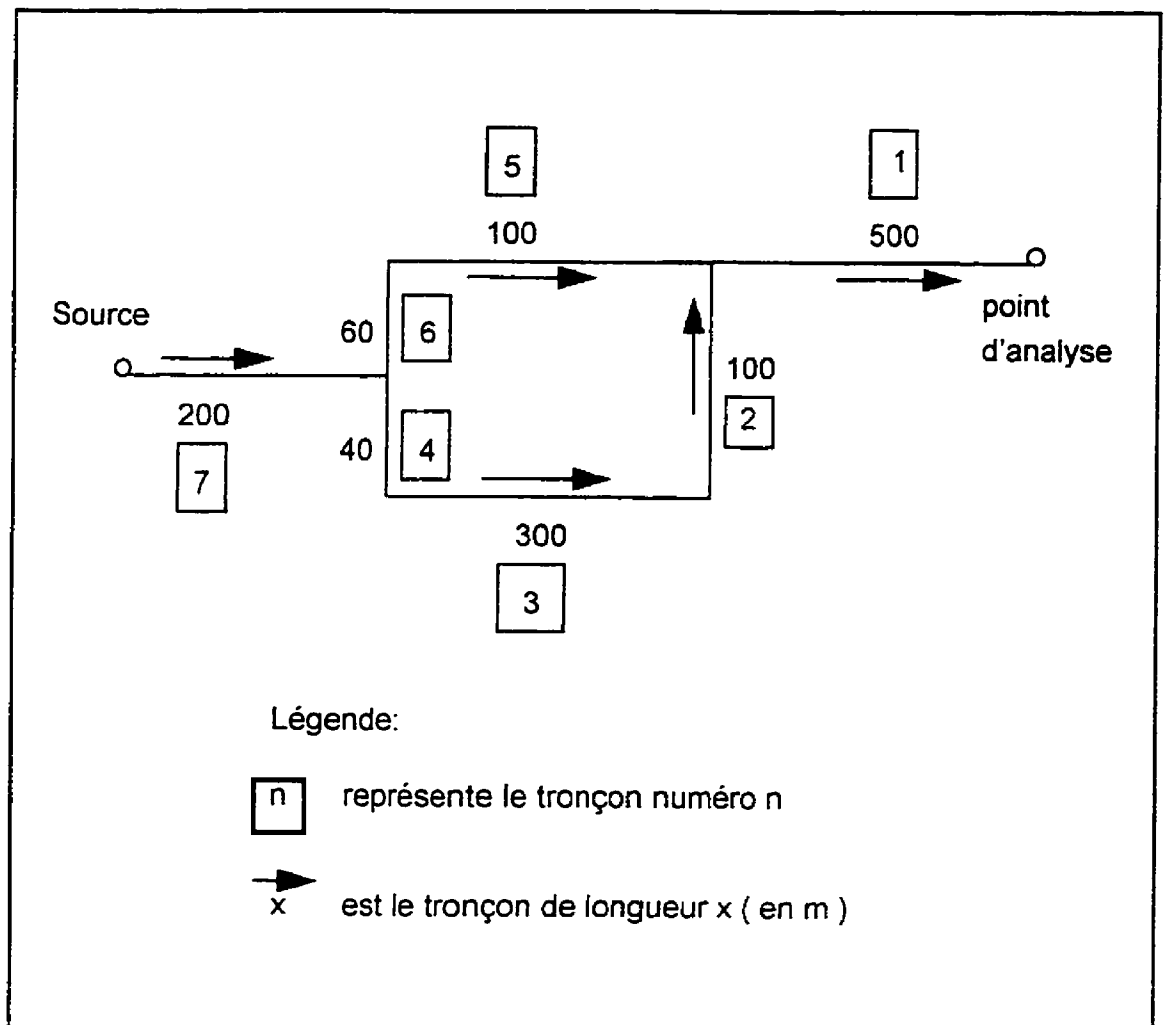


Figure 4.1 : Schéma du Réseau-modèle

Tronçon (*)	Longueur (m)	Débit (m ³ /s)	Section (m ²)
1	500	2.0	1.0
2	100	0.5	1.0
3	300	0.5	1.0
4	40	0.5	1.0
5	100	1.5	1.0
6	60	1.5	1.0
7	900	2.0	1.0

(*) les n° des tronçons servent à identifier les différents tronçons, une suite de n° désigne ainsi pour PADRE un chemin.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des tronçons du réseau-modèle

Le fichier de données est alors traité par PADRE, générant deux fichiers de résultats modèle1.RES (Annexe B.1) et modèle2.RES (Annexe B.2). Modèle1.RES nous permet d'évaluer les temps de séjours relatifs à chaque chemin, le temps de séjour global et de retrouver en tout temps d'analyse quelle a été la contribution en termes de concentration de chacun des chemins. Modèle2.RES nous fournit directement la loi de variation de la concentration du traceur relative au point d'analyse qui constitue le résultat majeur de la simulation avec le programme PADRE. L'évolution de la concentration du traceur prédite par PADRE et la courbe de concentration, à la sortie de l'usine sont superposées (réseau de la figure 4.3).

La courbe de concentration au point d'analyse obtenue par le programme PADRE doit idéalement être une translation dans le temps de la courbe mesurée à la source. En effet, le rôle de PADRE est uniquement de traduire les valeurs de concentration émises

à la source à un moment ultérieur dans le réseau ; il tient aussi compte des conditions hydrauliques qui régissent les écoulements dans le réseau.

7					←	Nombre total de tronçons constituant le réseau
200.0	2.0	1.0			←	Caractéristiques de tous les tronçons constituant le réseau. Chaque ligne caractérise un tronçon unique par sa longueur (m), le débit qui le traverse (m ³ /s) et par sa section (m ²)
60.0	1.5	1.0				
100.0	1.5	1.0				
40.0	0.5	1.0				
300.0	0.5	1.0				
100.0	0.5	1.0				
500.0	2.0	1.0				
1	150	1000	10		←	Comprend successivement, le numéro de la conduite qui est à l'étude, le temps de début d'analyse (en s), le temps de fin d'analyse (en s) et le pas de temps de la simulation
2					←	Indique le nombre de chemins que l'eau emprunte depuis la source jusqu'au point d'analyse.
4			5		←	Relate le nombre de tronçons pour chacun des tronçons qui constituent un chemin selon l'information de la section précédente.
7	3	2	1		←	Chaque ligne donne la succession des numéros de tronçons qui constituent un chemin selon l'information de la section précédente.
7	6	5	4	1		
0		1.0			←	Donne l'évolution de la concentration du traceur à la source : la colonne de gauche exprime le temps écoulé (en s) alors que celle de droite donne la concentration correspondante observée (mg/l).
1000		1.0				
1400		0.8				
1800		0.6				
2000		0.5				
2500		0.4				
3000		0.3				
3500		0.2				
4500		0.1				
10000		0.1				

Figure 4.2 : fichier de données de PADRE, modèle.DAT

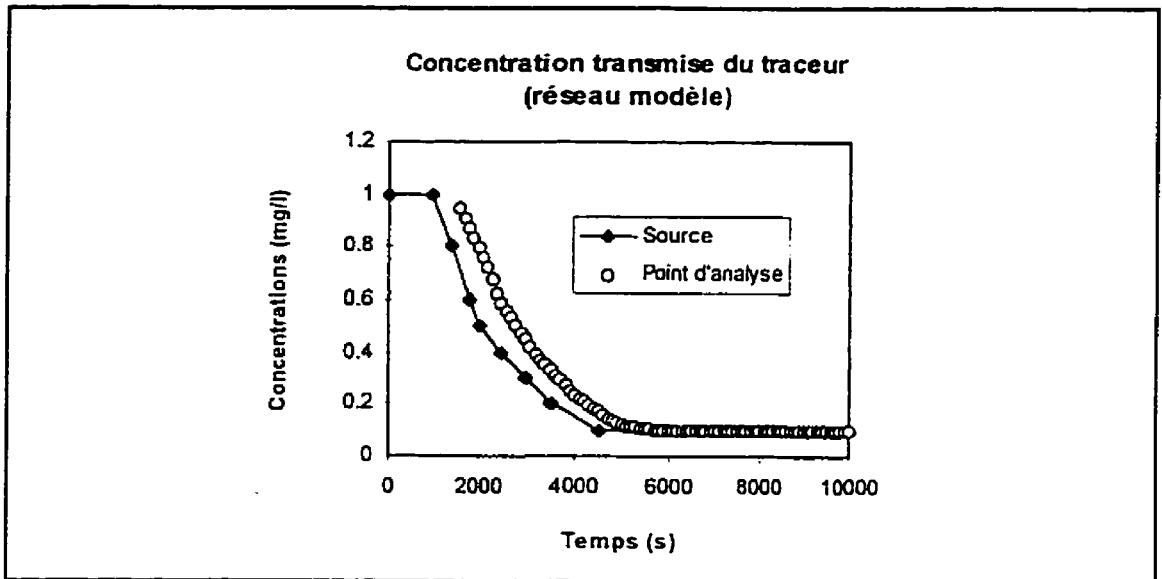


Figure 4.3 : Concentration transmise du traceur (modèle2.DAT)
réseau-modèle

Si les hypothèses de calcul sont valides , c'est le cas de notre exemple modèle, le temps de séjour est le délai entre deux points de même concentration sur les deux courbes.

Afin d'illustrer l'amélioration apportée par PADRE dans le calcul des temps de séjour, nous nous servirons du réseau modèle présenté à la figure 4.1.

Chaque tronçon de conduite est désigné par son numéro. Il est compris entre deux noeuds, un noeud amont (N_{am}) au tronçon numéro N et un noeud aval (N_{av}) à celui-ci relativement au sens d'écoulement de l'eau dans ce tronçon. On notera de même, V_N , la vitesse de l'eau dans le tronçon N , L_N , la longueur du tronçon N et Q_N , le débit dans ce tronçon.

La formule de calcul du temps de séjour par PICCOLO se présente comme suit:

$$TS_{pi}(l_{am}) = \frac{(L_3/V_3)*Q_3 + (L_2/V_2)*Q_2}{Q_3 + Q_2} \quad (5)$$

Le calcul par PADRE se fait par chemins. En effet, on distingue deux chemins menant au noad l_{am} , un premier chemin Ch1 formé des tronçons 7, 6 et 5, et un second chemin noté Ch2 et formé des tronçons 7, 4, 3 et 2. Le temps de séjour de chacun des chemins ($TS(ch1)$ et $TS(ch2)$) est calculé comme illustré à l'annexe A. Le temps de séjour total est donné par la formule suivante:

$$TS_{pa}(l_{am}) = \frac{TS(ch1)*Q_{min}(ch1) + TS(ch2)*Q_{min}(ch2)}{Q_{min}(ch1) + Q_{min}(ch2)} \quad (6)$$

Le calcul numérique donne :

$$TS_{pi}(l_{am}) = 100 \text{ s}$$

$$TS_{pa}(l_{am}) = 1000 \text{ s}$$

4.4 SENSIBILITÉ DU PROGRAMME PADRE

Pour l'ensemble des simulations effectuées avec PADRE, le pas du temps est souvent fixé à 10 ou 100 secondes. Le choix est fonction de l'emplacement du point d'analyse dans le réseau. En effet, lorsque les points de prélèvement sont proches de l'usine et qu'ils sont alimentés par un nombre faible de conduites, le temps de calcul est court même avec un pas de temps de 10 s. Pour des points d'analyse alimentés par plusieurs chemins, un pas de temps de 100 secondes permet d'obtenir de bons résultats après un temps de calcul raisonnable. A titre d'exemple, le point TE310, alimenté par 10 chemins (155 tronçons de conduites) nécessiterait plus de 15 heures de calcul avec un pas de temps de 10 secondes.

Cependant, le choix d'un pas peut avoir un effet non négligeable sur les résultats. Cet effet est illustré par la simulation d'un même point d'analyse avec les deux pas de temps. Le tableau 4.2 donne les résultats d'un tel calcul pour les points d'analyse:

Point d'analyse	Valeur de Ts	Valeur de Ts	Variation de
	Pas = 10s	Pas = 100s	Ts (s)
HB411	34465 s	34400 s	65 s
AX503	11970 s	12100 s	130 s
HD40	14127 s	14475 s	348 s

Tableau 4.2 : Influence du pas de temps d'analyse sur la valeur du temps de séjour total.

La différence peut être appréciable pour des conduites de faible longueur. En effet, PADRE fonctionne en remontant les trajets d'eau, depuis le point d'échantillonnage jusqu'à la source. Ainsi, pour un chemin formé de trois tronçons, (en partant de la source : 60 mètres de longueur et 0,3 m/s; 30 m et 0,4 m/s et 100 m avec 0,5 m/s). PADRE effectue son calcul à partir de la dernière conduite. Son premier arrêt d'analyse a lieu à $100 \text{ s} \times 0,5 \text{ m/s} = 50 \text{ m}$, soit sur la dernière conduite. Lors de son 3^{ème} arrêt, soit après 100 m supplémentaire, il sera à 20 m de la 1^{ère} conduite, manquant ainsi la seconde. Nous concluons donc qu'un pas de temps trop long peut générer des résultats faussés. En reprenant cet exemple avec un pas de temps de 10 secondes, les arrêts de PADRE se feront à tous les 5 m ($10 \text{ s} \times 0,5 \text{ m/s}$). Après 20 arrêts, PADRE reconnaît le changement de conduite pour la fin de l'analyse.

CHAPITRE 5

TRAÇAGE EN RÉSEAU DE VILLE DE LAVAL

5.1 INTRODUCTION

L'organisation du traçage des réseaux de ville de Laval, les 9, 16 et 23 novembre respectivement aux usines de Pont-Viau, Chomedey et Ste-Rose découle d'une planification importante. Cette planification est décrite à l'article 5.3.1.

5.2 CHOIX DU TRACEUR

Un traçage au fluorure a été adopté pour cette étude. Le choix de ce traceur a été dicté par plusieurs considérations :

- La ville de Laval utilise les fluorures sous forme d'acide hexafluorosilicique qu'elle injecte dans les trois réseaux d'eau potable à une dose contrôlée de 1,2 mg/l.
- Le fluorure est un produit facilement mesurable pour des concentrations variant de 0,1 mg/l à 2,0 mg/l à l'aide d'une électrode sélective aux ions fluorures.

5.3 LE MODE DE TRAÇAGE

Deux procédures de traçage au fluorure étaient possibles. La première consiste à mesurer une diminution de la concentration du traceur après arrêt de la fluoruration, la deuxième s'effectue en mesurant une augmentation de la concentration du traceur après redémarrage de la fluoruration arrêtée pour une période de près de 48 heures. Les deux méthodes ont donné des résultats similaires lors du traçage des réserves des usines de traitement de ville de Laval. Afin d'éviter un arrêt trop long de la fluoruration, la première méthode a été choisie. Théoriquement, la concentration des ions fluorures doit passer de 1,2 à 0,1 mg/l.

5.3.1 ORGANISATION DU TRAÇAGE

5.3.1.1 CARACTÉRISTIQUES ATTRIBUÉES À CHACUNE DES USINES

L'organisation du traçage a été accomplie en tenant compte des caractéristiques propres de chaque usine. Cela a permis de choisir le point de prélèvement à l'usine qui donne un profil de traceur semblable à celui observé à l'entrée de la première conduite du réseau.

5.3.2 TRAÇAGE DES RÉSERVES DES USINES DE TRAITEMENT DE VILLE DE LAVAL

Le traçage des réserves avait pour but de mesurer le temps de séjour réel dans les réserves d'eau potable. Ce temps a été calculé en utilisant le programme de calcul CACTUS mis au point par le Dr Marche et qui calcule les temps de séjour à escompter dans les réserves d'eau potable connaissant les niveaux d'eau dans celles-ci et le débit produit. Ce calcul a été effectué pour chacune des usines en considérant les conditions en usine enregistrées la veille du traçage en réseaux.

Le modèle appliqué au réseau Ste-Rose a permis d'évaluer à 11 h 48 mn le temps nécessaire à une goutte d'eau pour se rendre depuis le point de dosage de fluor jusqu'à la sortie des réserves d'eau traitée ; le détail de cette simulation est donné à l'annexe C.1. Le temps de séjour dans les réserves a été estimé pour le réseau Chomedey à 4 h 20 mn (voir l'annexe C.2 pour le détail de la simulation) et pour le réseau Pont-Viau à 66 mn 12 s (voir l'annexe C.3).

Les heures d'arrêt du fluor, compte tenu de ces valeurs, ont été respectivement fixées à 5 h 00 pm la veille du traçage au réseau Ste-Rose, à 12 h 00 pm de la veille du traçage au réseau Chomedey et à 4 h 00 am la journée même du traçage à Pont-Viau.

5.4 LES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE

Les points d'échantillonnage ont été choisis parmi les points de prélèvement de l'étude réseau (Prévost *et al.*, 1993). Le choix de ces points a été effectué afin de pouvoir suivre l'eau dans le réseau, depuis l'usine, jusqu'au point à l'étude. Nous disposons donc d'un point d'échantillonnage à chaque usine, et de points de prélèvement dans le réseau.

Les temps de séjour théoriques considérés pour fins d'organisation du traçage sont ceux déterminés par le logiciel RINCAD (Prévost *et al.*, 1993). Ils ont été calculés avec une simulation hydraulique de l'ensemble du réseau en supposant une consommation totale moyenne de 200 000 m³/d. C'étaient alors les seules valeurs théoriques disponibles.

Les points d'échantillonnage ont été répartis sur des conduites maîtresses et sur des petites conduites de façon à avoir un temps de séjour simulé variant de 0 à 15 heures. Compte tenu des analyses prévues à chacun des points d'échantillonnage, le nombre de points de prélèvement a été limité à 11 par zone d'influence répartis comme suit :

- Un point de prélèvement aux pompes haute-pression (immédiatement avant le réseau)
- 4 à 5 points de prélèvement sur la conduite maîtresse
 - ◇ après environ 3 heures de séjour
 - ◇ après environ 6 heures de séjour
 - ◇ après environ 9 heures de séjour
 - ◇ après environ 12 heures de séjour
 - ◇ après environ 15 heures de séjour (si possible)

- 6 points de prélèvement sur de petites conduites
 - ◇ après environ d'une heure de séjour dans le réseau
 - ◇ après environ 3 heures de séjour dans le réseau
 - ◇ après environ 6 heures de séjour dans le réseau
 - ◇ après environ 9 heures de séjour dans le réseau
 - ◇ après environ 12 heures de séjour dans le réseau
 - ◇ après environ 15 heures de séjour dans le réseau (si possible)

Au total 33 points d'échantillonnage ont été retenus.

5.5 LA PRÉPARATION DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE

Le plan directeur d'aqueduc (ossature détaillée), fourni par le service de l'environnement de ville de Laval, et joint en document annexe au présent rapport, montre la localisation exacte des points d'échantillonnage qui sont à l'étude. Les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 indiquent les caractéristiques de ces points respectivement aux réseaux de Pont-Viau, Chomedey et Ste-Rose.

Les points d'échantillonnage sont situés dans des chambres de vannes aménagées. Ils sont éloignés des accessoires de conduite et ils se prêtent facilement à l'installation des dispositifs d'échantillonnage.

Localisation	Rues adjacentes	Type de Chambre	Noeud pour Simulation	Diamètre (mm)	Arrêt de Corporation	N° de Chambre	Type de matériau
CONDUITES MÂTRESSSES							
Boul. Concorde	Est de l'assomption	Drain	M313	915	2 x 1 po	11-01-C36-468	Hyprescon
Boul. Concorde	Coin Vanier est	Vanne	Q308	405	2 x 1 po	13-02-C16-117	Hyprescon
Boul. Lévesque	Face au pénitencier	Vanne	S28	405	2 x 1 po	14-02-C16-400	Hyprescon
Boul. Lévesque	Ouest de Pélican	Ventouse	W348	405	2 x 1 po	17-03-C16-203	Hyprescon
PETITES CONDUITES							
Derome	Coin sud de Chevalier	Porteuse	E373	150	5 x 1 po	10-00-C06-336	Acier
8è avenue	nord de la 19è rue	Porteuse	B479	150	5 x 1 po	09-01-C06-416	Fonte ductile
Isle Maligne	croissant Port au Persil	Vanne	N428	150	2 x 1 po	12-02-C06-339	Fonte
Luzeme	ouest de Joly	Porteuse	M411	150	5 x 1 po	12-01-C06-438	Fonte gnse
Rue St-Henn	Est de Champagnat	Porteuse	Q105	150	5 x 1 po	13-02-C06-171	Fonte ductile
François Chartrand	coin est Kugler	Porteuse	W320	150	5 x 1 po	17-03-C06-107	Fonte gnse

Tableau 5.1 : Caractéristiques des points d'échantillonnage au réseau Pont-Viau

Localisation	Rues adjacentes	Type de Chambre	Noeud pour Simulation	Diamètre (mm)	Arrêt de Corporation	N° de Chambre	Type de matériau
CONDUITES MÂTRESSSES							
St-Martin	Coin nord est de Favreau	Purgeur	AX443	1220	2 x 1 1/2 po	06-02-C48	Hyprescon
V.service Auth#13 sud	Sortie Boul Dagenais	Mesure	BQ303	750	2 x 1 po	04-05-C30-104	Hyprescon
Boul. Ste-Rose	Est de la 55è avenue	Drain	CC309	405	1x1po + 1x11/2po	02-06-C16-134	Hyprescon
Boul. Ste-Rose	Coin nord est 11è avenue	Vanne	CF330	355	2 x 1 po	03-06-C14-442	Fonte gnse
Boul. Ste-Rose	Coin de la 1è avenue	Vanne	CF344	200	2 x 1 po	01-05-C08-205	Fonte gnse
PETITES CONDUITES							
85è avenue	Nord Boul. Lévesque	Porteuse	AV328	150	5 x 1 po	06-01-C06-138	Fonte gnse
Lapalme	Nord de dufrasne	Porteuse	AP345	150	5 x 1 po	07-02-C06-452	Fonte gnse
Avenue Barbe	Près de Gaboury	Porteuse	AX503	150	5 x 1 po	06-02-C06-452	Fonte gnse
Nathalie	Coin est de Munelle	Porteuse	BJ520	150	5 x 1 po	05-05-C06-323	Fonte ductile
Nina	Coin ouest de Marcel	Porteuse	BJ375	150	5 x 1 po	05-06-C06-311	Fonte ductile
45è avenue	Coin nord 8è rue	Porteuse	CC374	150	5 x 1 po	-	Fonte gnse

Tableau 5.2 : Caractéristiques des points d'échantillonnage au réseau Chomedey

Localisation	Rues adjacentes	Type de Chambre	Noeud pour Simulation	Diametre (mm)	Arrêt de Corporation	N° de Chambre	Type de matériel
CONDUITES MÂITRESSES							
Boul. des Laurentides	Coin Sabounn	Drain	HD40	610	1 x 1 po	10-07-C24-108	Fonte
Boul. des Mille-Iles	Avant terrasse Débien	Purgeur	RE325	610	1 x 1 po	13-08-C24-400	Hyprescon
Boul. des Mille-Iles	Sortie du club de Golf	Purgeur	TE310	610	2 x 1 1/2 po	06-03-C24-104	Hyprescon
Duranleau	Est de Cambay	Chloration	YA307	355	1 x 1 po	18-05-C14-312	Hyprescon
PETITES CONDUITES							
Roseval	Je-me-souviens	Porteuse	AL429	150	5 x 1 po	08-06-C06-314	Fonte ductile
Riendeau	Coin Rioux	Vanne	LD322	150	2 x 1 po	11-07-C06-213	Fonte gnse
Réaumur	Coin Riendeau	Porteuse	LD325	150	5 x 1 po	11-07-C06-224	Fonte gnse
PontBrand	Coin nord de Provence	Porteuse	HC331	150	5 x 1 po	-	Fonte ductile
Prudentiel	Coin Casault	Porteuse	HB411	150	5 x 1 po	10-05-C06-449	Fonte ductile
Montée Masson	Coin Nord de Berloin	Porteuse	YB379	150	5 x 1 po	18-06-C06-214	Fonte gnse

Tableau 5.3 : Caractéristiques des points d'échantillonnage au réseau Ste-Rose

Durant les jours précédant la campagne d'échantillonnage, des systèmes de mesure de vitesse et de pression, appelés FLO-TOTE, ont été installés sur la plupart des points de mesure. Cela a permis de mesurer les conditions qui ont prévalu dans les réseaux, avant, pendant et après le traçage.

Des vérifications ont permis d'optimiser la profondeur d'insertion des sondes de mesures afin de mesurer des vitesses moyennes dans les conduites. Ainsi, la vitesse a été mesurée au centre des petites conduites, et à $0,226 \cdot R$ dans les conduites maitresses.

Les points d'échantillonnage ont été munis, durant les journées de traçage, d'un dispositif pour le prélèvement de liquide. Ce dispositif est constitué d'un tube de pitot qui est inséré à l'intérieur de la conduite. Le tube de pitot est différent selon que l'échantillonnage se fait dans une conduite maitresse ou dans une petite conduite.

Le tube de pitot de 150 mm est muni de plusieurs perforations disposées de manière à prélever un échantillon représentatif formé de tranches d'écoulement ayant des débits équivalents. Pour des conduites maîtresses un pitot de format plus grand est inséré jusqu'à l'axe de la conduite (centre de la conduite) et est ensuite utilisé pour prélever l'échantillon. Une illustration des deux types de tubes de pitot est donnée à la figure 5.1.

L'échantillon est dirigé à l'extérieur de la chambre de visite au moyen d'un tube de téflon relié au tube de pitot. Au bout de ce tube de téflon on a installé une vanne de régulation de débit ainsi qu'un manomètre de façon à pouvoir lire la pression au moment de la prise de l'échantillon.

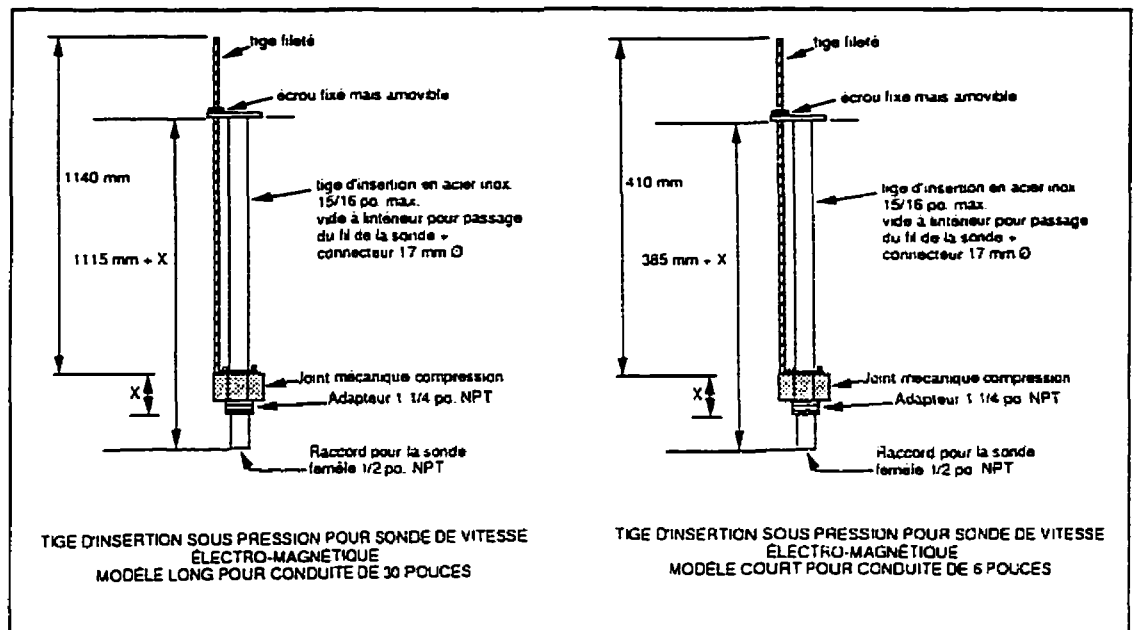


Figure 5.1 : Tubes de pitot insérés dans les conduites maitresses et dans les conduites secondaires.

5.6 PROCÉDURE D'ÉCHANTILLONNAGE

À chaque point d'échantillonnage, un préposé est chargé du prélèvement d'échantillons à toutes les dix minutes. Les prélèvements débutent à l'heure indiquée par le responsable de traçage conformément au temps de séjour moyen simulé par RINCAD .

La bonne communication entre le personnel du laboratoire et les responsables de l'échantillonnage (au moyen de téléphones cellulaires) permet aux préposés à l'échantillonnage de noter l'heure à laquelle la concentration résiduelle de fluorures passe sous 0,2 mg/l. C'est l'heure à laquelle les prélèvements sont arrêtés.

Plusieurs précautions ont été prises afin d'éviter les erreurs d'échantillonnage susceptibles de fausser les mesures en laboratoire. Ainsi, avant de prélever un échantillon, chaque flacon est rincé trois fois avec l'eau à prélever. Afin de minimiser l'effet de la température sur la mesure de la concentration de fluorure, les échantillons prélevés sont placés dans une glacière pendant leur transport au laboratoire. Des mesures de température sont aussi effectuées aux points d'échantillonnage pour évaluer la différence de température de l'eau entre le laboratoire et le point d'échantillonnage.

5.7 ANALYSE DES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE

Tous les échantillons sont analysés dans le laboratoire de l'usine. Le protocole d'analyse du fluorure est présenté à l'annexe D. Les précautions suivantes ont été prises :

- L'analyse des fluorures et une lecture de température sont effectuées dès la réception des échantillons. Si la mesure n'est pas faite dans les trente minutes suivant le prélèvement, l'échantillon est rejeté.
- La mesure est effectuée à l'aide d'une électrode sensible aux fluorures.
- Une calibration des appareils est réalisée à toutes les heures avec des solutions standards de 1 mg/l et 2 mg/l maintenues à la température des échantillons.
- L'influence du pH sur l'analyse du fluor est contrôlée par l'ajout d'une solution tampon de TISAB dans chacun des échantillons mesurés.

CHAPITRE 6

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1 TEMPS DE SÉJOUR MESURÉS PAR TRAÇAGE

6.1.1 RÉSULTATS DES MESURES

L'analyse des échantillons prélevés donne, pour chaque point d'échantillonnage, la valeur de la concentration de fluorure résiduel à chaque instant de mesure, comme indiqué dans le chapitre précédent. Les résultats de ces mesures sont listés aux tableaux 6.1, 6.2 et 6.3 pour chacun des réseaux de ville de Laval.

À partir de ces résultats, on trace les courbes de diminution de traceur en fonction du temps écoulé ; c'est ce qu'on appelle les courbes de traçage.

Théoriquement, la concentration de traceur observée à chaque instant en un point du réseau est une translation dans le temps de la concentration émise à l'usine de traitement d'eau potable. En effet, partant de l'hypothèse qui stipule que l'eau est un fluide incompressible, qui se propage dans le réseau suivant un écoulement piston, on s'attend à ce que la concentration à l'usine se propage suivant le même écoulement.

Afin de vérifier cette hypothèse et, par suite, être capable d'estimer le temps de séjour réel observé à chaque point d'analyse, on procède à la superposition de la courbe de traçage à l'usine et de celle obtenue à chacun des points d'échantillonnage pour chacun

des réseaux. Ces courbes sont présentées aux annexes E.1 (Pont-Viau) , E.2 (Chomedey) et E.3 (Ste-Rose).

6.1.2 ANALYSE DES COURBES DE TRAÇAGE AUX USINES

Point# Pompes HP		Point # M313		Point # Q308		Point #S28	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
05 :38	1.32	06 :05	1.18	07 :10	1.1	09 :14	1.13
06 :02	1.32	06 :15	1.15	08 :50	1.17	12 :39	0.92
06 :35	0.77	06 :25	1.15	09 :20	1.19	13 :10	0.8
06 :48	0.66	06 :35	1.16	09 :50	1.21	13 :20	0.76
07 :05	0.78	06 :45	1.15	10 :20	1.19	13 :30	0.73
07 :20	0.74	06 :55	1.18	10 :30	1.1	13 :40	0.66
07 :33	0.7	07 :05	1.18	10 :40	1.01	13 :50	0.6
07 :48	0.26	07 :15	1.22	10 :50	0.87	14 :00	0.56
08 :05	0.2	07 :25	1.17	11 :00	0.69	14 :20	0.5
08 :20	0.17	07 :35	1.22	11 :20	0.56	14 :40	0.44
08 :38	0.17	07 :45	1.2	11 :30	0.48	14 :50	0.43
08 :55	0.16	07 :55	1.18	11 :40	0.44	15 :00	0.44
09 :25	0.14	08 :05	1.18	11 :50	0.39	15 :10	0.38
10 :00	0.14	08 :15	1.2	12 :00	0.31	15 :20	0.39
10 :25	0.13	08 :25	1.12	12 :10	0.32	15 :30	0.36
11 :30	0.1	08 :35	1.07	12 :20	0.3	15 :40	0.34
		08 :45	0.62	12 :40	0.25	15 :50	0.36
		08 :55	0.72	12 :50	0.24	16 :00	0.31
		09 :05	0.67	13 :00	0.24	16 :10	0.32
		09 :15	0.53	13 :20	0.19	16 :22	0.31
		09 :25	0.45	13 :50	0.15	16 :30	0.31
		09 :35	0.38			16 :40	0.31
		09 :45	0.35			16 :50	0.29
		09 :55	0.26			17 :00	0.28
		10 :05	0.29			17 :20	0.29
		10 :15	0.25			17 :40	0.27
		10 :25	0.25			17 :50	0.27
		10 :35	0.21			18 :00	0.27
		10 :45	0.2				
		10 :55	0.19				

Tableau 6.1 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 09 Novembre 1994, Pont-Viau

Point # W348		Point # E373		Point #B479	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
09 :05	1.10	05 :38	1.3	06 :00	1.1
13 :34	1.10	05 :50	1.27	06 :10	1.13
15 :05	1.12	06 :00	1.28	06 :20	1.15
15 :51	1.11	06 :10	1.28	06 :30	1.14
16 :00	1.09	06 :20	1.25	06 :40	1.17
16 :10	1.10	06 :30	1.25	06 :50	1.14
16 :20	1.06	06 :40	1.20	07 :00	1.11
16 :30	1.02	06 :50	1.13	07 :10	1.12
16 :40	1.00	07 :00	0.95	07 :20	1.05
16 :50	0.96	07 :10	0.83	07 :30	1.07
17 :00	0.93	07 :20	0.69	07 :40	1.06
17 :10	0.87	07 :30	0.58	07 :50	1.09
17 :20	0.86	07 :40	0.5	08 :10	1.19
17 :30	0.79	07 :50	0.41	08 :30	1.16
17 :40	0.75	08 :00	0.38	08 :50	1.01
17 :50	0.71	08 :10	0.28	09 :00	0.94
18 :00	0.66	08 :20	0.29	09 :33	0.66
18 :10	0.6	08 :30	0.26	09 :40	0.61
18 :20	0.54	08 :40	0.24	09 :50	0.54
18 :30	0.51	08 :50	0.21	10 :00	0.39
18 :40	0.48	09 :00	0.2	10 :10	0.4
18 :50	0.47	09 :10	0.19	10 :20	0.42
19 :00	0.42	09 :20	0.19	10 :30	0.42
19 :10	0.42			10 :40	0.41
19 :50	0.34			10 :50	0.37
20 :00	0.32			11 :00	0.35
20 :10	0.31			11 :10	0.31
20 :20	0.31				
20 :30	0.32				
20 :40	0.32				
21 :00	0.31				
21 :10	0.3				
21 :40	0.28				
22 :10	0.26				

Tableau 6.1 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 09 Novembre 1994 (suite), Pont-Viau

Point# M411		Point # Q105		Point # N428		Point #W320	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
07:00	1.11	09:21	1.11	09:31	1.1	09:00	1.12
09:38	1.10	13:20	0.99	16:00	0.62	13:09	1.05
10:10	1.07	13:30	0.96	16:10	0.58	16:01	1.14
10:30	0.93	13:40	0.94	16:20	0.54	16:40	1.03
11:00	0.97	13:50	0.84	16:40	0.54	17:35	1.08
11:20	0.9	14:00	0.84	17:00	0.52	19:00	0.86
11:30	1.00	14:10	0.78	17:20	0.48	19:55	0.71
11:40	1.02	14:20	0.72	17:30	0.47	20:05	0.62
11:50	0.8	14:30	0.74	17:40	0.45	20:15	0.6
12:00	0.34	14:40	0.67	17:50	0.45	20:25	0.56
12:10	0.28	14:50	0.22	18:40	0.31	20:35	0.47
12:20	0.29	15:00	0.56	18:50	0.34	20:45	0.44
12:30	0.44	15:10	0.56	19:00	0.29	20:55	0.48
12:40	0.42	15:20	0.50	19:20	0.27	21:05	0.46
12:50	0.36	15:30	0.50	19:40	0.24	21:15	0.44
13:00	0.81	15:40	0.50	19:50	0.28	21:25	0.4
14:30	0.50	15:50	0.44	20:00	0.3	21:35	0.44
14:40	0.46	16:05	0.32	20:10	0.27	21:45	0.38
14:50	0.29	16:20	0.38	20:30	0.26	21:55	0.36
15:40	0.19	16:30	0.38	20:40	0.25	22:05	0.34
15:50	0.18	16:40	0.32	20:50	0.22		
		16:50	0.36				
		17:10	0.32				
		17:30	0.26				
		17:50	0.25				
		18:00	0.19				
		18:10	0.22				
		18:20	0.20				

Tableau 6.1: Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 09 Novembre 1994 (suite), Pont-Viau

Point# Pompes HP		Point # AX443		Point # BQ303		Point # CC309	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
04 :45	0.95	06 :00	1.16	09 :20	1.09	13 :04	0.97
05 :40	0.99	06 :10	1.13	10 :22	0.99	15 :15	0.99
06 :05	0.9	06 :20	1.09	11 :13	0.94	15 :25	0.99
06 :15	0.8	06 :30	1.08	11 :40	0.93	15 :35	0.98
06 :25	0.8	06 :50	1.08	12 :00	0.93	15 :45	0.98
06 :35	0.76	07 :00	1.05	12 :10	0.87	15 :55	0.92
06 :45	0.7	07 :10	1.04	12 :20	0.83	16 :05	0.97
06 :55	0.67	07 :20	1.03	12 :40	0.78	16 :15	1.00
07 :05	0.64	07 :30	0.97	13 :00	0.73	16 :35	0.97
07 :10	0.58	07 :50	0.9	13 :10	0.7	17 :05	0.96
07 :15	0.56	08 :00	0.86	13 :20	0.7	17 :35	0.91
07 :25	0.52	08 :10	0.77	13 :30	0.65	17 :45	0.89
07 :32	0.44	08 :30	0.73	13 :40	0.59	17 :55	0.87
07 :33	0.48	08 :50	0.63	13 :50	0.57	18 :05	0.83
07 :45	0.44	09 :00	0.56	14 :00	0.53	18 :15	0.78
07 :55	0.4	09 :20	0.48	14 :10	0.48	18 :25	0.73
08 :05	0.38	09 :50	0.36	14 :20	0.45	18 :35	0.67
08 :09	0.36	10 :00	0.34	14 :30	0.44	18 :45	0.63
08 :23	0.3	10 :20	0.28	14 :40	0.4	18 :55	0.6
08 :35	0.27	10 :50	0.2	14 :50	0.4	19 :05	0.55
08 :45	0.26	11 :00	0.21	15 :00	0.36	19 :15	0.52
08 :58	0.22	11 :20	0.19	15 :10	0.35	19 :25	0.5
09 :05	0.19			15 :20	0.32	19 :35	0.46
09 :15	0.17			15 :30	0.31	19 :45	0.43
09 :25	0.15			15 :40	0.28	19 :55	0.42
09 :35	0.14			15 :50	0.27	20 :05	0.47
09 :45	0.14					20 :15	0.37
09 :58	0.14					20 :25	0.33
10 :05	0.13						
10 :15	0.11						
10 :35	<0.1						

Tableau 6.2 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 16 Novembre 1994, Chomedey

Point# CF330		Point # CF342		Point # AV328		Point #AX503	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
15 :40	1.05	18 :42	1.03	05 :40	1.04	06 :12	1.14
16 :30	1.05	18 :50	1.03	06 :10	1.07	06 :22	1.01
17 :00	1.05	19 :00	1.03	06 :20	1.01	06 :32	1.00
17 :20	1.02	19 :10	1.03	06 :30	1.03	06 :42	1.17
17 :45	1.03	19 :40	1.00	06 :40	0.98	06 :52	1.13
18 :15	1.00	20 :10	1.02	06 :50	0.96	07 :02	1.15
18 :43	0.98	20 :30	1.01	07 :00	0.97	07 :12	1.13
19 :00	0.97	21 :00	1.00	07 :10	0.96	07 :22	1.14
19 :15	0.96	21 :10	0.95	07 :20	0.90	07 :32	1.12
19 :30	0.96	21 :20	1.00	07 :30	0.92	07 :52	1.12
19 :45	0.92	21 :30	0.92	07 :40	0.82	08 :02	1.11
20 :00	0.92	21 :45	0.96	07 :50	0.84	08 :12	1.08
20 :15	0.85	22 :00	0.92	08 :00	0.78	08 :22	1.06
20 :30	0.78	22 :15	0.87	08 :10	0.77	08 :32	1.08
20 :45	0.74	22 :30	0.86	08 :20	0.72	08 :52	1.10
21 :00	0.71	22 :45	0.83	08 :40	0.72	09 :12	1.10
21 :15	0.66	23 :00	0.83	08 :50	0.71	09 :32	1.06
21 :30	0.67	23 :15	0.81	09 :00	0.69	09 :53	1.05
21 :45	0.63	23 :30	0.80	09 :10	0.74	10 :03	1.04
22 :00	0.63	23 :45	0.78	09 :20	0.65	10 :12	0.99
22 :10	0.59			09 :30	0.62	10 :22	1.04
22 :20	0.50			09 :40	0.72	10 :42	1.02
22 :30	0.48			09 :50	0.63	11 :02	1.01
22 :40	0.48			10 :00	0.60	11 :32	0.99
22 :50	0.46			10 :10	0.58	11 :52	0.99
23 :00	0.46			10 :20	0.48	12 :12	0.93
23 :10	0.44			10 :30	0.40	12 :22	0.92
23 :20	0.41			10 :40	0.38	12 :27	0.75
23 :30	0.41			10 :50	0.34	13 :32	0.88
23 :40	0.42			11 :00	0.32	13 :35	0.73
				11 :10	0.32	13 :45	0.68
				11 :20	0.23	14 :20	0.52
						14 :30	0.50
						15 :50	0.38
						16 :10	0.34
						16 :30	0.34
						16 :50	0.25

Tableau 6.2 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 16 Novembre 1994 (suite), Chomedey

Point# M411		Point # Q105		Point # N428		Point #W320	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
09 :07	1.08	12 :59	0.95	16 :45	1.05	12 :40	0.95
10 :07	1.06	15 :05	0.94	17 :10	1.03	15 :15	0.96
10 :52	0.98	15 :25	0.94	17 :50	1.06	15 :35	0.96
11 :11	1.00	15 :45	0.92	18 :25	1.05	15 :56	0.97
11 :22	1.00	16 :05	0.87	18 :50	1.04	16 :15	0.95
11 :32	0.96	16 :25	0.95	19 :10	1.07	16 :55	1.05
11 :42	0.88	16 :45	0.93	19 :40	1.07	17 :35	1.05
11 :52	0.88	17 :05	0.91	20 :15	1.05	17 :55	1.00
12 :03	0.87	17 :25	0.86	21 :05	1.02	18 :25	1.03
12 :13	0.87	17 :45	0.79	21 :17	1.05	18 :55	1.05
12 :23	0.81	18 :05	0.72	22 :10	1.01	19 :05	1.04
12 :45	0.81	18 :15	0.67	22 :40	1.00	19 :15	1.04
12 :55	0.81	18 :35	0.60	22 :50	0.99	19 :25	1.03
13 :06	0.80	18 :45	0.55	23 :10	0.99	19 :35	1.02
13 :16	0.79	19 :00	0.50	23 :20	0.99	19 :45	0.96
13 :27	0.77	19 :15	0.45	23 :30	0.99	19 :55	0.96
13 :37	0.79	19 :30	0.41			20 :05	0.90
13 :58	0.70	19 :45	0.35			20 :15	0.90
14 :09	0.70	20 :00	0.31			20 :35	0.96
14 :19	0.64	20 :15	0.29			20 :45	0.95
14 :30	0.69	20 :30	0.28			20 :55	0.89
14 :40	0.66					21 :05	0.85
14 :50	0.66					21 :15	0.81
15 :01	0.65					21 :25	0.77
15 :11	0.59					21 :45	0.72
15 :22	0.66					22 :05	0.72
16 :01	0.58					22 :25	0.66
16 :11	0.60					22 :55	0.68
16 :34	0.55					23 :07	0.62
17 :05	0.55					23 :15	0.64
17 :18	0.51					23 :25	0.62
17 :28	0.50						
17 :38	0.46						
17 :48	0.42						
17 :58	0.40						
18 :08	0.39						
18 :18	0.34						
18 :28	0.36						
18 :38	0.37						
18 :58	0.36						

Tableau 6.2 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 16 Novembre 1994 (suite), Chomedey

Point# Pompes HP		Point # HD40		Point # RE325		Point # TE310	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
05 :15	1.20	07 :05	1.25	12 :40	1.16	16 :51	1.24
06 :00	1.10	07 :15	1.28	13 :40	1.14	17 :30	1.23
06 :15	1.05	07 :25	1.27	14 :30	1.16	18 :45	1.20
06 :30	1.08	07 :35	1.22	15 :20	1.16	20 :30	1.17
06 :50	0.97	07 :45	1.17	15 :40	1.76	21 :00	1.17
07 :05	0.97	08 :15	1.23	16 :10	1.24	22 :00	1.15
07 :35	0.90	08 :45	1.19	16 :20	1.24	22 :30	1.24
07 :55	0.84	08 :55	1.19	17 :10	1.25	22 :45	1.09
08 :10	0.82	09 :05	1.18	17 :20	1.24	23 :00	1.08
08 :45	0.68	09 :25	1.19	18 :30	1.40	23 :30	1.08
09 :00	0.62	09 :35	1.17	18 :40	1.20	23 :45	1.06
09 :10	0.56	09 :45	1.17	20 :20	1.07	00 :25	1.07
09 :20	0.54	09 :55	1.13	20 :30	1.06		
09 :40	0.52	10 :05	1.11	20 :40	1.03		
09 :55	0.44	10 :15	1.11	21 :10	1.07		
10 :10	0.42	10 :35	1.06	21 :30	0.97		
10 :35	0.30	11 :05	1.05	21 :50	0.98		
10 :50	0.26	11 :15	0.98	22 :00	0.99		
11 :20	0.24	11 :25	0.94	22 :40	0.98		
11 :30	0.28	11 :45	0.96	23 :00	0.96		
11 :35	0.22	11 :55	0.91	23 :20	0.95		
		12 :05	0.85	23 :40	0.93		
		12 :15	0.80	23 :50	0.92		
		12 :25	0.77				
		12 :35	0.74				
		12 :45	0.65				
		12 :55	0.69				
		13 :05	0.60				
		13 :15	0.60				
		13 :25	0.64				
		13 :35	0.60				
		13 :45	0.58				
		14 :05	0.48				
		14 :15	0.46				
		14 :30	0.33				
		14 :45	0.28				
		15 :00	0.24				

Tableau 6.3 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 23 Novembre 1994, Ste-Rose

Point # YA307		Point # AL429		Point # HC331	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
17 :10	1.19	06 :00	1.19	07 :38	1.18
18 :30	1.11	06 :20	1.26	07 :50	1.33
18 :40	1.10	06 :40	1.25	08 :10	1.22
19 :10	1.11	06 :50	1.22	08 :20	1.20
20 :10	1.11	07 :00	1.15	08 :40	1.15
20 :30	1.19	07 :10	1.25	08 :50	1.25
20 :50	1.17	07 :30	1.32	09 :00	1.25
21 :30	1.70	07 :50	1.28	09 :10	1.24
22 :20	1.23	08 :10	1.24	09 :30	1.25
22 :50	1.06	08 :20	1.22	09 :50	1.21
23 :20	1.09	08 :30	1.13	10 :10	1.26
23 :40	1.08	09 :00	1.18	10 :25	1.17
		09 :10	1.20	10 :30	1.20
		09 :20	1.13	10 :50	1.22
		09 :40	1.11	11 :10	1.18
		09 :50	1.04	11 :20	1.12
		10 :00	1.10	11 :30	1.20
		10 :10	1.01	11 :50	1.17
		10 :30	1.06	12 :00	1.21
		10 :50	0.96	12 :30	1.16
		11 :00	0.98	13 :10	1.17
		11 :20	0.96	14 :00	1.27
		11 :40	0.88	14 :20	1.20
		11 :50	0.83	14 :30	1.20
		12 :01	0.81	14 :40	1.12
		12 :10	0.80	15 :00	1.20
		12 :20	0.75	15 :10	1.20
		12 :30	0.74	15 :20	1.20
		12 :40	0.70	15 :40	1.10
		13 :00	0.65	16 :20	1.20
		13 :10	0.56	16 :30	1.20
		13 :20	0.52	17 :20	1.20
		13 :30	0.46	17 :30	1.20
		13 :40	0.42	18 :00	1.29
		14 :00	0.38	18 :10	1.17
		14 :10	0.39	18 :20	1.18
		14 :20	0.36	18 :40	1.11
		14 :30	0.32	21 :15	1.12
		14 :40	0.31	21 :55	1.13
		14 :50	0.30	22 :30	1.19
		15 :00	0.32	23 :10	1.25
		15 :10	0.32	23 :45	1.03
		15 :20	0.33		

Tableau 6.3 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 23 Novembre 1994 (suite), Ste-Rose

Point# LD322		Point # HB411		Point # LD325		Point # YB379	
Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. Mg/l	Heure	Conc. mg/l	Heure	Conc. mg/l
09 :27	1.19	10 :39	1.21	13 :40	1.15	22 :20	1.23
10 :45	1.17	11 :09	1.20	14 :20	1.12	22 :35	1.07
11 :00	1.24	11 :19	1.21	15 :00	1.12	23 :05	1.07
11 :30	1.17	11 :39	1.17	15 :10	1.13	23 :35	1.06
11 :45	1.27	11 :59	1.15	16 :10	1.17	00 :05	1.07
12 :15	1.15	12 :50	1.18	16 :40	1.24		
12 :30	1.18	13 :51	1.11	17 :10	1.20		
12 :45	1.16	14 :01	1.11	17 :55	1.05		
13 :30	1.16	14 :11	1.06	18 :10	1.26		
14 :15	1.14	14 :21	1.02	20 :25	1.15		
15 :00	1.17	14 :31	0.97	20 :40	1.07		
16 :00	1.16	14 :41	1.06	21 :10	1.15		
16 :30	1.16	15 :01	1.01	21 :25	1.19		
16 :45	1.11	15 :21	0.94	21 :40	1.06		
17 :00	1.08	15 :31	0.88	21 :55	0.93		
17 :30	1.01	15 :41	0.84	22 :10	0.99		
17 :45	1.01	15 :51	0.81	22 :25	1.07		
21 :28	0.47	16 :08	0.75	22 :55	1.10		
22 :05	0.40	16 :20	0.73	23 :10	1.05		
22 :40	0.40	16 :30	0.66	23 :25	1.00		
23 :20	0.34	16 :40	0.62	00 :25	0.89		
23 :40	0.28	16 :50	0.64				
		17 :00	0.62				
		17 :10	0.57				
		17 :20	0.54				
		17 :30	0.48				
		17 :40	0.45				
		17 :50	0.44				
		18 :00	0.34				
		18 :10	0.33				
		18 :20	0.32				
		18 :30	0.30				
		18 :40	0.29				
		18 :50	0.28				

Tableau 6.3 : Évolution de la concentration de fluorure résiduel aux points d'échantillonnage, journée du 23 Novembre 1994 (suite), Ste-Rose

Les concentrations mesurées au niveau des pompes haute pression nous ont permis de tracer les courbes de concentration en usine. Ces profils ont été utilisés pour définir le profil d'entrée du traceur pour le modèle de simulation PADRE.

On constate généralement que les concentrations de fluorures dans l'eau au point P_0 ne décroissent pas immédiatement après arrêt de la fluoruration. En effet, le passage de l'eau dans les différentes réserves de stockage atténue la courbe par effet de mélanges ou d'existence éventuelle d'espaces morts, et engendrent une décroissance exponentielle plutôt qu'une décroissance en escalier (fonction de Dirac).

6.1.2.1 USINE PONT-VIAU

La forme de la courbe est différente de la forme d'une fonction de Dirac, correspondant à un écoulement en piston idéal. En effet, le fluorure met près de 2 heures (de 6h00 à 8h00) pour que sa dose atteigne un minimum de 0,2mg/l. Ce temps de séjour représente le délai entre l'arrêt de la fluoruration et son arrivée au point d'échantillonnage en usine. En outre, la courbe présente une remontée de la concentration de l'ordre de 0,15mg/l entre 07h05 am et 07h33 pm. Afin d'expliquer une telle remontée, il est important de noter qu'à l'usine Pont-Viau la fluoruration se fait presque à la sortie de l'usine et non dans les réserves d'eau filtrée. De ce fait, le déplacement du traceur est largement influencé par le débit de pompage à la sortie de l'usine.

Une concentration constante de 1,2mg/l de fluorure est théoriquement véhiculée par le débit pompé à l'usine, ce débit étant variable sur la durée de pompage.

Cette remontée peut donc être expliquée par une augmentation brusque du débit à la sortie de l'usine entre les mêmes heures (6h00 à 8h00). Lorsque le débit diminue, la concentration diminue par effet de dispersion du traceur, qui est entraîné moins rapidement selon le cycle de puisage de la journée du 09 Novembre 1994 (fig 6.2).

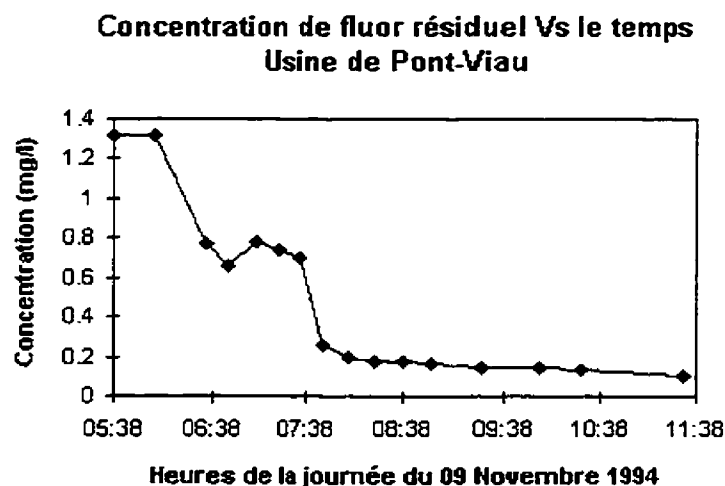


Figure 6.1 : Variations du traceur mesurées à l'usine Pont-Viau

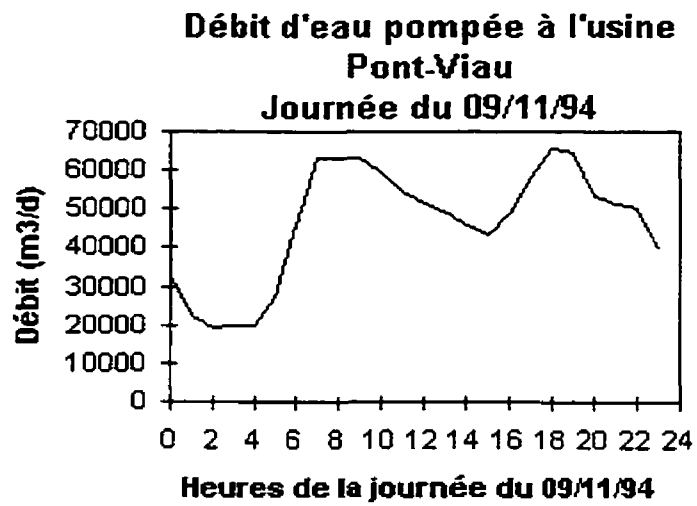


Figure 6.2 : Cycle de puisage de l'eau à l'usine Pont-Viau (le 9-11-94)

6.1.2.2 USINES CHOMEDEY ET STE-ROSE

La courbe de traçage au niveau de l'usine présente une forme adoucie par effet des

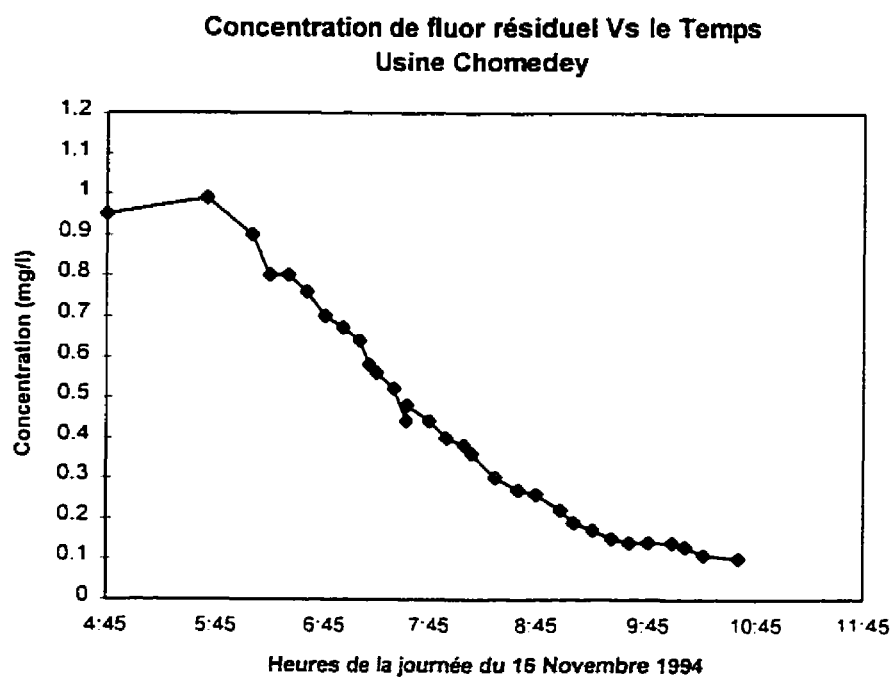


Figure 6.3 : Variations du traceur mesurées à l'usine Chomey

mélanges qui sont dominants par rapport à l'effet du pompage. Il n'y a donc pas de remontée notable sur la courbe de concentration, même si le débit d'eau pompé est variable.

A Chomedey, le fluorure met près de 3 heures pour que sa dose atteigne une valeur minimale de 0,2mg/l. La courbe de concentration ne commence pas par la valeur théorique de 1,2mg/l. Cela veut probablement dire que nous avons commencé à échantillonner à quelques minutes de retard.

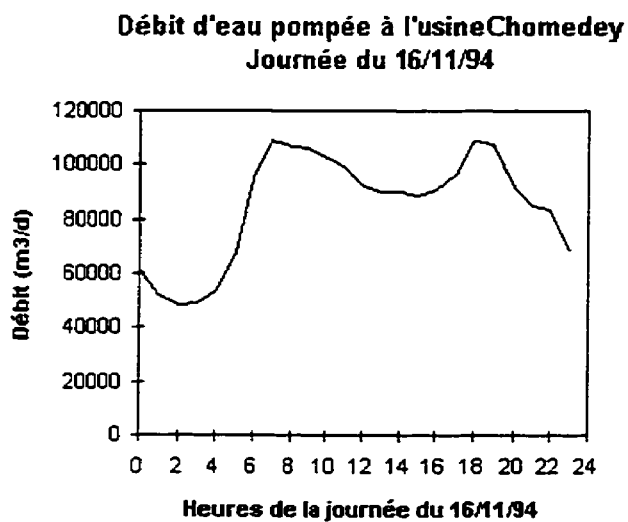


Figure 6.4 : Cycle de puisage de l'eau à l'usine Chomedey (16-11-94)

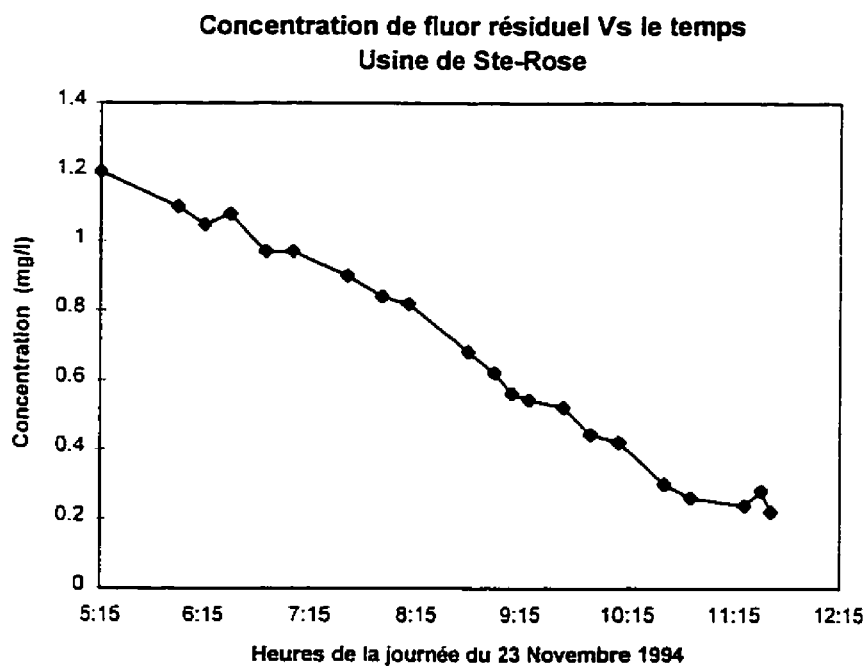


Figure 6.5 : Variations du traceur mesurées à l'usine Ste-Rose

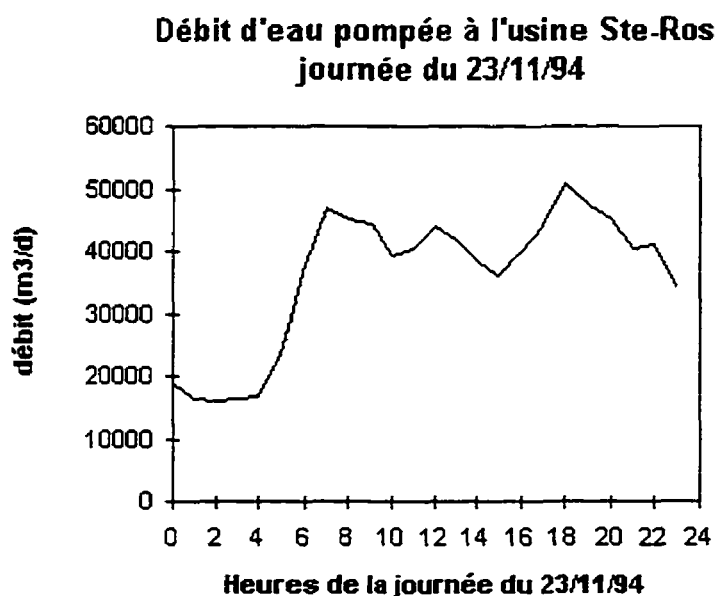


Figure 6.6 : Cycle de puisage de l'eau à l'usine de Ste-Rose (23-11-94)

À Ste-Rose, le traceur met près de 7 heures pour que sa dose atteigne une valeur minimale de 0,2mg/l, en partant de la concentration théorique de 1,2mg/l.

On constate une très légère remontée des concentrations à partir de 6h15 jusqu'à 6h30 environ. Cette variation n'est pas comparable à celle observée à Pont-Viau, mais dénote cependant une augmentation des flux du traceur à cet instant, probablement due à l'augmentation du débit pompé enregistré à ce même instant.

6.1.3 ÉVALUATION DES TEMPS DE SÉJOUR

6.1.3.1 ANALYSE DES COURBES DE TRAÇAGE EN RÉSEAU

L'analyse des courbes de traçage peut être menée de manière similaire pour les trois réseaux. On peut faire abstraction des particularités de ces courbes si on considère que la variation de concentration au niveau de l'usine doit théoriquement se refléter, à quelques variations près, sur les concentrations mesurées dans le réseau. Lorsque l'allure des deux courbes (sortie de l'usine et réseau) est différente, on pourra supposer une variation dans le temps des conditions hydrauliques pendant la période de traçage.

Ainsi, on constate que pour les conduites maîtresses, le profil est à peu près conservé pour les points d'échantillonnage proches de l'usine. Le profil change au fur et à mesure que l'on s'éloigne. Pour les conduites secondaires, l'effet des mélanges se reflète de manière plus accentuée, et les profils de concentration se trouvent alors grandement changés.

D'autres part, pour certains points, l'instabilité des conditions hydrauliques, tels que le changement du sens de l'écoulement, a causé une stagnation de la concentration de traceur enregistrée pour une longue période. Ainsi, pour ces points, la concentration enregistrée s'est maintenue entre 1,2 et 1,0 mg/l pendant plusieurs heures. Cela ne nous a pas permis d'observer une courbe de traçage et ainsi de mesurer le temps de séjour.

Pour finir, signalons que toute fluctuation de la concentration du traceur dans le réseau par rapport à la concentration en usine est tributaire des conditions réelles qui ont prévalu pendant la période d'échantillonnage. Il est donc normal que la courbe de concentration relevée pour certains points d'échantillonnage ne soit pas tout à fait représentative car les mesures ont été arrêtées avant que la concentration minimale de fluorure ait été atteinte.

L'analyse des courbes de traçage montre qu'elles ne sont pas toujours une translation dans le temps des courbes de traçage émises à l'usine.

6.1.3.2 VALEURS DES TEMPS DE SÉJOUR MESURÉS

La forme des courbes de traçage est donc affectée par l'ensemble des facteurs qui ont conditionné le transit du traceur à travers le réseau. Pour chacun des points de mesure, cette forme n'est pas une translation parfaite de la courbe de traçage à la sortie de l'usine. Il a donc été décidé de faire un calcul approché du temps de séjour mesuré par traçage. Ce dernier est la moyenne pondérée de deux ou trois temps de séjour qui représentent le délai, à concentration égale, entre le temps d'analyse à l'usine et le temps d'analyse en réseau.

Ce calcul a été fait en respectant, pour chacun des points d'échantillonnage, l'allure de la courbe de traçage obtenue. Ce calcul n'a été effectué que pour les points dont la courbe de concentration est représentative : soit celle où la concentration diminue

d'environ 1,2mg/l à 0,2mg/l . Les résultats de ce calcul sont présentées aux tableaux 6.4, 6.5 et 6.6

Localisation	Rues adjacentes	Noeud pour Simulation	Diamètre (mm)	Nombre de conduites	Nombre de chemins	Is traçage (s)	Is en h:mn:s
CONDUITES MÂTRESSES							
Boul. Concorde	Est de l'assomption	M313	915	34	2	7685	2:08:05
Boul. Concorde	Coin Vanier est	Q308	405	80	8	15367	4:16:07
Boul. Lévesque	Face au pénitencier	S28	405	>1700	>1000	21831	6:03:51
Boul. Lévesque	Ouest de Pélican	W348	405	>1700	>1000	40207	11:10:07
PETITES CONDUITES							
Derome	Coin sud de Chevalier	E373	150	14	1	2188	0:36:28
8è avenue	nord de la 19è rue	B479	150	143	110	9224	2:33:44
Isle Maligne	croissant Port au Persil	N428	150	>600	>1000	34769	9:39:29
Luzeme	ouest de Joly	M411	150	63	6	20125	5:35:25
Rue St-Henri	Est de Champagnat	Q105	150	>1700	>1000	26961	7:29:21
François Chartrand	coin est Kugler	W320	150	>1700	>1000	45335	12:35:35

Tableau 6.4 : Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage (Pont-Viau)

Localisation	Rues adjacentes	Noeud pour Simulation	Diamètre (mm)	Nombre de conduites	Nombre de chemins	Ts traçage (s)	Ts en h.mn.s
CONDUITES MÂITRESSES							
St-Martin	Coin nord est de Favreau	AX443	1220	21	1	6280	1.44.40
V.service Aut#13 sud	Sortie Boul Dagenais	8Q303	750	79	4	22995	6.23.15
Boul. Ste-Rose	Est de la 55 ^e avenue	CC309	405	319	928	42414	11.46.54
Boul. Ste-Rose	Coin nord est 11 ^e avenue	CF330	355	700	>900	50839	14.07.19
Boul. Ste-Rose	Coin de la 1 ^e avenue	CF344	200	>900	>1000	57660	16.01.00

PETITES CONDUITES							
85 ^e avenue	Nord Boul. Lévesque	AV328	150	37	3	6615	1:50:15
Lapalme	Nord de dufresne	AP345	150	142	70	25497	7:04:57
Avenue Barbe	Près de Gaboury	AX503	150	25	1	24419	6.46.59
Nathalie	Coin est de Murielle	BI520	150	144	160	52995	14:43:15
Nina	Coin ouest de Marcel	BJ375	150	201	208	40668	11.17.48
45 ^e avenue	Coin nord 8 ^e rue	CC374	150	387	>35000	-	-

(-) évaluation impossible par manque de points de mesure significatifs

Tableau 6.5 : Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage (Chomedey)

Localisation	Rues adjacentes	Noeud pour Simulation	Diamètre (mm)	Nombre de conduites	Nombre de chemins	Ts traçage (s)	Ts en h.mn.s
CONDUITES MÂITRESSES							
Boul. des Laurentides	Coin Sabourn	HD40	610	61	5	16099	4.28.19
Boul. des Mille-Iles	Avant terrasse Débien	RE325	610	134	5	51900	14.25.00
Boul. des Mille-Iles	Sortie du club de Golf	TE310	610	155	10	-	-
Duranleau	Est de Cambray	YA307	355	319	225	59640	16.34.00

PETITES CONDUITES							
Roseval	Je-me-souviens	AL429	150	32	6	15125	4:12:05
Riendeau	Coin Rioux	LD322	150	161	118	38502	10:41.42
Réaumur	Coin Riendeau	LD325	150	169	166	60540	16:49:00
PontBriand	Coin nord de Provence	HC331	150	413	300	-	-
Prudentiel	Coin Casault	HB411	150	71	2	28570	7:56:10
Montée Masson	Coin Nord de Berloin	YB379	150	320	225	62400	17:20:00

(-) évaluation impossible par manque de points de mesure significatifs

Tableau 6.6 : Temps de séjour mesurés aux points d'échantillonnage (Ste-Rose)

6.1.4 VITESSES ET PRESSIONS RECUEILLIES PAR FLOTOTE

6.1.4.1 RÉSULTAT DES MESURES PAR FLOTOTE

Les vitesses et les pressions ont été mesurées aux points d'échantillonnage à l'exception de ceux qui présentaient des difficultés d'accès (souvent sur des conduites maîtresses). Les variations de vitesse et de pression pour les conduites maîtresses et secondaires aux différents points d'échantillonnage qui y sont situés sont présentées à l'annexe F.

A partir de ces valeurs et pour chacune des journées d'échantillonnage, l'écart entre les valeurs mesurées et simulées a été calculé sous forme de pourcentage d'erreur. Ce pourcentage représente le rapport de la différence entre les vitesses simulée et mesurée avec la vitesse mesurée. Un pourcentage positif indique que la vitesse mesurée au point d'échantillonnage est inférieure à celle prédite par simulation. Cela equivaut, entre autre, à dire que PICCOLO surestime la vitesse, (ou sous estime le coefficient de perte de charge). Le même calcul a été effectué avec les valeurs de pression mesurées et simulées. Nous présenterons aussi pour la pression, les valeurs absolues des écarts algébriques calculés.

6.2 RÉSULTATS OBTENUS PAR SIMULATION AVEC PICCOLO

6.2.1 MISE EN SITUATION

Considérant les valeurs moyennes de débits et de pressions qui ont prévalu aux différentes usines de traitement d'eau pendant les journées d'échantillonnage, il a été décidé de réaliser une seule simulation sur le modèle hydraulique de l'ossature détaillée du réseau de distribution. Cette simulation en régime permanent a été faite en considérant une consommation totale de 170 000 m³/d. Le tableau 6.7 résume les conditions journalières observées aux usines au cours des journées de prélèvement et des journées précédentes. Ces valeurs ont été calculées à partir des valeurs horaires de pression et de débit. La pression moyenne à la sortie des différentes usines est d'environ 600 Kpa alors que le débit s'inscrit dans une gamme de 170 000 m³/d à 200 000 m³/d . La décision de simuler une seule condition de consommation peut être justifiée comme suit :

Date	Débit journalier mesuré de l'eau finie (m3/s)				Pression journalière mesurée de l'eau pompée (Kpa)		
	Pont-Viau	Chomedey	Ste-Rose	Total	Pont-Viau	Chomedey	Ste-Rose
8/11/94	45600	80700	-	-	609	594	-
9/11/94	46300	85200	36100	167600	612	601	597
15/11/94	49900	83100	-	-	608	590	-
16/11/94	48500	85500	37900	171900	611	597	597
22/11/94	42600	87300	38900	168800	600	597	591
23/11/94	40900	90300	36600	167800	606	601	594

Tableau 6.7 : Conditions moyennes journalières aux usines pendant la période d'échantillonnage

- Les responsables du service de l'environnement de ville de Laval ont observé, lors de la calibration du modèle PICCOLO, que les résultats de simulation (les vitesses dans les différents tronçons du réseau, ainsi que les pressions et les temps de séjour moyens aux différents noeuds) à un débit total pompé de 170 000 m³/d peuvent être extrapolés de façon linéaire lorsque le débit total varie de 160 000 à 200 000 m³/d.
- Ensuite, le régime permanent a été choisi afin d'évaluer l'erreur commise par PICCOLO dans l'évaluation des débits et des vitesses et ensuite des temps de séjour par rapport aux valeurs réellement rencontrées.

Suite à la simulation avec un débit total pompé de 170 000 m³/d, les résultats aux noeuds sont les pressions et les temps de séjour moyens. Les résultats aux différents

tronçons (soit aux liens entre les noeuds) comprennent les débits et les vitesses. Un exemple des résultats obtenus après simulation avec PICCOLO est montré au tableau 6.8.

PROJET POLYTECHNIQUE 170000 m3/s									
# NOEUD # INITIAL	NOEUD FINAL	DIAMETRE (mm)	DEBIT (l/mn)	VITESSE (m/s)	TEMPS SEJ./PARC.	MATERIAU	RQM		
A301	A1	304.80	-442.9	-0.10	0:01:39	FG70	BOUL.	DES P	
A1	A302	304.80	-442.9	-0.10	0:12:09	FG70	BOUL.	DES P	
A2	A4	304.80	-195.5	-0.04	0:35:10	FG5059	AVE.	DU CRC	
A302	A2	304.80	-195.5	-0.04	0:13:19	FG5059	AVE.	DU CRC	
A301	A3	152.40	-35.1	-0.03	1:11:23	FG5059	MTE	DU MOUL	
A3	A304	152.40	-35.1	-0.03	0:43:39	FG5059	MTE	DU MOUL	
A4	A303	304.80	-195.5	-0.04	0:31:21	FG5059	AVE.	DU CRC	
A5	A7	152.40	-25.0	-0.02	1:01:19	FG5059	MTE	DU MOUL	
A304	A5	152.40	-25.0	-0.02	0:12:55	FG5059	MTE	DU MOUL	
A6	A8	304.80	-267.6	-0.06	0:36:08	FG5059	AVE.	DU CRC	
A303	A6	304.80	-267.6	-0.06	0:02:05	FG5059	AVE.	DU CRC	
A7	A9	152.40	-25.0	-0.02	0:52:13	FG5059	MTE	DU MOUL	
A8	A11	304.80	-267.6	-0.06	0:33:59	FG5059	AVE.	DU CRC	
A9	A10	152.40	-25.0	-0.02	1:04:53	FG5059	MTE	DU MOUL	
A306	B1	152.40	8.3	0.01	6:12:55	FG5059	MTE	DU MOUL	
B1	B300	152.40	8.3	0.01	1:34:57	FG5059	MTE	DU MOUL	
B300	B2	200.00	-150.8	-0.08	0:02:40	FG5059	RUE	MONTMO	
B2	B301	200.00	-150.8	-0.08	0:15:21	FG5059	RUE	MONTMO	
A12	B3	304.80	161.2	0.04	0:46:09	FG5059	AVE.	DU CRC	
B301	B3	304.80	-161.2	-0.04	0:04:33	FG5059	RUE	MONTMO	
B304	B4	203.20	201.5	0.10	0:02:11	FG5059	MTE	DU MOUL	
B4	B305	203.20	201.5	0.10	0:04:57	FG5059	MTE	DU MOUL	
B5	B6	203.20	-127.3	-0.07	0:31:44	FG5059	MTE	DU MOUL	
B304	B5	203.20	-127.3	-0.07	0:31:05	FG5059	MTE	DU MOUL	
B6	B7	203.20	-127.3	-0.07	0:18:16	FG5059	MTE	DU MOUL	
B7	B8	203.20	-127.3	-0.07	0:21:23	FG5059	MTE	DU MOUL	
B8	B805	203.20	-127.3	-0.07	0:13:58	FG5059	MTE	DU MOUL	
B9	B805	150.00	0.0	0.00		FG5059	MTE	DU MOUL	
B9	B806	150.00	0.0	0.00		FG5059	MTE	DU MOUL	
C1	C2	254.00	0.0	0.00		FG6069	RUE	FLEETW	
C300	C1	254.00	0.0	0.00		FG6069	RUE	FLEETW	
C2	C807	250.00	0.0	0.00		FG6069	RUE	FLEETW	
C3	C4	254.00	-385.5	-0.13	0:16:43	FG6069	RUE	FLEETW	

# NOEUD	ALTITUDE (m)	ZONE	PRESSION (KPa)	TEMPS SEJ./PARC.
Q5	40.23	PT_MESURE	409.46	6:25:09
R67	27.13	PT_MESURE	534.51	13:56:06
BN25	32.00	PT_MESURE	483.69	11:59:16
BU25	41.45	PT_MESURE	390.45	15:39:30
D372	33.53	PT_MESURE	478.45	18:05:53
Q303	40.23	PT_MESURE	409.43	7:56:51
Q306	40.23	PT_MESURE	409.38	6:36:25
Q340	40.39	PT_MESURE	400.64	9:14:36
Q444	42.67	PT_MESURE	384.28	11:51:04
R308	26.52	PT_MESURE	540.94	17:23:20
R310	26.67	PT_MESURE	538.33	14:19:17
R318	26.21	PT_MESURE	543.95	17:24:27
AA309	14.63	PT_MESURE	604.93	33:32:41
BA553	41.15	PT_MESURE	408.89	28:45:04
BN349	32.92	PT_MESURE	474.62	12:06:35
BR118	22.86	PT_MESURE	589.48	13:21:16
BT372	27.43	PT_MESURE	526.41	9:19:34
CJ368	25.60	PT_MESURE	538.23	14:35:32
HB332	41.15	PT_MESURE	405.93	12:44:18
LC309	52.58	PT_MESURE	304.13	4:58:34
LC310	49.68	PT_MESURE	331.99	5:05:07
YA305	17.98	PT_MESURE	580.78	25:20:58
YA306	18.29	PT_MESURE	578.42	25:04:39

Tableau 6.8 : Résultats sur PICCOLO

Afin de mieux représenter les conditions qui ont prévalu aux différentes usines pendant chacune des journées d'échantillonnage, on a calculé les valeurs minimale, moyenne et maximale de pression et de débit observés pendant les périodes de prélèvement des échantillons. Ces dernières se situaient entre 06h00 am et 23h00 pm respectivement à chacune des journées de traçage et à chacune des usines. Les résultats de ce calcul sont présentés au tableau 6.9.

Date & Référence	Débit mesuré de l'eau finie (1000 m ³ /d)			Pression mesurée de l'eau pompée (en Kpa)		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
Pont-Viau						
9/11/94	19,4	53,8	65,5	603,0	609,0	625,0
16/11/94	23,2	57,6	71,0	603,0	608,5	622,0
23/11/94	17,9	47,9	58,5	598,0	606,8	622,0
Chomedey						
9/11/94	52,3	91,1	106,8	597,0	600,4	605,0
16/11/94	48,2	95,0	109,2	593,0	596,3	602,0
23/11/94	57,1	99,0	114,4	585,0	601,1	607,0
Ste-Rose						
9/11/94	19,0	42,1	49,0	575,0	597,1	605,0
16/11/94	22,0	41,0	50,0	560,0	586,6	603,0
23/11/94	16,1	42,1	51,0	584,0	595,5	603,0

Tableau 6.9 : Conditions aux usines pendant la période de traçage (6h00-23h00)

Les débits et les vitesses obtenus lors de la simulation (débit de 170 000 m³/d) ont été multipliés par un facteur de pondération qui correspond au rapport entre le débit réel observé et le débit utilisé pour la simulation (débit : 170 000 m³/d). Ce facteur a été calculé pour chacune des journées d'échantillonnage. Les résultats de ces calculs, pour chacun des réseaux de distribution sont présentés ci-après.

Date	débit total moyen pompe (1000 m ³ /d)	Facteur de pondération F_p	débit total minimal pompe (1000 m ³ /d)	débit total maximal pompe (1000 m ³ /d)
9/11/94	187,8	1,1047	90,7	221,3
16/11/94	193,6	1,1388	93,4	230,2
23/11/94	189,0	1,1117	91,1	223,9

Tableau 6.10 : Débit total aux usines et facteurs de pondération

6.2.2 RÉSULTATS DE SIMULATION

Une révision des trajets de l'eau a été effectuée à partir des résultats de simulation sur PICCOLO. Elle consistait à relever le trajet de l'eau depuis l'usine jusqu'à un point d'échantillonnage. Cela a été fait pour chacun des points retenus pour l'étude de traçage des réseaux de ville de Laval.

6.3 RÉSULTATS DE LA SIMULATION AVEC PADRE

6.3.1 MISE EN SITUATION

Les tableaux 6.4, 6.5 et 6.6 relatent le nombre de conduites mises en jeu ainsi que le nombre de chemins pour chacun des points de prélèvement .

L'identification des différents chemins de l'eau a été plus laborieuse que prévu. Certains points sont alimentés par plus de mille chemins. Etant donné le grand nombre de chemins possibles, il a été nécessaire d'utiliser le programme PADRE selon plusieurs approches. La première approche consiste à traiter les points alimentés par moins de dix chemins par simulation directe avec PADRE. Une seconde approche (qui concerne les points de prélèvement désignés par particuliers) est utilisée lorsque le nombre de chemins se situe entre 10 et 1 000, alors que le traitement par PADRE a été impossible pour les points alimentés par plus de 1 000 chemins.

6.3.2 POINTS DE PRÉLÈVEMENT PARTICULIERS

Les résultats d'identification des chemins de l'eau montrent que l'ensemble des chemins menant à quelques uns des points d'échantillonnage constituent des sections de réseaux de distribution qui consistent en quelques centaines de tronçons dont le diamètre varie de moins de 150 mm à plus de 1 000 mm.

La réduction du nombre de chemins par simplification du réseau a été rejetée. En effet, cela consiste à éliminer les conduites de faible diamètre qui contribuent peu à l'écoulement (Fair *et al.*, 1971, Jeppson, 1982, Walski, 1983a). Cela est incompatible avec l'idée de base de notre étude. En effet, on tient compte à la fois des débits et de la qualité de l'eau. Il est donc possible qu'un débit d'eau de mauvaise qualité puisse influencer la qualité de l'eau à un point d'échantillonnage. Pour quelques uns de ces points, nous avons décidé de bien les documenter. Cela consiste à calculer pour chacun des chemins le pourcentage de débit qui contribue à l'écoulement jusqu'au point d'échantillonnage. L'étape suivante consiste à déterminer le ou les chemins les plus contributeurs au débit total. Nous considérons alors que ce sont ces derniers qui influencent le plus la valeur du temps de séjour global calculée par PADRE. Notons que cela suppose que nous calculons le temps de séjour par rapport au débit véhiculé par ces chemins, ce débit n'étant qu'une partie du débit total parvenant au point de prélèvement. Cette partie du débit est représentée par son pourcentage par rapport au débit total. Cette identification a été possible pour les points de prélèvement portant les numéros suivants: B479 (Pont-Viau), AP345, BI520 et BJ375 (Chomedey) et les noeuds LD322, LD325, YA307 et YB379 (Ste-Rose). Lorsque cela est possible, le traitement par PADRE est effectué pour deux pourcentages croissants par rapport au débit total qui parvient au point d'échantillonnage ; cela génère une courbe de concentration pour chacun de ces pourcentage. Par exemple, si on considère les quatre chemins les plus contributeurs au débit total parvenant à un point de prélèvement donné et qu'on se rend compte qu'ils

véhiculent 20 % du débit, la courbe de concentration simulée par PADRE correspondrait à ce pourcentage. Si on considère ensuite les huit chemins les plus contributeurs, ils véhiculeront un pourcentage plus grand du débit total (soit par exemple 60 %). La courbe simulée par PADRE, en considérant ces huit chemins, correspond à 60 % du débit total qui arrive au point d'échantillonnage considéré. Une telle idée a pour but essentiel de voir le déplacement de la courbe de concentration au fur et à mesure qu'on ramène la proportion de débit à 100 %. Un tel calcul a été fait pour le nœud AP345. Les résultats sont tabulés (tableau 6.11) et les variations des longueurs, des proportions des débits et des temps de séjour, relativement à chaque chemin, sont présentées à la figure 6.7.

Une fois les chemins les plus contributeurs identifiés, on constate que la loi de continuité n'est pas respectée. Il faut alors ajouter une conduite fictive dans laquelle circule le débit complémentaire permettant d'assurer la continuité pour permettre le traitement par le programme PADRE. Cette conduite a un diamètre et une longueur qui donnent un temps de séjour égal au temps de séjour pondéré des chemins les plus contributeurs. Le temps de séjour assigné au chemin fictif a pour but d'isoler l'effet des chemins réels les plus contributeurs uniquement.

Les résultats d'un tel traitement, pour le point AP345 du réseau Chomedey, sont présentés ci-après à la figure 6.7. Des courbes de la figure 6.7 présentent les variations de longueur, de débits et de temps de séjour en fonction de numéros successifs des chemins identifiés. Pour cet exemple, on constate qu'il n'existe aucun chemin plus important qu'un

autre, tous contribuent par des pourcentages équivalents, ont des longueurs qui varient de 4 000 à 8 000 m et des temps de séjour assez variables.

n chemin	L en m	Qmin en m ³ /s	% C	ts en s
1	4724 36	0 00060	3 26	20782
2	5575 70	0 00040	2 17	53082
3	5472 53	0 00040	2 17	50188
4	5711 66	0 00020	1 09	70680
5	5342 80	0 00070	3 80	38421
6	5239 64	0 00070	3 80	35507
7	5478 77	0 00020	1 09	56018
8	5504 12	0 00003	0 16	106752
9	5400 96	0 00003	0 16	103838
10	5640 09	0 00003	0 16	124250
11	4506 95	0 00070	3 80	19999
12	4403 80	0 00070	3 80	17085
13	4642 92	0 00020	1 09	37596
14	5562 96	0 00040	2 17	54377
15	5459 80	0 00040	2 17	51463
16	5698 93	0 00020	1 09	71975
17	5330 07	0 00070	3 80	39716
18	5226 91	0 00070	3 80	36801
19	5466 04	0 00020	1 09	57313
20	5491 39	0 00003	0 16	108047
21	5388 23	0 00003	0 16	105133
22	5627 36	0 00003	0 16	125645
23	4494 20	0 00070	3 80	21294
24	4391 06	0 00070	3 80	18380
26	4630 19	0 00020	1 09	38892
26	6469 50	0 00040	2 17	64675
27	6366 34	0 00040	2 17	61761
28	6605 47	0 00020	1 09	82273
29	6236 61	0 00070	3 80	50014
30	6133 45	0 00070	3 80	47099
31	6372 60	0 00020	1 09	67611
32	6397 93	0 00003	0 16	116345
33	6294 77	0 00003	0 16	115431
34	6533 90	0 00003	0 16	135943
35	6848 24	0 00040	2 17	69744
36	6745 10	0 00040	2 17	66829
37	6984 20	0 00020	1 09	87341
38	6615 35	0 00070	3 80	55082
39	6512 20	0 00070	3 80	52168
40	6751 30	0 00020	1 09	72679
41	6776 70	0 00003	0 16	123413
42	6673 50	0 00003	0 16	120499
43	6912 64	0 00003	0 16	141011
44	6861 90	0 00020	1 09	91889
45	6758 70	0 00020	1 09	88975
46	6997 80	0 00020	1 09	109487
47	6628 98	0 00020	1 09	77229
48	6525 80	0 00020	1 09	74314
49	6764 95	0 00020	1 09	94825
50	6790 30	0 00003	0 16	145559
51	6687 14	0 00003	0 16	142645
52	6926 27	0 00003	0 16	163157
53	6858 90	0 00020	1 09	77856
54	6755 70	0 00020	1 09	74942
56	6994 90	0 00020	1 09	95454
56	6626 00	0 00020	1 09	63194
57	6522 86	0 00020	1 09	60280
58	6762 00	0 00020	1 09	80792
59	6787 30	0 00003	0 16	131526
60	6684 20	0 00003	0 16	128612
61	6923 30	0 00003	0 16	149123
62	6854 10	0 00020	1 09	75309
63	6751 00	0 00020	1 09	72395
64	6990 10	0 00020	1 09	92906
65	6621 30	0 00020	1 09	60647
66	6518 10	0 00020	1 09	57733

Tableau 6.11 : Documentation du point d'échantillonnage AP345 (Chomedey)

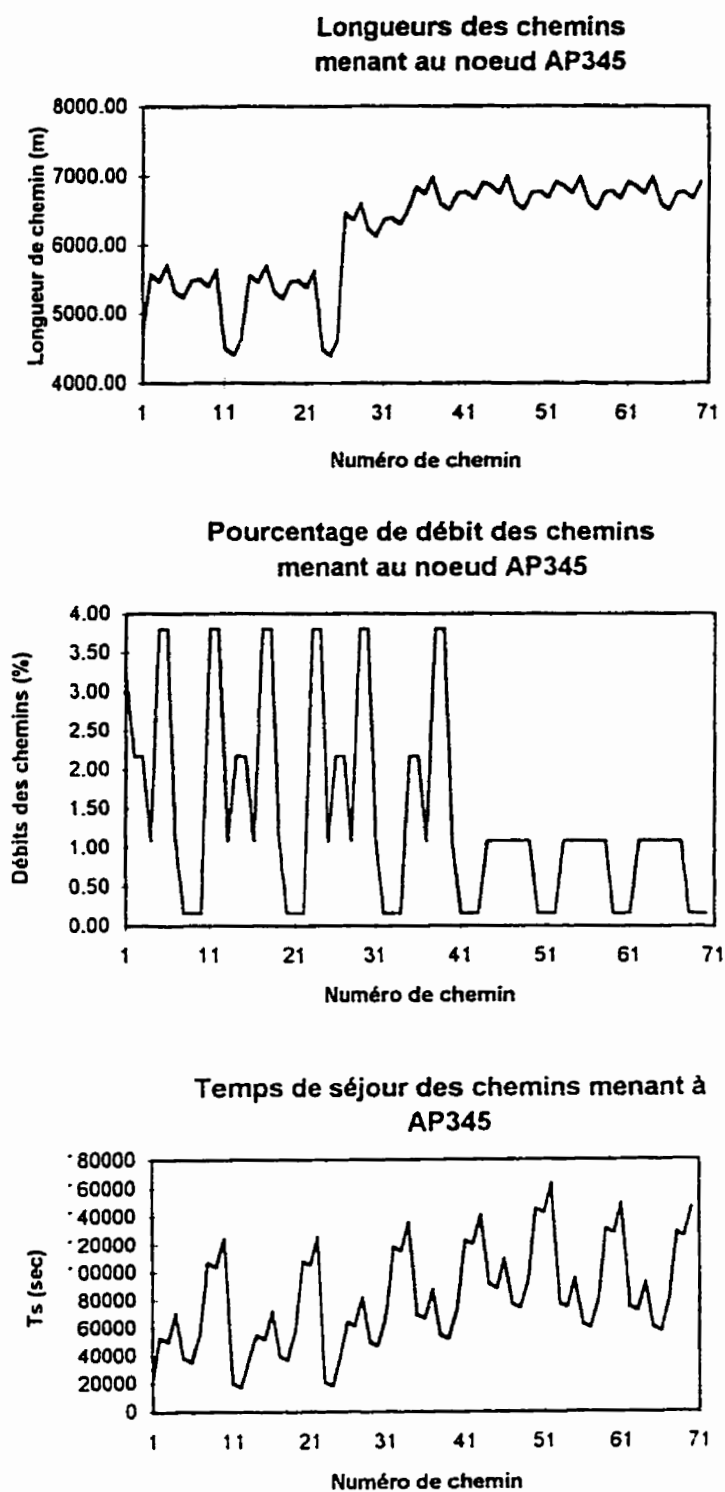


Figure 6.7 : Caractérisation du noeud AP345 (Chomedey)

6.3.3 SIMULATION DIRECTE AVEC PADRE

La simulation avec le programme PADRE a été effectuée pour certains points d'échantillonnage. Nous citerons ces points pour chacun des réseaux par leurs numéros de noeud dans le modèle PICCOLO. Ainsi, E373, M313, M411 et Q308 ont été retenus

Point d'analyse	chemin	TS pa (s)	proportion du débit	TS pa pondéré (s)	TS pa (h:mn:s)	TS pi (h:mn:s)
E373	1	1740	100%	1740	0:29:00	0:29:55
M313	1	13860	48%	13766.4	3:49:26	4:14:20
	2	13680	52%			
M411	1	38000	22%	29688	8:14:48	9:21:08
	2	21700	22%			
	3	26000	6%			
	4	38600	22%			
	5	22300	22%			
	6	26600	6%			
Q308	1	38110	1%	22151	6:09:11	6:58:09
	2	38040	1%			
	3	26620	1%			
	4	21990	47%			
	5	38280	1%			
	6	38210	1%			
	7	26800	1%			
	8	22170	44%			

Tableau 6.12 : Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Pont-Viau)

pour le réseau Pont-Viau. Les noeuds BQ303, AX503, AV328 ont été analysés pour le réseau Chomedey et les noeuds AL429, HB411, HD40, RE325 et TE310 pour le réseau Ste-Rose. Le résultat de l'analyse avec PADRE est constitué des courbes de traçage simulées qui sont présentées à l'annexe H. PADRE calcule aussi les temps de séjour à partir des vitesses et des débits calculés par PICCOLO dans chacun des tronçons des chemins de l'eau. Il fournit la contribution au débit total ainsi que le temps de séjour relatif à chacun des chemins. La validité du temps de séjour est largement liée à la qualité de l'analyse hydraulique effectuée par PICCOLO. Ces résultats sont donnés aux tableaux 6.12, 6.13 et 6.14, où sont comparés les temps de séjour simulés respectivement par PICCOLO et par PADRE.

Point d'analyse	chemin	TS pa (s)	proportion du débit	TS pa pondéré (s)	TS pa (h:mn:s)	TS pi (h:mn:s)
AX443	1	6690	100%	6690	1:51:30	2:06:50
AX503	1	11970	100%	11970	3:19:30	3:46:43
AV328	1	10430	17%	7185	1:59:45	0:55:39
	2	11530	17%			
	3	5230	66%			
BQ303	1	23650	89%	24638.3	6:50:38	7:37:44
	2	32500	5%			
	3	37130	1%			
	4	31870	5%			

Tableau 6.13 : Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Chomedey)

Point d'analyse	chemin	TS pa (s)	proportion du débit	TS pa pondéré (s)	TS pa (h:mn:s)	TS pi (h:mn:s)
AL429	1	2550	17%	2320.3	0:38:40	0:36:30
	2	2560	17%			
	3	2150	16%			
	4	2340	17%			
	5	2340	17%			
	6	1950	16%			
HD40	1	18470	4%	141267	3:55:27	4:16:35
	2	20230	1%			
	3	20080	1%			
	4	13990	2%			
	5	13810	92%			
HB411	1	33310	50%	34465	9:34:25	10:05:21
	2	35620	50%			
RE325	1	50400	5%	46284	12:51:24	13:53:51
	2	52100	2%			
	3	46000	2%			
	4	52000	2%			
	5	45800	89%			
TE310	1	61600	1%	56625	15:43:45	16:58:33
	2	63300	1%			
	3	57400	1%			
	4	63200	1%			
	5	57200	1%			
	6	60600	5%			
	7	62300	2%			
	8	56100	2%			
	9	62200	2%			
	10	55900	84%			

Tableau 6.14 : Proportions de débit et temps de séjour simulés avec PADRE et PICCOLO (Ste-Rose)

6.3.4 PADRE VS PICCOLO

Les tableaux 6.12, 6.13 et 6.14 relatent les temps de séjour moyens calculés respectivement par PADRE et par PICCOLO.

Le calcul de l'écart entre le temps de séjour calculé par PICCOLO (TSpi) et le temps moyen calculé par PADRE (TSpa) révèle les résultats suivants :

Réseau	Noeud	TSpi-TSpa
Pont Viau	E373	+ 55 s
	M313	+ 24 mn 54 s
	M411	+ 1 h 6 mn 20 s
	Q308	+ 48 mn 58 s
Chomedey	AX443	+ 15 mn 20 s
	AX503	+ 27 mn 13 s
	AV328	- 1 h 4 mn 6 s
	Ba303	+ 47 mn 6 s
Ste-Rose	AL429	- 2 mn 10 s
	HD40	+ 21 mn 8 s
	HYB411	+ 30 mn 56 s
	RF325	+ 1 h 2 mn 27 s
	TE310	+ 1 h 14 mn 48 s

Tableau 6.15 : Écart entre les temps de séjour calculés par PICCOLO et PADRE

On constate que l'écart entre les deux temps de séjour varie d'un écart minimal d'une minute à un maximum de 75 mn.

Cette marge d'erreur entre les deux programmes n'est pas énorme, ce qui est justifiable par le fait que PADRE et PICCOLO fournissent tous deux un temps de séjour moyen basé sur le même ensemble de vitesses calculées par PICCOLO.

On constate en outre que l'écart entre les deux temps moyens calculés se creuse plus on s'éloigne de l'usine de traitement. Ceci est dû au fait qu'en s'éloignant de l'usine de traitement, le nombre de chemins croît et comme PADRE tient compte de tous les chemins, il considèrera même les chemins à faible contribution, donc les chemins ayant un long temps de séjour. C'est pour cette raison que les temps de séjour calculés par PADRE sont plus longs que ceux calculés par PICCOLO pour la quasi-totalité des points d'échantillonnage.

En étudiant la méthode de calcul de chacun des deux logiciels, on note que le temps de séjour est un temps moyen pondéré par le débit de chaque chemin dans PICCOLO alors que PADRE calcule un temps de séjour pour chaque chemin. Comme la moyenne ne reflète pas la grande différence qu'il peut y avoir entre les chemins à forte contribution des chemins stagnants, l'évaluation du temps de séjour par PADRE demeure plus crédible.

CHAPITRE 7

ANALYSE DES RÉSULTATS ET VALIDATION DES TEMPS DE SEJOUR

7.1 ANALYSE DES RÉSULTATS DE VITESSE ET DE PRESSION

L'analyse des résultats de vitesse et de pression est basée sur les écarts calculés entre les mesures et les valeurs simulées pour les points de prélèvement pour chacune des journées d'échantillonnage. Les tableaux 7.1, 7.3 et 7.5 donnent les résultats des vitesses. Les tableaux 7.2, 7.4 et 7.6 donnent les résultats de pression.

Pour ce qui est des vitesses, les résultats sont variables d'un réseau à l'autre, voire à l'intérieur d'un même réseau. La moyenne des écarts de vitesses entre les valeurs mesurées (FLOTOTE) et simulées par PICCOLO, pour les réseaux de ville de Laval est de :

- 70% pour Pont-Viau.
- 95% pour Chomedey.
- 65% pour Ste-Rose.

Pour l'ensemble des trois réseaux, l'écart moyen est évalué à 77 %. On remarque que l'écart est plus important pour les petites conduites par rapport aux conduites maîtresses. Ces écarts sont aussi importants pour les conduites où la vitesse est faible (inférieure à 0,03 m/s). Nous essayerons, dans ce qui suit, d'expliquer les causes

probables de tels écarts. Il faut d'abord noter que les débits simulés aux usines ne correspondent pas aux débits mesurés pour chacune des journées d'échantillonnage. Le tableau 7.7 présente les écarts entre les débits total simulé et moyen journalier mesuré.

En outre, pour des vitesses faibles, les valeurs mesurées sont peu fiables car un écart minime sur la vitesse mesurée implique un pourcentage d'erreur important.

Noeud	Tronçon		Diamètre	Mesures (flototes)			Simulation (m/s)		Erreur (%)
d'échantillonnage			(mm)	Vmin	Vmoy	Vmax	V (170000 m3/d)	V(pondérée)	sur Vmoy
Conduites maitresses									
M313	J566	M413	914.4	0.23	0.35	0.45	0.12	0.13	-63
Q308	Q308	Q58	406.4	-	-	-	0.46	0.51	-
S28	S27	S28	406.4	0.56	0.65	0.78	0.44	0.49	-25
W348	W11	W348	406.4	0.24	0.35	0.52	0.36	0.40	14
Petites conduites									
E373	E509	E373	150.0	0.29	0.38	0.43	0.17	0.19	-50
B479	B804	B479	150.0	0.01	0.04	0.06	0.02	0.02	-50
M411	M433	M411	150.0	0.08	0.16	0.26	0.04	0.04	-75
Q105	Q507	Q105	150.0	0.03	0.05	0.09	0.07	0.08	60
W320	W320	W402	152.4	0.01	0.03	0.06	0.08	0.09	200
N428	N97	N428	152.4	0.10	0.13	0.16	0.01	0.01	-92

Tableau 7.1 : Vitesses simulées et mesurées au réseau Pont-Viau

Noeud	Tronçon		Diamètre	Pressions mesurées par flototes (Psi)			Pressions simulées	Erreur (%)
d'échantillonnage			(mm)	Pmin	Pmoy	Pmax	(Kpa)	sur Pmoy
Conduites maitresses								
M313	J566	M413	914.4	55.70	57.60	60.30	54.22	5.9
Q308	Q308	Q58	406.4	-	-	-	61.28	-
S28	S27	S28	406.4	220.70	227.70	235.40	97.12	erronnée
W348	W11	W348	406.4	87.20	94.20	98.10	92.70	1.6
Petites conduites								
E373	E509	E373	150.0	-	-	-	84.36	-
B479	B804	B479	150.0	65.40	66.60	69.00	65.81	1.2
M411	M433	M411	150.0	51.90	53.60	55.30	52.74	1.6
Q105	Q507	Q105	150.0	-14.40	-14.50	-14.50	59.63	erronnée
W320	W320	W404	152.4	90.00	95.20	97.70	92.56	2.8
N428	N97	N428	152.4	57.00	60.90	65.60	60.91	0

Tableau 7.2 : Pressions simulées et mesurées au réseau Pont-Viau

Noeud	Tronçon		Diamètre	Vitesses (flototes)			Simulation (m/s)		Erreur (%)
d'échantillonnage			(mm)	Vmin	Vmoy	Vmax	V (170000 m3/d)	V(pondérée)	sur Vmoy
Conduites maitresses									
AX443	AX385	AX443	1219.2	-	-	-	0.31	0.35	-
BQ303	BQ302	BQ303	914.2	-	-	-	0.23	0.26	-
CC309	CC308	CC309	406.4	-	-	-	0.40	0.46	-
CF330	CF323	CC309	355.6	0.11	0.24	0.31	0.07	0.08	-67
CF344	CF344	CF346	355.6	0.32	0.42	0.55			
Petites conduites									
AV328	AW569	AV328	152.4	0.11	0.15	0.20	0.20	0.23	53
AX503	AX140	AX503	150.0	-	-	-	0.05	0.06	-
AP345	AP384	AP345	152.4	0.01	0.03	0.05	0.09	0.10	233
BJ375	BJ375	BJ325	150.0	0.20	0.25	0.33	0.02	0.02	-92
CC374	CC374	CC417	150.0	0.01	0.03	0.04	0.02	0.02	-33
BI520	BI520	BI421	152.4	-	-	-	0.03	0.03	-

Tableau 7.3 : Vitesses simulées et mesurées au réseau Chomedey

Noeud	Tronçon		Diamètre	Mesures (flototes) (Psi)			Simulation	Erreur (%)
d'échantillonnage			(mm)	Pmin	Pmoy	Pmax	(Psi)	sur Pmoy
Conduites maitresses								
AX443	AX385	AX443	1219.2	-	-	-	65.88	-
BQ303	BQ302	BQ303	914.2	-	-	-	73.71	-
CC309	CC308	CC309	406.4	-	-	-	80.31	-
CF330	CF323	CC309	355.6	68.30	76.60	80.80	74.52	2.7
CF344	CF344	CF346	355.6	74.60	80.20	83.30	81.73	1.9
Petites conduites								
AV328	AW569	AV328	152.4	86.50	88.50	89.40	87.00	1.7
AX503	AX140	AX503	150.0	71.60	73.60	75.00	67.83	7.8
AP345	AP384	AP345	152.4	65.70	67.00	68.50	64.58	3.6
BJ375	BJ375	BJ325	150.0	82.70	85.10	86.60	82.20	3.4
CC374	CC374	CC417	150.0	75.70	84.90	87.60	79.25	6.6
BI520	BI520	BI421	152.4	-	-	-	78.33	-

Tableau 7.4 : Pressions simulées et mesurées au réseau Chomedey

Noeud	Tronçon		Diamètre	Mesures (flototes)			Simulation (m/s)		Erreur (%)
d'échantillonnage			(mm)	Vmin	Vmoy	Vmax	/ (170000 m3/d	V(pondérée)	sur Vmoy
Conduites maitresses									
HD40	HD465	HD40	609.6	0.03	0.15	0.26	0.17	0.19	26
RE325	RE2	RE325	609.6	-	-	-	0.14	0.16	-
TE310	TE309	TE310	609.6	0.17	0.20	0.25	0.13	0.14	-30
YA307	YA308	YA307	355.6	0.19	0.27	0.34	0.19	0.21	-22
Petites conduites									
AL429	AL429	AL427	152.4	0.00	1.46	4.50	0.11	0.12	-92
HC331	HC331	HC577	150.0	0.00	0.03	0.09	0.06	0.07	133
HB411	HB618	HB411	150.0	0.23	0.27	0.33	0.06	0.07	-74
LD322	LD322	LD5	152.4	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	100
LD325	LD325	LD439	152.4	0.09	0.11	0.15	0.03	0.03	-73
YB379	YB308	YB379	150.0	0.05	0.08	0.14	0.10	0.11	38

Tableau 7.5 : Vitesses simulées et mesurées au réseau Ste-Rose

Noeud d'échantillonnage	Tronçon		Diamètre (mm)	Mesures (flototes) (Psi)			Simulation (Psi)	Erreur (%) sur Pmoy
				Pmin	Pmoy	Pmax		
Conduites maitresses								
HD40	HD465	HD40	609.6	66.90	69.10	71.40	63.74	7.7
RE325	RE2	RE325	609.6	-	-	-	86.74	-
TE310	TE309	TE310	609.6	86.60	93.50	95.10	92.29	1.3
YA307	YA308	YA307	355.6	82.20	88.60	93.10	83.95	5.2
Petites conduites								
AL429	AL429	AL427	152.4	-	-	-	71.49	-
HC331	HC331	HC577	150.0	40.90	49.90	53.30	51.10	2.4
HB411	HB618	HB411	150.0	56.20	57.90	59.50	54.64	5.6
LD322	LD322	LD5	152.4	-	-	-	56.28	-
LD325	LD325	LD439	152.4	57.40	61.10	62.20	58.01	5
YB379	YB308	YB379	150.0	80.20	91.10	94.20	88.69	2.6

Tableau 7.6 : Pressions simulées et mesurées au réseau Ste-Rose

Date	Débit moyen simulé (m3/d)				Débit moyen journalier mesuré (m3/d)			Ecart (m3/d)
	PV	CH	Dte R	T	PV	CH	Ste R	
11-09-94	46985.6	100177.6	40689.6	187852.8	46300	85200	36100	-20252.8
16/11/94	48436	103269.9	41945.6	19193652	48500	85500	37900	-21751.5
23/11/94	47283.38	100812.4	40947.4	189043.1	40900	90300	36600	-21243.13

Tableau 7.7 : Ecart entre les débits simulés et les débits mesurés aux usines.

L'écart est significatif, du même ordre de grandeur pour les trois réseaux. Cet écart non négligeable va influencer grandement sur les résultats, en terme d'écart entre les valeurs simulées et mesurées.

Afin de mieux visualiser les variations de vitesses et de pressions dans le réseau, nous présentons les résultats des mesures par Flotote aux annexes F.1 (Pont Viau), F.2 (Chomedey) et F.3 (Ste-Rose). On relève des variations importantes des vitesses, aussi bien pour les conduites maîtresses que pour les petites conduites. Notons cependant que cette variation est de loin moins importante pour le réseau Ste-Rose et que, pour les conduites maîtresses, les variations sont moins brusques. A partir des valeurs extrêmes des vitesses relevées pendant la période des prélèvements, on peut facilement imaginer des scénarios où l'écart entre les valeurs de vitesses simulées et mesurées passeront du simple au double pour une petite variation de la valeur de vitesse considérée dans ce calcul.

Pour ce qui est des pressions, la moyenne des écarts est évaluée à 2 % pour Pont Viau, à 4 % pour Chomedey et à 4 % pour Ste Rose. Les variations des pressions dans le réseau sont moins importantes que celles des vitesses ; c'est pour cela que les écarts calculés sont plus faibles.

7.2 ANALYSE DES TEMPS DE SÉJOUR

La valeur des temps de séjour calculés par PICCOLO ou par PADRE est directement liée à la valeur de vitesse. En effet, si PICCOLO sous-estime la vitesse, il surestime les temps de séjour et vice-versa. D'autre part, les débits cumulés à la sortie des usines ont leur importance dans l'estimation du temps de séjour. Selon l'étude menée par Poulin, on remarque des différences des temps de séjour qui peuvent atteindre quelques heures pour une petite variation du débit total de simulation.

En outre, l'étude menée par Boudreau (1994), montre qu'en régime permanent, on observe une translation de la courbe de concentration simulée par PADRE, lorsque le débit à la sortie de l'usine change. Plus précisément, une augmentation du débit de sortie déplace la courbe de concentration vers la courbe à la sortie de l'usine, ce qui réduit le temps de séjour. Il est donc très important de connaître les débits de sortie réels pendant la période d'échantillonnage.

De plus, les temps de séjour sont influencés par l'évolution de la consommation pendant la journée d'échantillonnage. Cette consommation varie en fonction de l'heure. Il est donc important de faire des simulations dynamiques qui tiennent compte à chaque instant de la consommation réelle. Les cycles de puisage représentés dans le chapitre précédent illustrent une variation de la consommation. Selon les heures de la journée, le débit moyen considéré pour la simulation s'éloigne du débit observé. Un traçage demeure

un moyen sûr pour valider les temps de séjour car il tient compte en tout temps de toutes ces variables.

7.3 VALIDATION DES TEMPS DE SÉJOUR

7.3.1 CALCUL DIRECT AVEC PADRE

Pour la plupart des noeuds, les courbes de concentration simulées par PADRE sont une translation de la courbe émise à l'usine. Cependant, les courbes de concentration mesurées lors du traçage et celles simulées par PADRE ne coïncident pas toujours, et ce en raison de plusieurs facteurs :

- PADRE ne tient pas compte des variations de consommation aux différentes heures de la journée.
- Les saignées aux noeuds utilisées par PICCOLO sont des valeurs moyennes, alors que les échantillonnages ont été effectués pendant une période précise de la journée.
- D'autres facteurs peuvent influencer la valeur du temps de séjour. On observe parfois un phénomène de dispersion du traceur dans les réseaux de distributions. C'est le résultat de mélanges longitudinaux dans les conduites ou aux noeuds. En négligeant cette dispersion, on surestime le temps de séjour.

7.3.2 CORRECTION DES DÉBITS ET CALAGE DES TEMPS DE SÉJOUR.

Si la courbe de concentration simulée ne coïncide pas avec la courbe de concentration mesurée, il faut procéder à son ajustement. On distingue trois situations possibles, selon la position de la courbe de concentration mesurée, par rapport à la position de la courbe de concentration simulée avec PADRE.

1. les courbes mesurées et simulées coïncident.
2. la courbe mesurée est décalée à gauche de la courbe simulée.
3. la courbe mesurée est décalée à droite de la courbe simulée.

La première situation a lieu lorsque les débits utilisés par PICCOLO coïncident avec les débits mesurés. Dans la deuxième situation, le décalage suggère que les débits dans les conduites arrivant aux points d'analyse sont supérieurs aux débits utilisés pour les simulations avec PADRE. Cela revient à dire que le programme PADRE surestime le temps de séjour.

Afin de procéder à un ajustement, on calcule un facteur de correction, obtenu comme le rapport des temps de séjour mesurés et simulés dans les conditions hydrauliques initiales. Ce facteur est toujours pris supérieur à 1.

Le calage est alors effectué en multipliant les débits par ce facteur de correction. Le programme PADRE définit alors les profils de courbes de concentration ajustées du traceur.

La troisième situation est opposée à la deuxième. Elle dicte le calcul d'un facteur de correction de façon similaire, et par lequel les débits sont divisés. Le calage est ainsi achevé avec une nouvelle simulation par PADRE.

Une telle démarche a été adoptée pour les points analysés par traitement direct avec PADRE. Soient, AP345, BI520, BJ375 à Chomedey, B479 à Pont Viau et LD322, LD325, YA307 et YB379 à Ste Rose. Les facteurs de correction ont été calculés de manière similaire pour les trois réseaux.

Points d'analyse	FC
E373	1,26
M313	1,79
M411	1,47
Q308	1,44

Tableau 7.8 : Facteurs de correction du débit (réseau Pont Viau)

Points d'analyse	FC
AX443	1,06
AX503	2,04
AV328	1,08
BQ303	1,07

Tableau 7.9 : Facteurs de correction de débit (réseau Chomedey)

Points d'analyse	FC
AL429	1,06
HD40	2,04
HB411	1,08
RE325	1,07
TE310	-

Tableau 7.10 : Facteurs de correction de débit réseau Ste Rose.

Pour les points qui font intervenir plus de dix chemins l'ajustement a aussi été effectué sur le temps de séjour dans la conduite fictive.

Pour l'ensemble des points d'échantillonnage, l'ajustement a été fait et validé par l'ajustement des courbes de traçage.

7.3.3 PRÉSENTATION DES TEMPS DE SÉJOUR CALIBRÉS

La méthode d'ajustement proposée a été utilisée pour vérifier la précision des résultats des simulations hydrauliques. Cependant, on ne peut prétendre que l'ajustement effectué élimine toutes les erreurs associées à la simulation sur PICCOLO, d'autant plus que tant qu'on utilisera des données moyennes de débit pour la simulation avec PICCOLO, il y aura toujours une disparité entre les prédictions du modèle et les observations in situ.

Il est à noter que les facteurs de correction calculés sont des constantes d'ajustement propres à chaque conduite. La variation de ce facteur de correction dans un même réseau nous empêche de calculer un facteur de correction global, relativement à chaque réseau, et qui donnerait des résultats plus réalistes (Ormsbee et wood, 1986).

Malgré la disparité des facteurs de correction entre les trois réseaux de distribution, ils ont permis de caler les courbes simulées avec PADRE aux résultats expérimentaux et génèrent désormais des résultats conformes aux mesures. Ces facteurs de correction seront donc adoptés pour calculer les temps de séjour des différents chemins menant au point d'échantillonnage. Les deux valeurs clefs en un point d'échantillonnage sont le temps minimal et le temps maximal pendant lequel une goutte d'eau séjourne dans le réseau avant d'atteindre ce point de prélèvement, car contrairement au temps de séjour moyen calculé par PICCOLO, ces deux valeurs reflètent parfaitement la différence qui peut exister entre les chemins à forte contribution et les chemins où l'eau stagne.

On présente ci-après, pour l'ensemble des points d'échantillonnage où les temps de séjour par chemin ont été calculés directement, l'intervalle de variation du temps de séjour pour valider un traçage en réseau.

Réseau	Noeud	TSpa minimal (s)	TSpa maximal (s)
Pont Viau	E373	2 192	2 192
	M313	7 642	7 743
	M411	14 762	26 258
	Q308	15 271	26 583
Chomedey	AX443	6 690	6 690
	AX503	24 419	24 419
	AV328	5 648	12 452
	BQ303	23 650	37 130
Ste-Rose	AL429	2 067	2 713
	HD40	28 172	41 269
	HB411	30 843	32 981
	RE325	46 000	52 100
	TE310	55 900	63 300

Tableau 7.11 : Temps de séjour minimal et maximal pour les points d'échantillonnage

Les intervalles ainsi définis constituent un moyen de validation des temps de séjour mesurés par traçage pour des conditions en usine similaires à celles qui ont prévalu pendant notre traçage à ville de Laval.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

La simulation hydraulique avec PICCOLO nous a permis d'évaluer les débits, les vitesses, les pressions et les temps de séjour, pour tous les tronçons menant aux différents noeuds qui ont fait l'objet de mesure, lors des journées d'échantillonnage pour cette étude de tracage. Les calculs ont été réalisés en régime permanent, soit sous des conditions hydrauliques constantes.

Le programme PADRE avait pour but d'améliorer l'information disponible sur le temps de séjour de toutes les particules d'eau passant en un point donné du réseau depuis sa sortie de l'usine et de rendre possible la transposition et la superposition en ce point des courbes de concentration en traceur transmises par les divers chemins.

La comparaison des temps de séjour calculés par PICCOLO et par PADRE montre que PICCOLO fournit une estimation acceptable des temps moyens de séjour. Il faut cependant calibrer le réseau à l'aide d'un traceur afin d'assurer la représentativité des résultats par rapport à la réalité.

Les essais d'échantillonnage et leurs simulations ont donc fourni pour chaque point trois valeurs du temps de séjour. La première est celle évaluée à partir des relevés effectués. Les deux autres sont produites par les simulations PADRE et PICCOLO.

Les deux dernières sont naturellement assez proches l'une de l'autre ; elles sont basées sur les mêmes valeurs calculées des vitesses et leurs différences ne sont liées qu'à

la discrétisation du réseau et aux modes de calcul de pondération employés. La différence entre ces deux valeurs et la première est plus fondamentale et implique la validité des mesures et des hypothèses de simulation.

- D'abord, les temps de séjour de l'eau ont été calculés en régime permanent, ce qui ne relate pas la réalité. En outre, cela ne permet de calibrer le logiciel PICCOLO qu'en régime permanent. Or, les consommations fluctuent énormément durant la période d'échantillonnage ; il est donc plus réaliste de considérer des simulations en régime dynamique, c'est-à-dire en tenant compte des fluctuations journalières des variables de consommation.

- Les valeurs de débits simulés par PICCOLO aux usines ne sont pas conformes aux débits mesurés en usine, ce qui entachera d'erreurs toute valeur de vitesse calculée par PICCOLO.

- De plus, les valeurs de vitesse mesurées sont erronées à 20 % pour les conduites maitresses là où la vitesses est prise au centre de la conduite, et à 80% pour les petites conduites là où la vitesse est relevée très près de la paroi des conduites.

- Une erreur supplémentaire émane du coefficient de Hazen Williams. En effet, la simulation sur PICCOLO considère des valeurs constantes de ce coefficient qui fluctue avec les variations de vitesse et de pression.

Enfin, les calculs ignorent le phénomène de la dispersion induite par la distribution de vitesse en conduite et les résultats sont de ce fait entachés d'une forte erreur possible dans les conduites à fort temps de séjour.

L'ensemble des erreurs hiérarchisées ci dessus justifient les écarts souvent relevés entre les valeurs des temps de séjour mesurés et simulés. D'autre part, ce travail a permis de dégager des recommandations de base pour améliorer le traçage des réseaux de distribution ; il a aussi validé l'approche à suivre pour le suivi de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution.

En effet, l'approche qui consiste à suivre l'évolution de l'eau dans les conduites s'est révélée sans succès dans le suivi de la qualité de l'eau potable par chemins. Si le nombre de chemins identifiés pour des points de prélèvement situés sur des conduites maîtresses a atteint 1 000, on ne saurait prétendre pouvoir maîtriser la qualité de l'eau par cette approche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DES TECHNIQUES DE L'EAU., 1974., « Balancement hydraulique des réseaux d'aqueduc ». Colloque tenu le 18 Octobre, École Polytechnique de Montréal, 162p

BRAZOS, B. et O'CONNOR, J.T., 1989 « Origin and Control of Bacteria in Drinking Water Distribution System ». Compte rendu du 12^e Symposium International sur les eaux usées, 4^e Atelier sur l'eau potable, Montréal, Novembre 1989.

BARIBEAU, H., PRÉVOST, M., ROMPRÉ, A. et LAFRANCE, P., 1994 « Modelling Oxidants and Disinfection By-Products in Distribution systems ». AWWA-WQTC Annual Conference, San Francisco, USA., November 6-10.

BHAVE, P.R., 1988 « Calibrating Water Distribution Network Models ». Journal of Environmental Engineering, vol.114, No 1, February 1988, pp. 120-136.

CESARIO, A.L. et DAVIS, J.O., 1984 « Calibrating Water System Models ». Journal of AWWA, vol.76, No 7, p.66.

CHANTEREAU, J, 1980 « Corrosion bactérienne bactéries de la corrosion » 2^e édition, Technique et documentation Lavoisier, Paris, France, 262 pages.

CHARACKLIS, W.G., et MARSHALL, K.C. (eds), 1990 « Biofilm », J.Wiley and Sons. Inc., New York, NY.

COALLIER, J., DUCHESNE, D., ROMPRÉ, A., PRÉVOST, M. et LAFRANCE, P., 1992 « Les dénombrements directs viables: une technique d'évaluation de la qualité microbiologique de l'eau potable dans les réseaux de distribution ? ». Compte rendu du

15^e Symposium International sur les eaux usées, 4^e Atelier sur l'eau potable, Montréal, Novembre 1992.

COALLIER, J., DUCHESNE, D. et LAFRANCE, P., 1993 « Les dénombrements bactériens dans trois réseaux de distribution d'eau potable et leur impact face à la réglementation ». *Sciences et Techniques de l'eau*. 26(3):195-201.

DAMEZ, F., 1982 « Evolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution ». *TRSM-l'eau* 77 (1) : 11-23.

DESJARDINS, R. et Ville de Laval., 1991 « Recroissance Microbienne dans les réseaux d'eau potable ». Projet CDT P1563, École Polytechnique de Montréal, Août 1991.

DESJARDINS, R., LAVOIE, J., LAFRANCE, P. et PRÉVOST, M., 1991 « Comparaison de l'évolution de la qualité de l'eau dans deux réseaux de distribution ». *Sciences et Techniques de l'eau*, vol 24, No 4, Novembre 1991, pp. 321-331.

EGGENER, C.L. and POLKOWSKI, L., 1976 « Network Models and the Impact of Modeling Assumptions ». *Journal of AWWA*, vol.68, No.4, p.189.

FAIR, G.M., GEYER, J.C. and ODUN, D.A., (1971) « Elements of Water Supply and Wate Water Disposal 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.

HASS, C.N., MEYER, M.A. et PALLER, M.S., 1983 « Microbial Altérations in Water Distribution Systems and their Relationship to Physical-Chemical Characteristics ». *J. AWWA*. 75: 475-481.

JEPPSON, R.W. (1982) « Equivalent Hydraulic Pipes for Parallel Pipes » *J. Hydraul. Div., ASCE*, 108(1), 35-45.

KENNEDY, M.S, SARIKELLE, S. and SURAVALLOP, K., 1991 « Calibrating Hydraulic Analyses of Distribution Systems Using Fluoride Tracer Studies ». *Journal of AWWA*, July 1991, pp. 54-59.

LAFRANCE, P., LAVOIE, J. et TOUTANT, S., 1991 « Les contrôles qualitatifs et les programmes de gestion des réseaux de distribution d'eau potable à ville de Laval ». *Sciences et techniques de l'eau*. 24 (4): 333-337.

LAU, TY.L. et LIU, D., 1993 « Effects of Flow Rate on Biofilm Accumulation in Open Channels ». *Wat.Research*. 27 (3) :355-360.

LAVOIE, J., 1991 « Etude des paramètres influençant la qualité de l'eau dans un réseau de distribution d'eau potable » Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Génie Civil. 89 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.

LECHEVALLIER, M.W., 1990 « Coliform Regrowth in Drinking Water: a Review ». *J. AWWA*. Vol.82, No.11, 74-86.

MARCHE, C., 1994 « PADRE Programme d'Aide à la Datation en Réseau d'eau ». Décembre 1994, p.26.

MATHIEU, L., 1992 « Matière organique biodégradable et stabilité biologique des eaux au cours de leur distribution ». Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, Nancy, France, 219 p.

MATHIEU, L., PAQUIN, J.L., BLOCK, J.C., RANDON, G., MAILLARD, J. et REASONER, D., 1992 « Paramètres gouvernant la prolifération bactérienne dans les réseaux de distribution ». *Revue des Sciences de l'Eau*. 5 (No spécial) : 91-112.

MAUL, A., VAGOST, D. et BLOCK, J.C., 1991 « Stratégies d'échantillonnage pour analyse microbiologique sur réseaux de distribution d'eau ». Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, France, 115 p.

POULIN, M.J., 1993 « Modélisation hydraulique des temps de séjour des réseaux de distribution d'eau de ville de Laval » Rapport de projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal, 74 pages, 1993.

PRÉVOST, M., DESJARDINS, R., DUCHESNE, D. et POIRIER, C. 1990a « Chlorine Demand Removal by Biological Activated Carbon Filtration in Cold Water » présenté à la conférence annuelle de la WQTC-AWWA à San Diego, 22 p.

PRÉVOST, M., DESJARDINS, R., ARCOUETE, N., DUCHESNE, D. et COALLIER, J., 1990c « Étude de la performance de filtres à charbon actif biologique (CAB) en eaux froides », Sci. Techn. Eau. Vol. 23, 25-30.

PRÉVOST, M., DESJARDINS, R., LAFRANCE, P., DUCHESNE, D. et COALLIER, J., 1992 « Microbial Regrowth in Distribution Systems: Development of Analytical Methods to Monitor Microbiological Quality ». Presented at the Annual AWWA-WQTC Conference in Toronto, Canada, Nov. 15-19.

PRÉVOST, M., BARIBEAU, H., et ALLARD, D., 1993 « Étude de l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable : Rapport d'avancement, étapes 2 et 3 ; 33 pages.

PRÉVOST, M., LAURENT, P., COALLIER, J., GAUTHIER, C., DAVIES, C. et MARCHE, C., 1994 « Etude des paramètres hydrauliques, chimiques et microbiologiques influençant la croissance de biofilm dans des réacteurs annulaires » Soumis à sciences de l'eau.

SERVAIS, P., LAURENT, P., BILLEN, G. et LEVI, Y., 1992a « Étude de la colonisation bactérienne des réseaux de distribution ». T.S.M. L'eau. 87 (6) : 321-326.

SERVAIS, P., LAURENT, P. et RANDON, G., 1992b « Mesure de la biomasse et de l'activité bactérienne dans l'eau de distribution ». *Revue des Sciences de l'Eau*. 5: 473-488.

SERVAIS, P., LAURENT, P., GATEL, D. et PRÉVOST, M., 1994 « Modelling Bacterial Dynamics in Distribution Systems » AWWA-WQTC Annual Conference, San Francisco, USA. November 6-10.

SHAMIR, U. et HOWARD, C.D.D., 1977 « Engineering Analysis of Water Distribution System ». *Journal of the American Water Works Association*, Vol.69, No. 9, Sept., pp. 510-514.

TÉKEU, J.C., 1979 « Précipitation contrôlée de CaCO_3 dans un système de distribution d'eau potable ». *Mémoire de maîtrise*, Université de Montréal, 185 p.

VAN DER KOOIJ, D., VISSER, A. et HIJNEN, W.A.M., 1982 « determining the Concentration of Easily Assimilable Organic Carbon in Drinkin Water ». *J. AWWA*. 74:540-545.

VAN DER KOOIJ, D., 1990 « Assimilable Organic Carbon (AOC) in Drinking Water ». Dans *Drinking Water Microbiology*. McFeters G.A. (Ed.), Springer-Verlag, New-York. 57-87.

VAN DER KOOIJ, D., 1992a « Aerosomonas in Drinkwater. Voorkomen, bestrijding, betekenis ». Edition KIWA N.V., 106 pages.

WALSKI, T.M., 1983a « Technique for Calibrating Network Models ». *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol.109, WR4, p. 360.

WALSKI, T.M., 1986 « Case Study : Pipe Network Model Calibration Issues ». *Journal of water resources Planning and Management*, vol 112, No.2, pp. 238-249.

ANNEXE A

A.1 Formule de calcul du temps d'émission d'une particule

$V_{ch,i}$: la vitesse d'écoulement de l'eau dans le tronçon i du chemin ch

$L_{ch,i}$: longueur du tronçon i du chemin ch

T_{an} : temps d'analyse

$T_{ch,i}$: temps de parcours de l'eau dans le tronçon i du chemin ch

$$T_{ch,i} = L_{ch,i} / V_{ch,i}$$

T_{sch} : âge de la particule d'eau dans le chemin ch

$T_{em,ch}$: temps d'émission d'une particule du chemin ch

$$T_{em,ch} = T_{an} - T_{sch}$$

$$T_{em,ch} = \sum_i T_{ch,i}$$

A.2 Formule de la concentration calculée en un point d'analyse

Disposant de la courbe de concentration à la sortie de l'usine on a,

$C_{pt, Tan}$: Concentration au point (pt) au temps d'analyse T_{an}

$$C_{pt, Tan} = \sum_i C (\text{à l'usine}, T_{em,ch})$$

$$C_{pt, Tan} = \sum_i C (\text{à l'usine}, \sum_i T_{ch,i})$$

$$C_{pt, Tan} = \sum_i C (\text{à l'usine}, \sum_i (L_{ch,i} / V_{ch,i}))$$

ANNEXE B.1

Programme PADRE Calcul des temps de séjour en réseau Débit constant dans le réseau Résultats

POINT	CHEMIN	PREMIERS ELEMENTS
1	1	7 3 2 1 0
1	2	7 6 5 4 1

TEMPS:	1600.0	CONCENTRATION OBSERVEE:	.947
--------	--------	-------------------------	------

POINT	CHEMIN	CONC. ORIGINE	TS	PROP.
1	1	.93	460.00	.75
1	2	1.00	1230.00	.25

TEMPS:	1700.0	CONCENTRATION OBSERVEE:	.910
--------	--------	-------------------------	------

POINT	CHEMIN	CONC. ORIGINE	TS	PROP.
1	1	.88	460.00	.75
1	2	1.00	1230.00	.25

TEMPS:	1800.0	CONCENTRATION OBSERVEE:	.873
--------	--------	-------------------------	------

POINT	CHEMIN	CONC. ORIGINE	TS	PROP.
1	1	.83	460.00	.75
1	2	1.00	1230.00	.25

TEMPS:	1900.0	CONCENTRATION OBSERVEE:	.835
--------	--------	-------------------------	------

POINT	CHEMIN	CONC. ORIGINE	TS	PROP.
1	1	.78	460.00	.75
1	2	1.00	1230.00	.25

ANNEXE B.2

Programme PADRE Calcul des temps de séjour en réseau Débit constant dans le réseau Résultats

POINT	CHEMIN	PREMIERS ELEMENTS				
1	1	7	3	2	1	0
1	2	7	6	5	4	1
TEMPS D'ANALYSE		CONCENTRATION OBSERVÉE				
1600.0		.947				
1700.0		.910				
1800.0		.873				
1900.0		.835				
2000.0		.798				
2100.0		.760				
2200.0		.722				
2300.0		.676				
2400.0		.626				
2500.0		.585				
2600.0		.558				
2700.0		.530				
2800.0		.503				
2900.0		.475				
3000.0		.448				
3100.0		.420				
3200.0		.393				
3300.0		.371				
3400.0		.350				
3500.0		.331				
3600.0		.311				
3700.0		.291				
3800.0		.271				
3900.0		.250				
4000.0		.234				
4100.0		.221				
4200.0		.208				
4300.0		.196				
4400.0		.183				
4500.0		.171				
4600.0		.159				
4700.0		.146				
4800.0		.135				
4900.0		.125				
5000.0		.118				
5100.0		.116				

ANNEXE C.1

Simulation avec CACTUS (Ste-Rose)

Date: 11/21/94 - 09:10					
==> Débit Usine Eau Brute :		38000.0 m3/d			
==> Débit Usine Eau Pompée:		36000.0 m3/d			
==> Niveau réservoir:		87.0 %			
==> Débit d'eau filtrée :		48000.0 m3/d			
				Point d'échantillonnage (***) Temps séjour	
Réserve Principale					
- R15 :		110.5 m3	3.31 min		
- R16 :	(/4)	14.2 m3	0.42 min	***	3.74 min
- R16:		56.1 m3	1.68 min		
- R17 :		167.2 m3	5.02 min		
- R18 :		657.5 m3	19.73 min		
- R19 :		657.5 m3	19.73 min		
- R20 :		657.5 m3	19.73 min		
- R21 :		662.7 m3	19.88 min	***	89.07 min
- R22 :		662.7 m3	19.88 min		
- R23 :		662.7 m3	19.88 min		
- R24 :		344.2 m3	10.33 min		
- R25 :		967.8 m3	29.03 min		
- R26 :		169.8 m3	5.10 min	***	173.29 min
- R27 :		964.1 m3	28.92 min		
- R28 :		937.9 m3	28.14 min		
- R29 :		626.7 m3	18.80 min		
- R30 :		631.8 m3	18.95 min		
- R31 :		712.8 m3	21.38 min		
- R32 :		747.7 m3	22.43 min		
- R33 :		297.0 m3	11.88 min	***	323.80 min
- R34 :		238.9 m3	9.56 min		
- T1 :		16.8 m3	0.67 min		
- R35 :		350.8 m3	14.03 min		
- R36 :		896.5 m3	35.86 min		
- R37 :		896.5 m3	35.86 min		
- R38 :		896.5 m3	35.86 min		
- R39 :		896.5 m3	35.86 min		
- R40 :		896.5 m3	35.86 min	***	527.36 min
- R41 :		896.5 m3	25.86 min		
- R42 :		896.5 m3	35.86 min		
- R43 :		896.5 m3	35.86 min		
- R44 :		977.5 m3	39.10 min		
- R45 :		887.5 m3	35.53 min		
- T2 :		31.5 m3	1.26 min		
- R46 :		88.5 m3	3.54 min		
- R47 :		1063.5 m3	42.54 min		
- R48 :		821.9 m3	32.88 min	***	779.76 min
*** Somme ==>>		22343.3 m3	779.76 min		
* Estimation du traçage ==>		Réserve (min.)	=>	647.95 min	
		Réserve (hrs.)	=>	10.80 h	
		Volume Total (m3)	=>	22343.34	

ANNEXE C.2

Simulation avec CACTUS (Chomedey)

Date: 11/14/94 - 19:28

==> Débit Usine Eau Brute : 90000.0 m3/d
 ==> Débit Usine Eau Pompée: 55000.0 m3/d
 ==> Niveau réservoir: 75.0 %
 ==> Débit d'eau filtrée : 88650.0 m3/d

Point d'échantillonnage
 (***) Temps séjour

Réserve Principale

- R11 :	58.3 m3	0.95 min		
- R12/2:	1485.6 m3	24.13 min	***	25.08 min
- R12 :	2971.3 m3	48.26 min		
- R13 :	1636.7 m3	26.59 min	***	75.80 min
- R14 :	1588.4 m3	25.80 min		
- R15/2:	811.6 m3	13.18 min	***	114.78 min
- R15 :	1623.2 m3	26.37 min		
- R16 :	1633.9 m3	26.54 min		
- R17 :	1610.5 m3	26.16 min		
- R18 :	1881.0 m3	30.55 min	***	211.22 min
- R19 :	34.7 m3	0.56 min		
- R20 :	1304.2 m3	21.18 min		
- R21 :	177.7 m3	2.89 min		
- R22 :	1359.8 m3	22.09 min	***	257.94 min
- R23 :	373.8 m3	6.07 min		
- R24 :	1592.8 m3	41.70 min		
- R25 :	491.9 m3	12.88 min		
- R26 :	169.8 m3	4.44 min		
- R27 :	297.0 m3	7.77 min		
- R28*0.75:	244.3 m3	6.39 min	***	337.21 min
- R28 :	325.7 m3	8.53 min		
- R29 :	555.2 m3	14.54 min		
- R30 :	663.2 m3	17.36 min		
- R31 :	260.0 m3	6.81 min		
- R32 :	326.6 m3	8.55 min		
- R33/4:	484.1 m3	12.67 min	***	399.28 min
- R33 :	1936.4 m3	50.70 min		
- R34/2 :	399.1 m3	10.45 min	***	447.75 min
- R34 :	798.2 m3	20.90 min		
- R35/2 :	532.4 m3	13.94 min	***	472.14 min
- R35 :	1064.8 m3	27.88 min		
	28691.9 m3	566.85 min		

* Estimation du traçage ==>	Réserve (min.) ==>	486.08 min
	Réserve (hrs.) ==>	8.10 h
	Volume Total (m3) ==>	28691.92

ANNEXE C.3

Simulation avec CACTUS (Pont-Viau)

Date: 11/7/94 - 06:51

--> Débit Usine Eau Brute: 63000.0 m3/d
 --> Débit Usine Eau Pompée: 25000.0 m3/d
 --> Niveau réservoir: 90.0 %

Traitement en PRÉ :
 (à partir du point d'injection du fluor)

Point d'échantillonnage
 (***) Temps séjour

- Conduite d'eau brute:	2.2 m3	0.05 min		
- Chambres de pré-ozonation :	331.2 m3	7.57 min	*** 1	7.62 min
- Chambre de dégazage :	215.7 m3	4.93 min		
- Mélangeur rapide :	88.9 m3	2.03 min	*** 2 et 3	14.58 min
		14.58 min		

Traitement Usine no. 1

31500.0 m3/d => Débit usine no. 1

- Goulotte alimentation eau brute :	57.0 m3	2.61 min		
- Décantation (pulsator) :	4359.6 m3	202.33 min	*** 5	219.52 min
- Goulotte eau décantée :	116.0 m3	5.38 min		
- Filtres S.A. :	554.0 m3	25.71 min	*** 6	250.61 min
- Goulotte eau filtrée :	58.0 m3	2.69 min		
- Chambres d'ozonation (A) :	249.8 m3	11.59 min	*** 7	264.90 min
- Chambres d'ozonation (B) :	154.8 m3	7.18 min	*** 9	272.08 min
- Chambre de dégazage :	94.9 m3	4.40 min		
		261.91 min		

Réserve Usine no. 1

- R1,1 :	73.1 m3	3.39 min		
- R1,2 :	594.7 m3	27.60 min		
- R1,3 :	365.7 m3	16.97 min	*** 12	309.87 min
- R1,4 :	769.6 m3	35.72 min		
- R1,5 :	629.6 m3	29.22 min		
- T1,3 :	66.4 m3	3.08 min		
		115.98 min		

Traitement Usine no. 2

31500.0 m3/d => Débit usine no. 2

- Goulotte alimentation eau brute :	84.3 m3	3.85 min		
- Décantation (super pulsator) :	4333.8 m3	201.13 min	*** 4	219.57 min
- Goulotte eau décantée :	245.2 m3	11.38 min		
- Filtres S.A. :	759.6 m3	35.25 min	*** 8	266.20 min
- Goulotte eau filtrée :	61.3 m3	2.84 min		
- Chambres d'ozonation (A) :	449.0 m3	20.84 min	*** 10	289.88 min
- Chambres d'ozonation (B) :	340.0 m3	15.78 min	*** 11	305.66 min
- Chambre de dégazage :	17.0 m3	0.79 min		
		291.87 min		

ANNEXE C.3 (suite)

Simulation avec CACTUS (Pont-Viau)

Réserve Usine no. 2

- R2,1 :	222.6 m3	10.33 min		
- R2,2 :	432.5 m3	20.07 min		
- R2,3 :	899.9 m3	41.77 min	*** 13	364.03 min
- R2,4 :	756.8 m3	35.13 min		
- R2,5 :	604.2 m3	28.04 min		
- R2,6 :	85.0 m3	3.94 min		
- T2,3 Ouest :	5.0 m3	0.23 min		
		139.51 min		

Réserve Principale no. 3

- R3,1 :	748.5 m3	43.11 min		
- R3,2 :	748.4 m3	43.11 min		
- R3,3 :	207.1 m3	11.93 min		
- R3,4 :	179.9 m3	10.36 min		
- R3,5 :	647.1 m3	37.27 min	*** 14	441.91 min
- R3,6 :	870.0 m3	50.11 min		
- R3,7 :	1359.4 m3	78.30 min	*** 15	570.32 min
- R3,8 :	1359.4 m3	78.30 min		
- R3,9 :	1359.4 m3	78.30 min		
- R3,10 :	1359.4 m3	78.30 min		
- R3,11 :	1359.4 m3	78.30 min		
- R3,12 :	1457.5 m3	83.95 min	*** 16	967.49 min
- R3,13 :	1241.1 m3	71.49 min		
- R3,14 :	1629.6 m3	93.86 min	*** 17	1132.83 min
- R3,15 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,16 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,17 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,18 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,19 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,20 :	817.5 m3	47.09 min		
- R3,21 :	599.5 m3	34.53 min		
- R3,22 :	256.2 m3	14.75 min	*** 18	1464.65 min
- R3,23 :	256.2 m3	14.75 min	*** 19	1479.40 min
- R3,24 :	572.3 m3	32.96 min		
- R3,25 :	294.3 m3	16.95 min		
- R3,26 :	704.9 m3	40.60 min	49.251744	66.20 min
- R3,27 :	1005.2 m3	57.90 min		
		1331.69 min		

* Estimation du traçage =>	Pré-traitement =>	14.58 min
	Usine #1 =>	377.89 min
	Usine #2 =>	431.38 min
	Moyenne =>	404.63 min
	Réserve #3 =>	1331.69 min
	TS Total =>	29.18 h
	Volume Total (m3) =>	41196.86

*** 20

* Note = Volume incertain

ANNEXE D

PROTOCOLE D'ANALYSE DU FLUOR

A. Nettoyage de l'électrode

1. Laver l'électrode 3 fois à l'eau déminéralisée
2. Rincer l'électrode 1 fois avec le liquide de référence
3. Remplir l'électrode du liquide de référence

B. Calibration de l'appareil

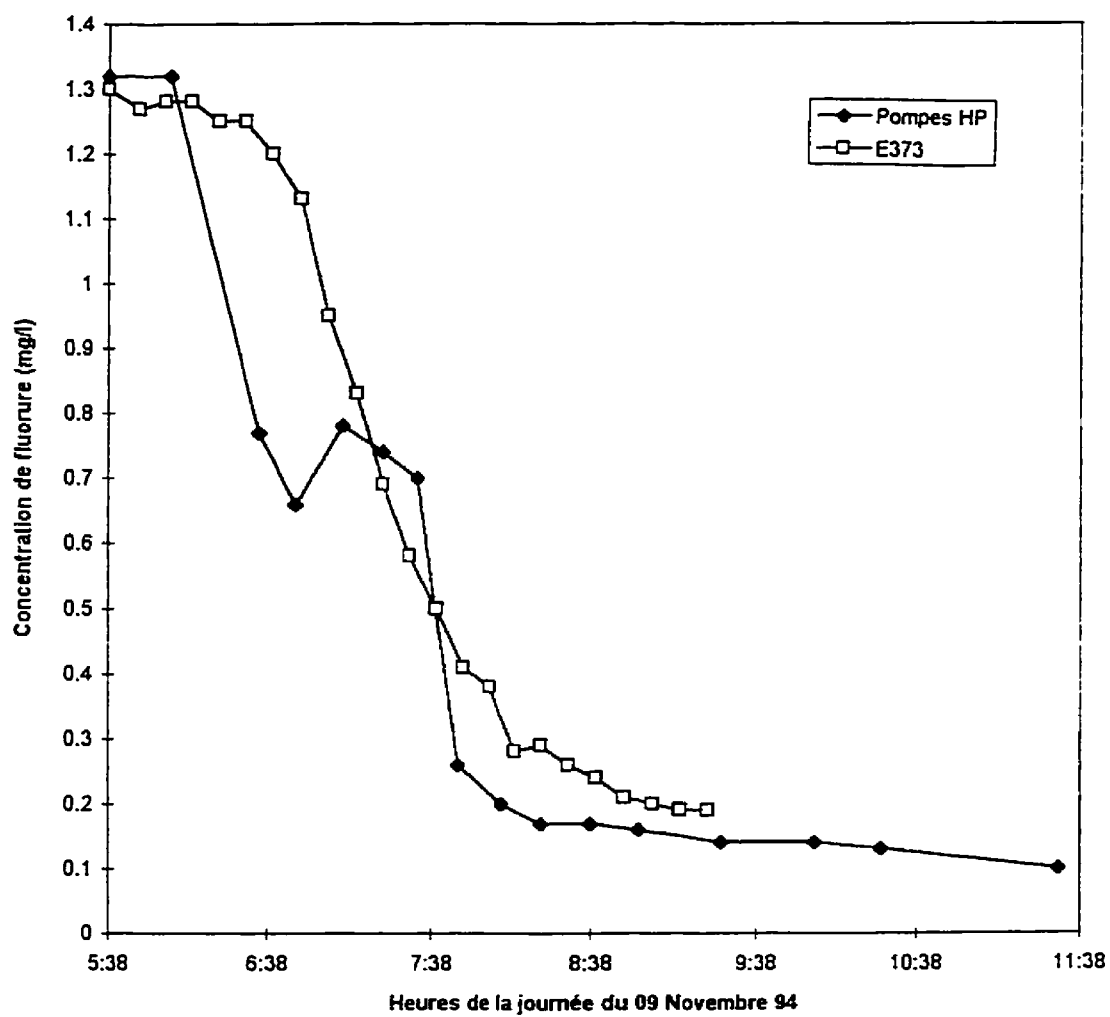
1. Prendre 25 ml de standard 1 mg F/l et ajouter 3 ml de TISAB
2. Prendre la mesure après 30 secondes de contact
3. Ajuster l'appareil à 1 mg/l
4. Refaire les étapes 1 à 3 pour le standard de 2 mg/l
5. **Il faut refaire des calibrations à toutes les heures et à toutes les fois qu'il y a un changement de bouteille de TISAB**

C. Mesure de l'échantillon

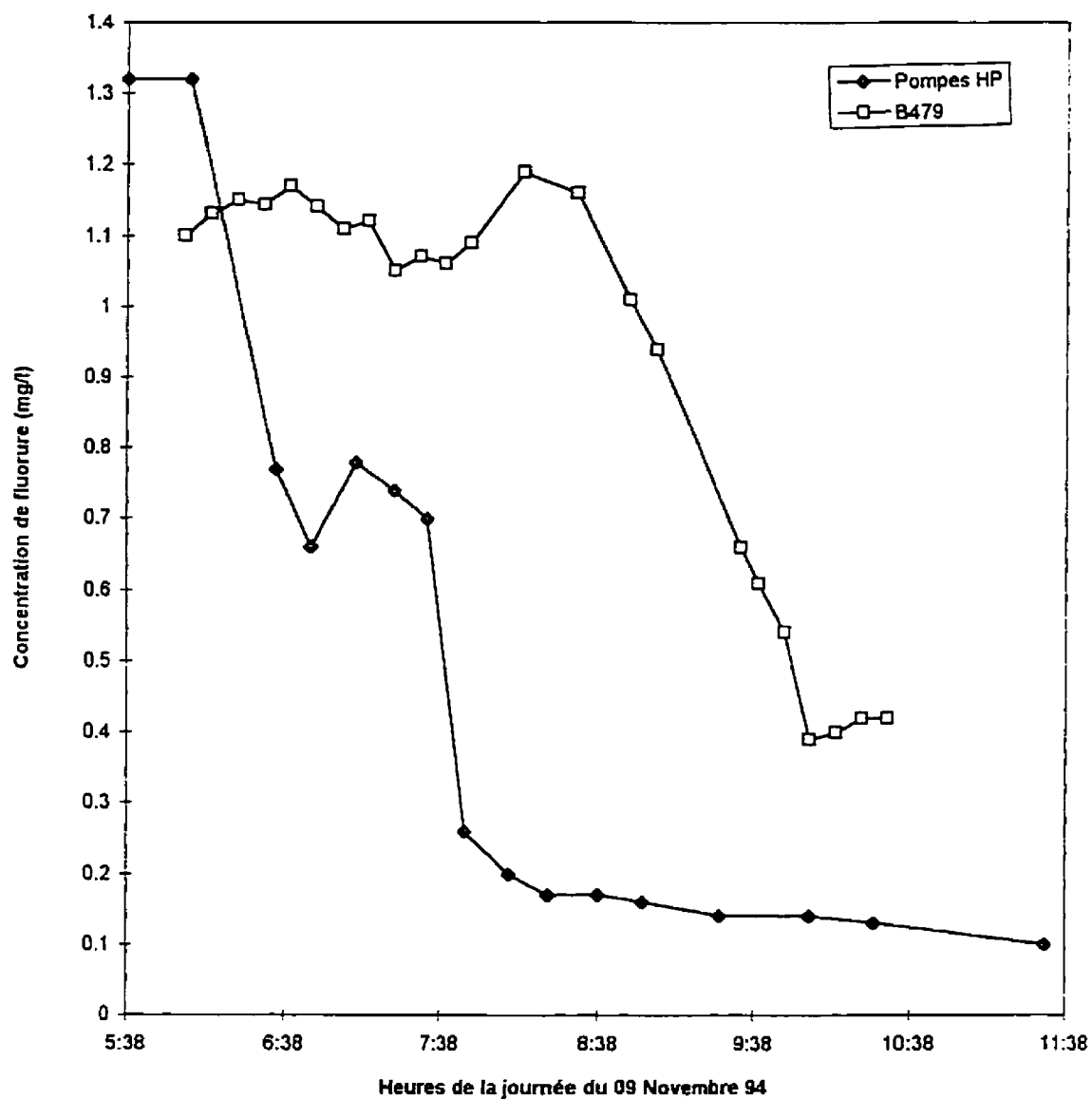
1. Pour chaque mesure, prendre la température juste avant la mesure
2. Faire deux mesures pour chacun des échantillons
3. Rincer l'électrode avec de l'eau déminéralisée
4. Rincer le becher 3 fois avec un peu d'eau de l'échantillon à mesurer
5. Prendre 25 ml de l'échantillon, ajouter 3 ml de TISAB
6. Prendre la mesure après 30 secondes de contact

ANNEXE E.1**Courbes de traçage en réseau de Pont-Viau**

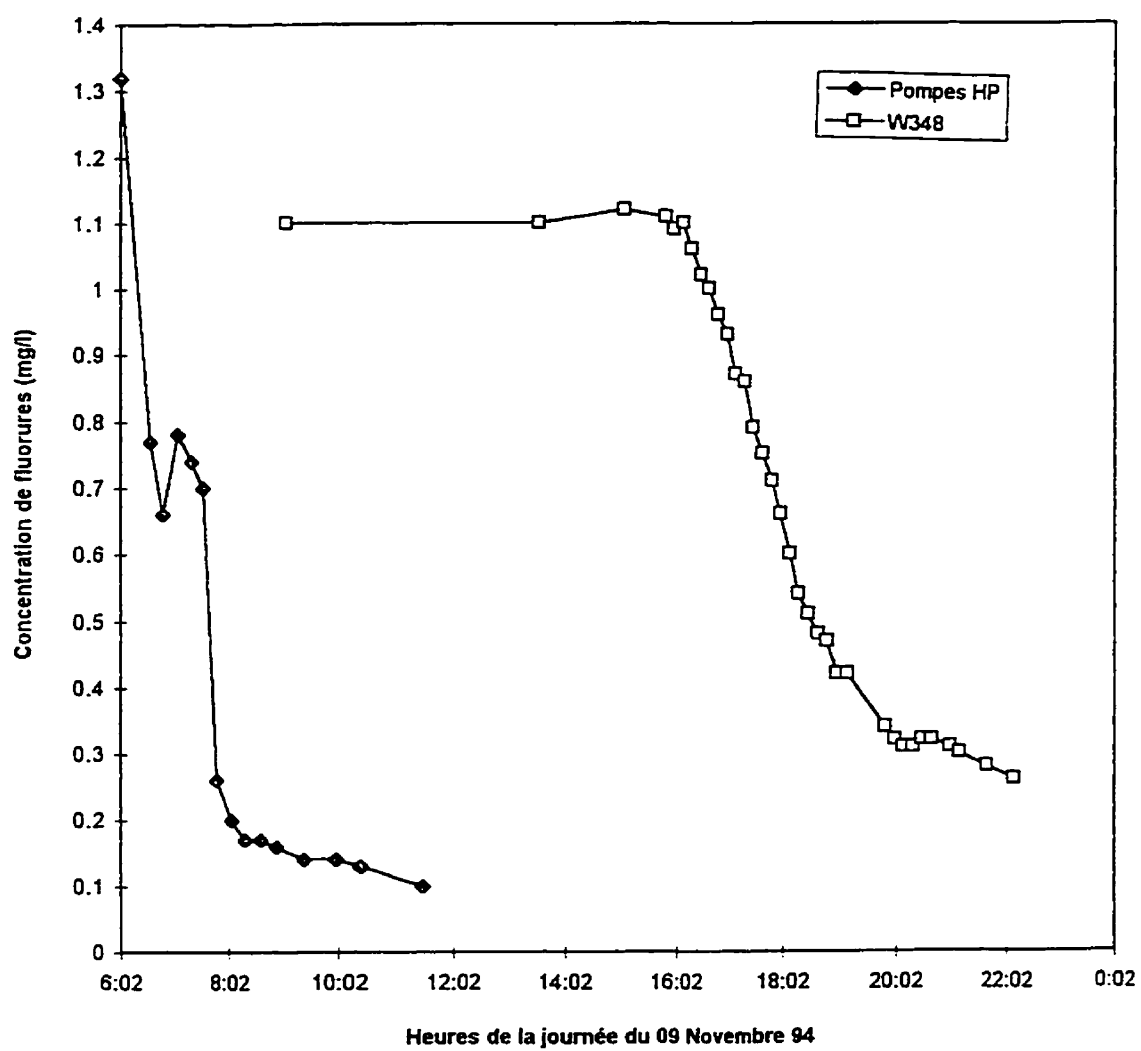
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage E373



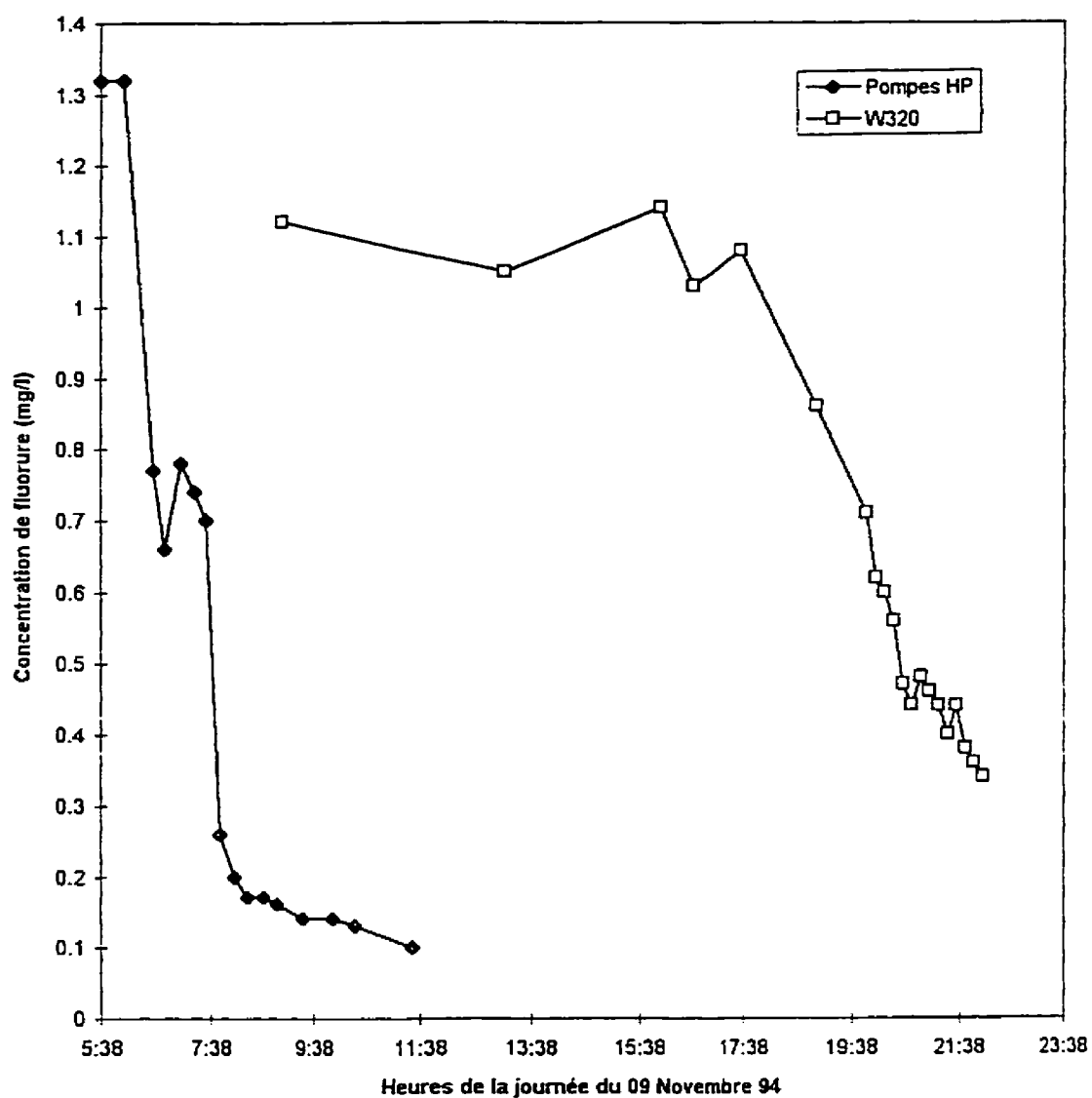
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage B479



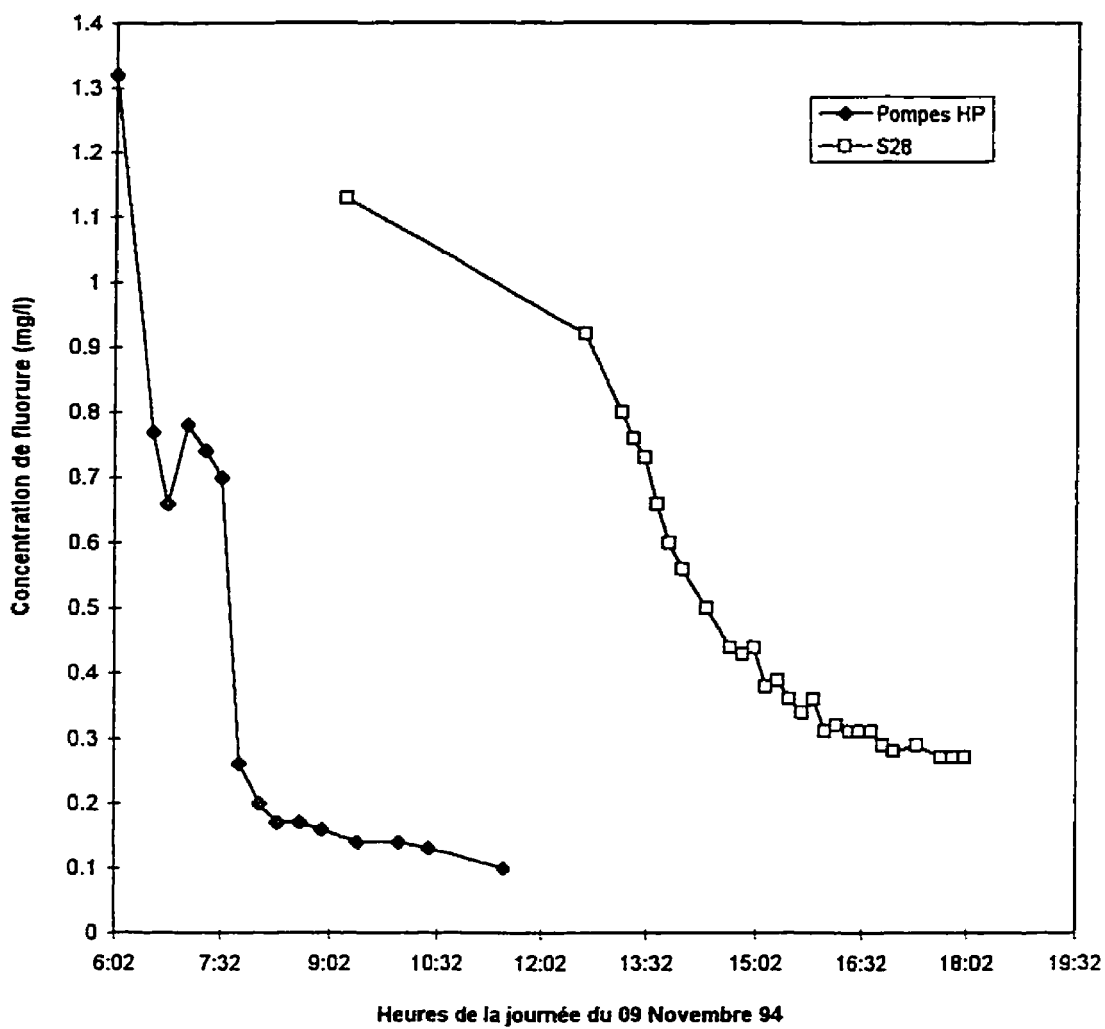
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage W348



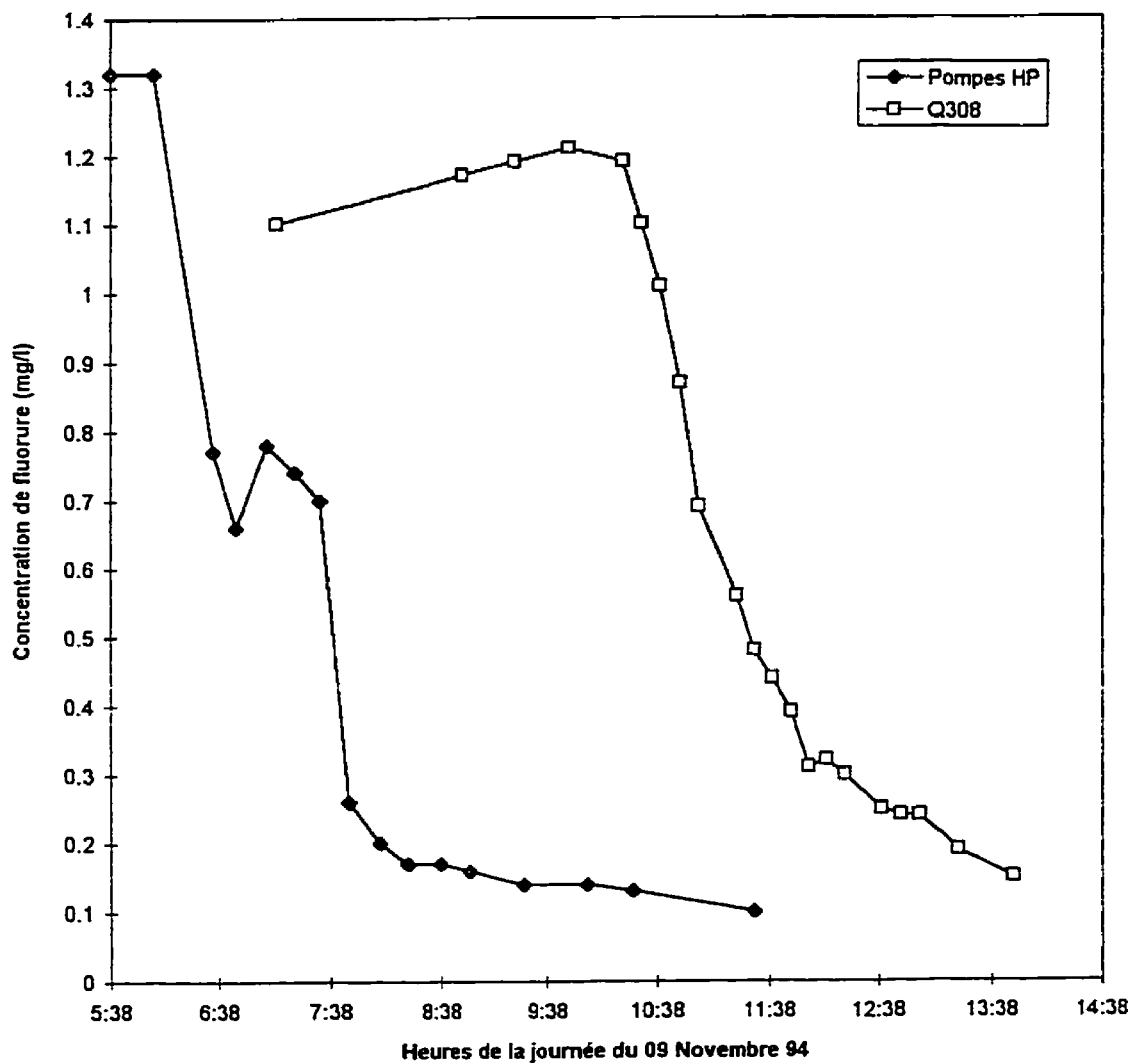
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage W320



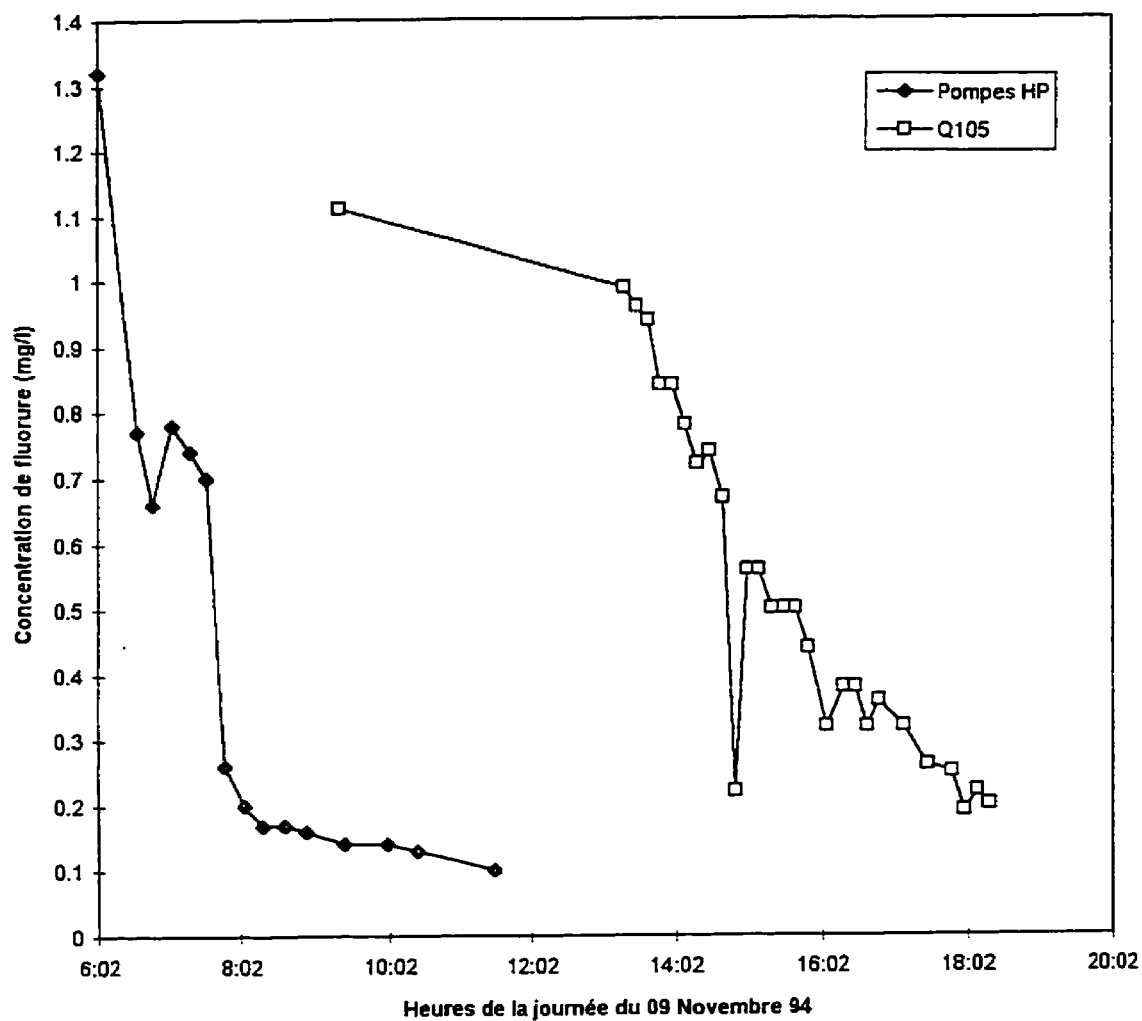
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage S28



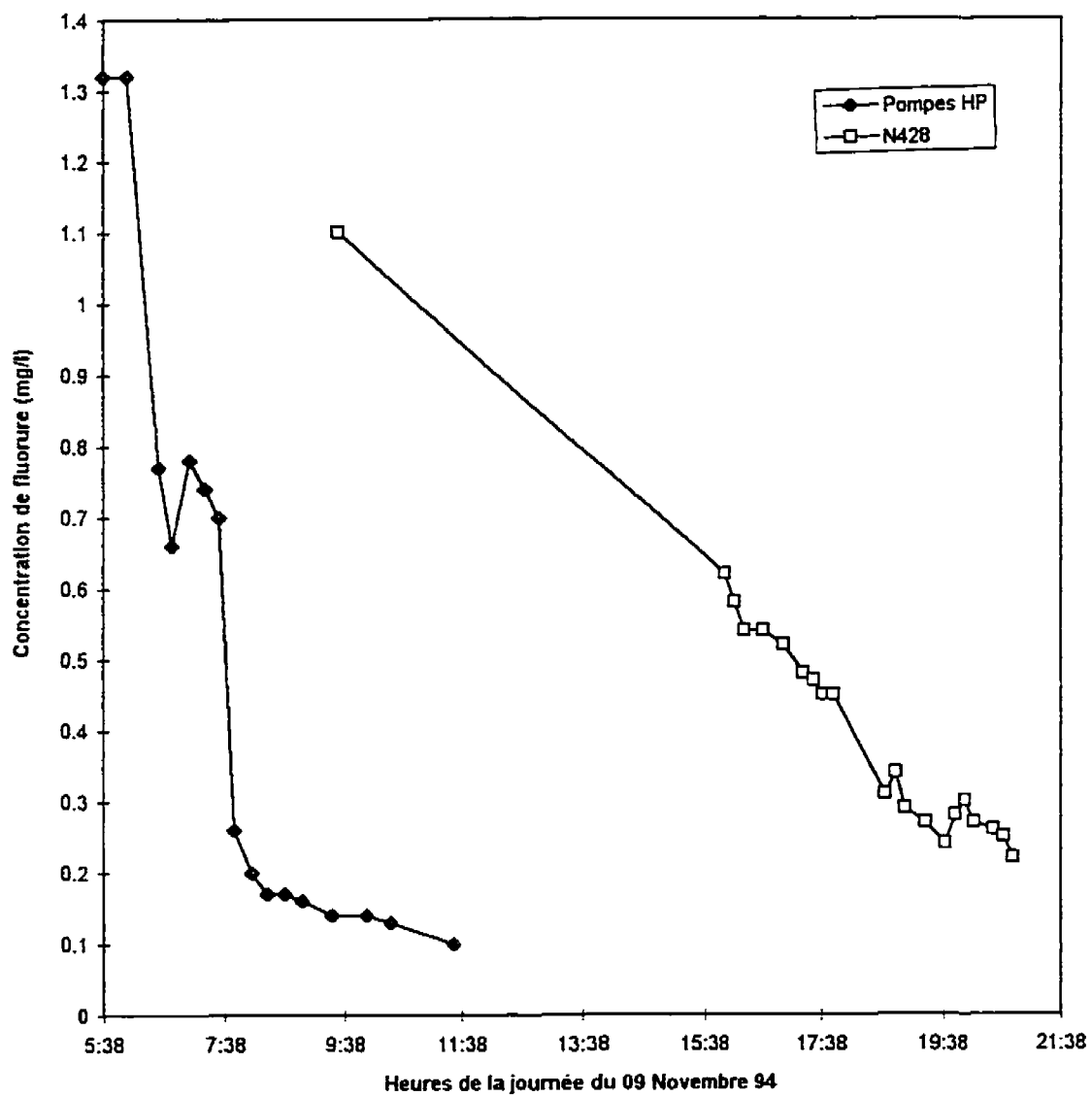
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage Q308



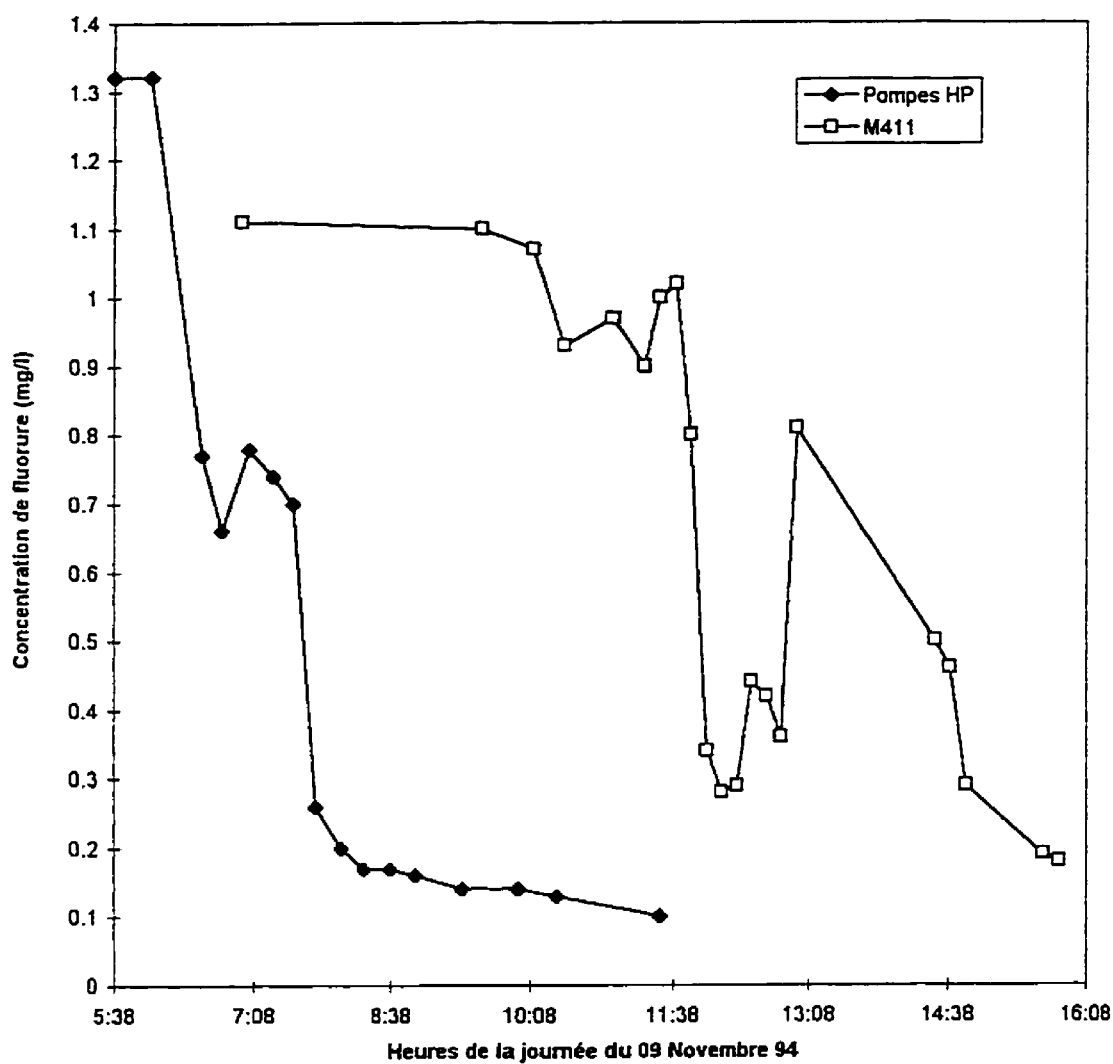
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage Q105



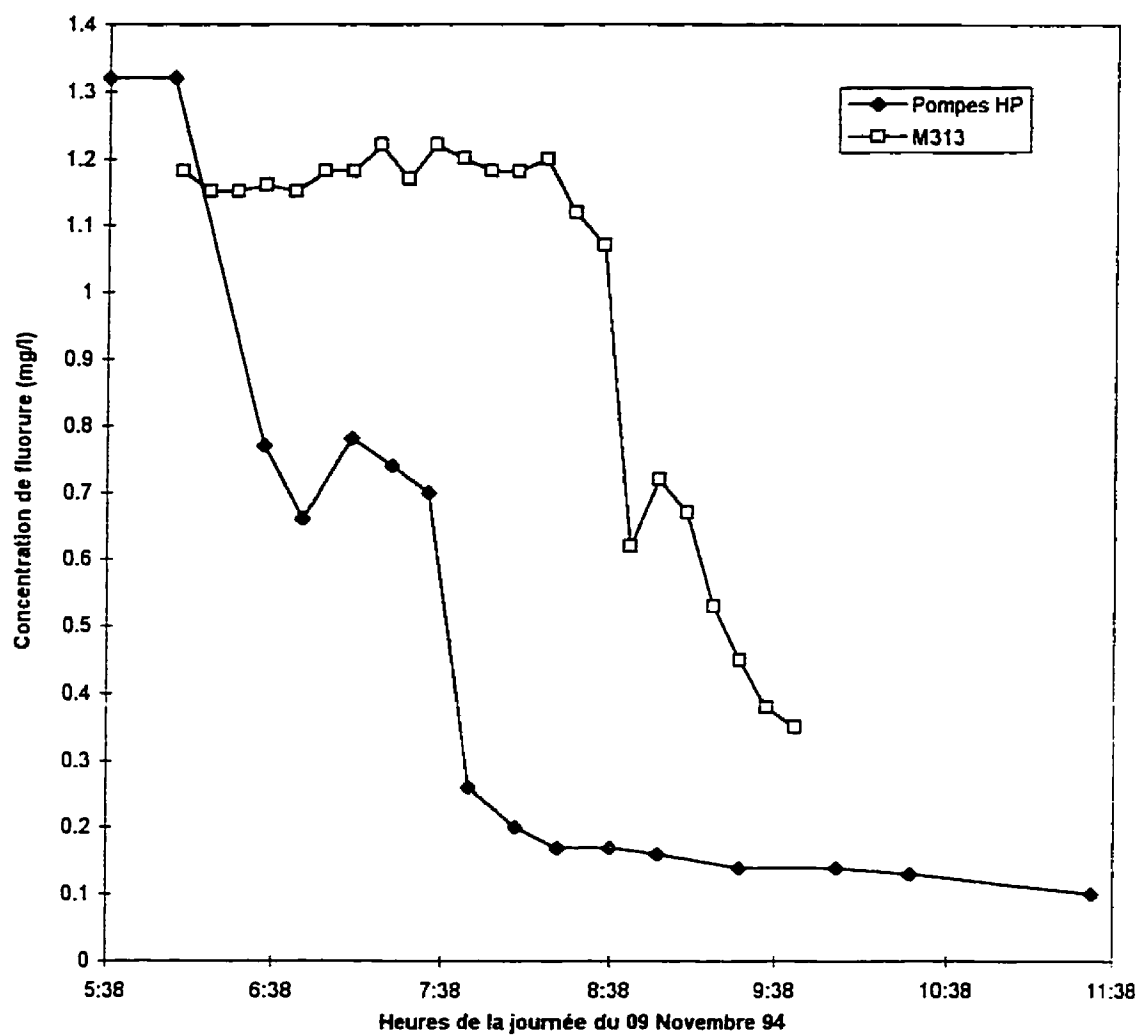
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage N428



Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage M411

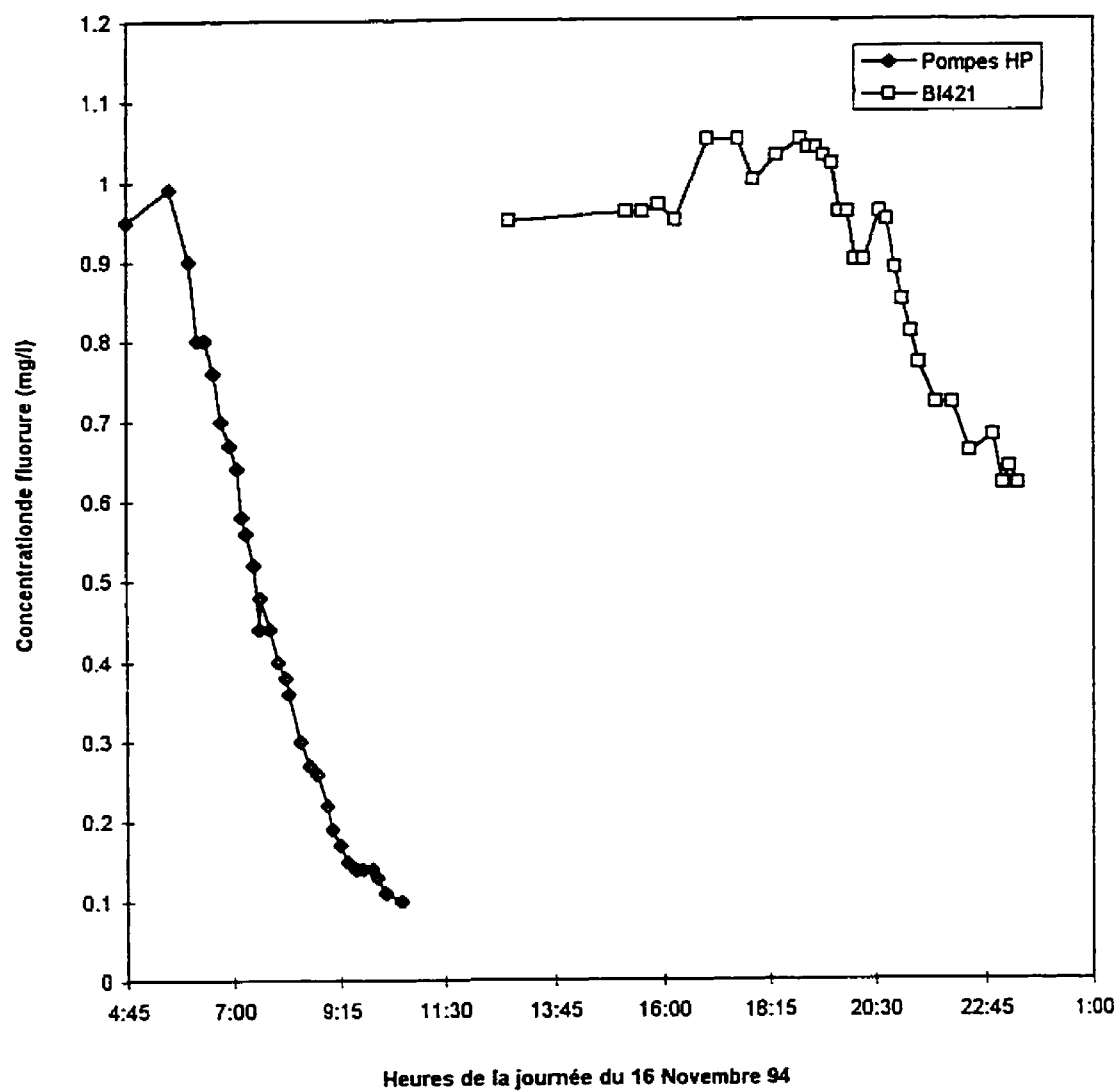


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage M313

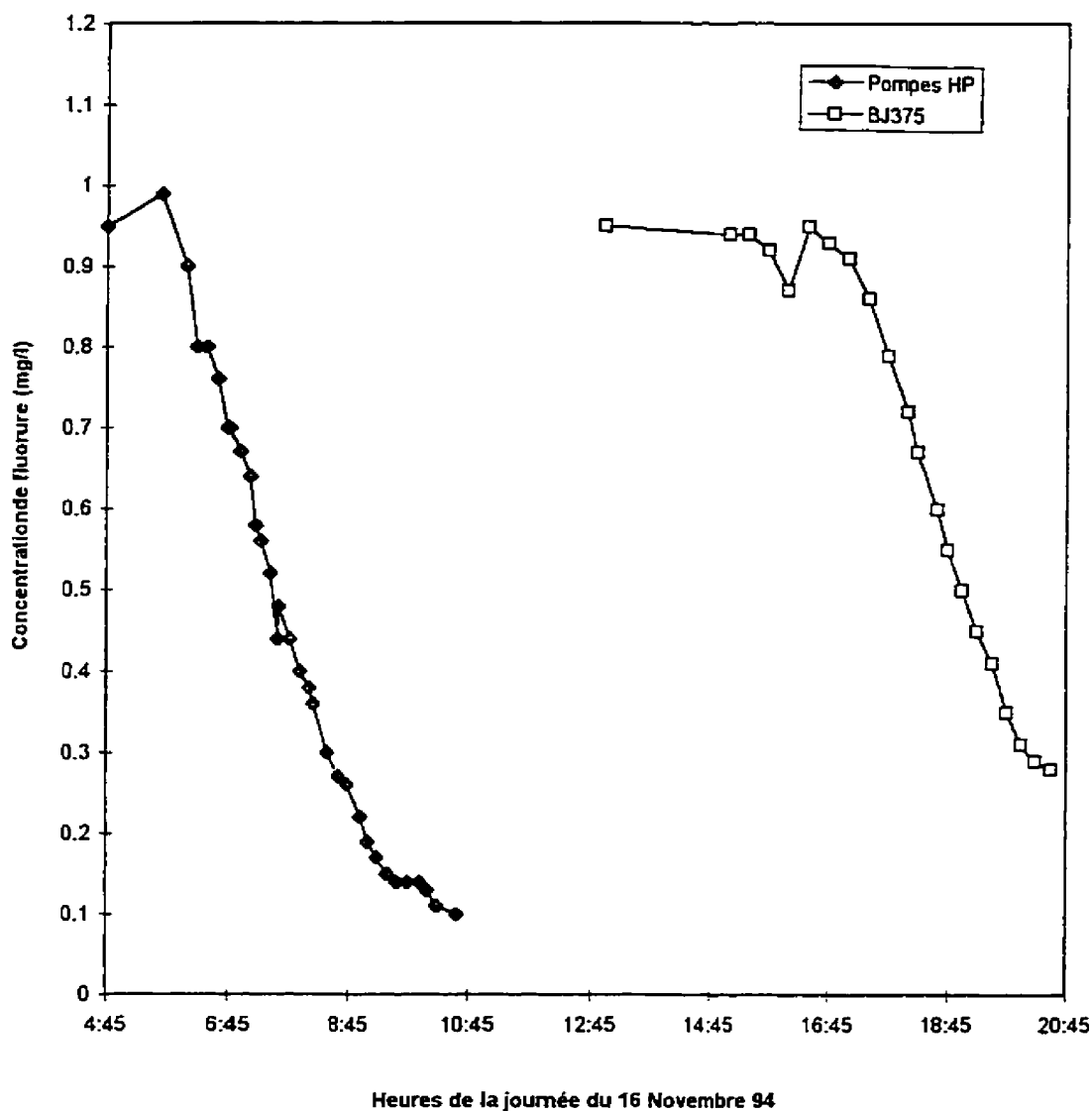


ANNEXE E.2**Courbes de traçage en réseau de Chomedey**

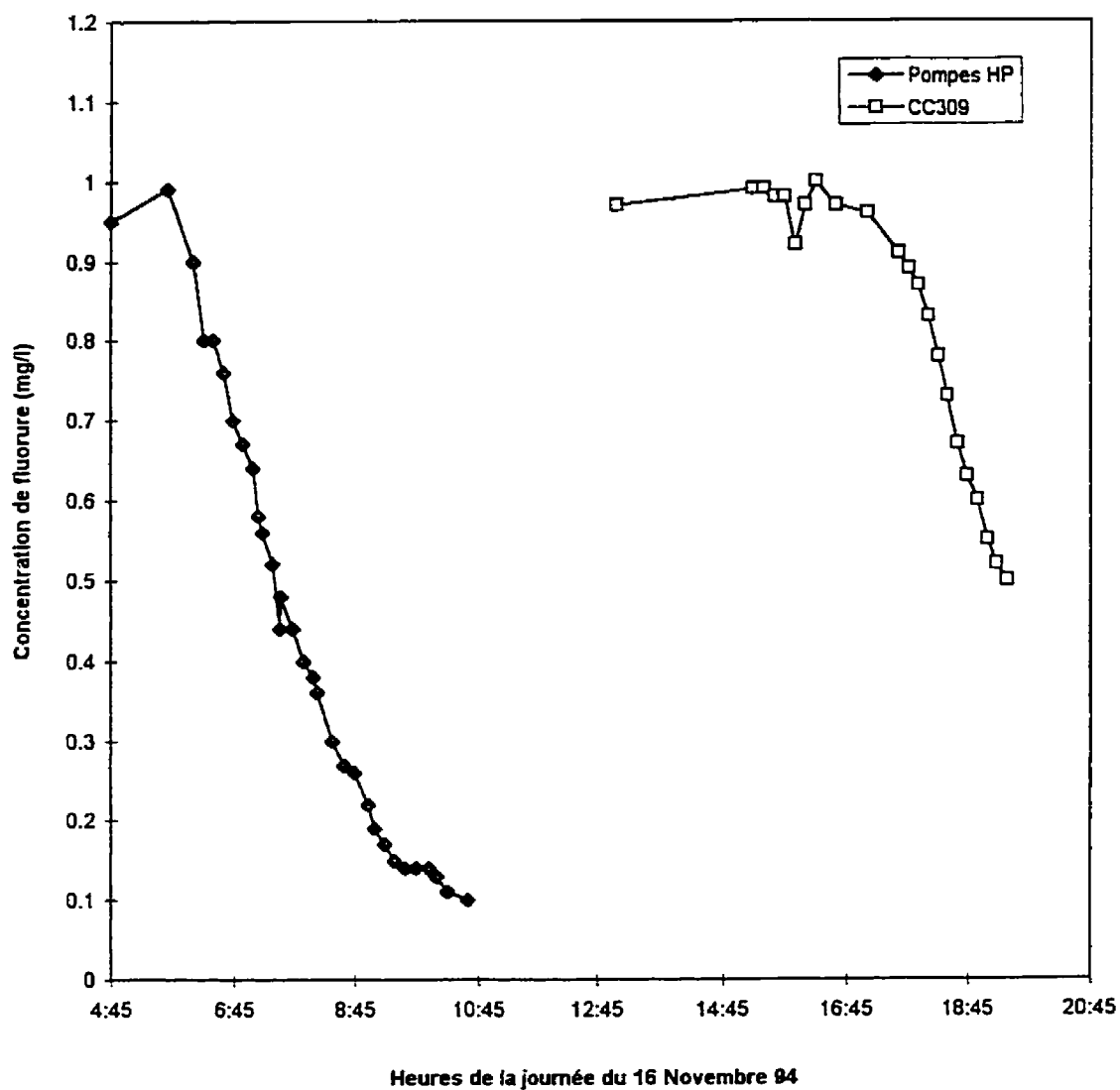
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage BI421



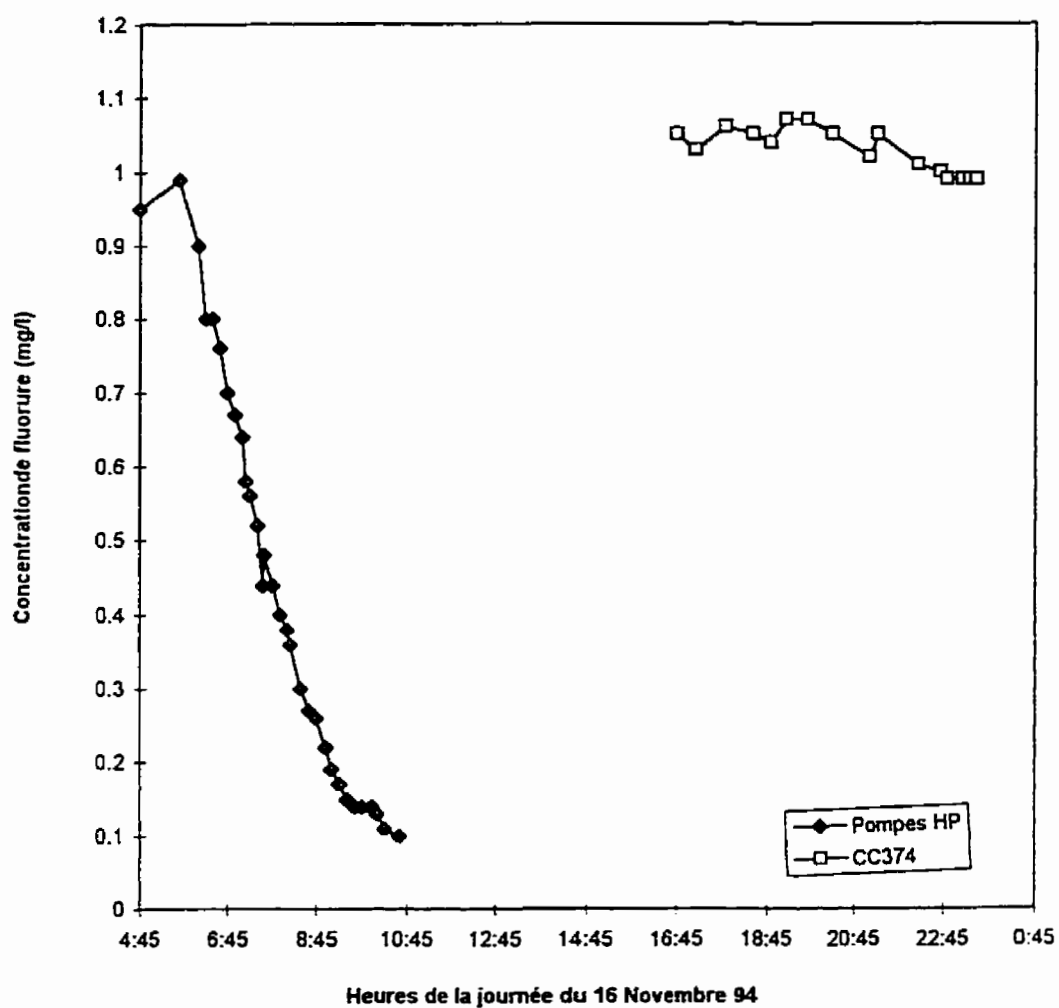
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage BJ375



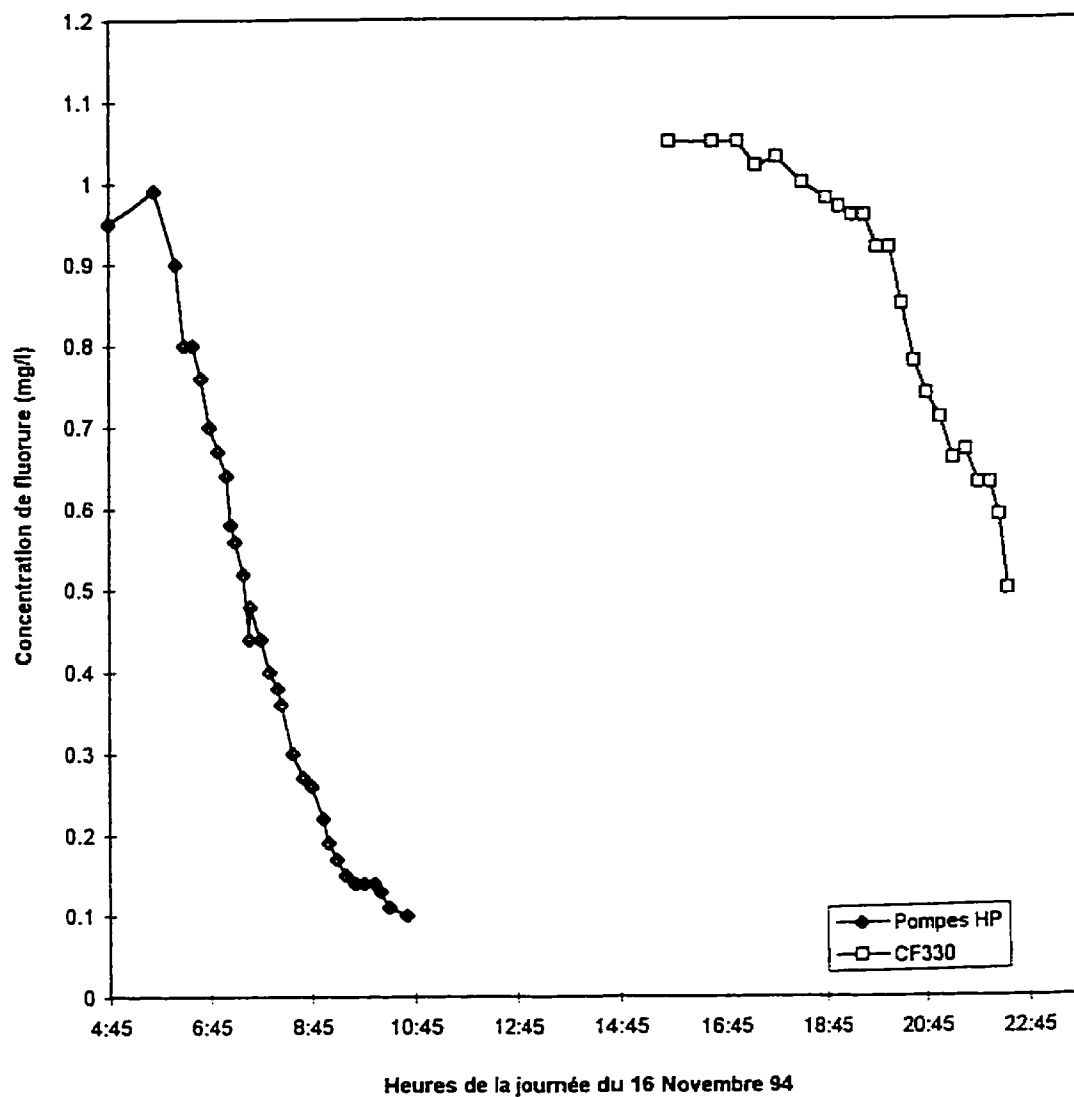
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage CC309

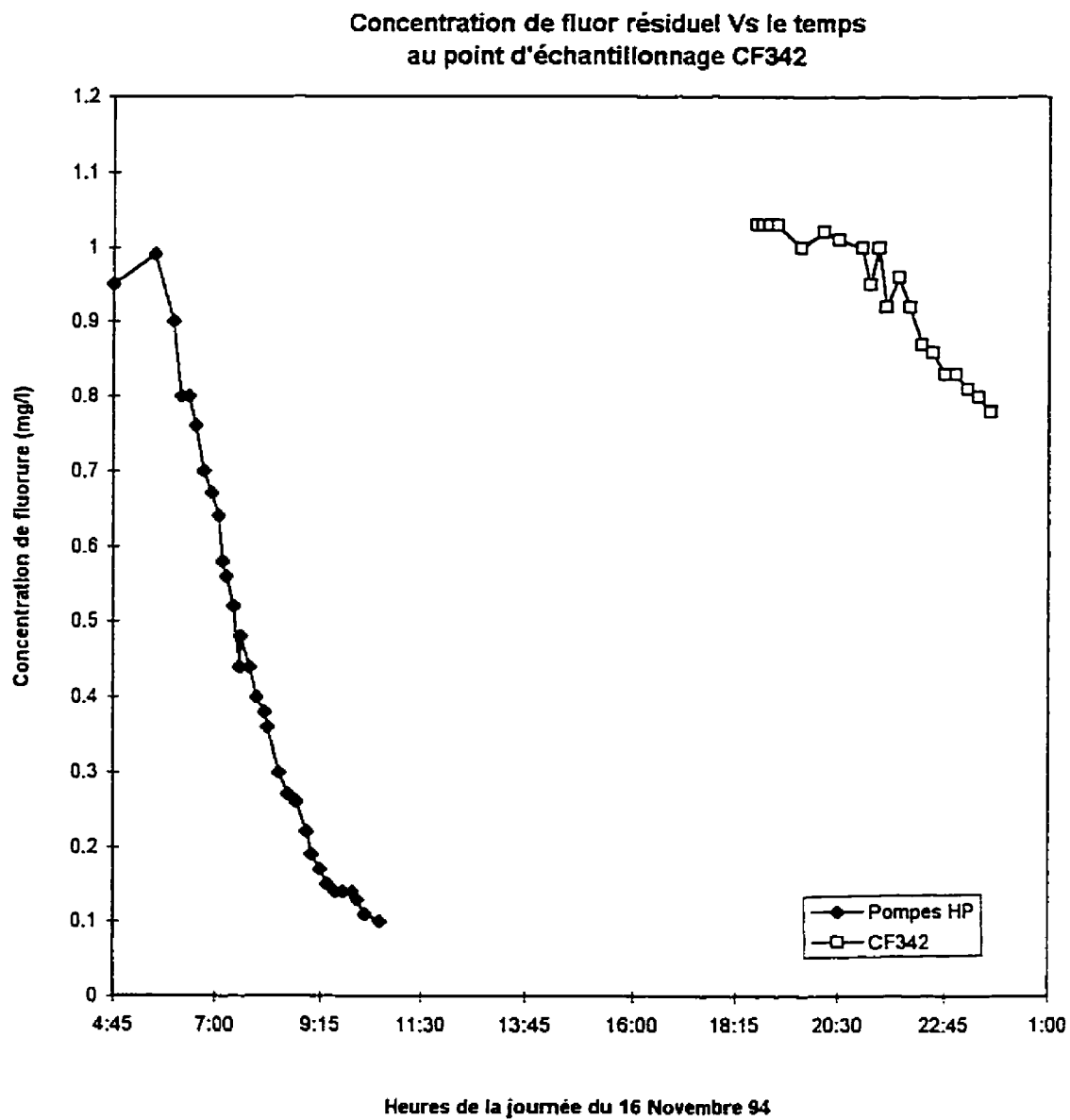


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage CC374

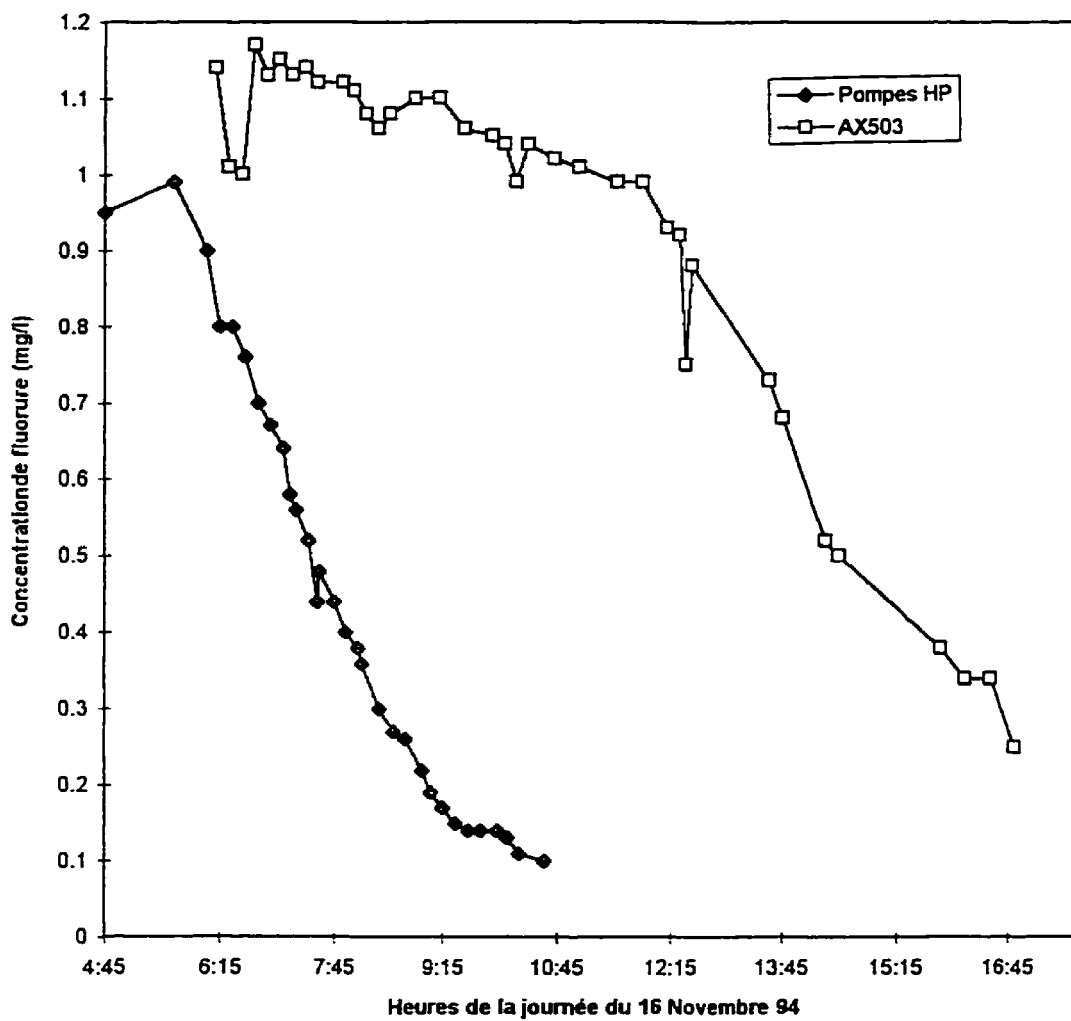


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage CF330

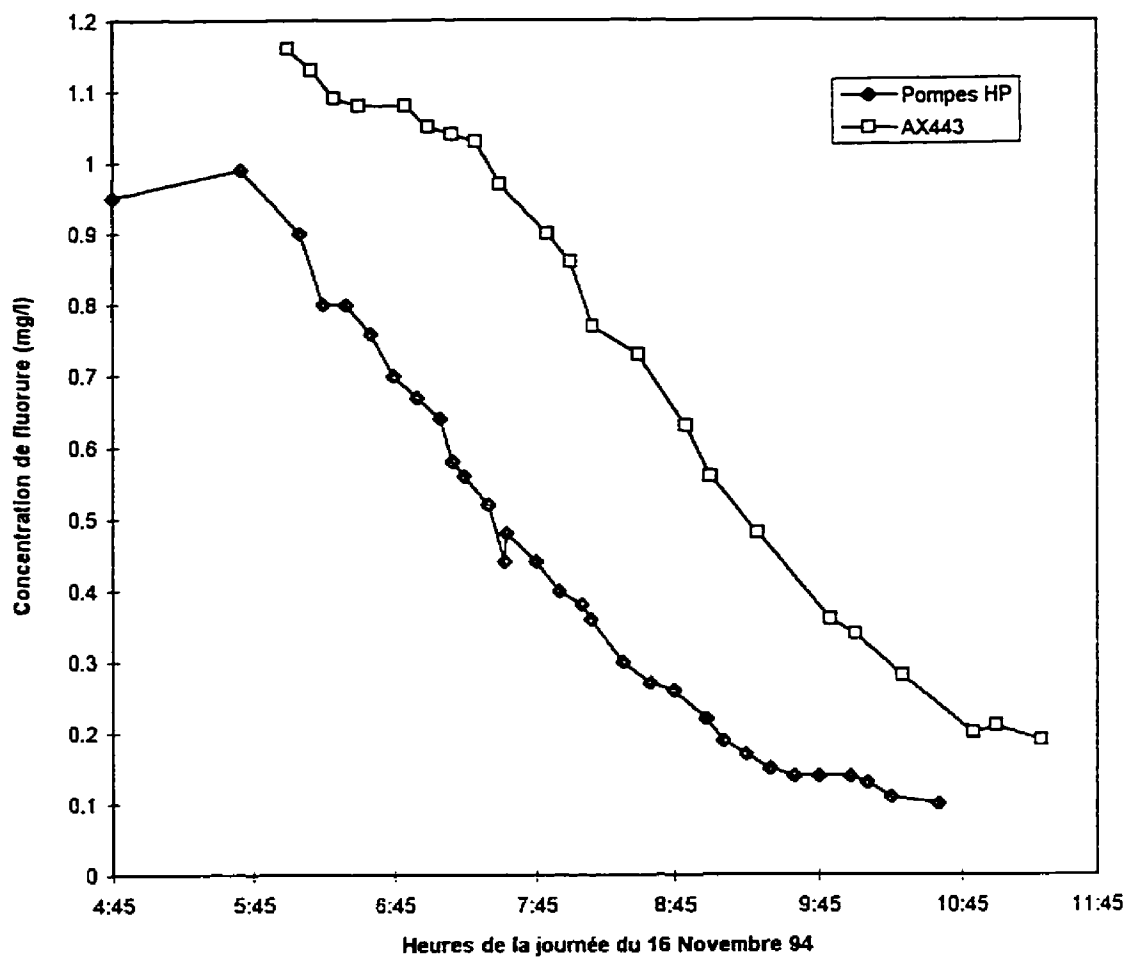




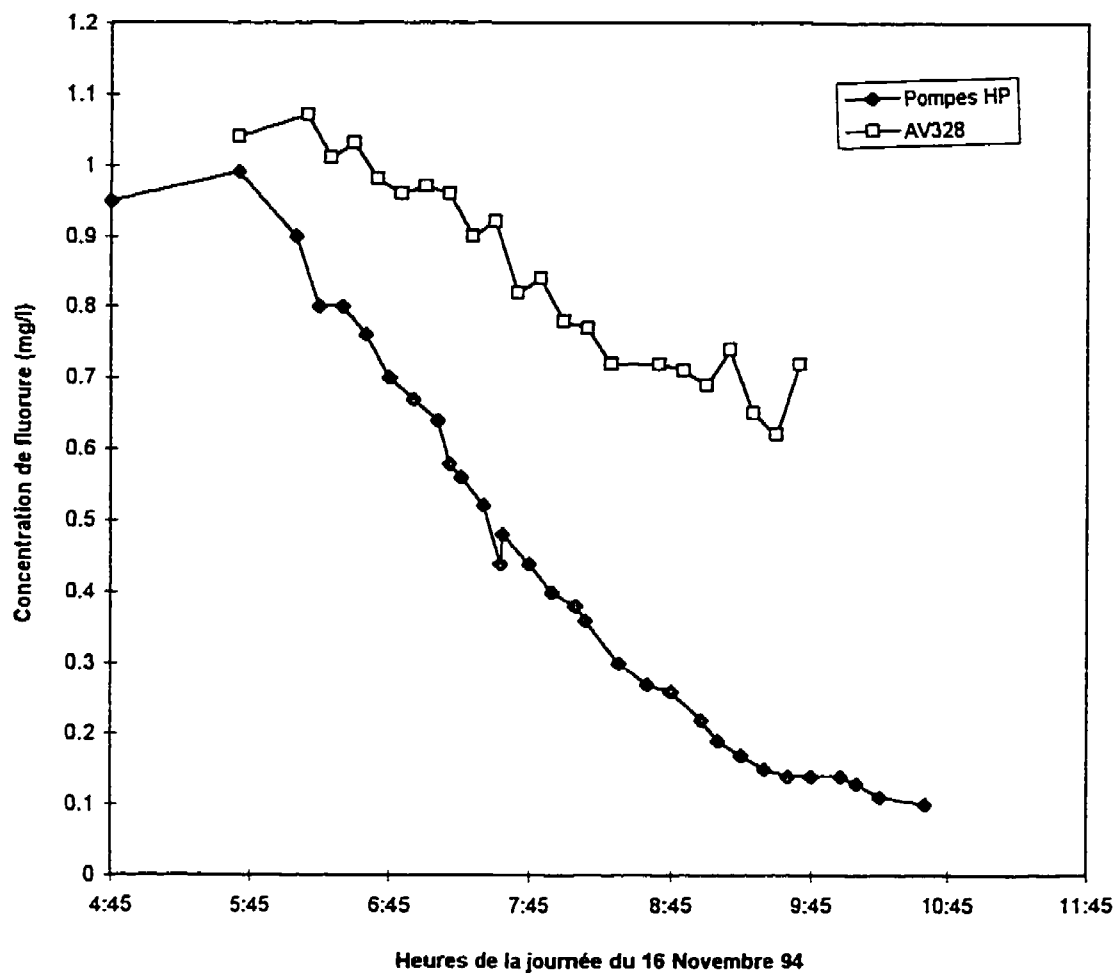
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage AX503

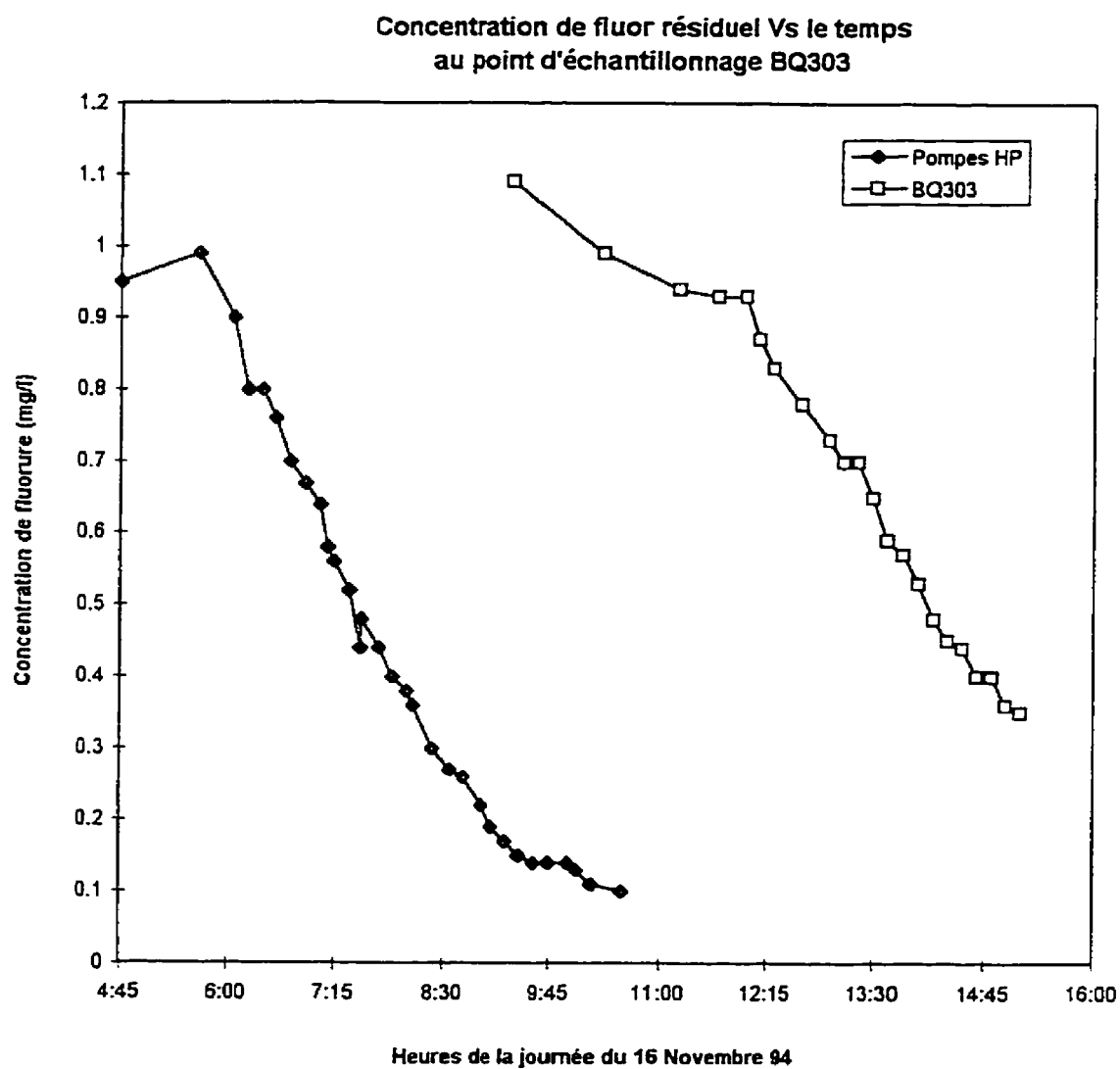


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage AX443

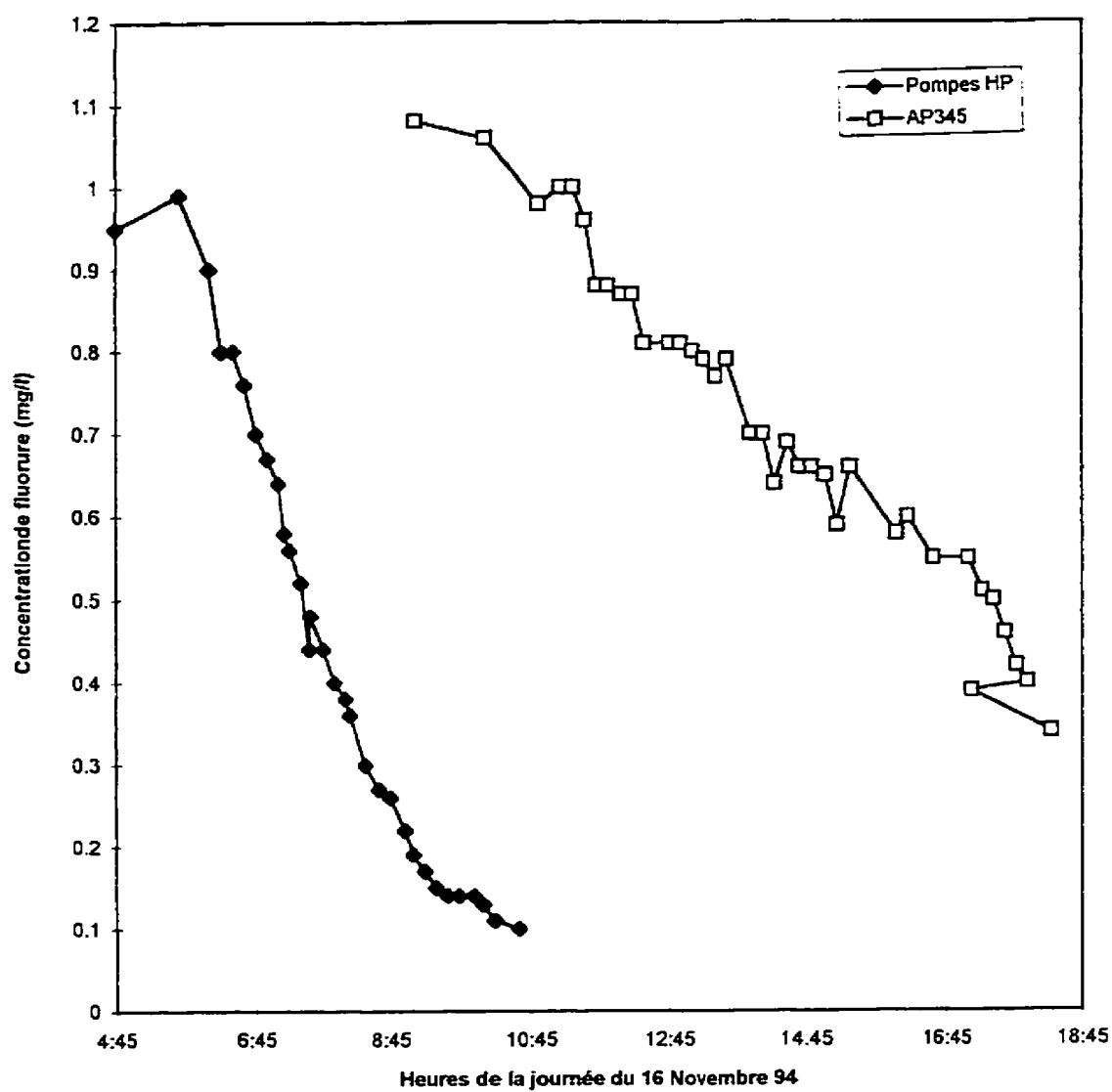


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage AV328



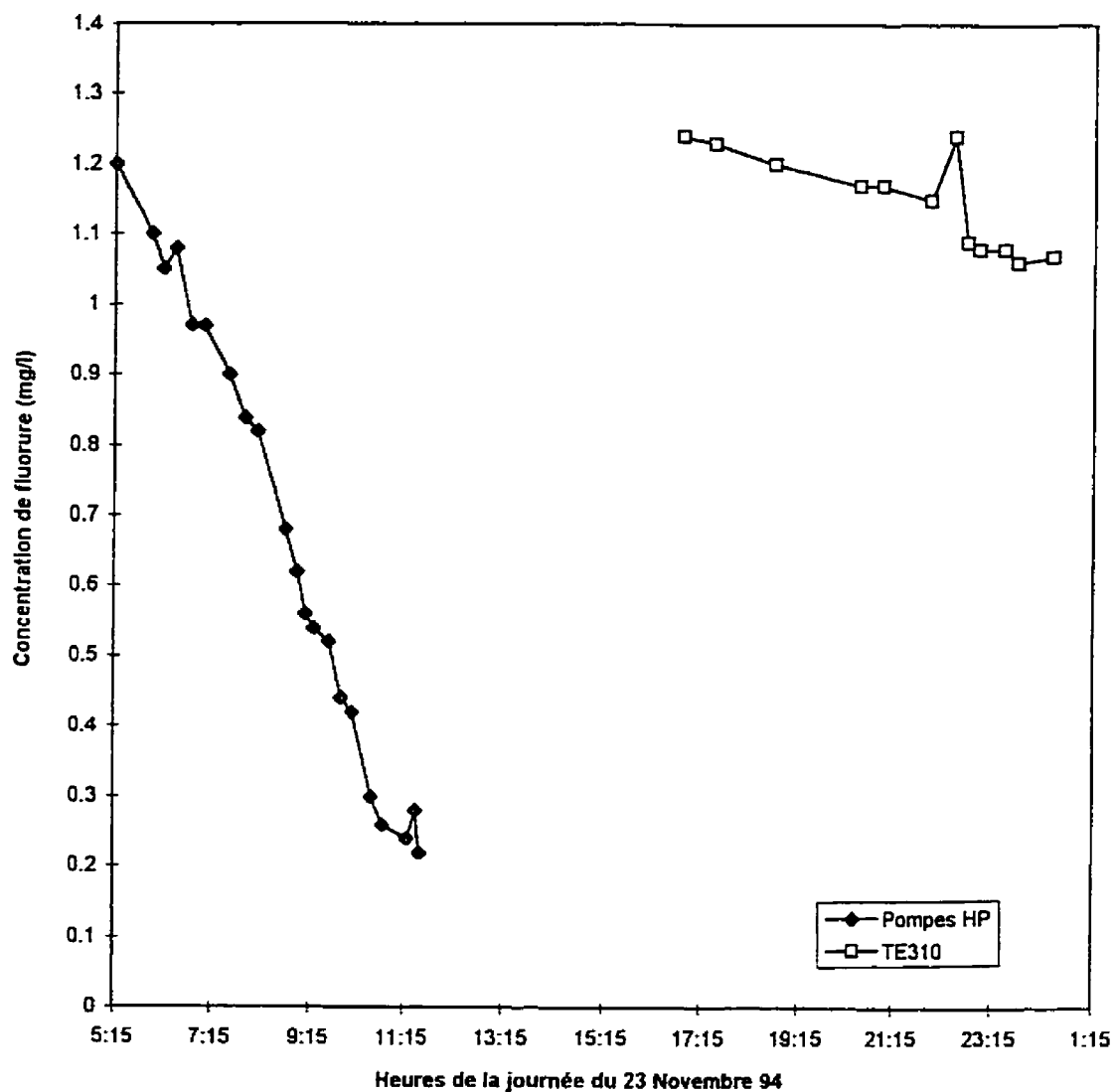


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage AP345

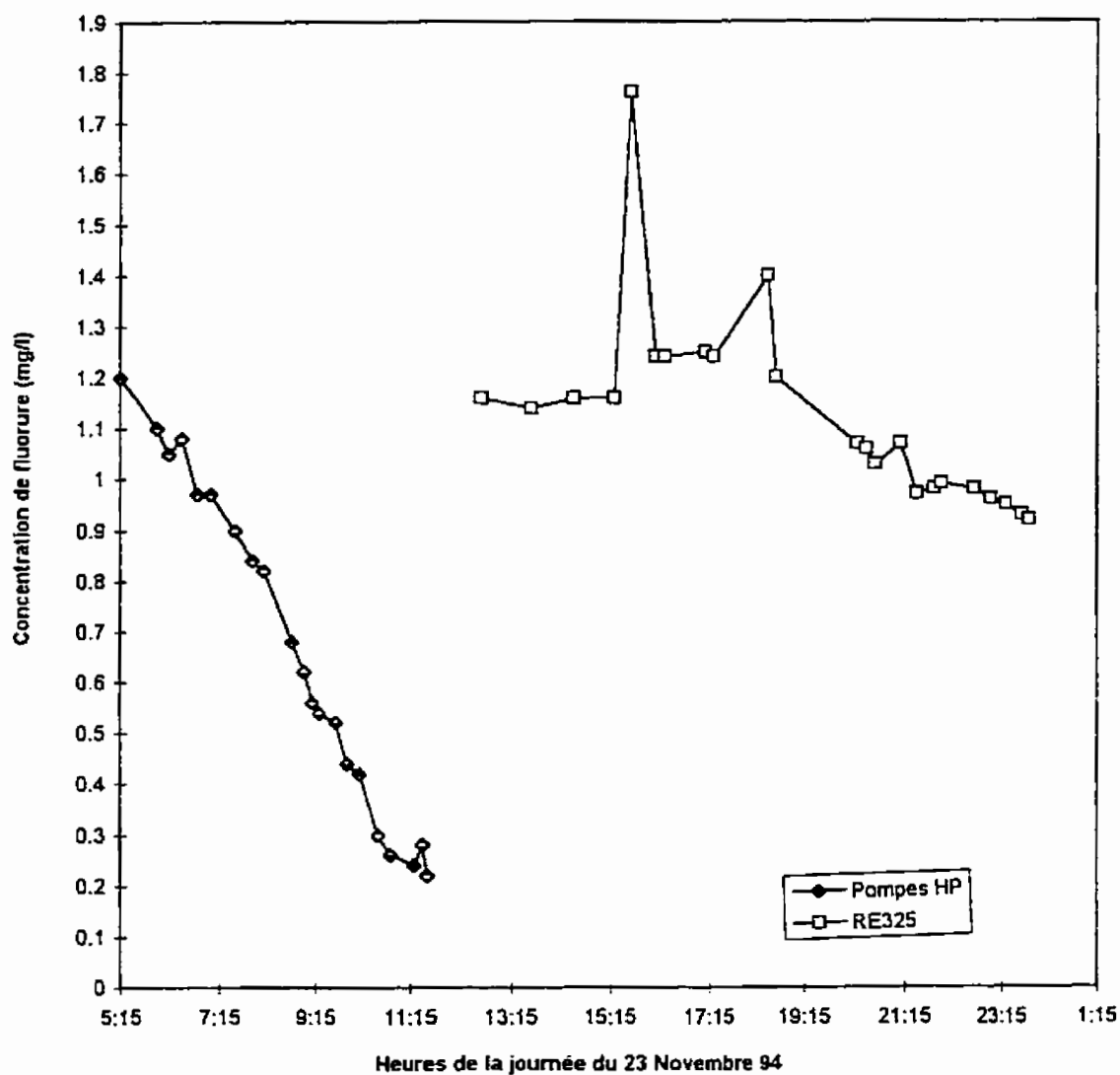


ANNEXE E.3**Courbes de traçage en réseau de Ste-Rose**

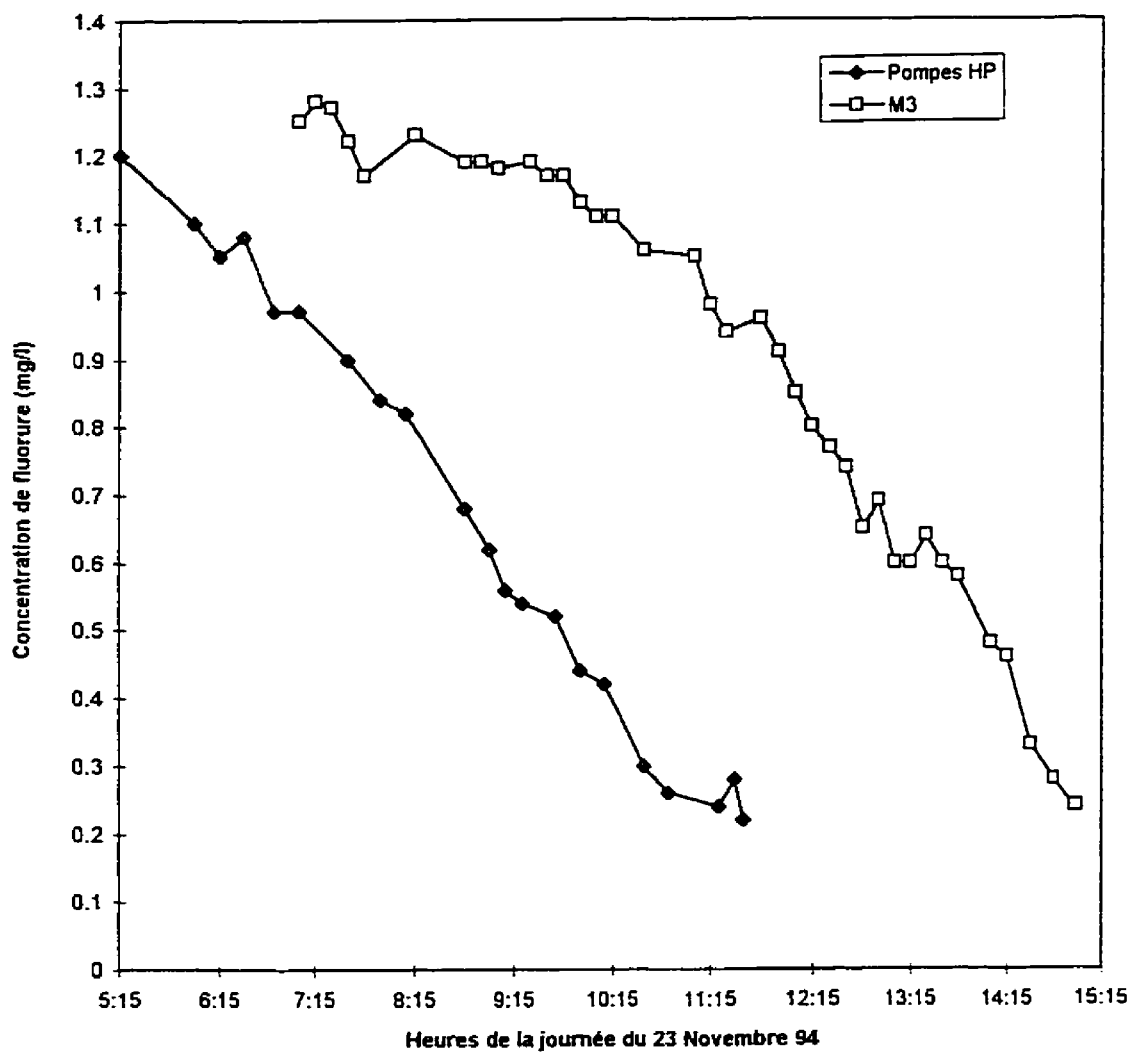
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage TE310



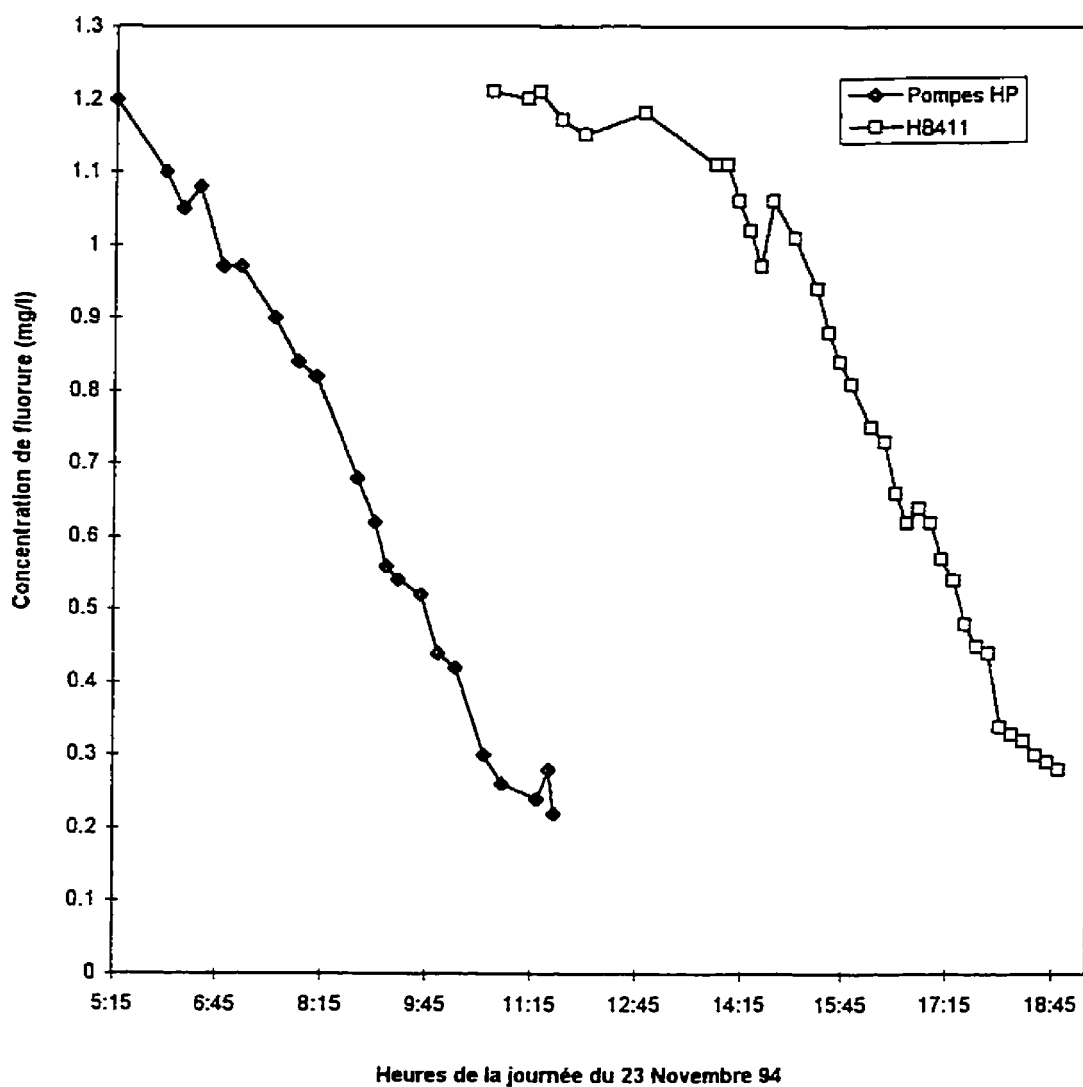
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage RE325



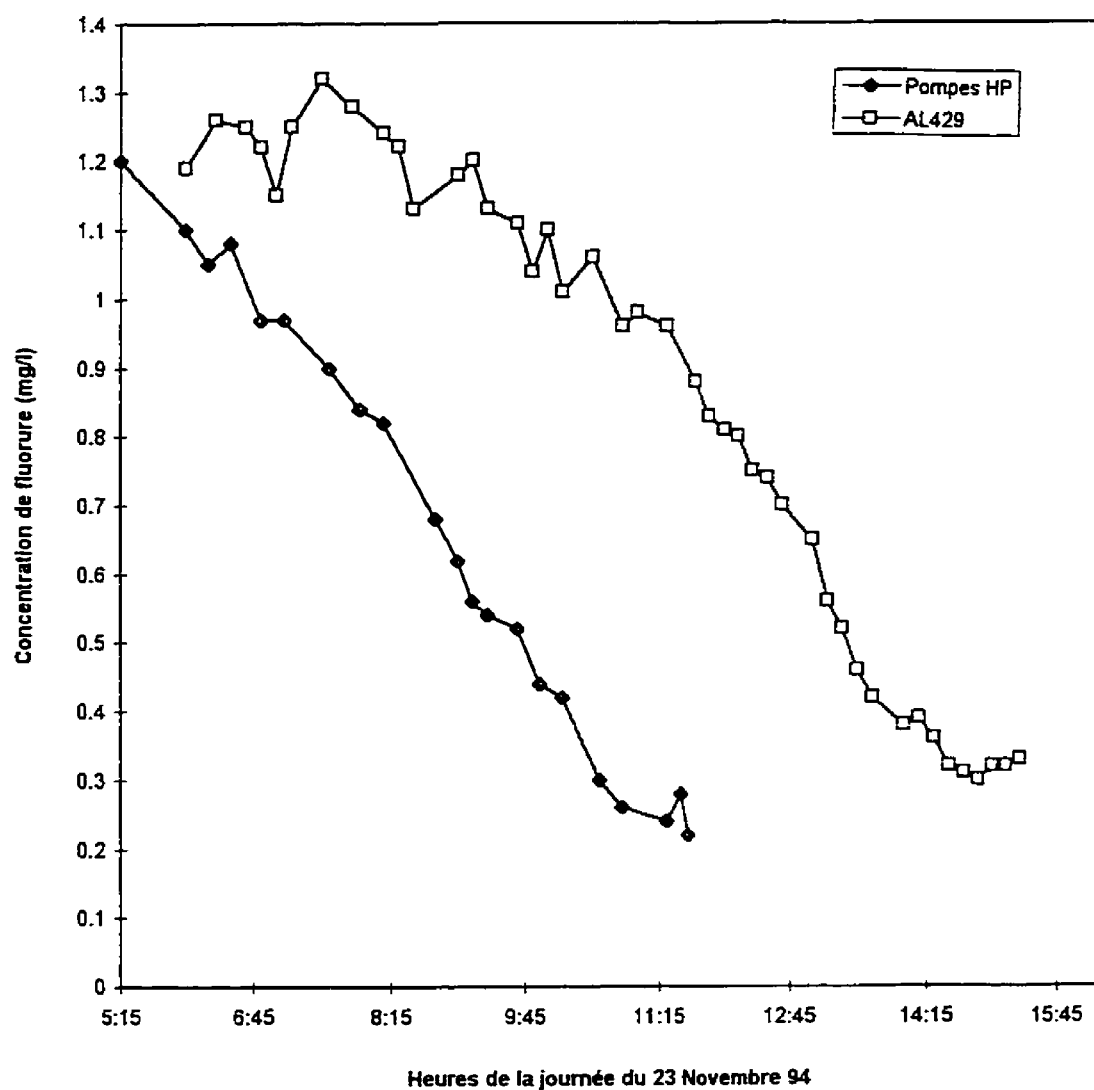
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage HD40

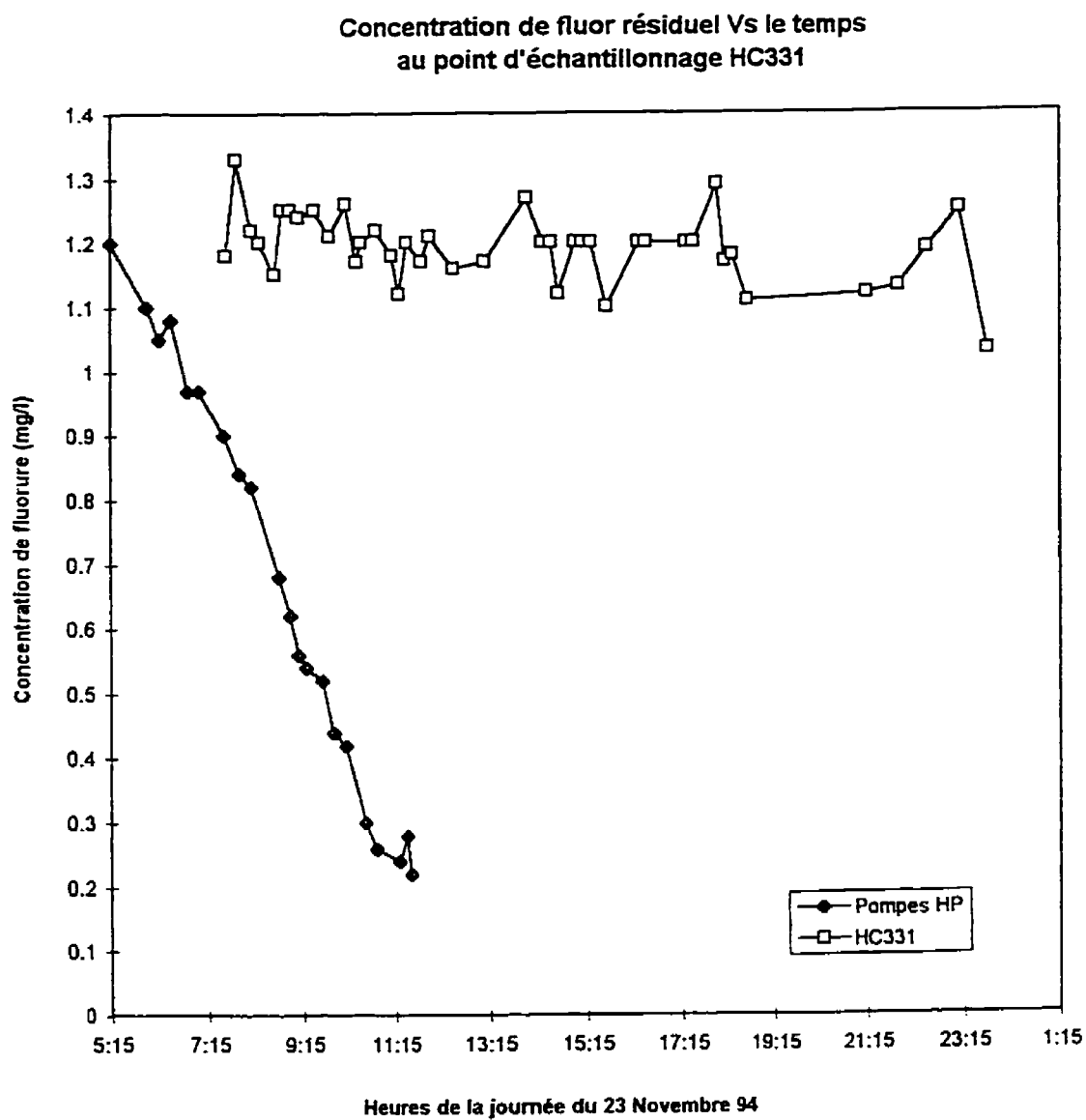


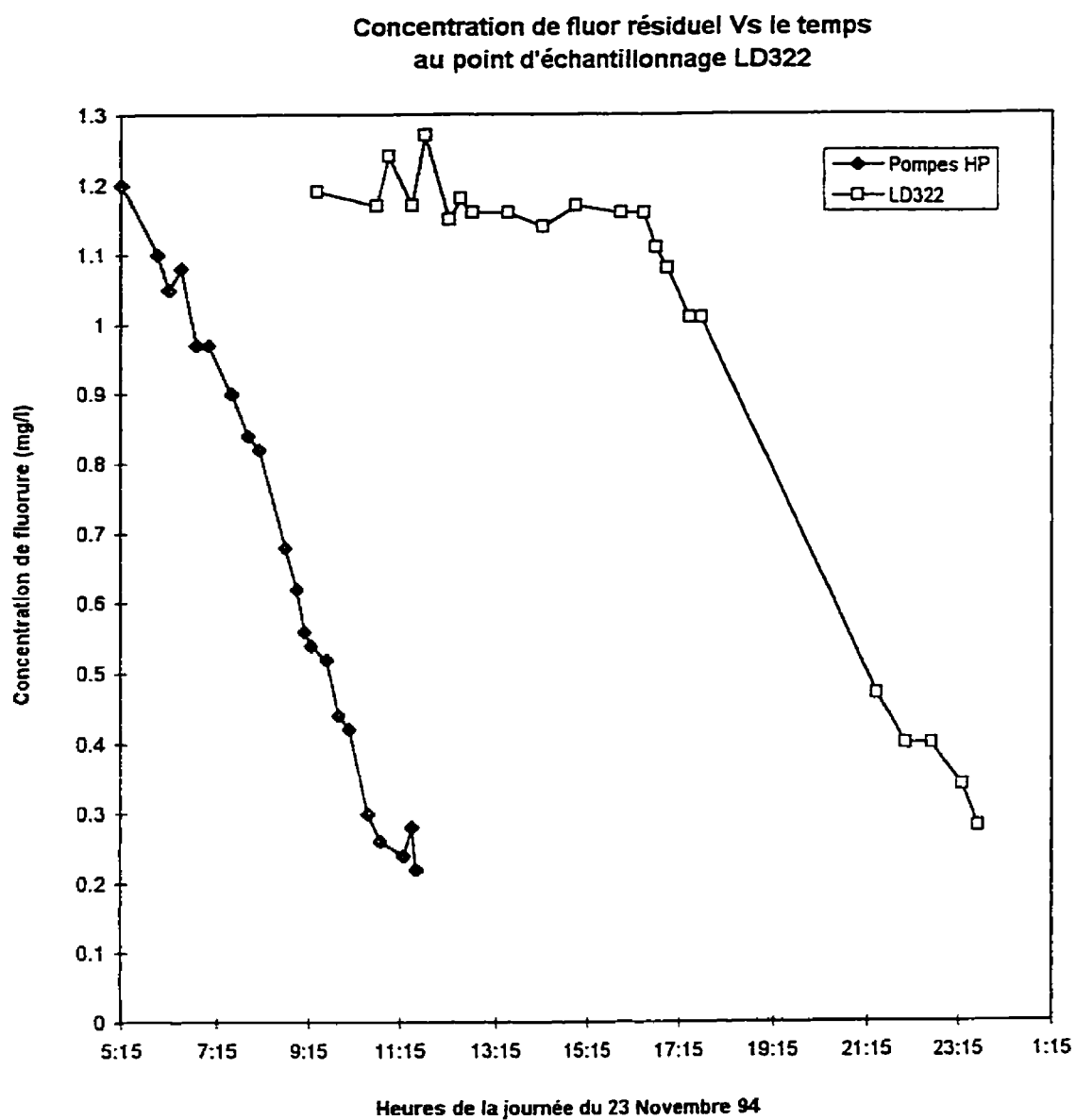
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage HB411



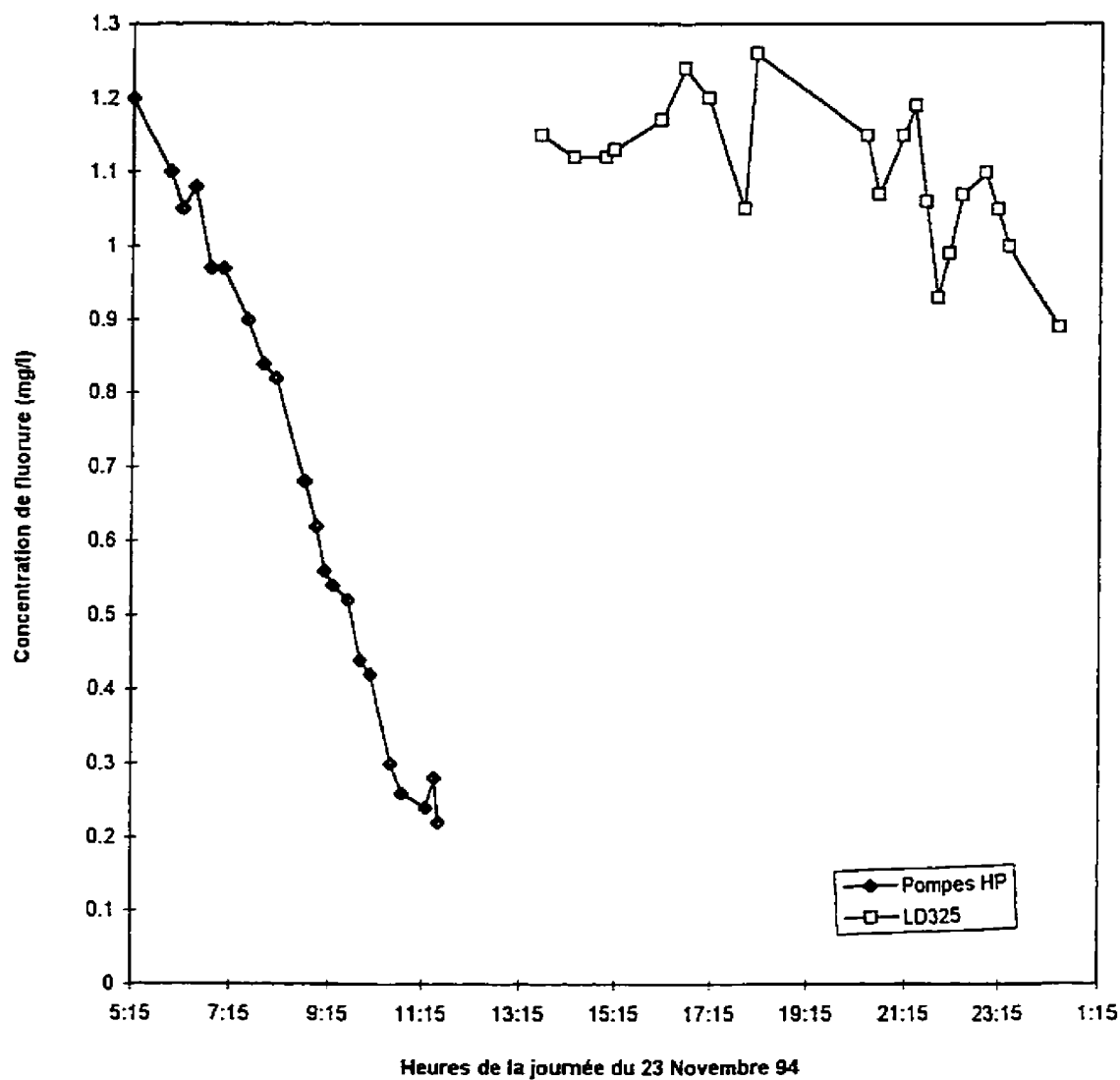
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage AL429



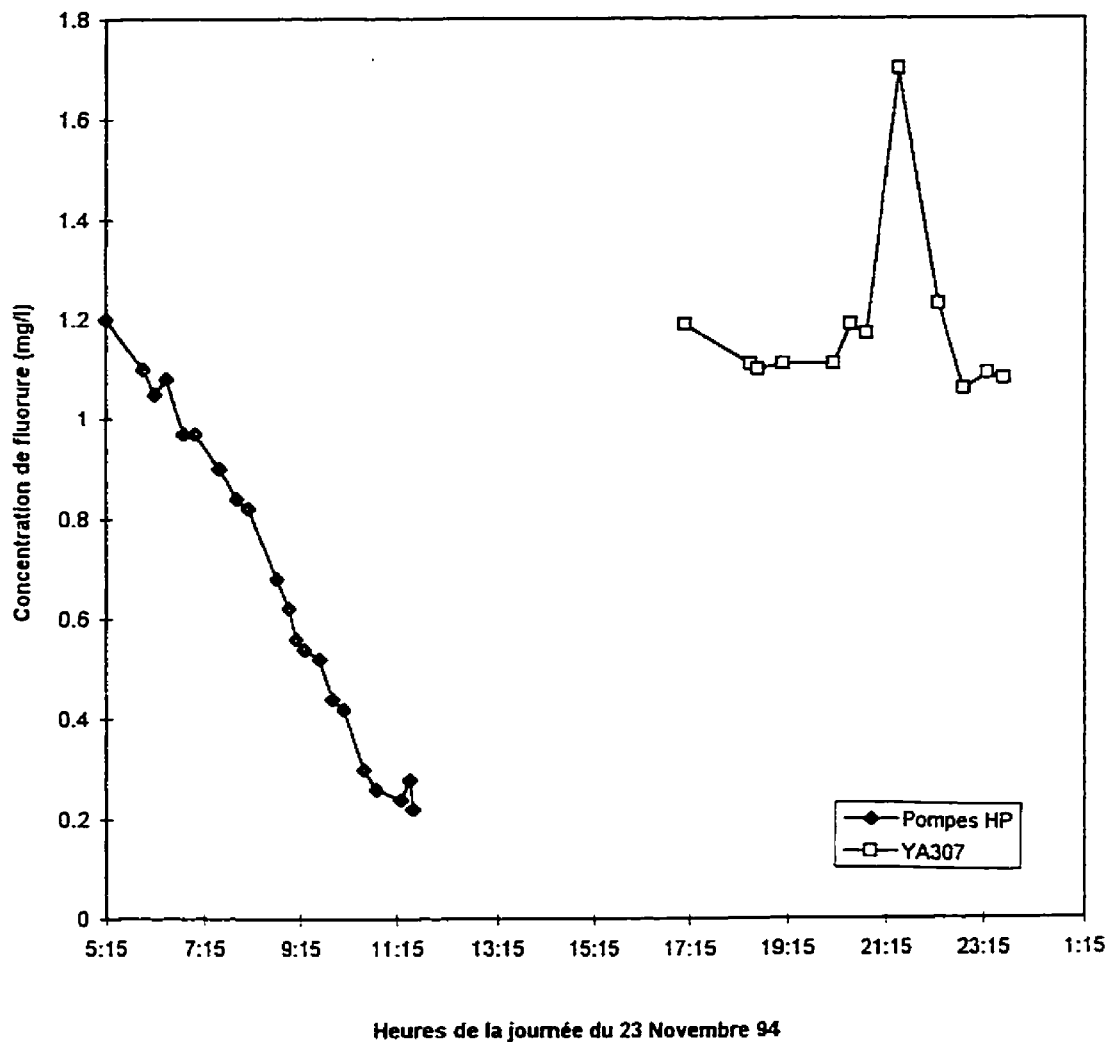




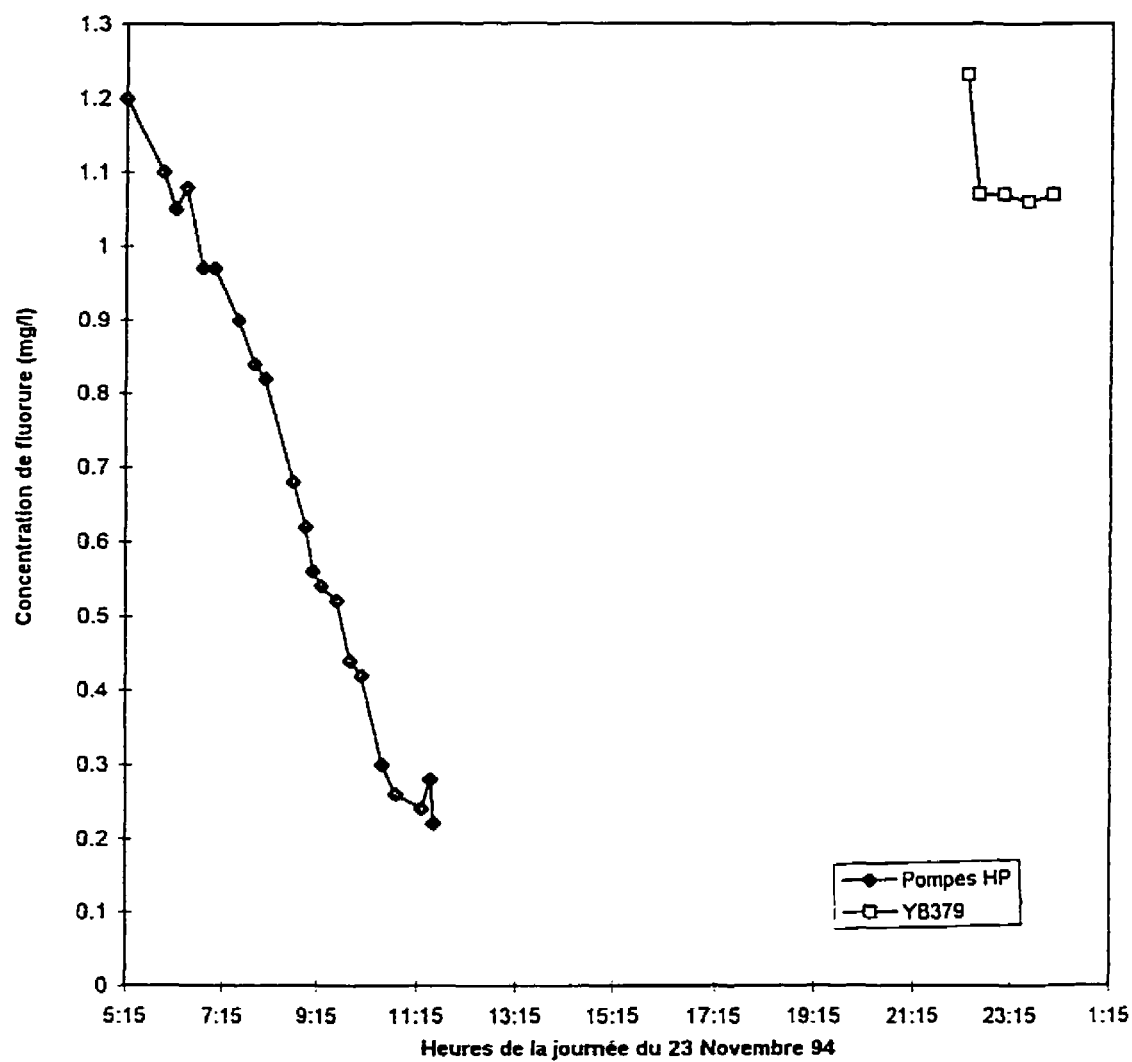
Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage LD325



Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage YA307

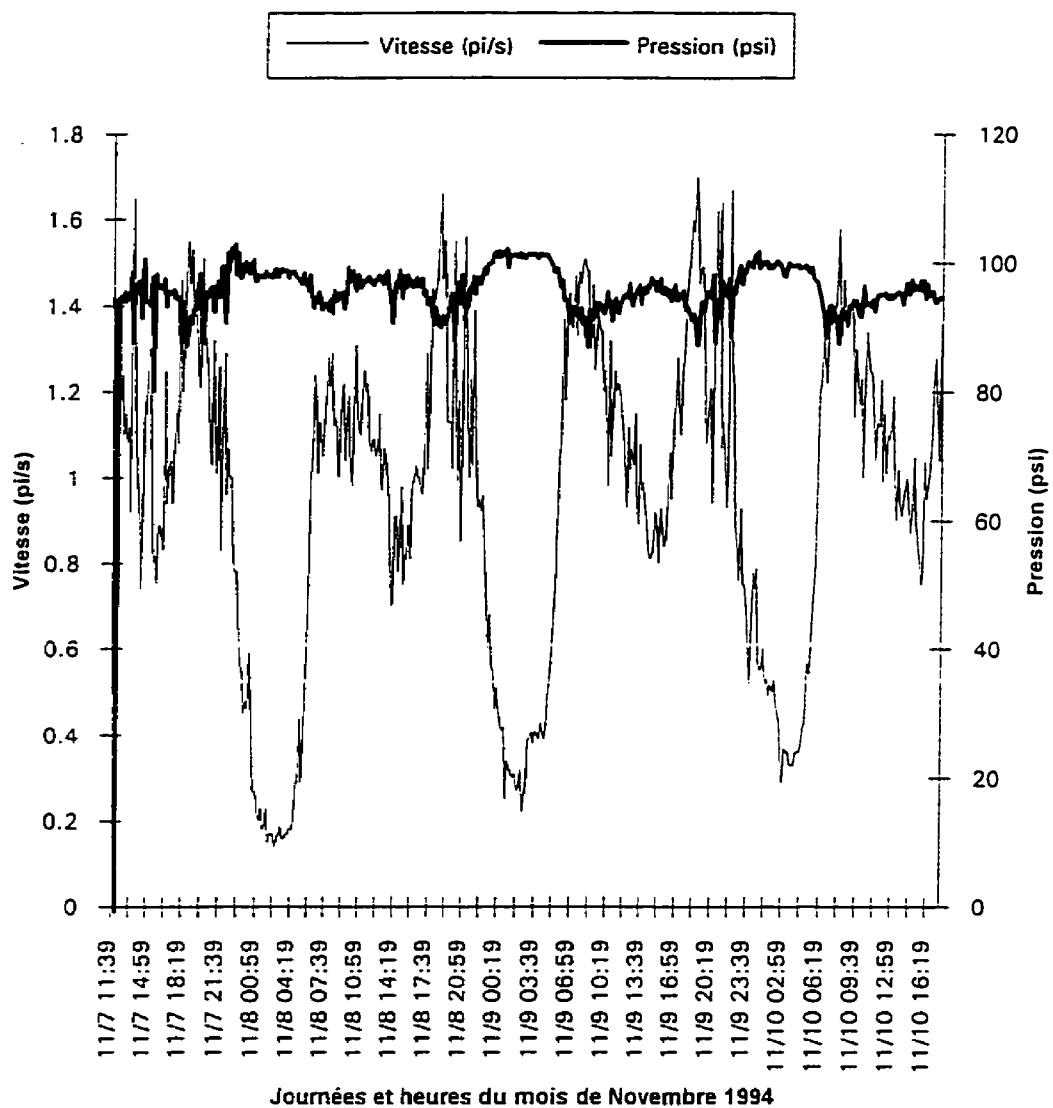


Concentration de fluor résiduel Vs le temps
au point d'échantillonnage YB379

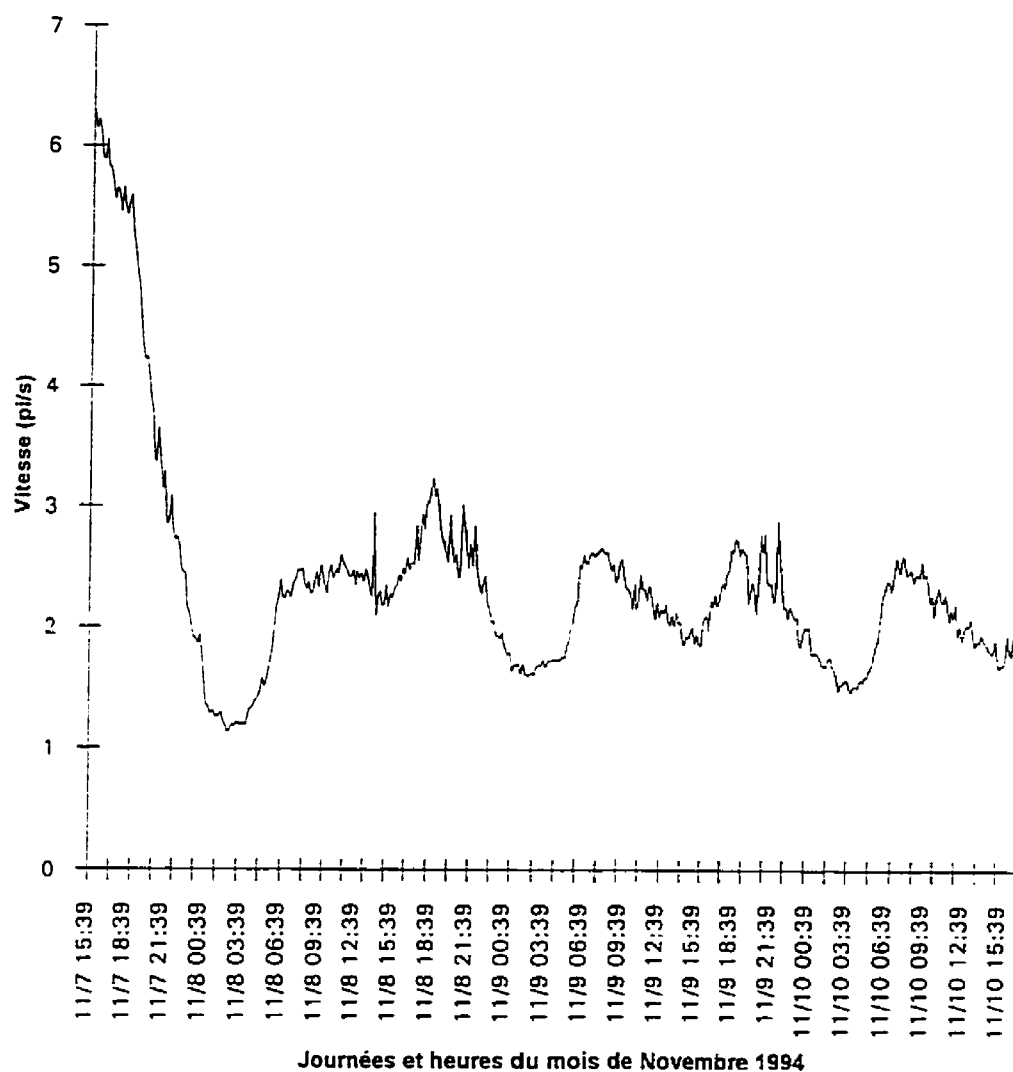


ANNEXE F**Profils de vitesse et de pression trois réseaux**

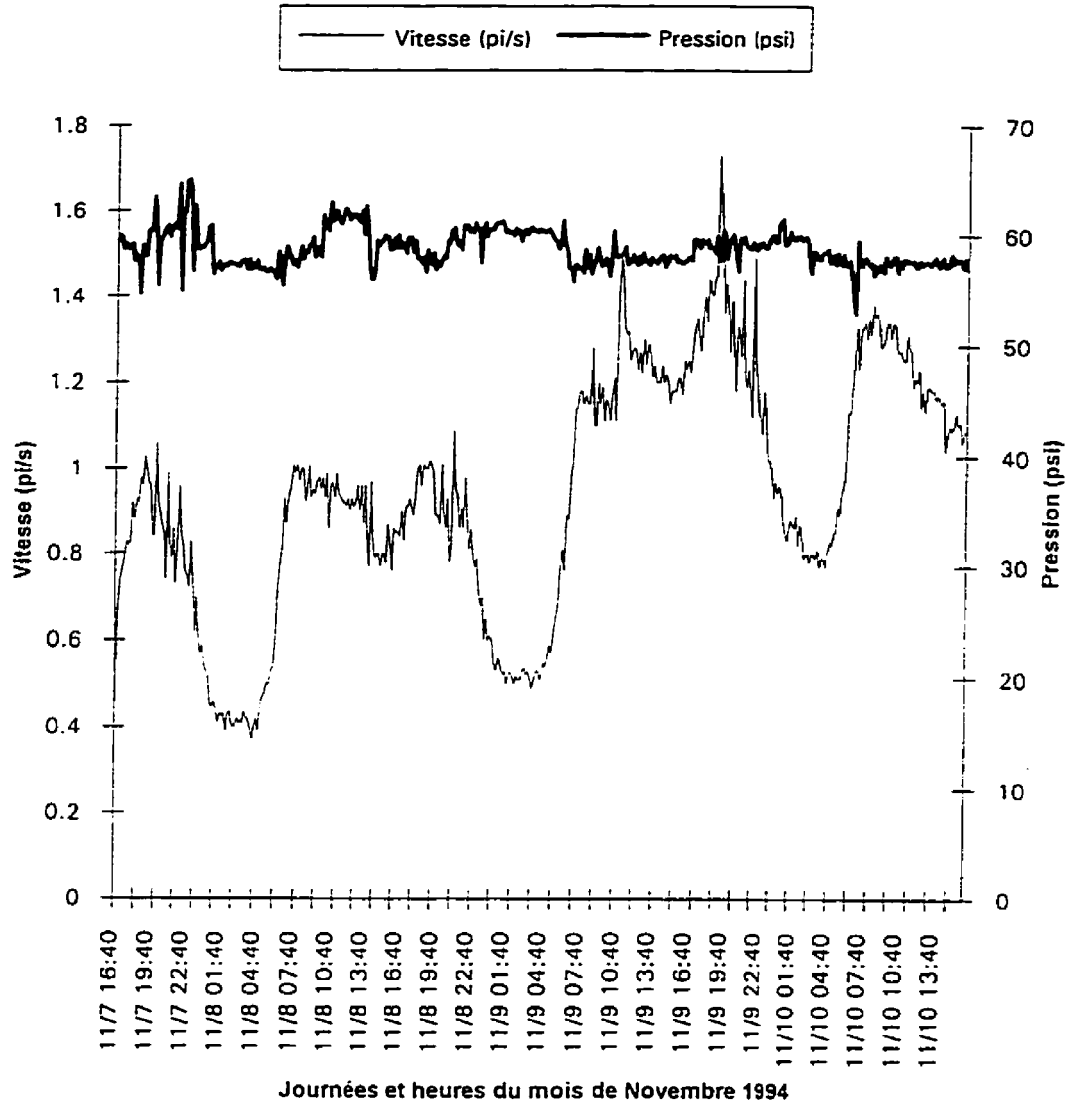
Réseau PONT-VIAU
Point PELICAN
Vitesse et Pression
Novembre 1994



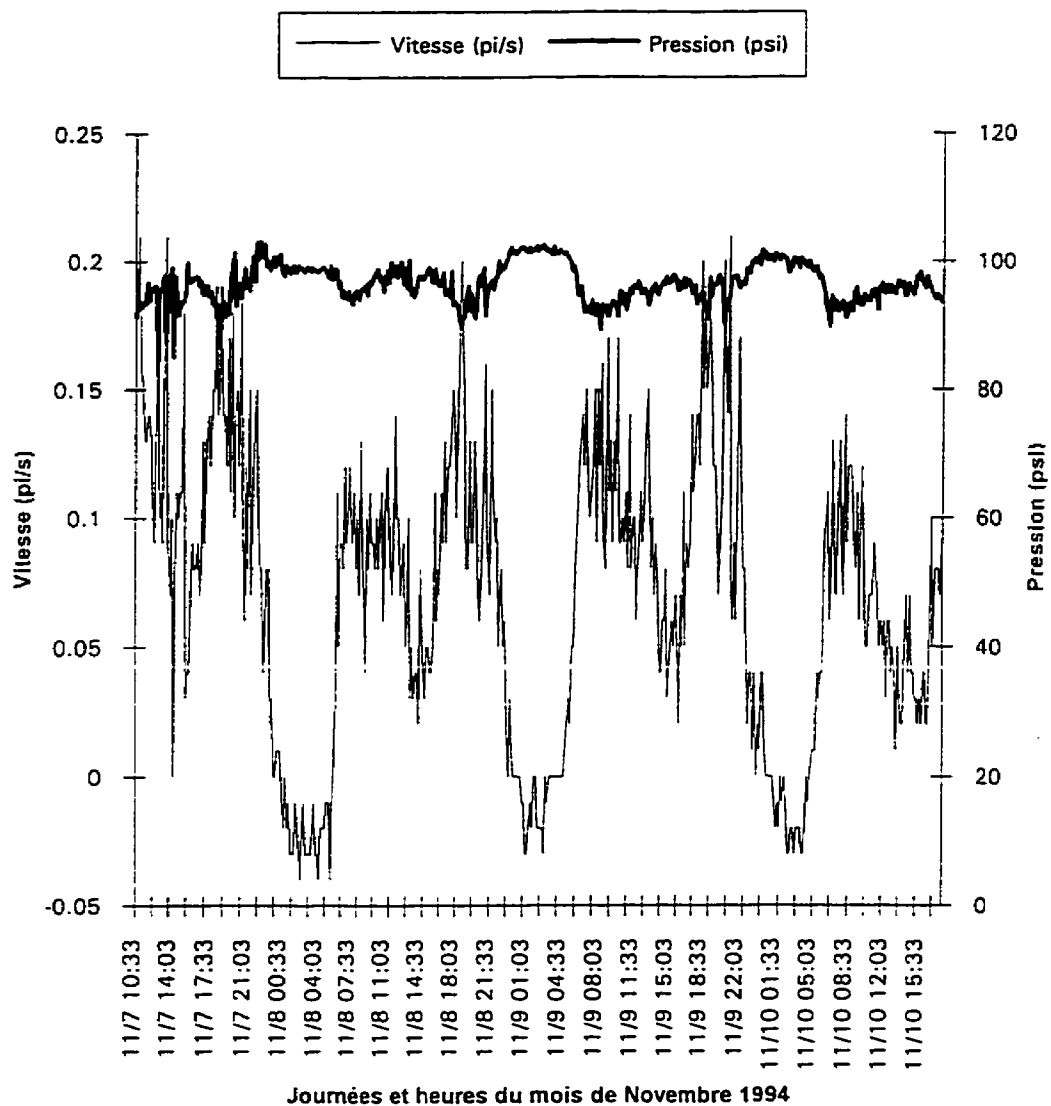
**Réseau PONT-VIAU
Point PENITENCIER
Vitesse en conduite
Novembre 1994**



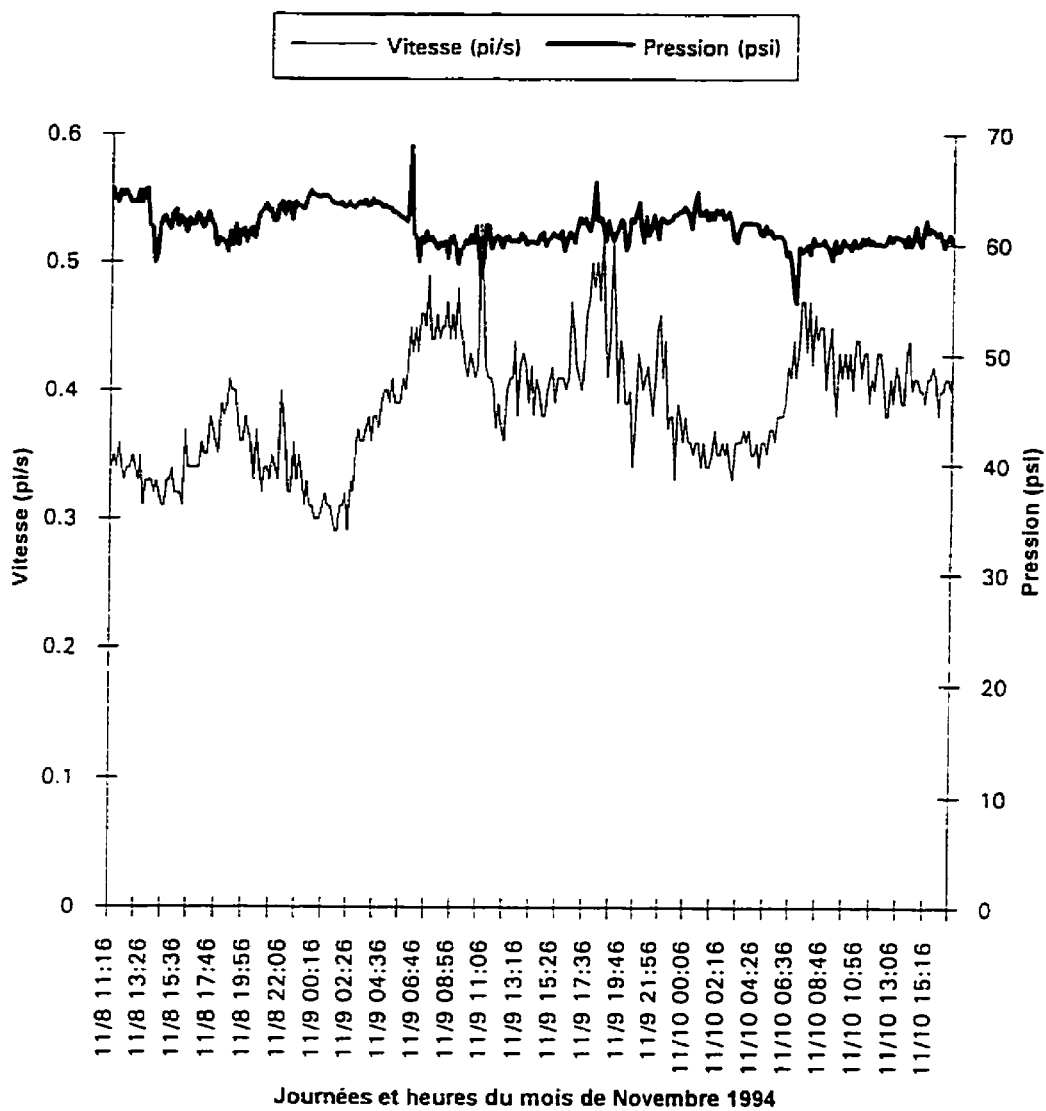
Réseau PONT-VIAU
Point L'ASSOMPTION
Vitesse et Pression
Novembre 1994



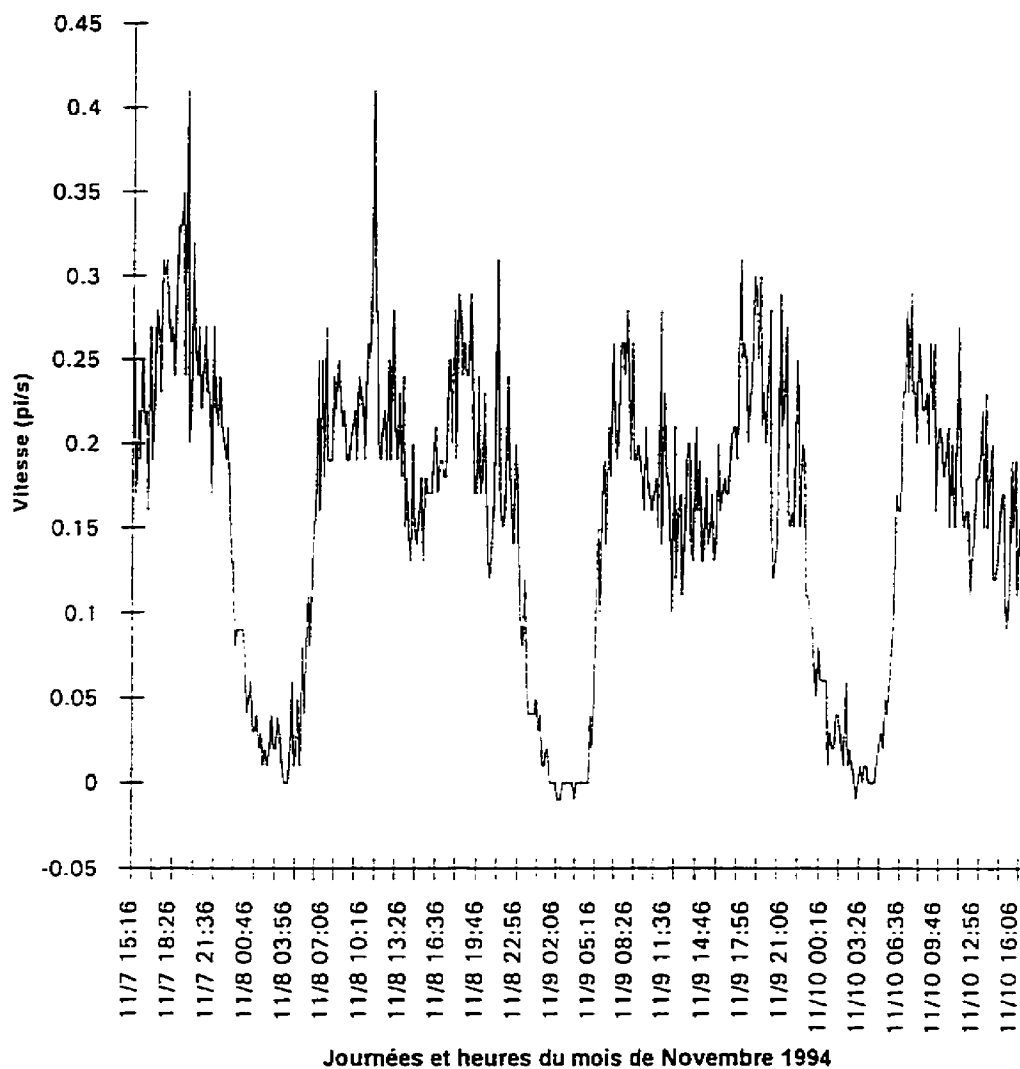
Réseau PONT-VIAU
Point KUGLER
Vitesse et Pression
Novembre 1994



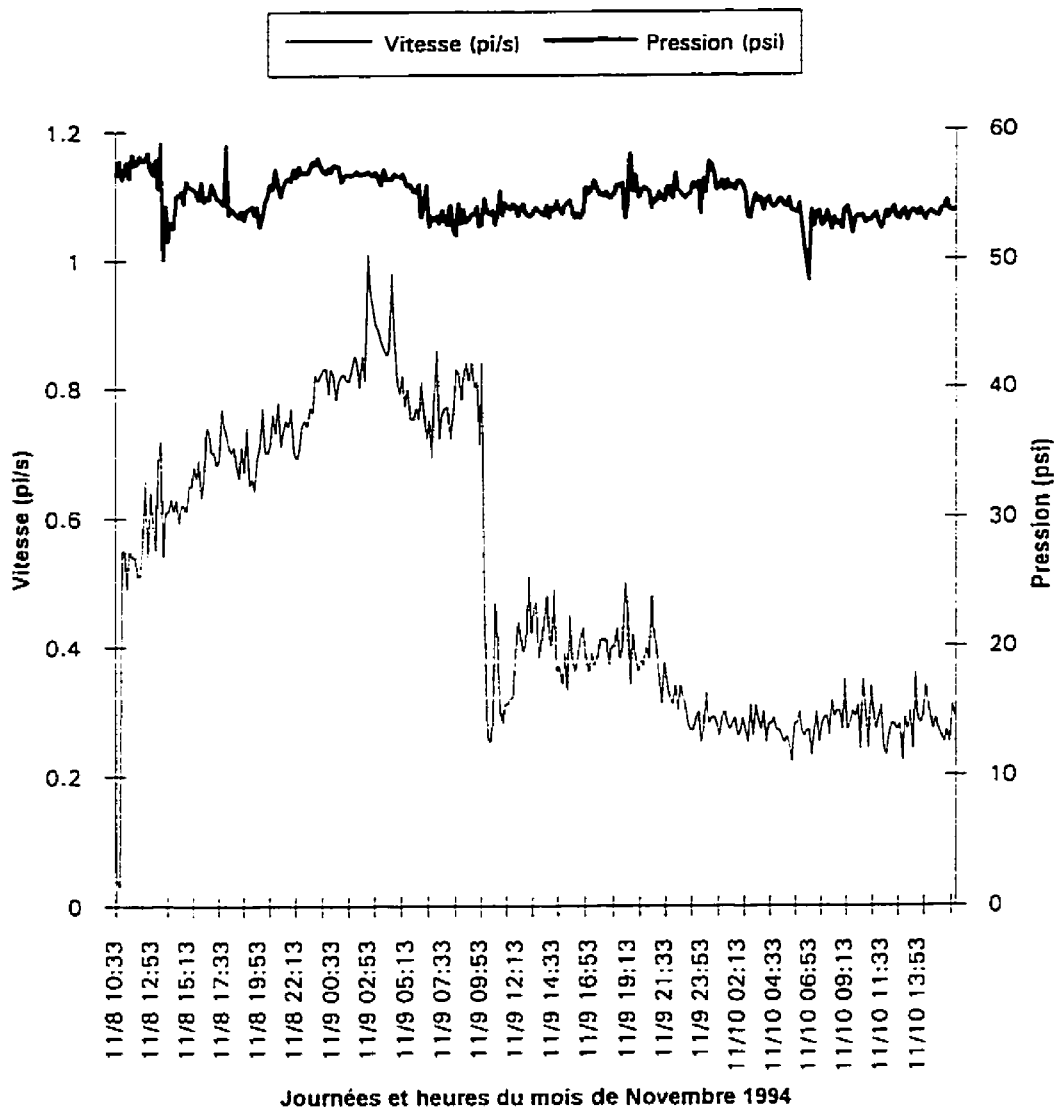
Réseau PONT-VIAU
Point ILE MALIGNE
Vitesse et Pression
Novembre 1994



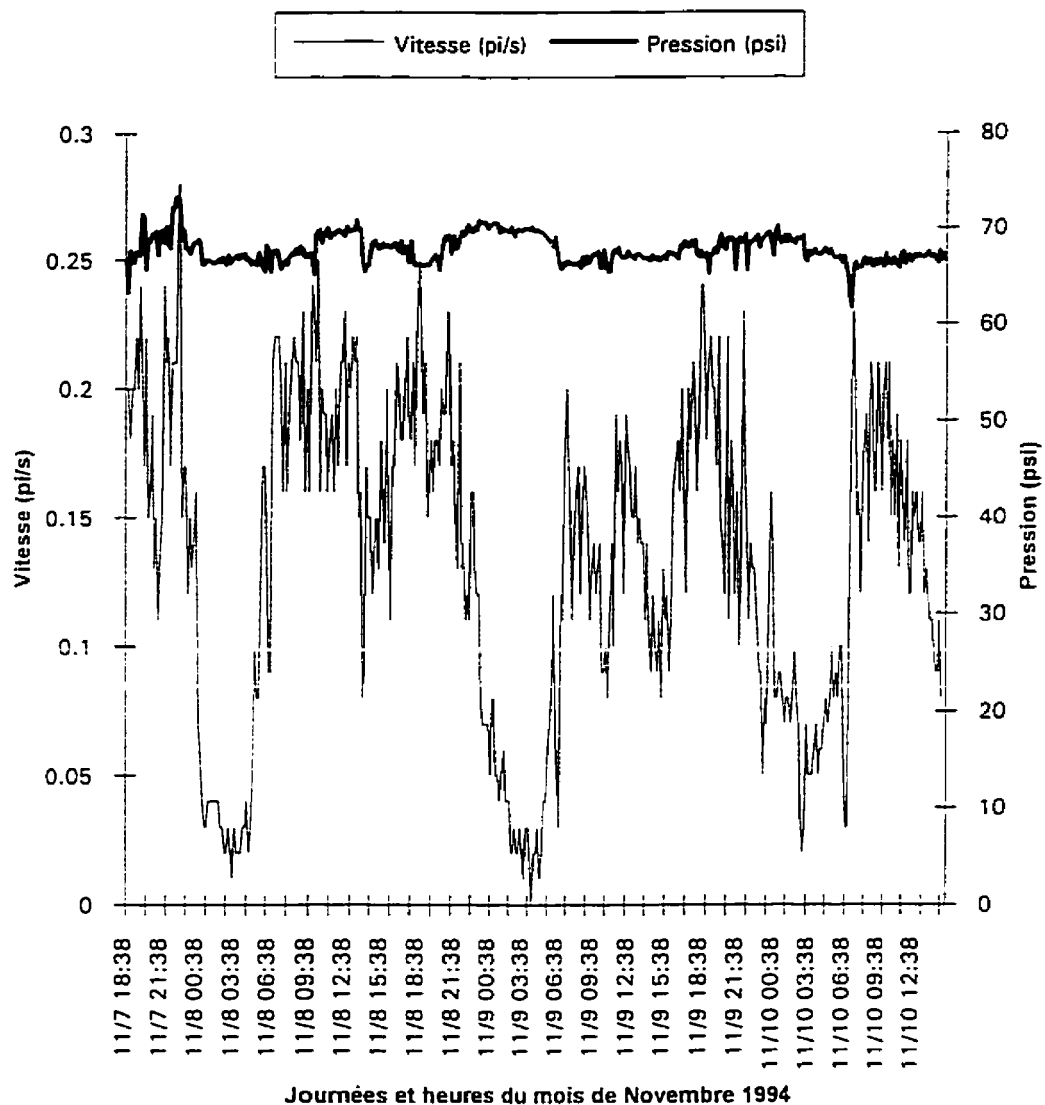
Réseau PONT-VIAU
Point ST-HENRI
Vitesse en conduite
Novembre 1994



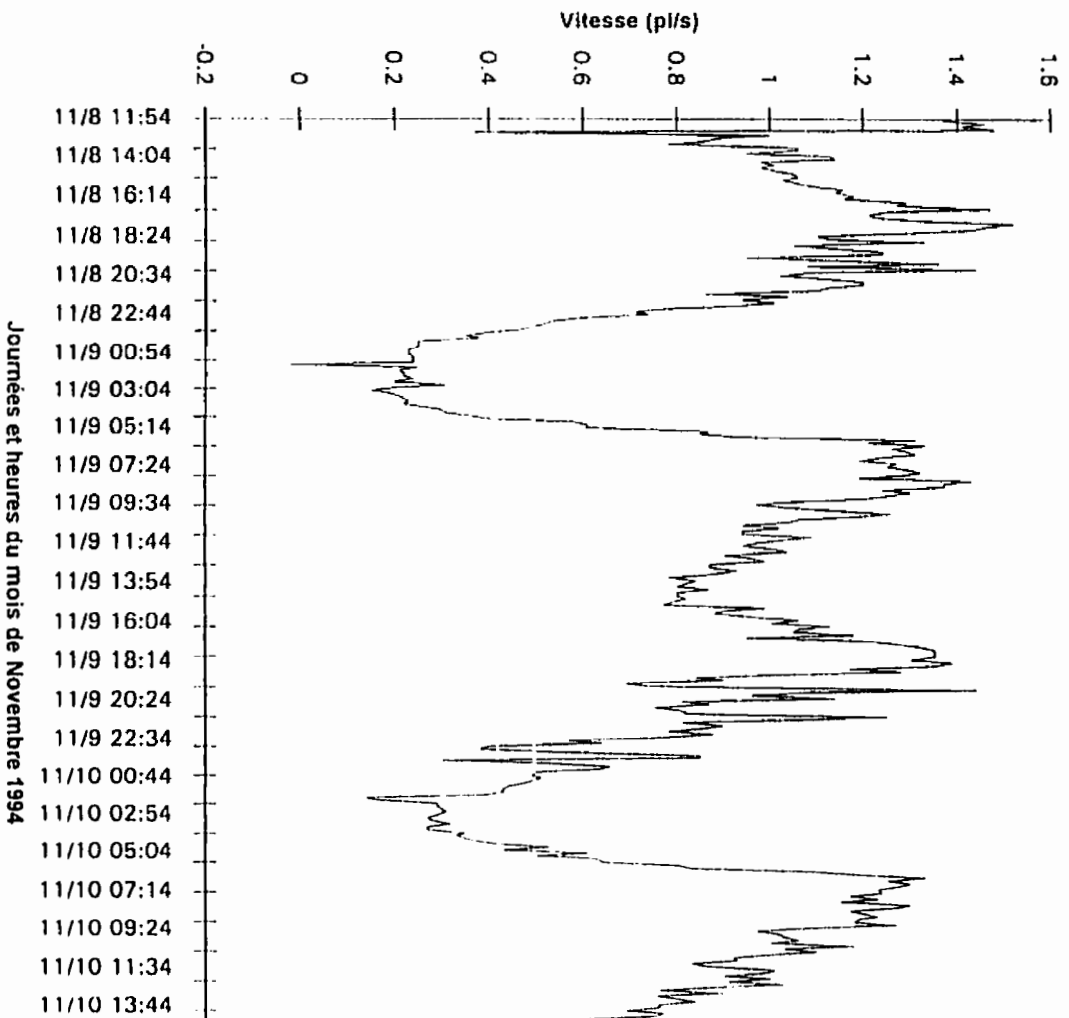
Réseau PONT-VIAU
Point LUZERNE
Vitesse et Pression
Novembre 1994



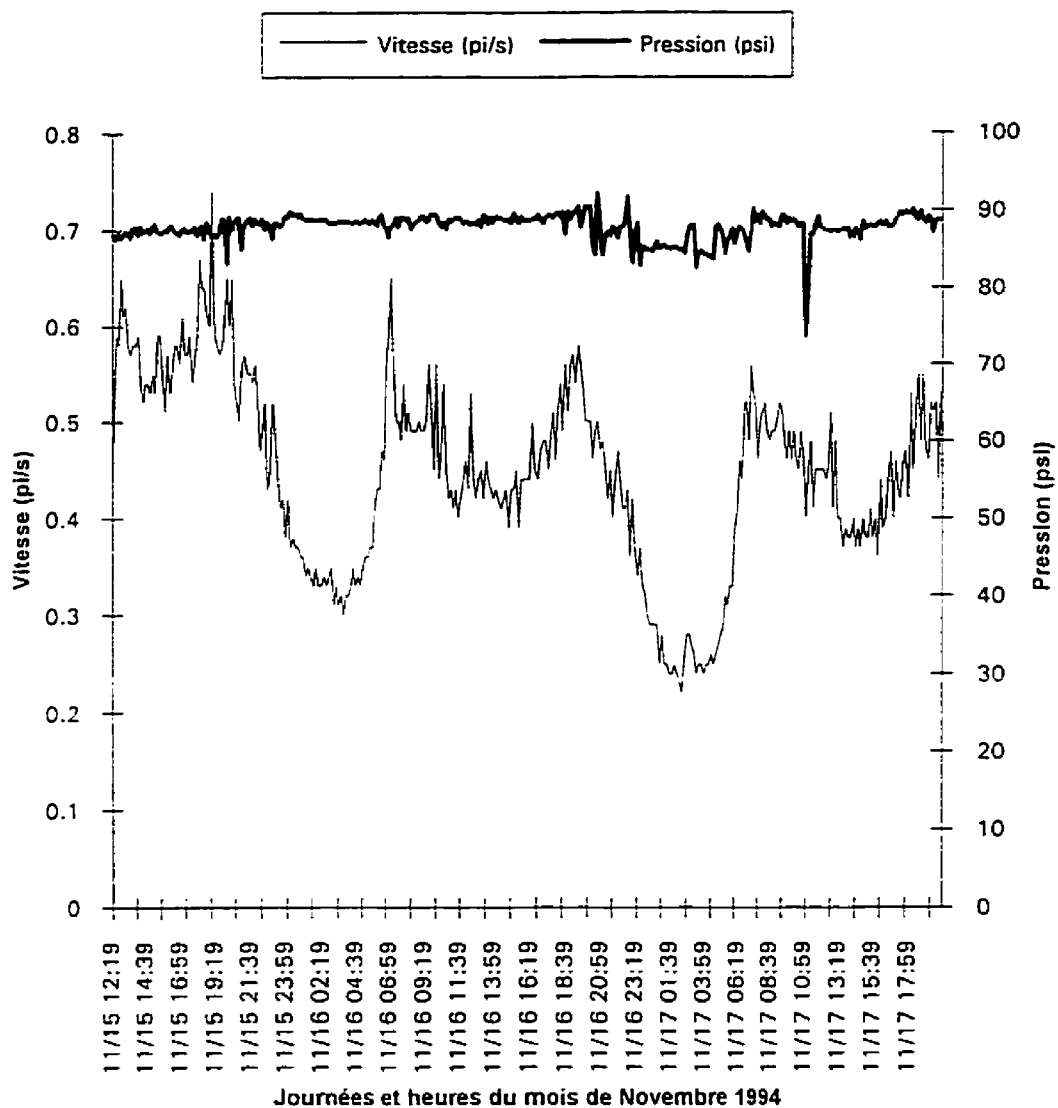
Réseau PONT-VIAU
Point 8ième AVENUE
Vitesse et Pression
Novembre 1994



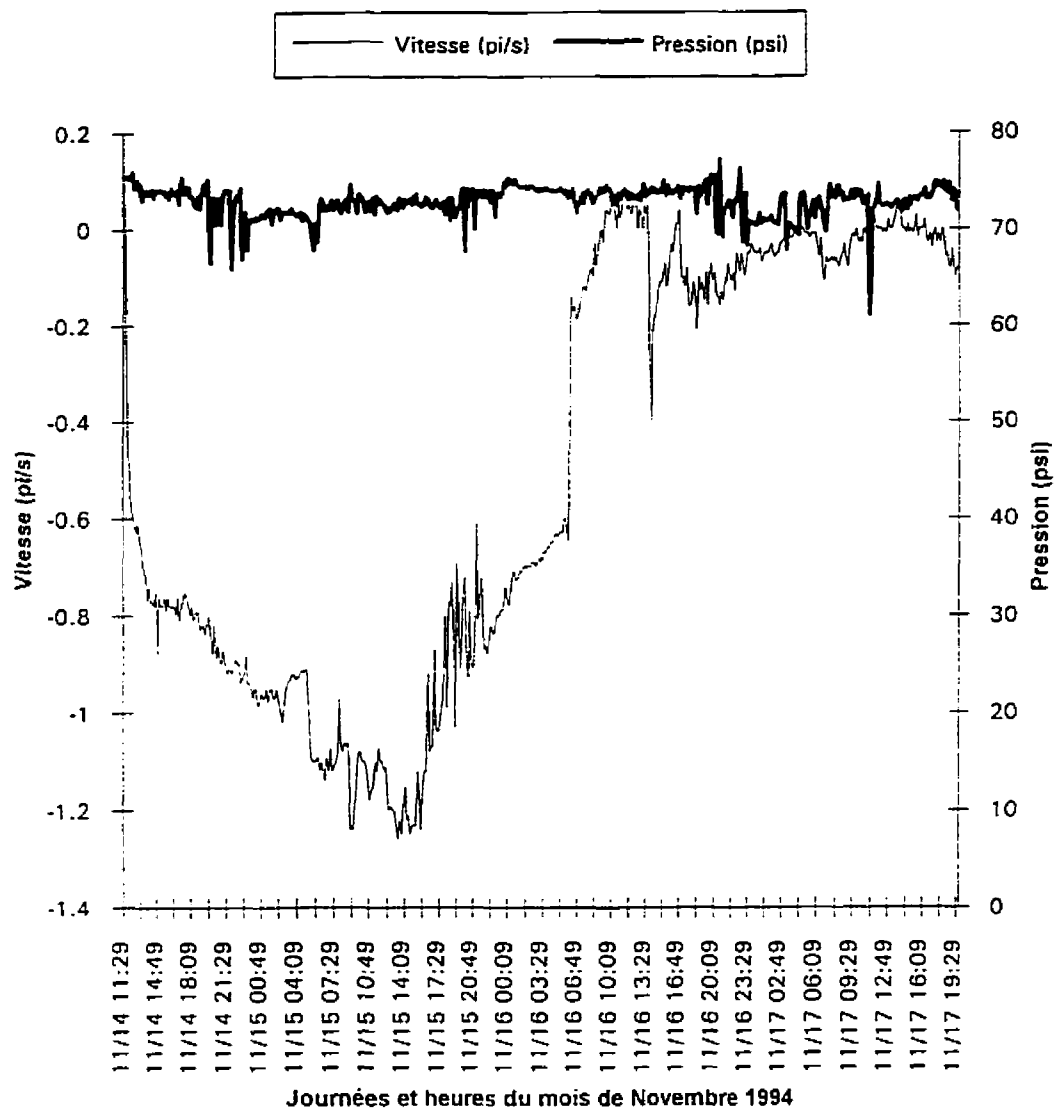
Réseau PONT-VIAU
Point DEROME
Vitesse en conduite
Novembre 1994



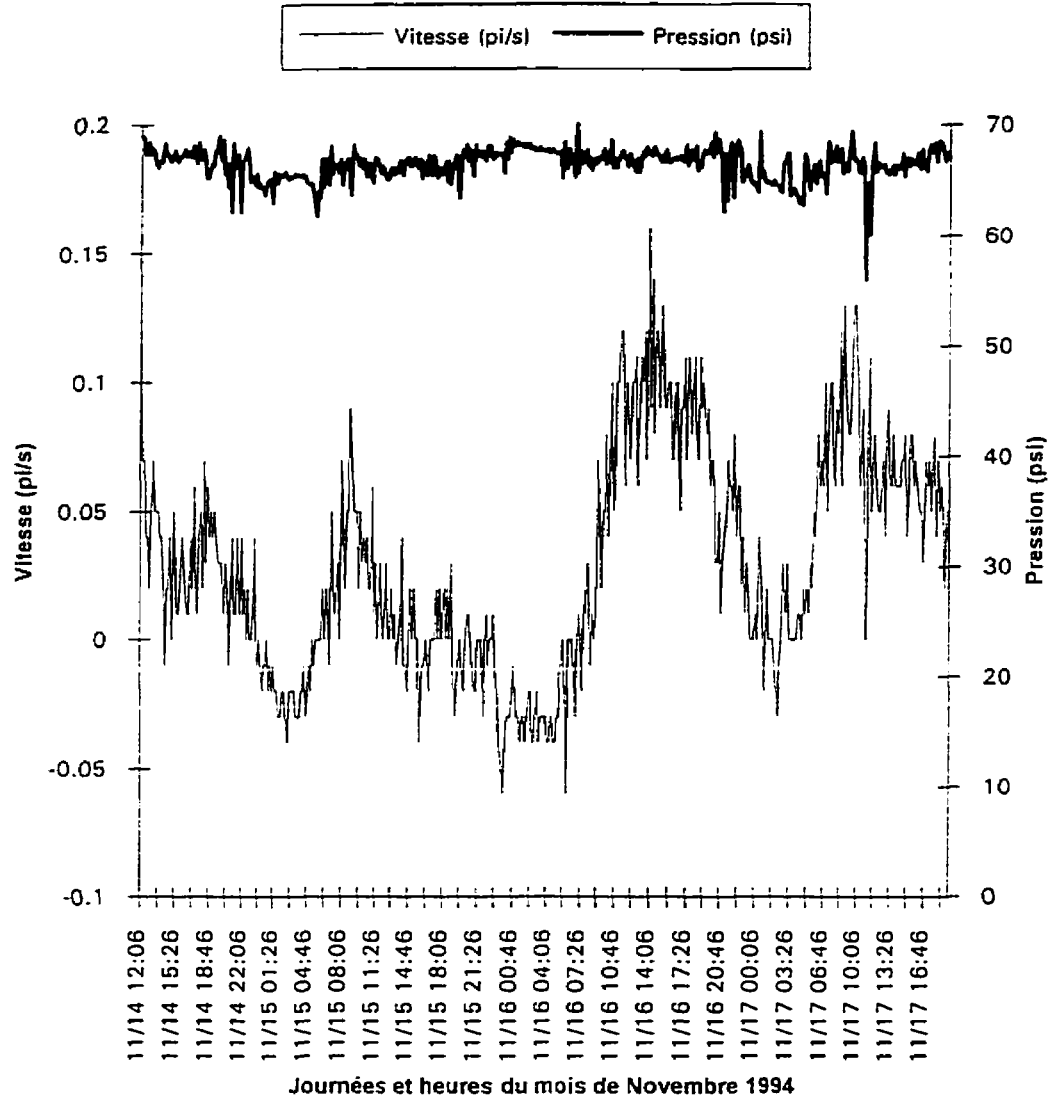
Réseau CHOMEDEY
Point 85ième AVENUE
Vitesse et Pression
Novembre 1994

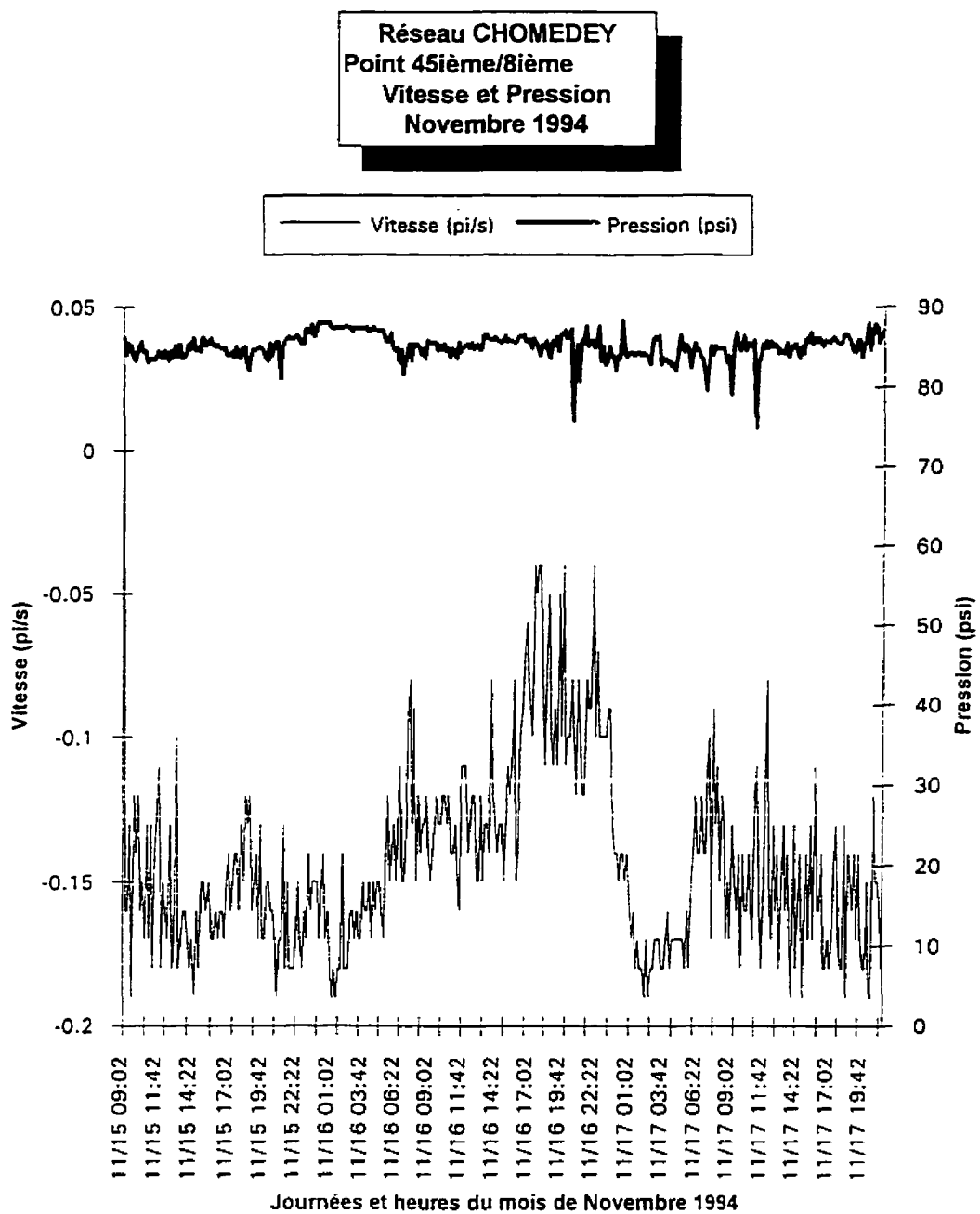


Réseau CHOMEDEY
Point BARBE
Vitesse et Pression
Novembre 1994

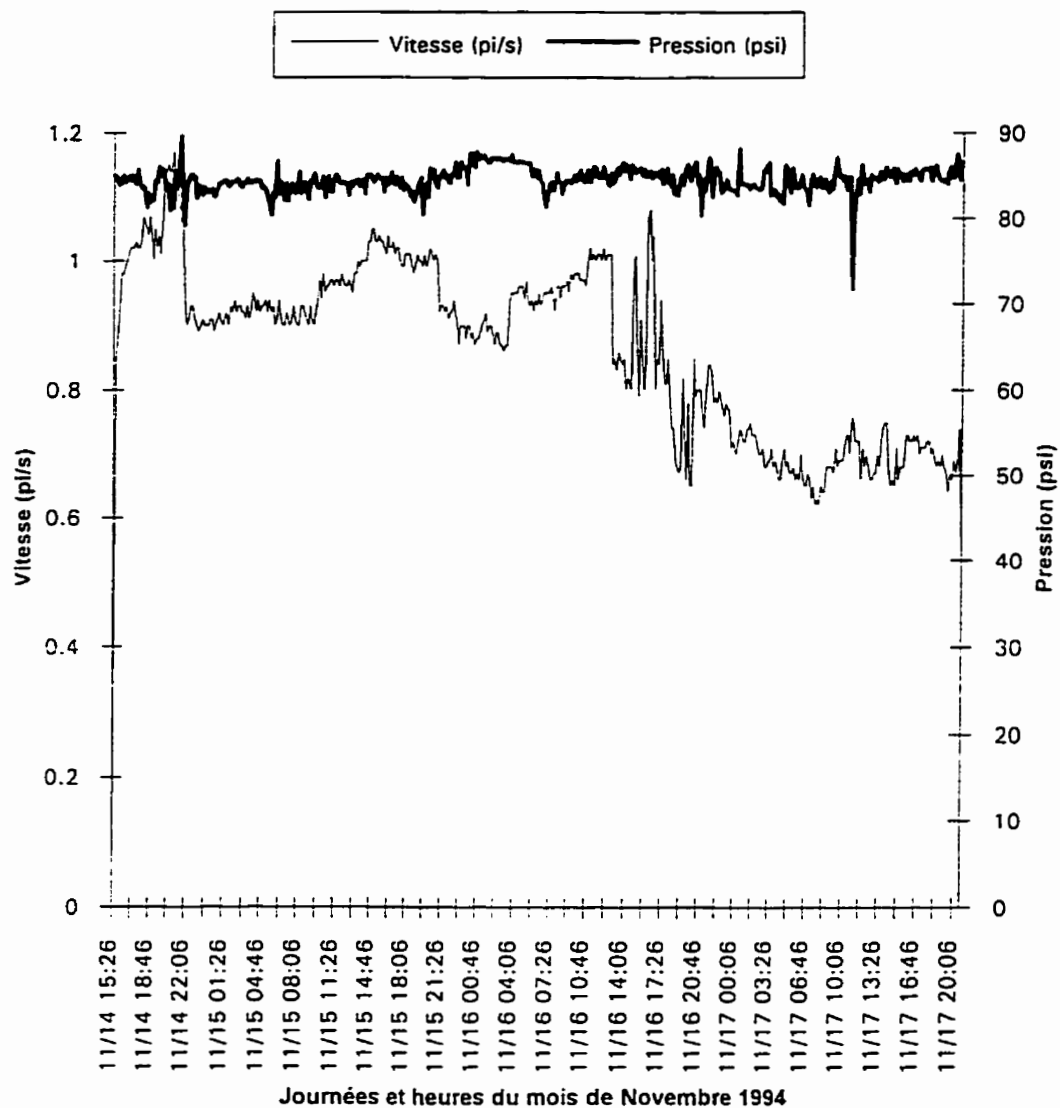


Réseau CHOMEDEY
Point LAPALME
Vitesse et Pression
Novembre 1994

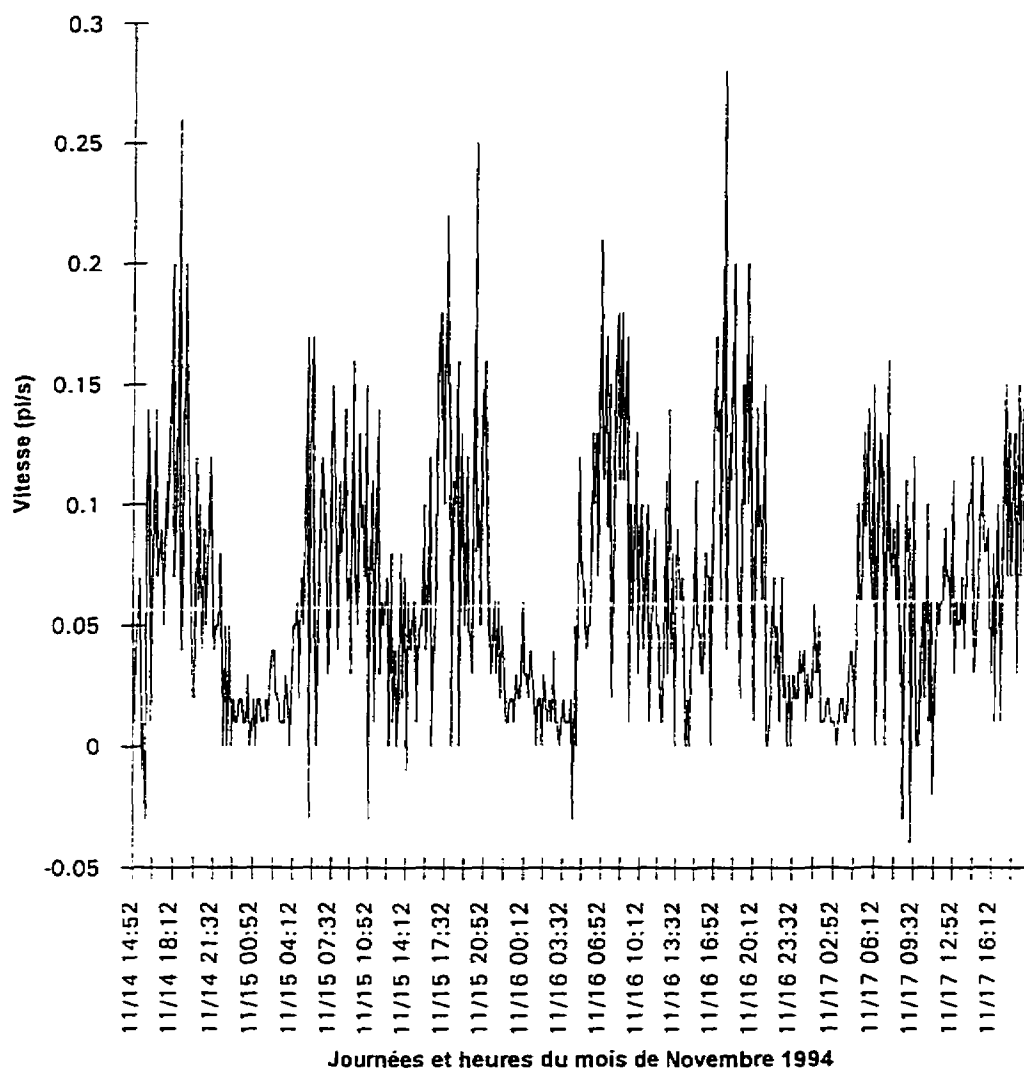




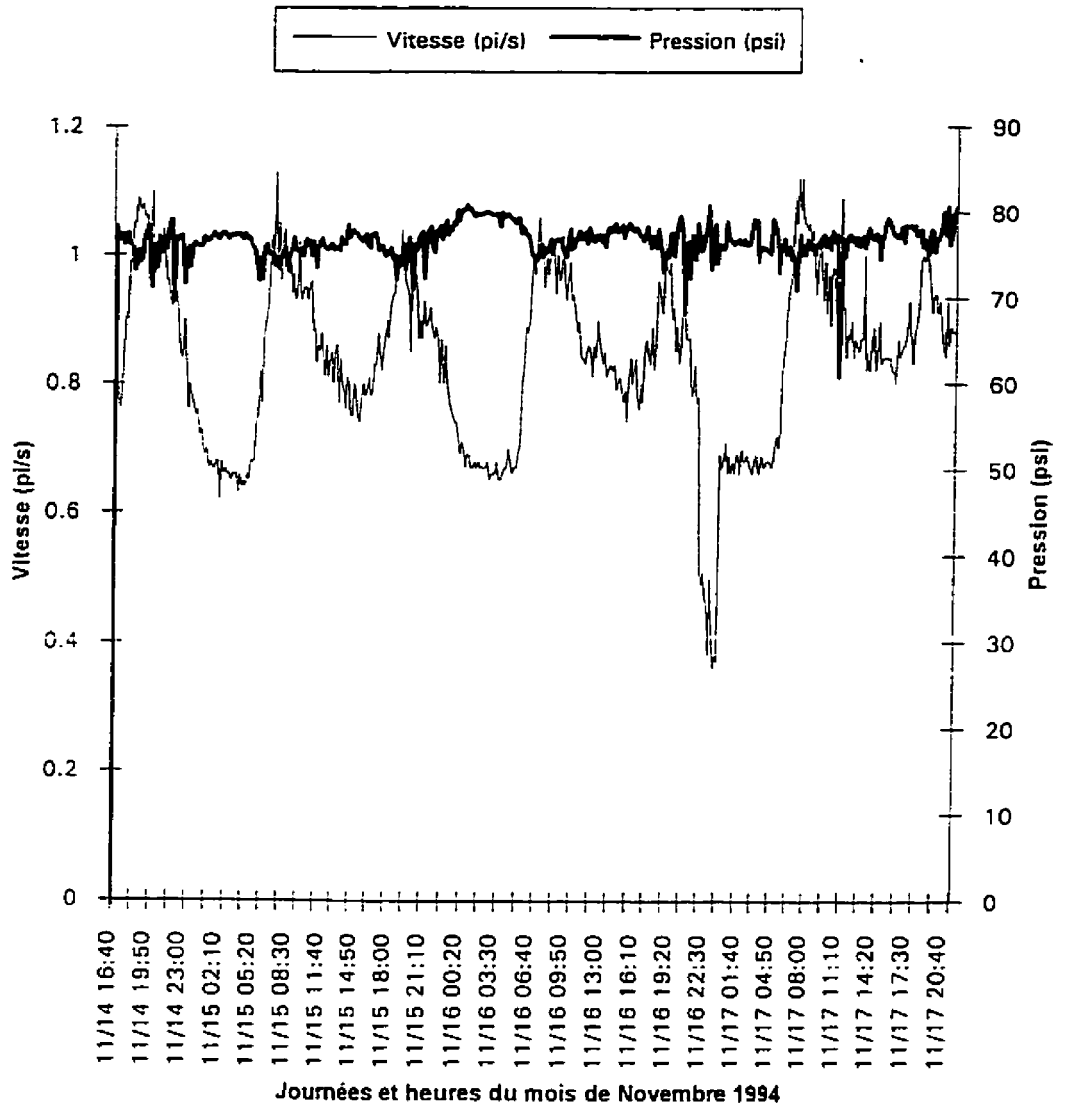
**Réseau CHOMEDEY
Point NINA/MARCEL
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



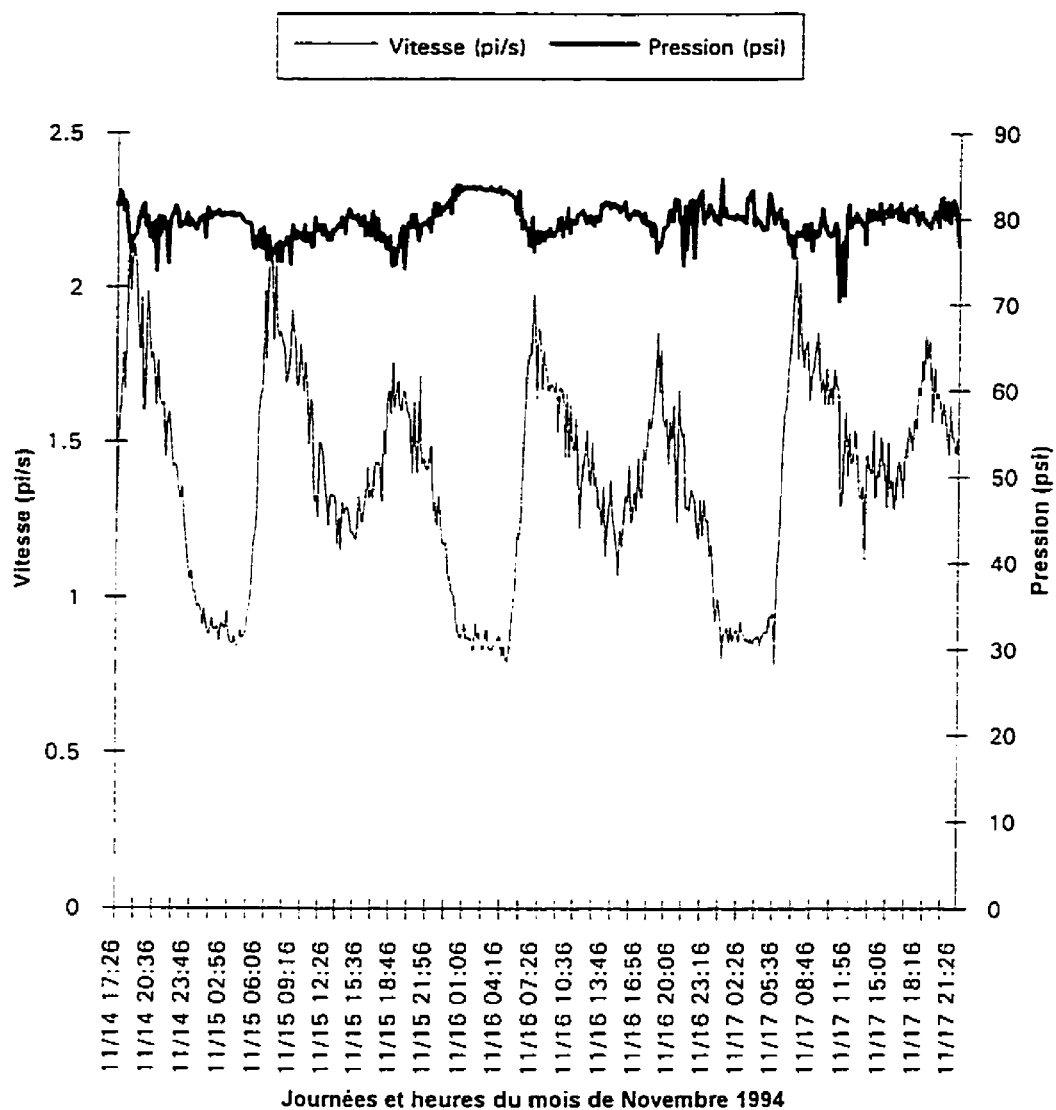
Réseau CHOMEDEY
Point NATHALIE/MURIELLE
Vitesse en conduite
Novembre 1994



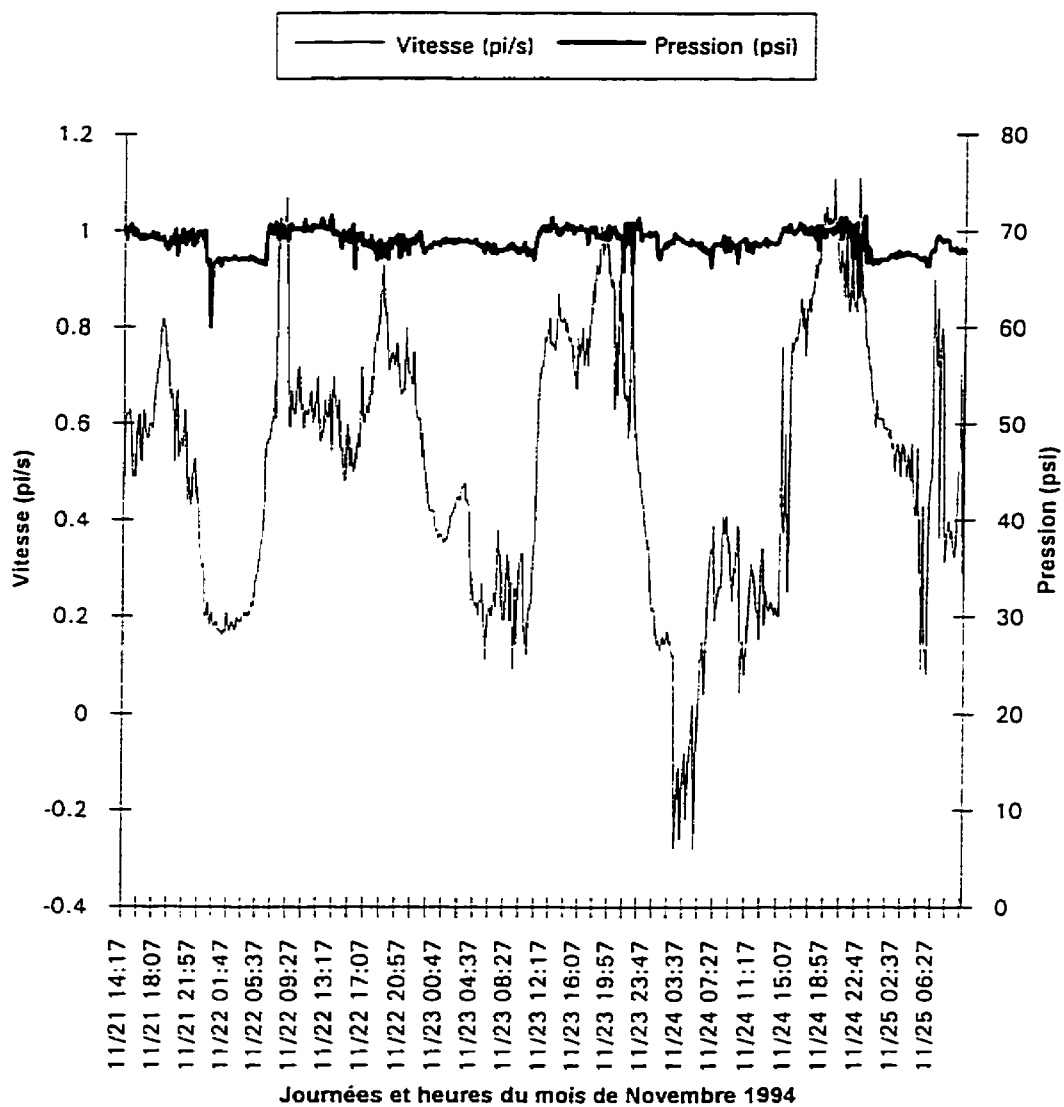
**Réseau CHOMEDEY
Point STE-ROSE/11ième AVENUE
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



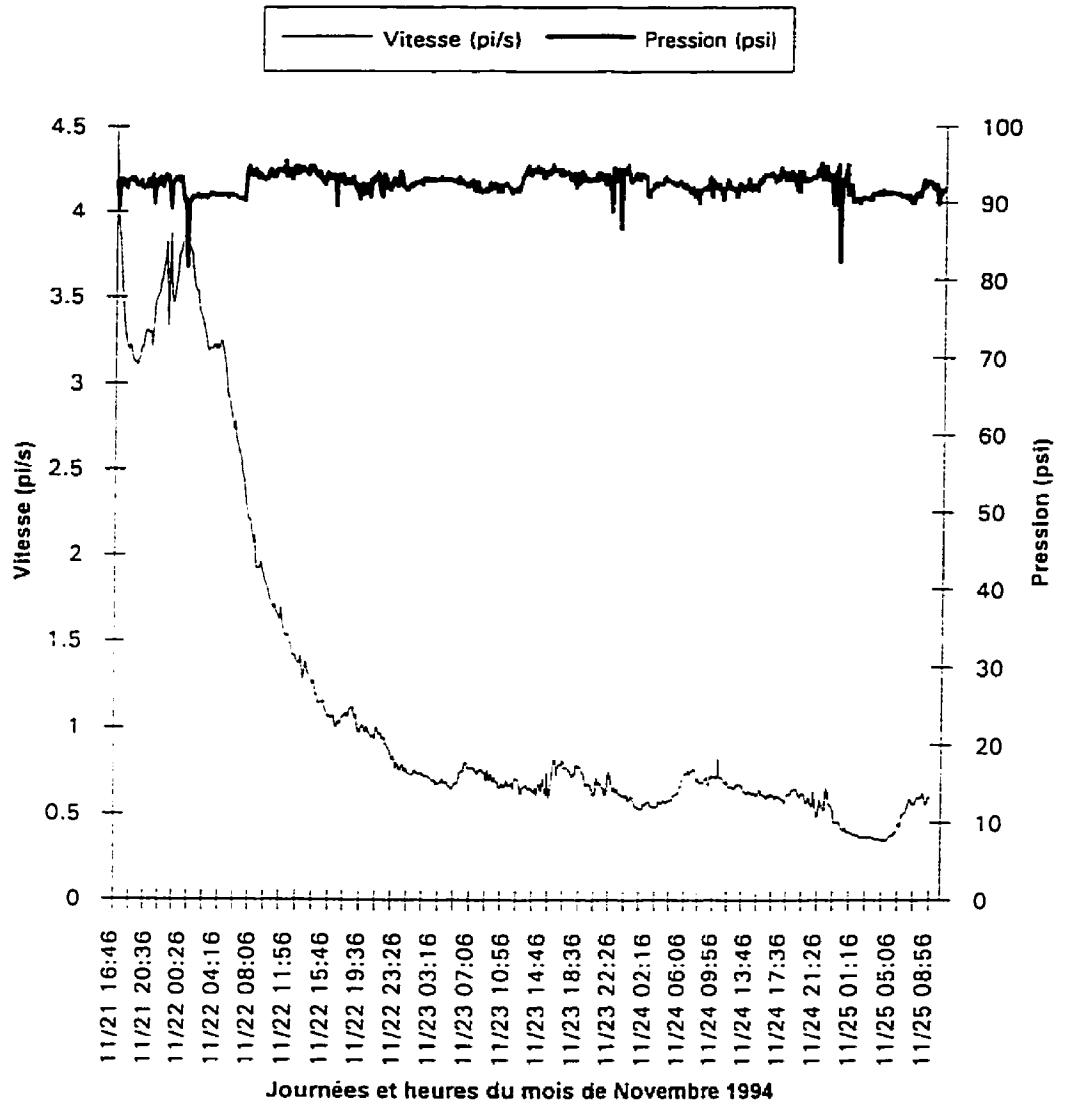
**Réseau CHOMEDEY
Point 1^{ère} AVENUE/STE-ROSE
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



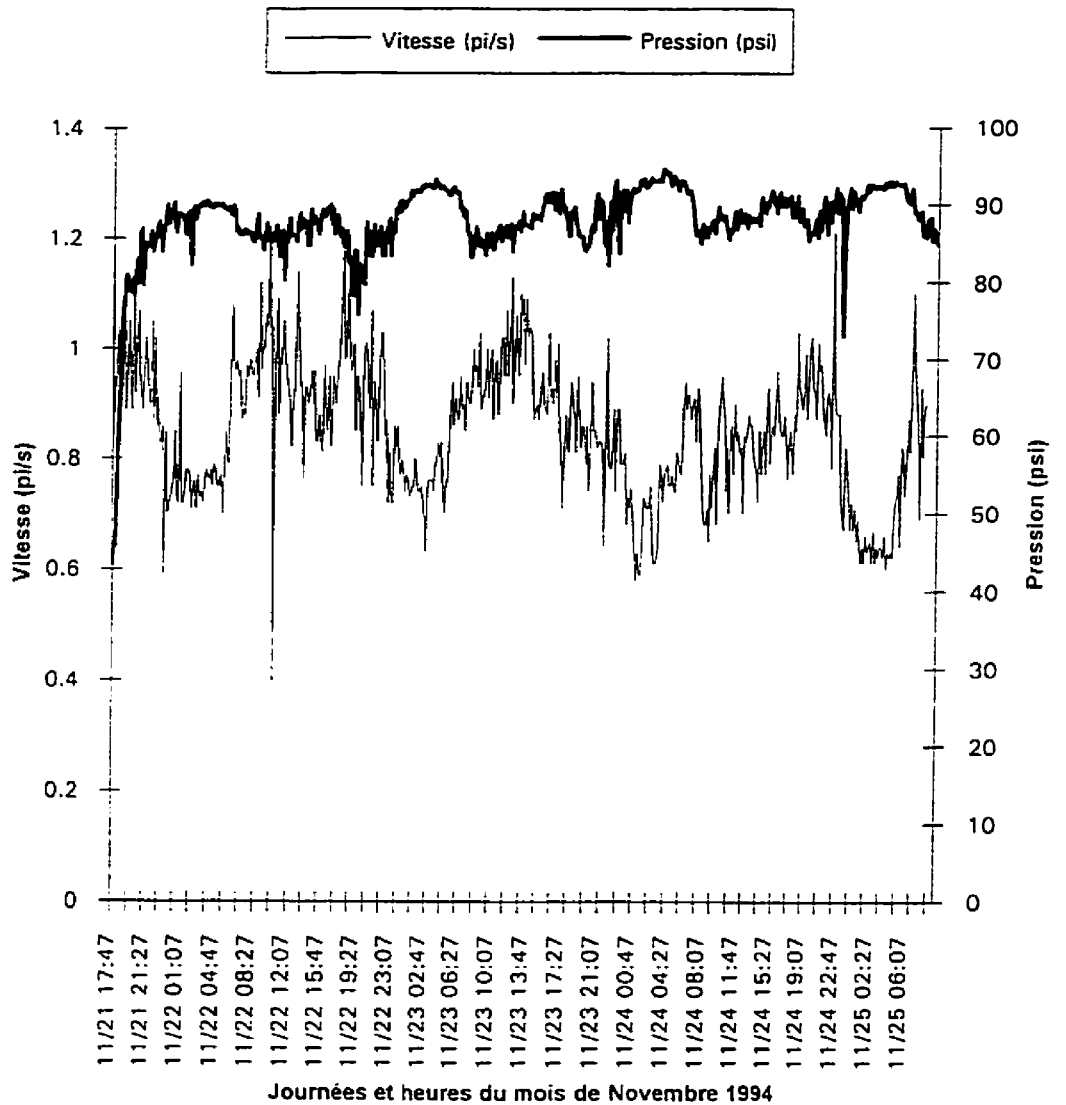
Réseau STE-ROSE
Point LAURENTIDES/SABOURIN
Vitesse et Pression
Novembre 1994



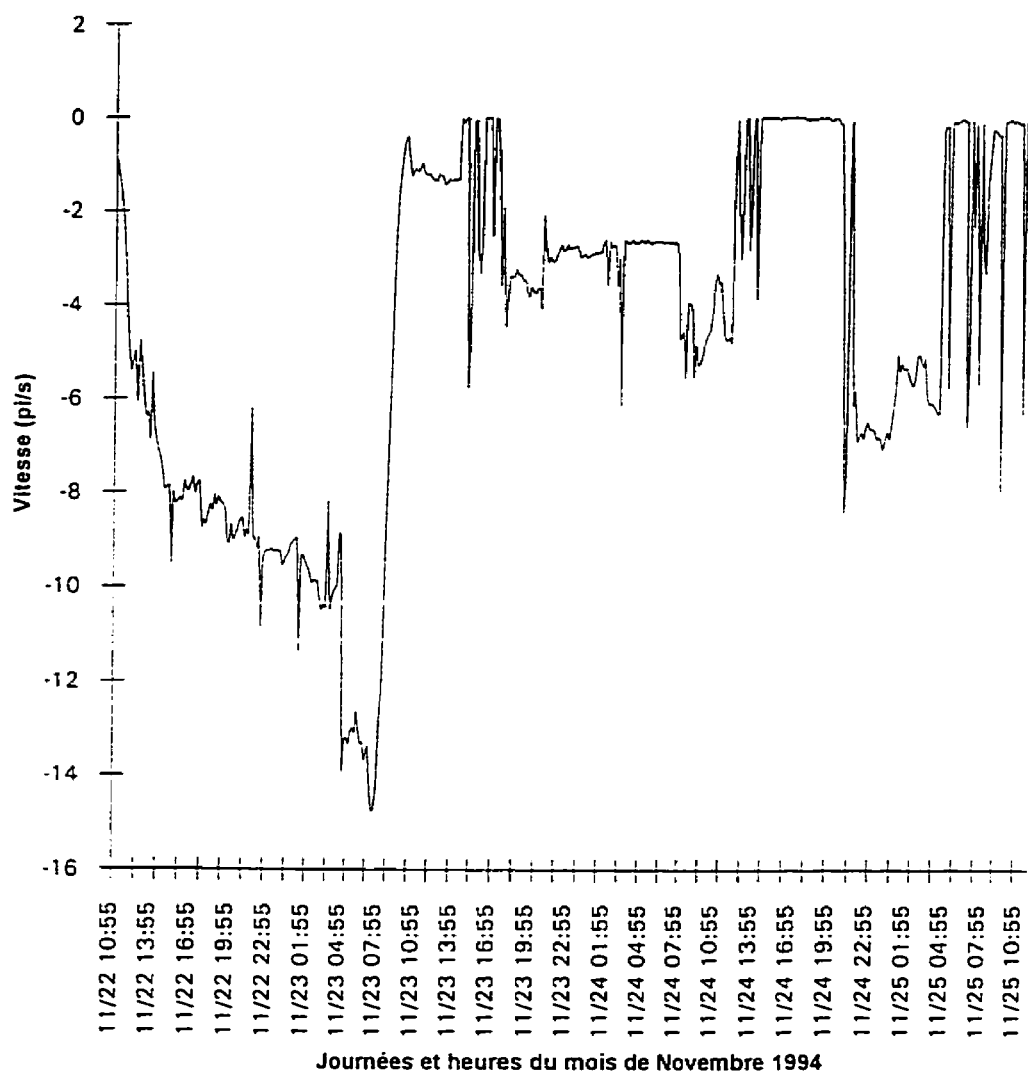
**Réseau STE-ROSE
Point CLUB DE GOLF
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



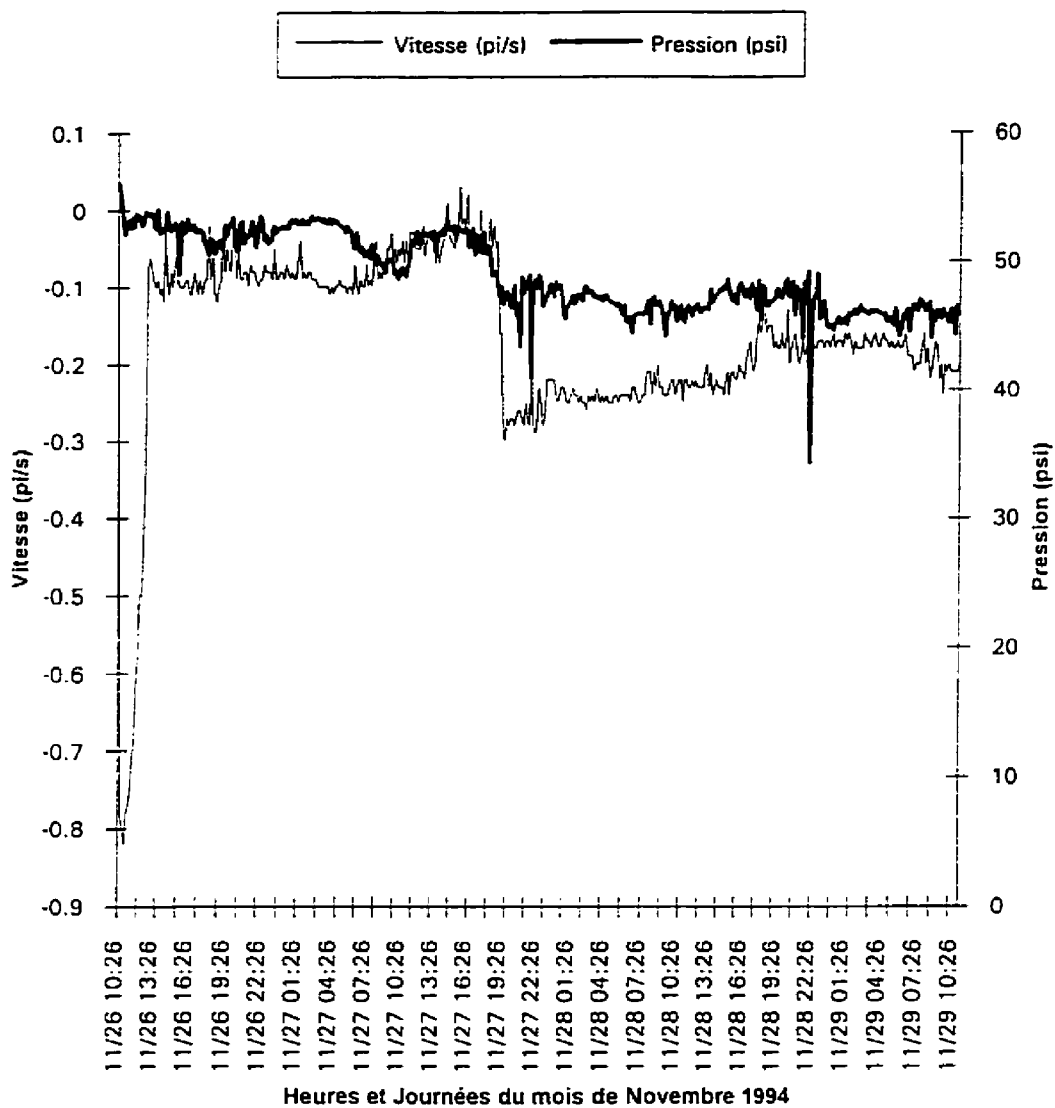
Réseau STE-ROSE
Point DURENLEAU/CAMBRAY
Vitesse et Pression
Novembre 1994



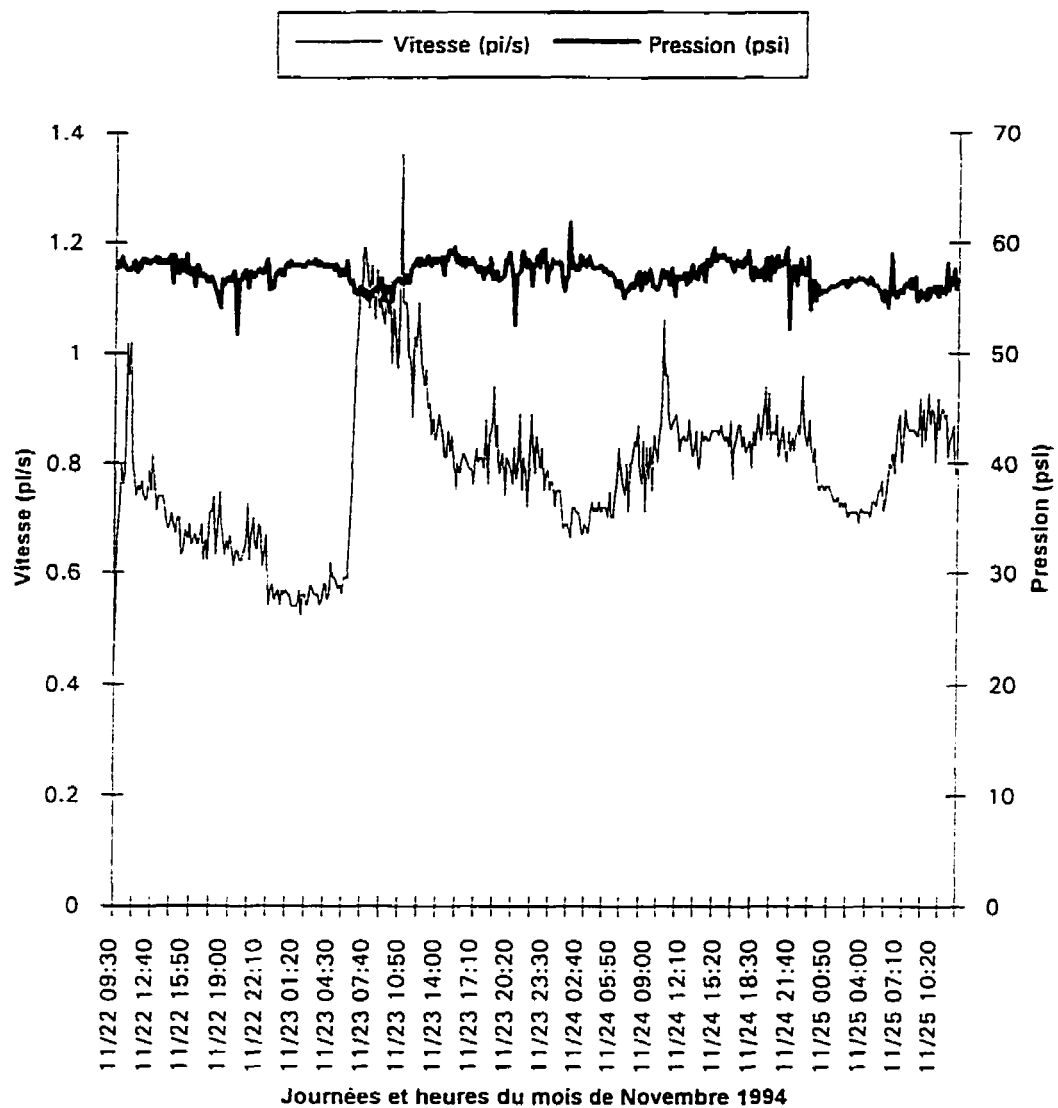
Réseau STE-ROSE
Point ROSEVAL/JE ME SOUVIENS
Vitesse en conduite
Novembre 1994



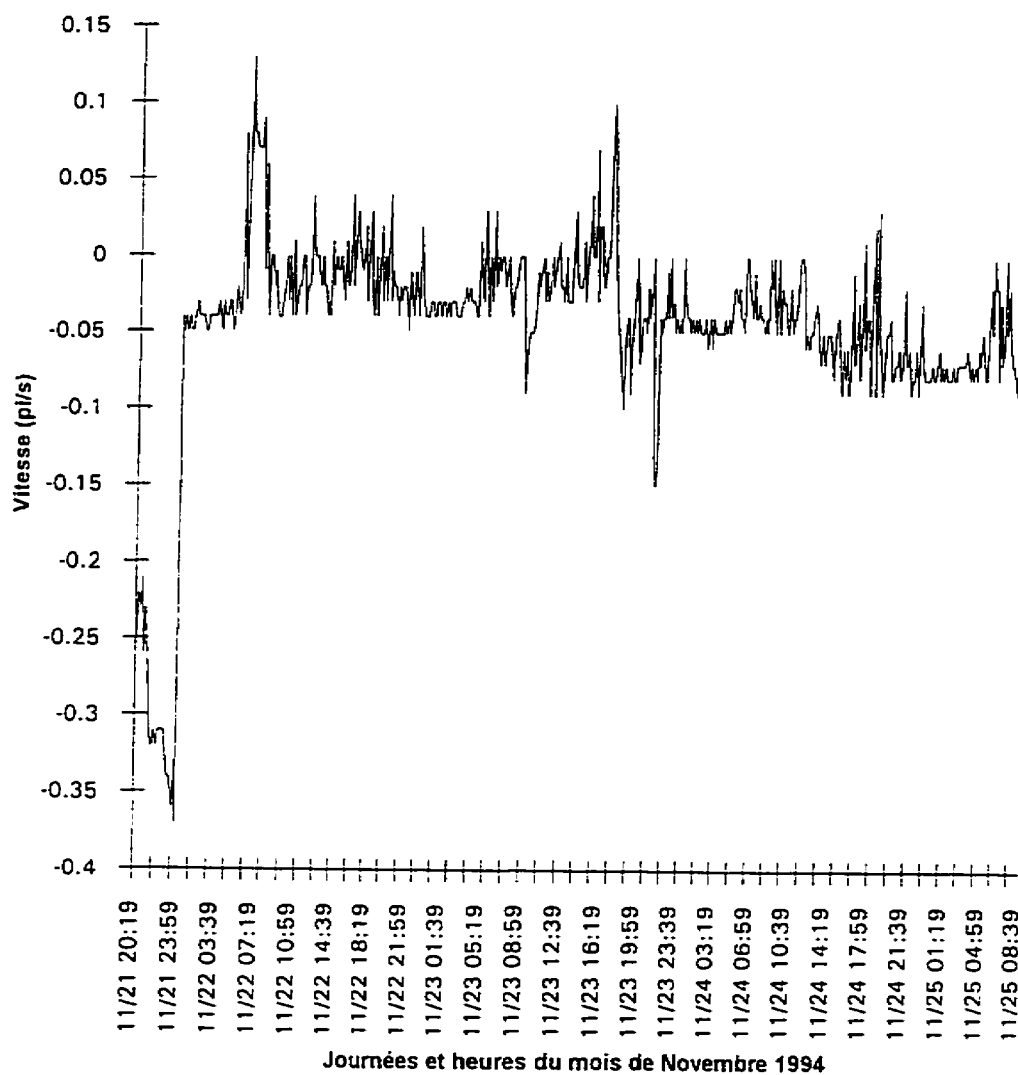
Réseau STE-ROSE
Point PONTBRIAND/PROVENCE
Vitesse et Pression
Novembre 1994



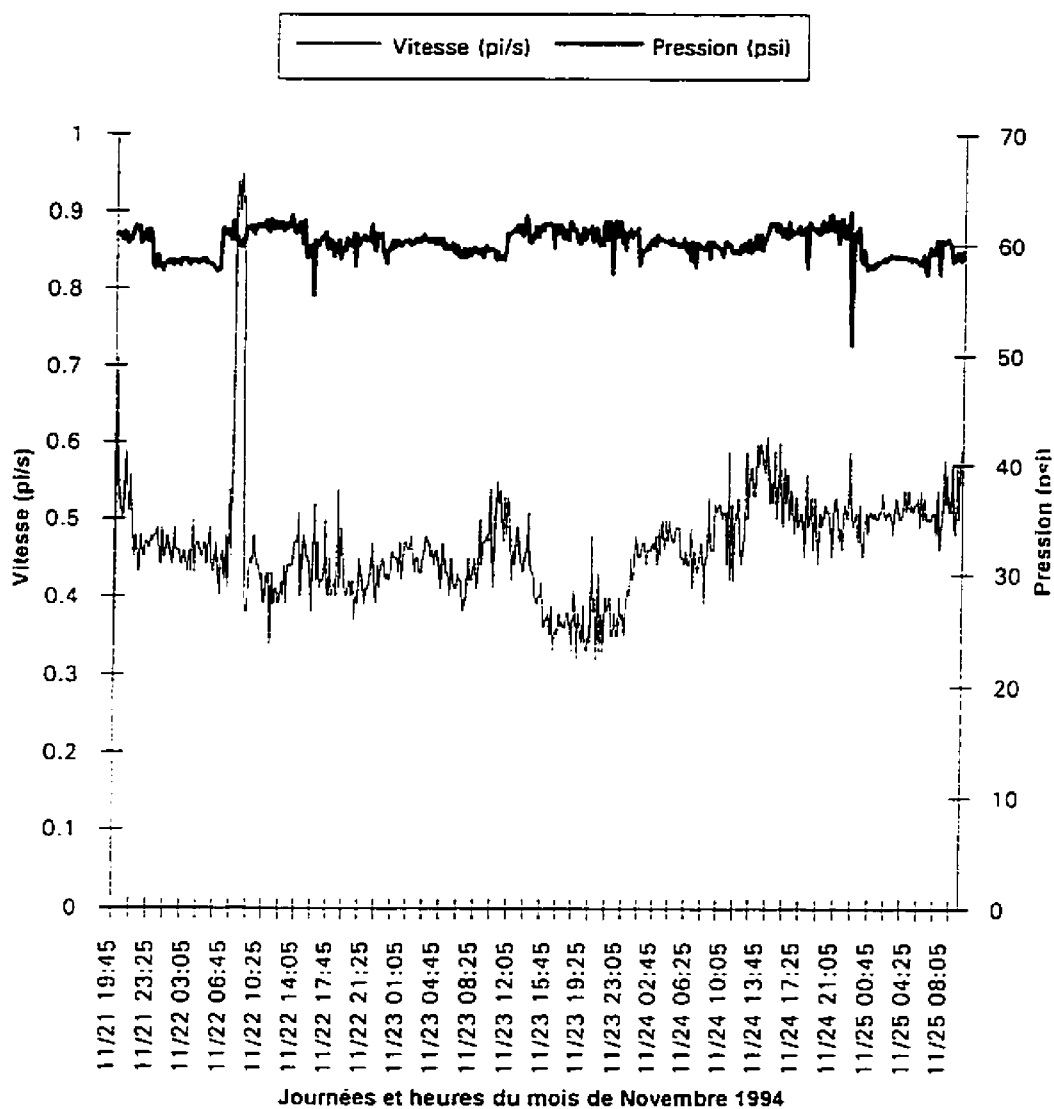
**Réseau STE-ROSE
Point PRUDENTIEL/CASALT
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



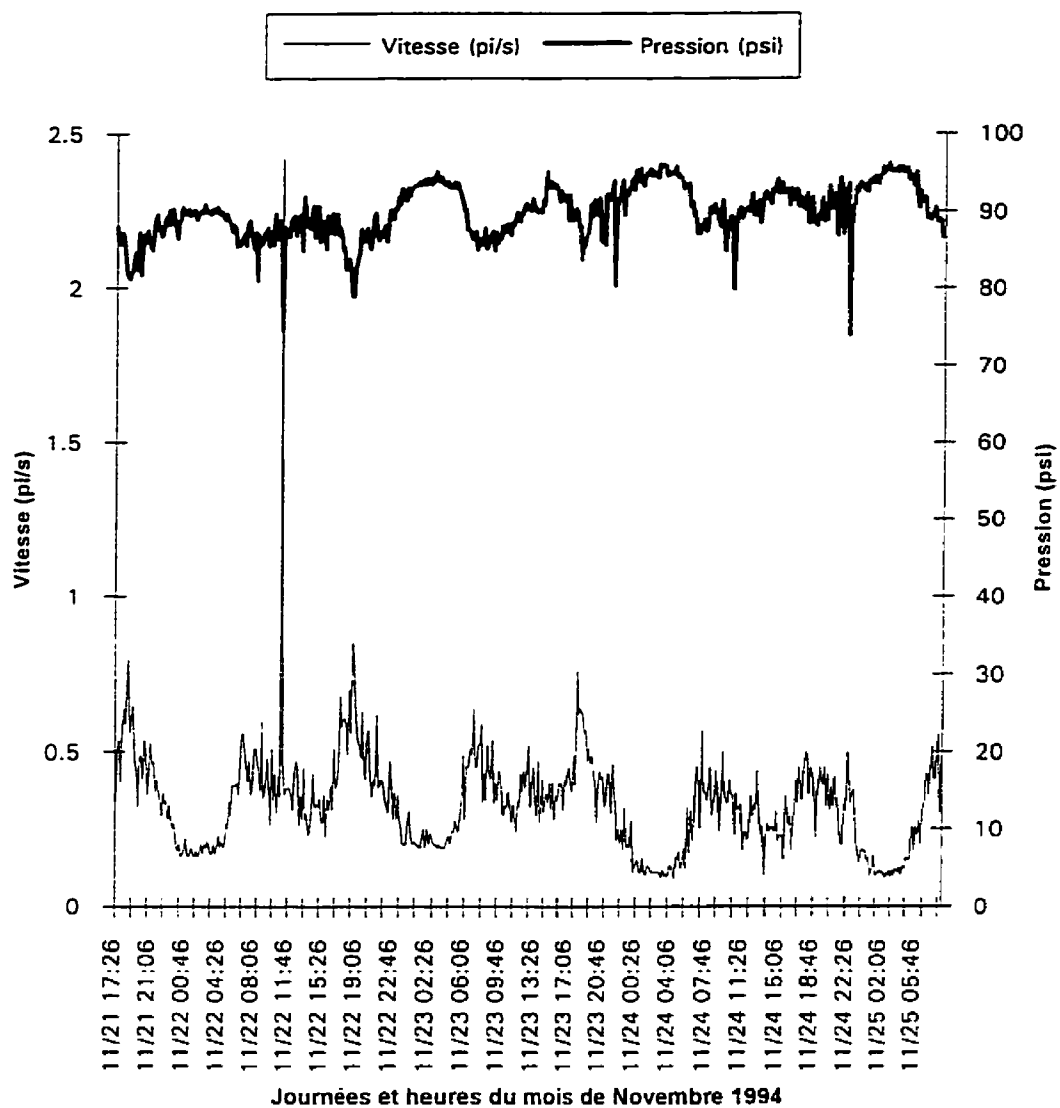
Réseau STE-ROSE
Point REAUMURE/RIOUX
Vitesse en conduite
Novembre 1994



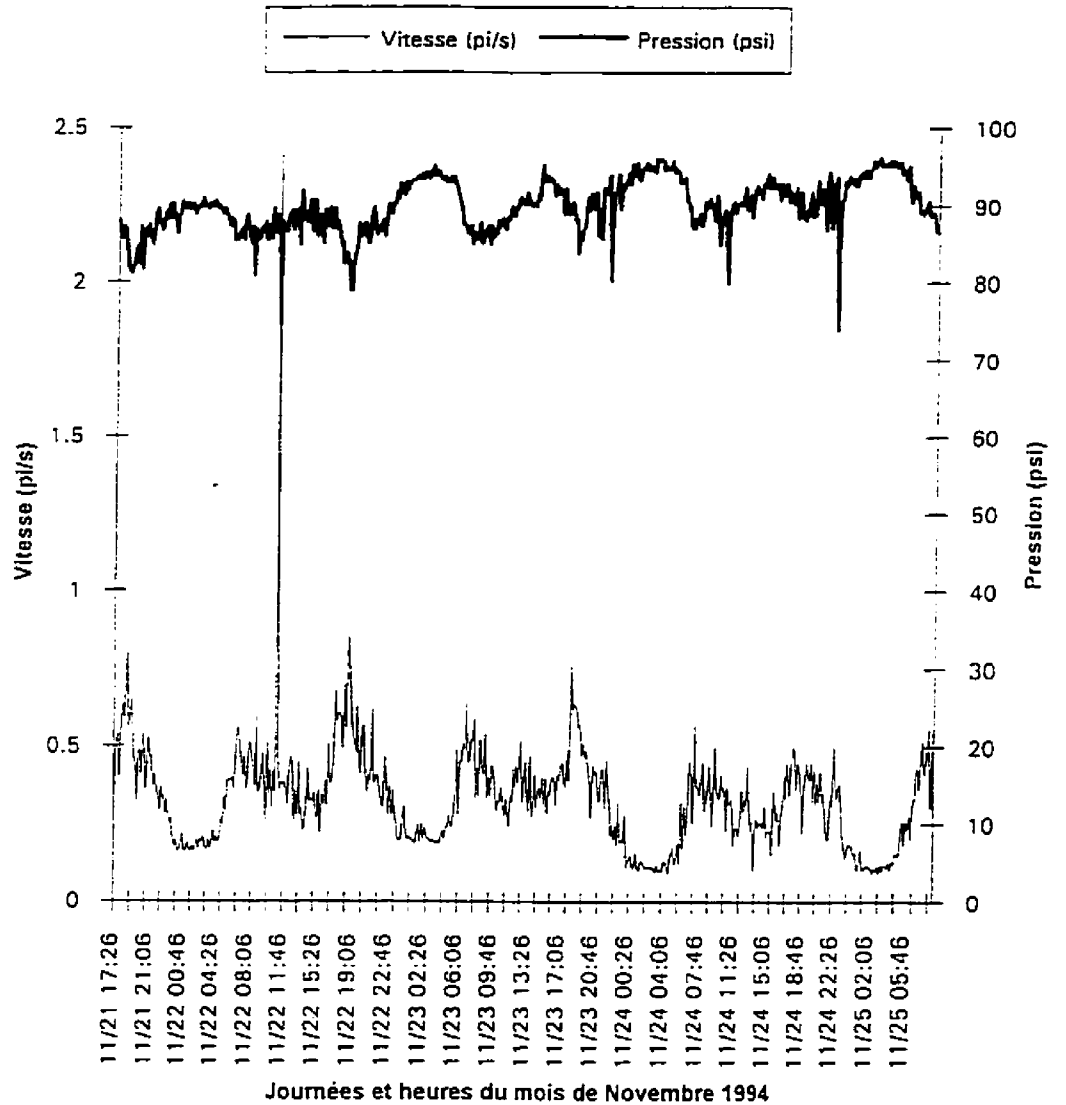
Réseau STE-ROSE
Point RIENDEAU/REAUMUR
Vitesse et Pression
Novembre 1994



**Réseau STE-ROSE
Point MASSON/BERLOIN
Vitesse et Pression
Novembre 1994**



Réseau STE-ROSE
Point MASSON/BERLOIN
Vitesse et Pression
Novembre 1994



ANNEXE G**Conditions moyennes horaires aux usines
trois réseaux**

Conditions moyennes horaires aux usines pendant la période des échantillonnages

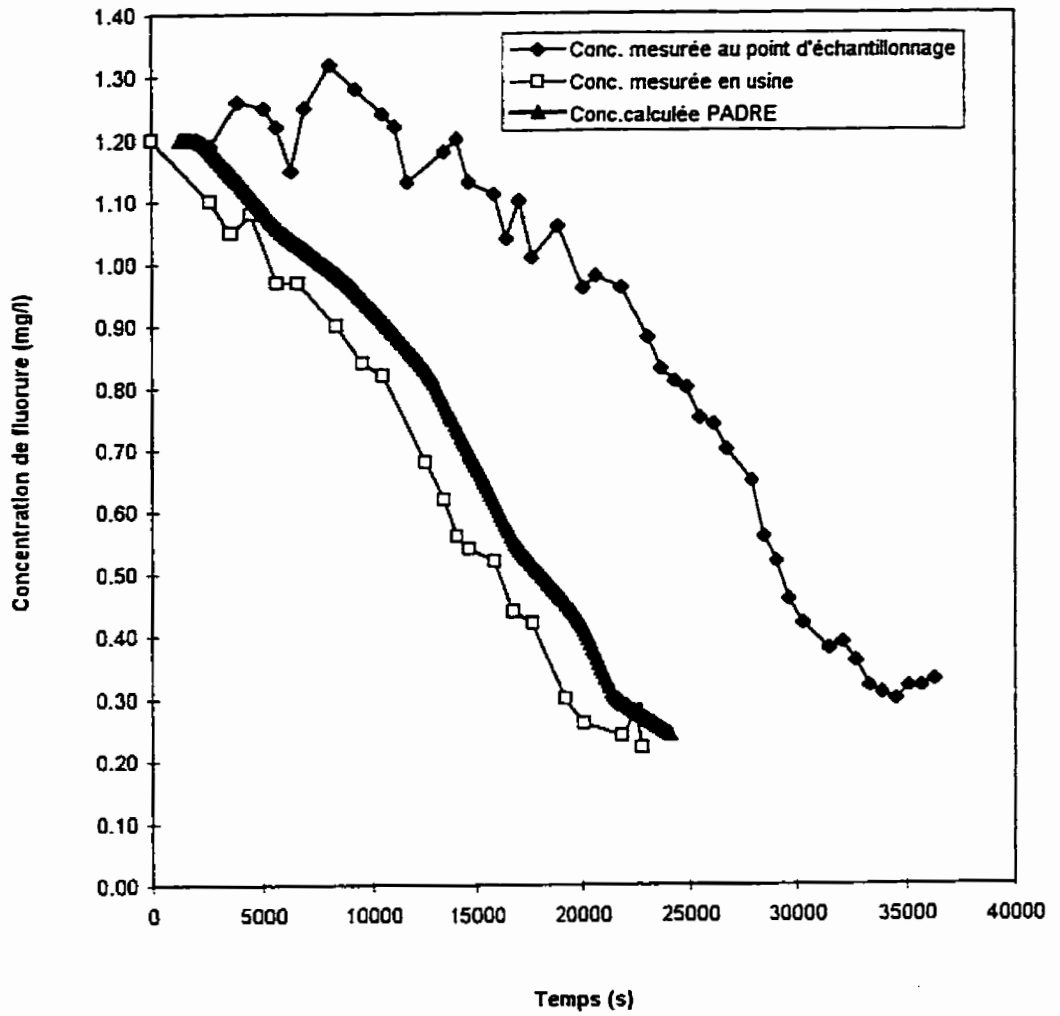
Date & Référence	pression horaire mesurée de l'eau pompée (KPa)																							
	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Ste-Rose																								
8/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9/11/94	-	596	-	597	-	591	-	599	-	603	-	605	-	600	-	596	-	596	-	604	-	596	-	575
15/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/11/94	-	603	-	601	-	592	-	591	-	594	-	593	-	591	-	590	-	600	-	591	-	580	-	570
22/11/94	573	574	576	577	576	574	597	601	603	605	604	604	604	602	599	594	592	592	590	592	587	591	586	583
23/11/94	587	588	588	588	586	587	584	587	587	588	587	587	600	603	599	600	601	600	599	602	599	600	600	597
Pont-Viau																								
8/11/94	612	595	597	597	596	595	605	607	609	613	-	633	634	629	604	616	616	615	606	606	614	619	626	625
9/11/94	625	620	619	620	620	615	609	605	603	606	603	607	606	604	604	603	608	617	616	613	614	614	614	616
15/11/94	590	604	606	606	605	593	593	599	604	606	605	610	611	616	622	618	619	614	602	617	607	610	609	615
16/11/94	614	621	622	620	616	607	610	614	610	609	607	608	608	608	606	606	608	608	605	610	613	614	607	603
22/11/94	589	587	590	588	585	587	594	606	608	607	606	604	607	605	608	607	604	595	574	611	604	601	603	604
23/11/94	601	607	608	611	603	607	601	602	603	603	601	601	600	600	606	622	617	614	620	621	606	610	598	598
Chomedey																								
8/11/94	568	579	579	583	583	576	595	597	605	597	600	602	600	600	599	600	601	598	588	596	598	600	605	598
9/11/94	604	603	602	602	601	607	596	599	600	601	604	605	602	599	597	600	600	599	601	598	601	604	598	602
15/11/94	577	579	581	581	581	571	590	595	598	596	592	593	590	592	597	592	593	592	593	596	600	599	597	594
16/11/94	601	598	596	595	596	597	593	600	601	601	599	597	595	595	601	600	599	601	600	602	590	588	593	579
22/11/94	578	575	579	578	577	578	598	603	601	603	603	603	601	603	604	599	611	600	601	599	607	607	613	604
23/11/94	607	605	600	599	600	597	602	603	606	603	606	604	604	602	601	605	603	595	599	600	602	602	599	585

Conditions moyennes horaires aux usines pendant la période des échantillonnages

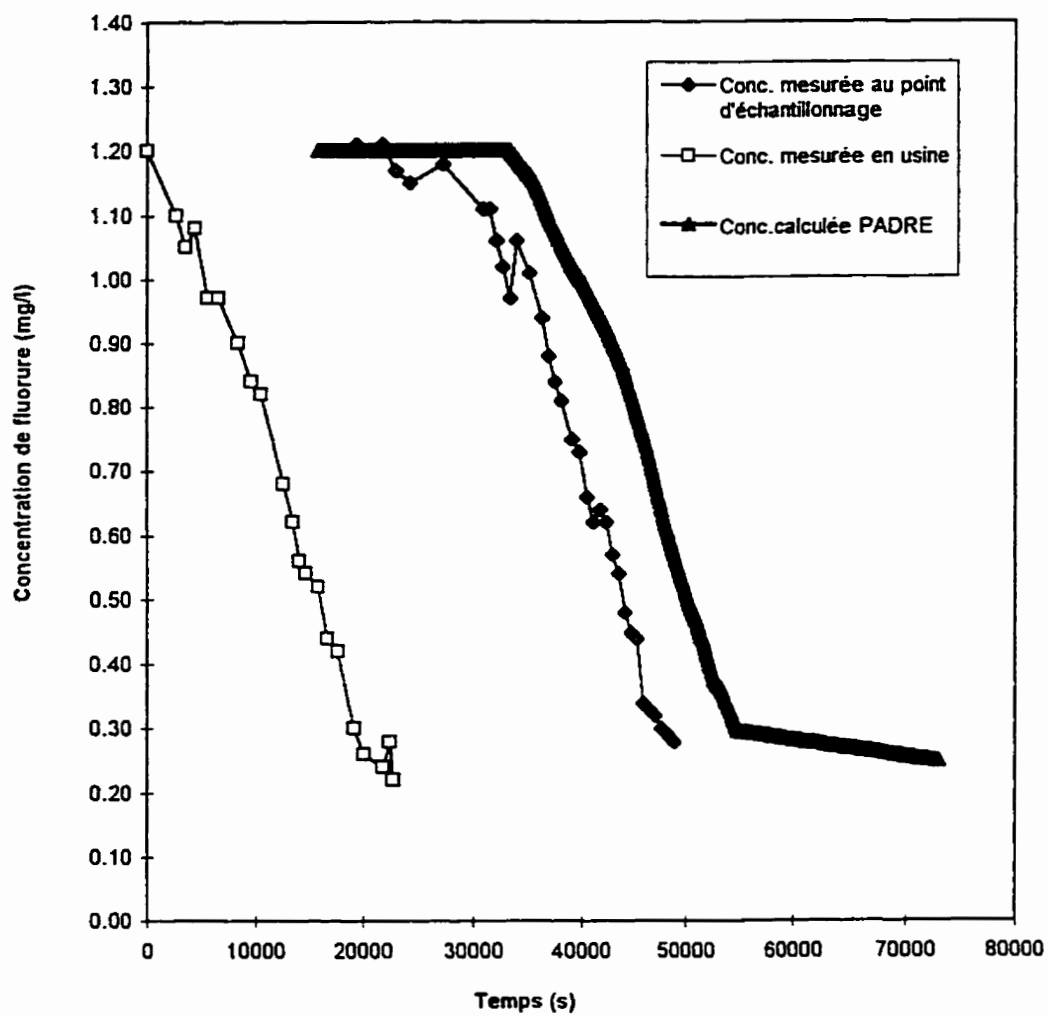
Date & Référence	Débit horaire mesuré de l'eau finie (1000 m3/d)																							
	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Ste-Rose																								
8/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9/11/94	-	24.0	-	19.0	-	20.0	-	49.0	-	47.0	-	46.0	-	41.0	-	37.0	-	38.0	-	49.0	-	38.0	-	34.0
15/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/11/94	-	23.0	-	22.0	-	23.0	-	44.0	-	46.0	-	41.0	-	41.0	-	39.0	-	42.0	-	50.0	-	45.0	-	28.0
22/11/94	25.9	25.4	23.9	24.0	24.6	29.6	44.8	52.2	50.8	47.9	48.0	46.1	44.9	42.1	41.0	37.1	37.8	43.6	50.9	44.5	41.6	40.8	33.6	23.6
23/11/94	18.9	16.5	16.1	16.2	16.9	23.8	37.7	46.9	45.2	44.5	39.4	40.5	43.9	42.0	38.5	35.9	40.1	44.1	51.0	47.2	45.0	40.4	41.2	33.7
Pont-Viau																								
8/11/94	40.2	23.0	20.2	18.9	19.0	21.2	44.3	60.7	62.3	62.8	-	68.2	68.2	64.1	48.6	53.0	54.4	59.5	63.0	59.0	55.0	58.6	56.6	44.1
9/11/94	32.6	22.2	19.4	19.8	20.0	27.0	45.7	63.0	63.3	63.0	59.4	54.6	51.7	49.7	45.9	43.1	48.7	58.0	65.5	64.3	53.4	51.4	50.2	39.4
15/11/94	24.2	23.8	23.9	23.9	24.0	24.4	40.7	60.9	63.1	61.9	62.0	61.3	61.2	60.6	59.5	56.2	59.9	60.8	62.1	65.5	55.6	54.6	47.5	39.6
16/11/94	26.3	23.2	23.3	23.4	23.6	24.6	52.1	71.0	70.0	67.4	62.4	61.5	60.5	56.2	50.2	47.8	54.2	55.8	61.9	66.0	59.8	54.5	45.6	40.3
22/11/94	23.1	19.0	15.4	15.4	15.5	22.4	37.9	56.2	56.5	58.2	55.2	52.7	51.9	49.9	47.9	46.6	47.9	48.7	50.5	59.2	51.2	48.0	40.8	32.7
23/11/94	21.8	18.6	18.4	19.8	17.9	23.6	41.2	53.3	52.9	54.5	51.1	48.0	45.4	44.3	43.1	45.5	47.6	51.4	58.5	57.6	46.6	47.9	41.8	32.3
Chomedey																								
8/11/94	46.9	53.6	51.6	52.3	54.1	57.3	89.0	102.0	101.0	96.9	90.2	89.3	85.0	85.4	85.9	83.1	86.7	92.8	102.0	102.6	89.6	90.0	82.4	65.5
9/11/94	58.7	55.3	53.5	52.3	53.7	66.7	90.5	105.2	106.8	106.8	102.6	98.0	93.5	89.7	87.3	87.9	88.3	92.0	105.0	97.7	93.2	88.8	85.0	76.0
15/11/94	57.3	54.0	50.1	49.0	49.8	60.4	92.7	107.0	105.4	104.5	98.7	97.3	88.1	85.2	83.5	82.0	85.6	92.4	107.0	98.1	96.2	93.7	81.9	70.3
16/11/94	61.6	51.7	48.2	48.8	53.6	67.6	94.8	109.2	106.5	106.2	102.1	98.7	92.1	89.7	90.2	88.6	90.4	96.3	109.2	107.2	91.7	85.2	83.7	68.0
22/11/94	58.8	51.5	50.9	49.8	50.9	62.3	92.1	104.2	102.6	101.3	100.5	102.5	94.9	91.2	86.6	86.8	98.0	102.2	117.2	107.0	102.5	101.9	92.3	82.4
23/11/94	68.3	62.4	57.1	56.2	59.0	69.2	97.7	113.0	110.7	114.4	107.8	103.3	96.8	93.9	90.1	88.9	92.5	99.3	109.8	106.5	101.6	93.0	91.1	72.9

ANNEXE H**Courbes de traçage simulées par PADRE**

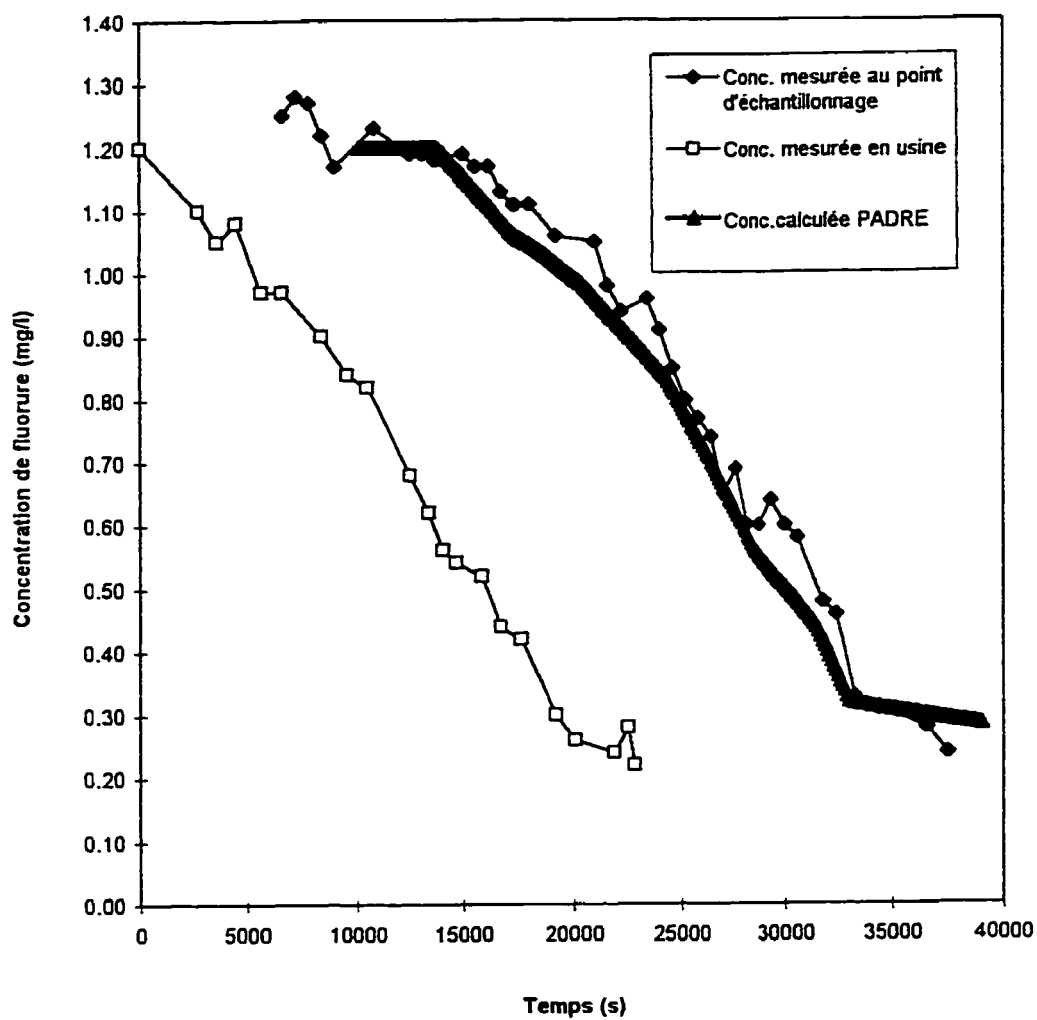
Point d'échantillonnage AL429
Réseau de Ste-Rose



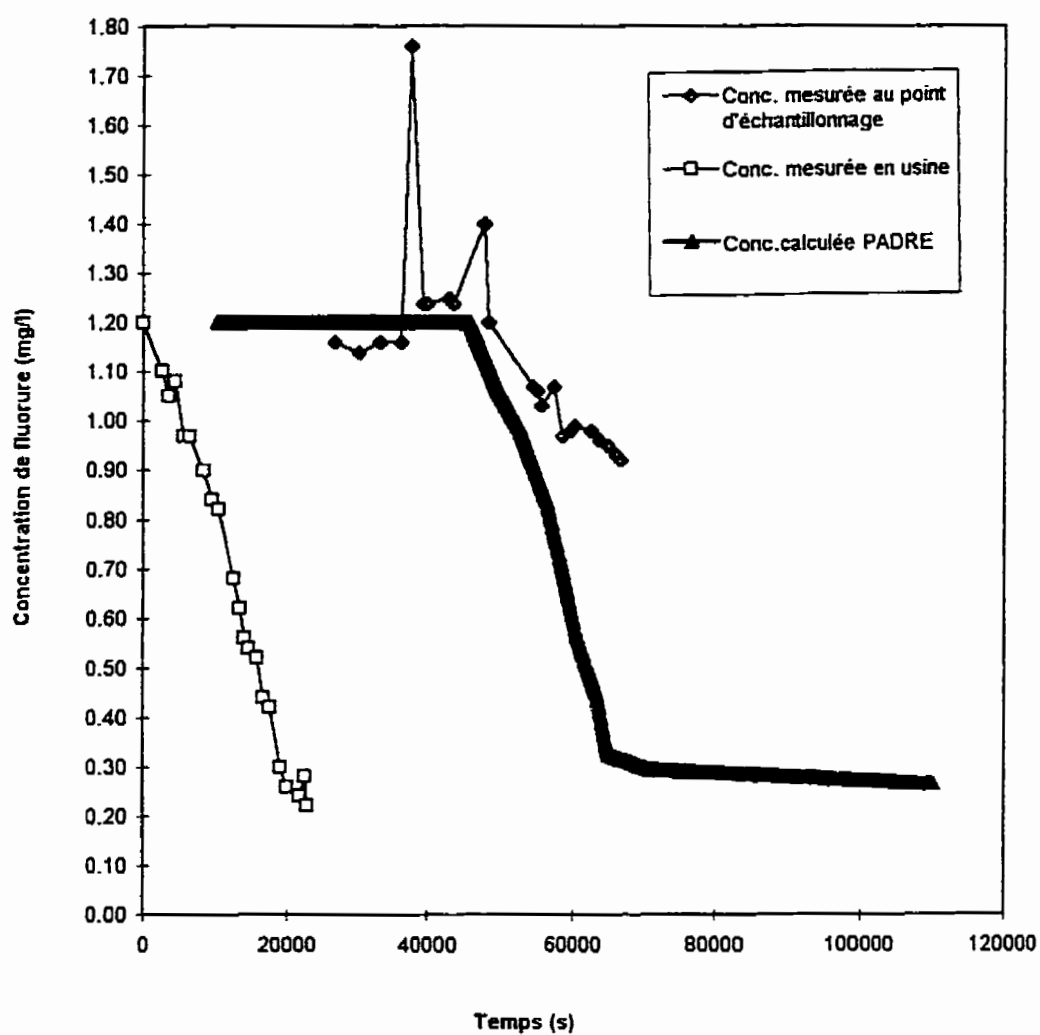
Point d'échantillonnage HB411
Réseau de Ste-Rose



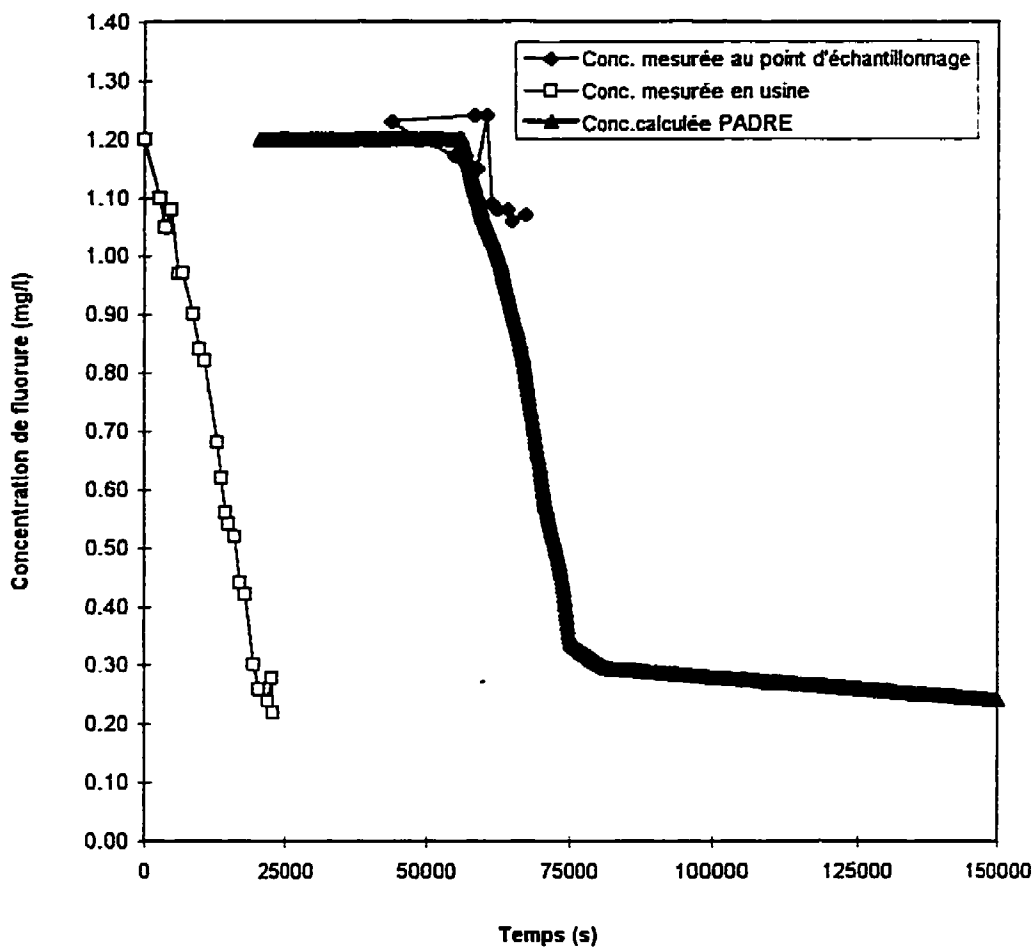
Point d'échantillonnage HD40
Réseau de Ste-Rose



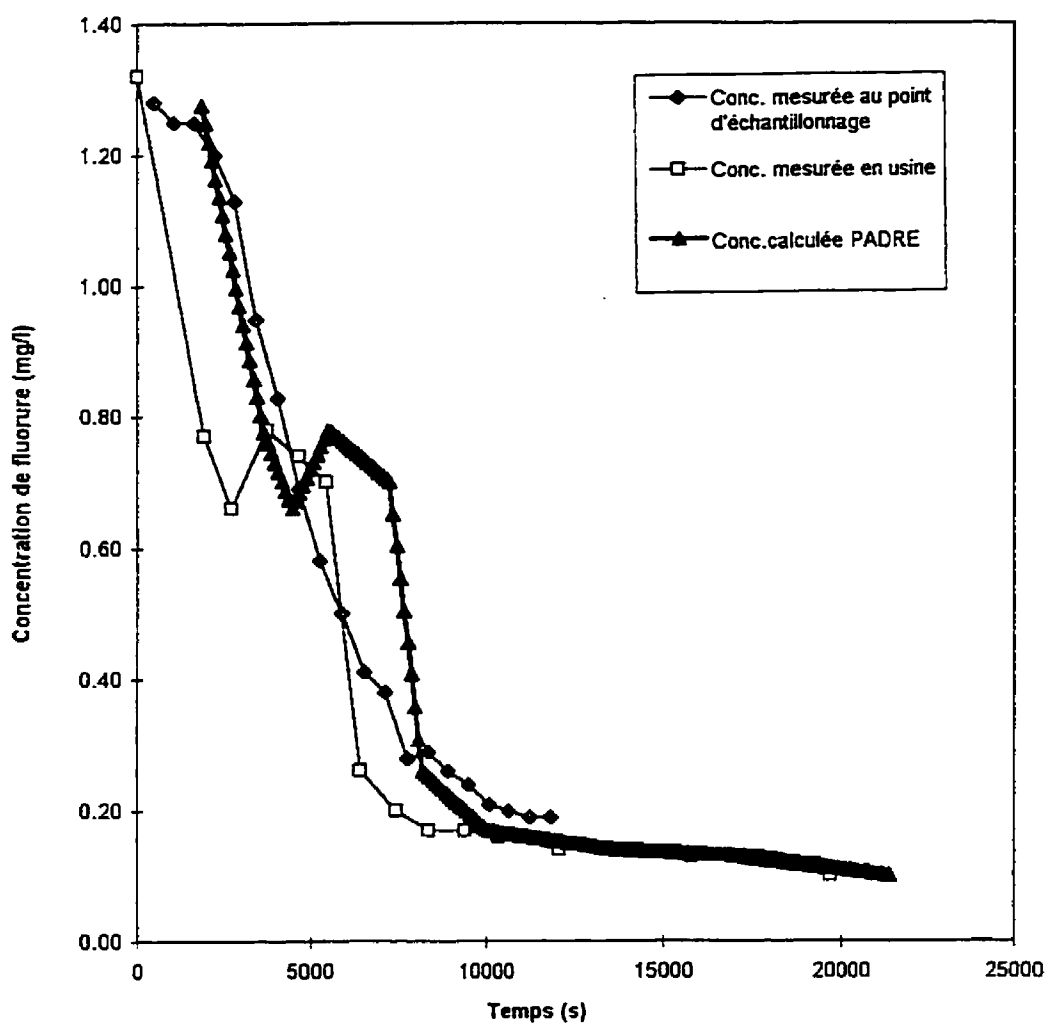
Point d'échantillonnage RE325
Réseau de Ste-Rose



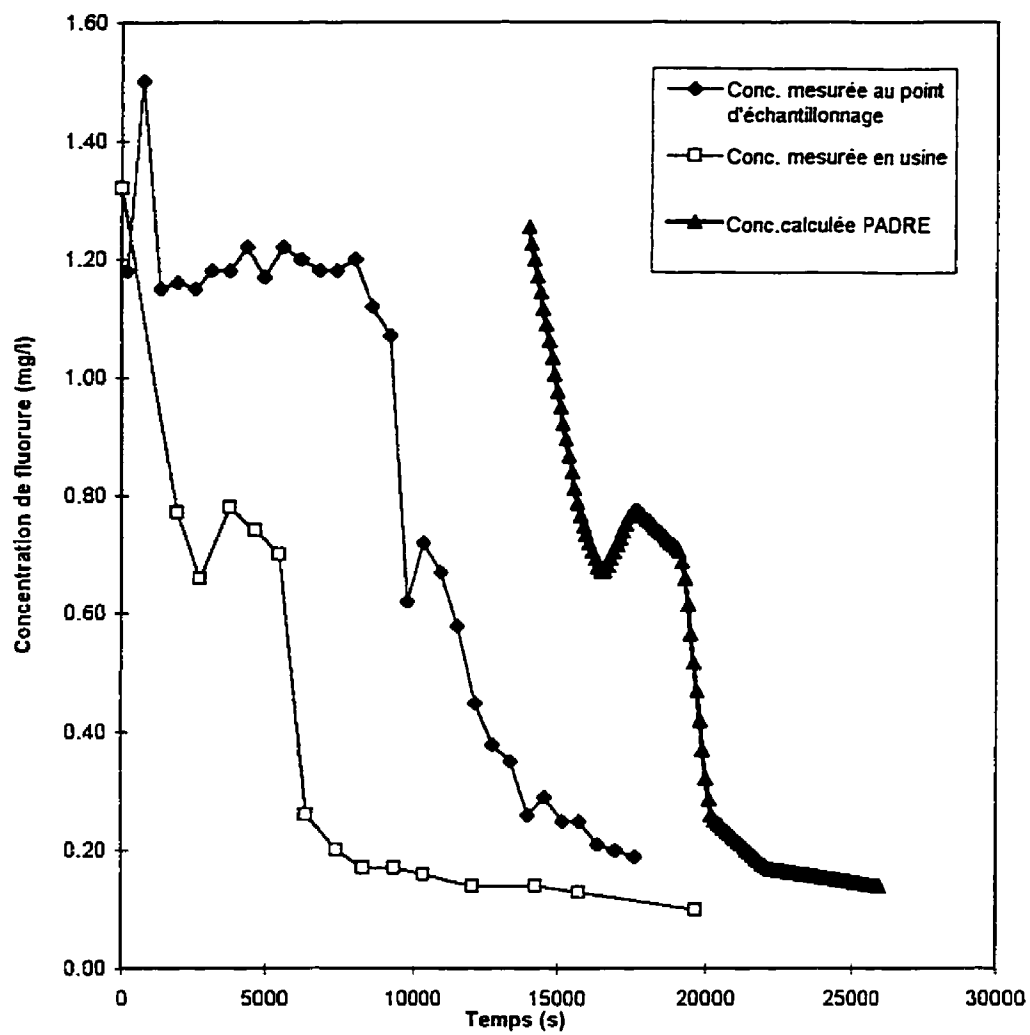
Point d'échantillonnage TE310
Réseau de Ste-Rose



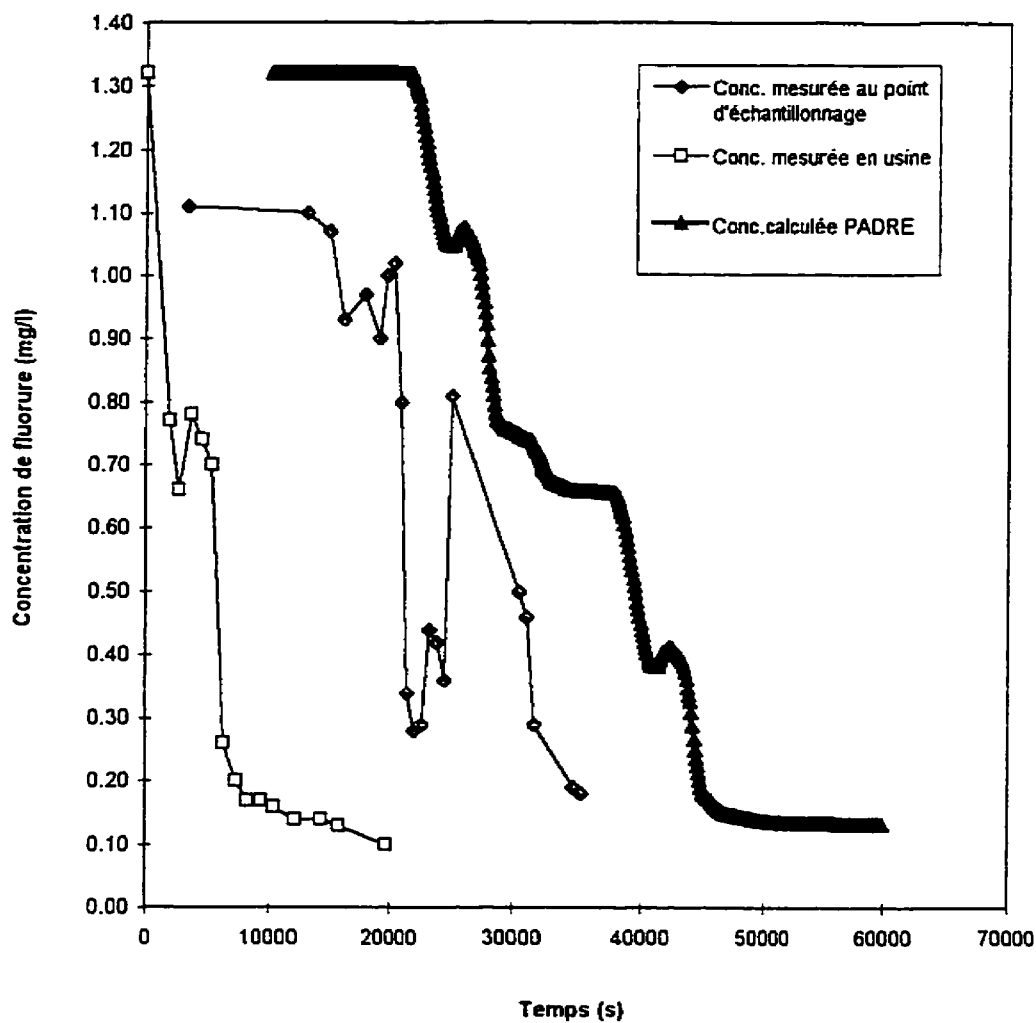
Point d'échantillonnage E373
Réseau de Pont-Viau



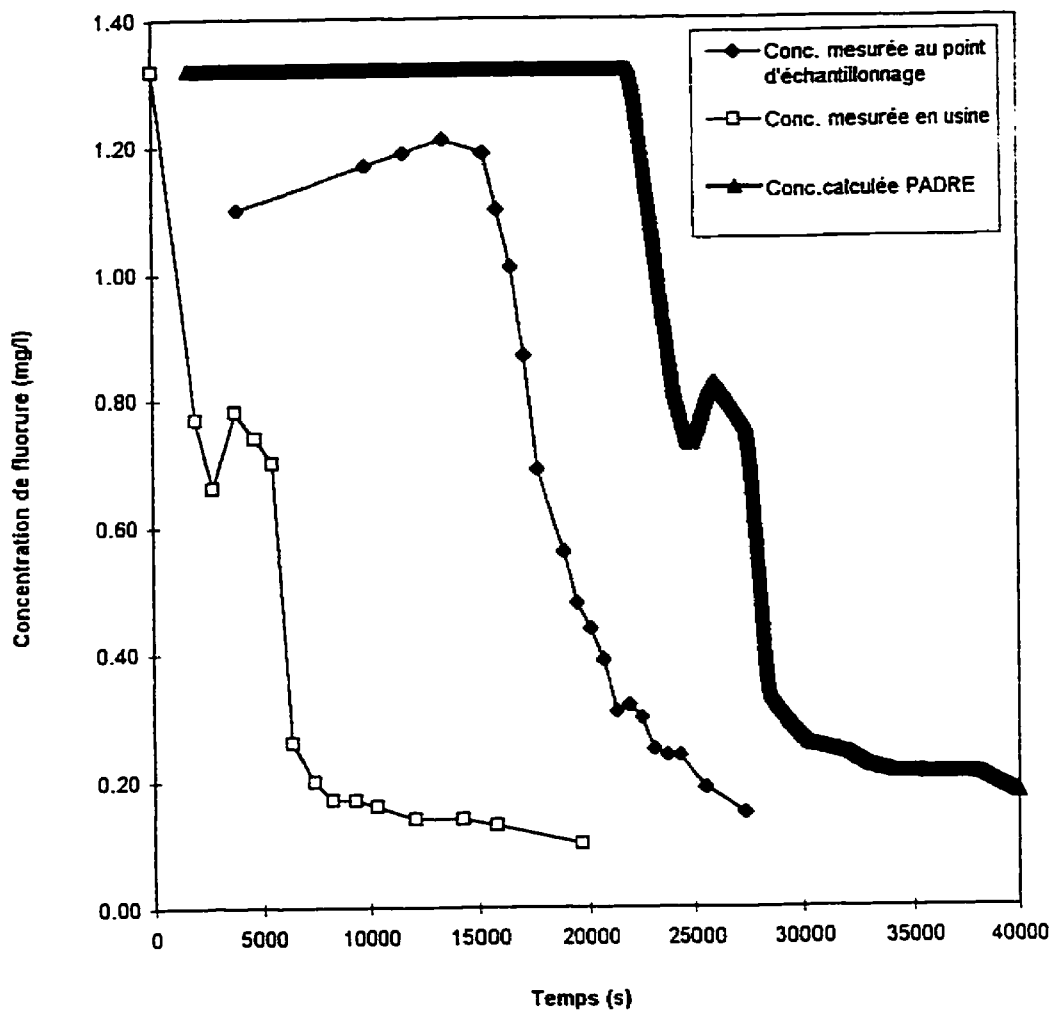
Point d'échantillonnage M313
Réseau de Pont Viau



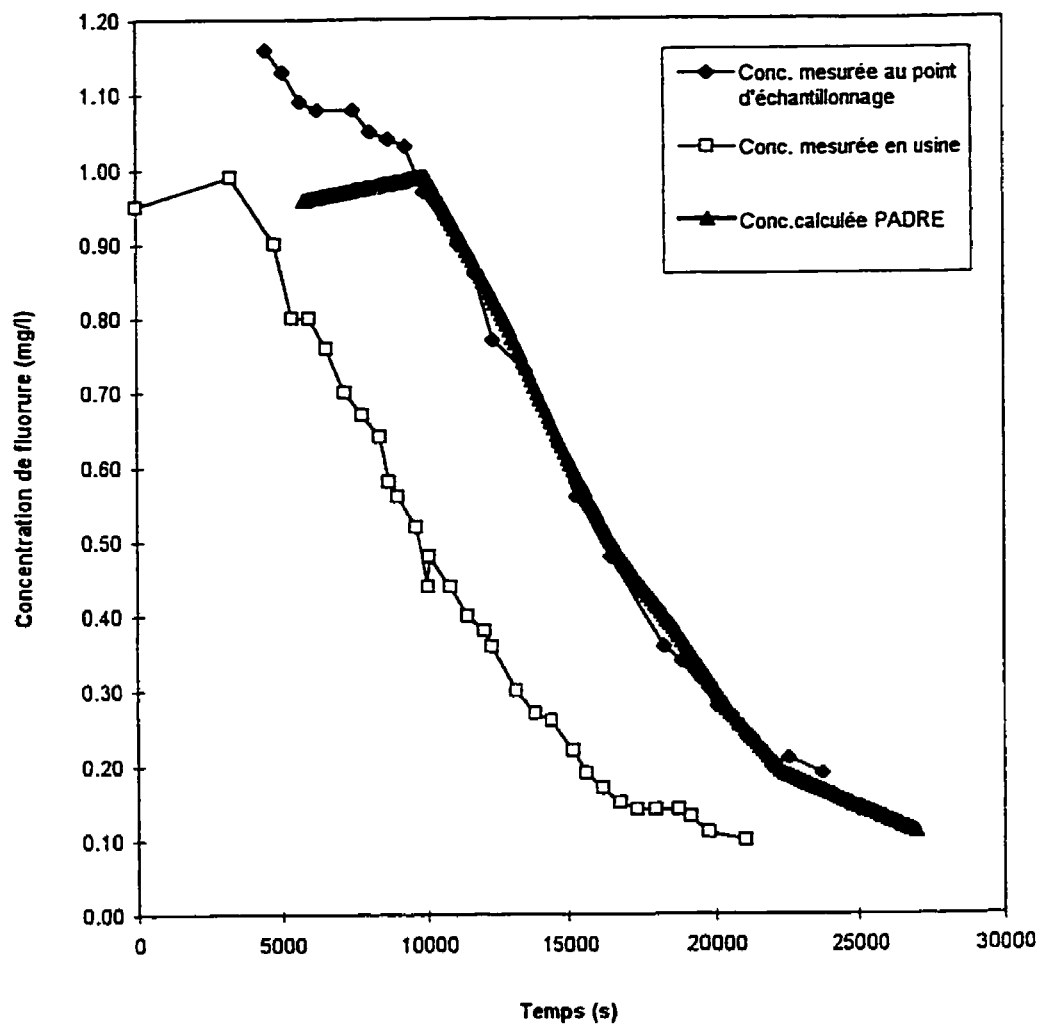
Point d'échantillonnage M411
Réseau de Pont-Viau



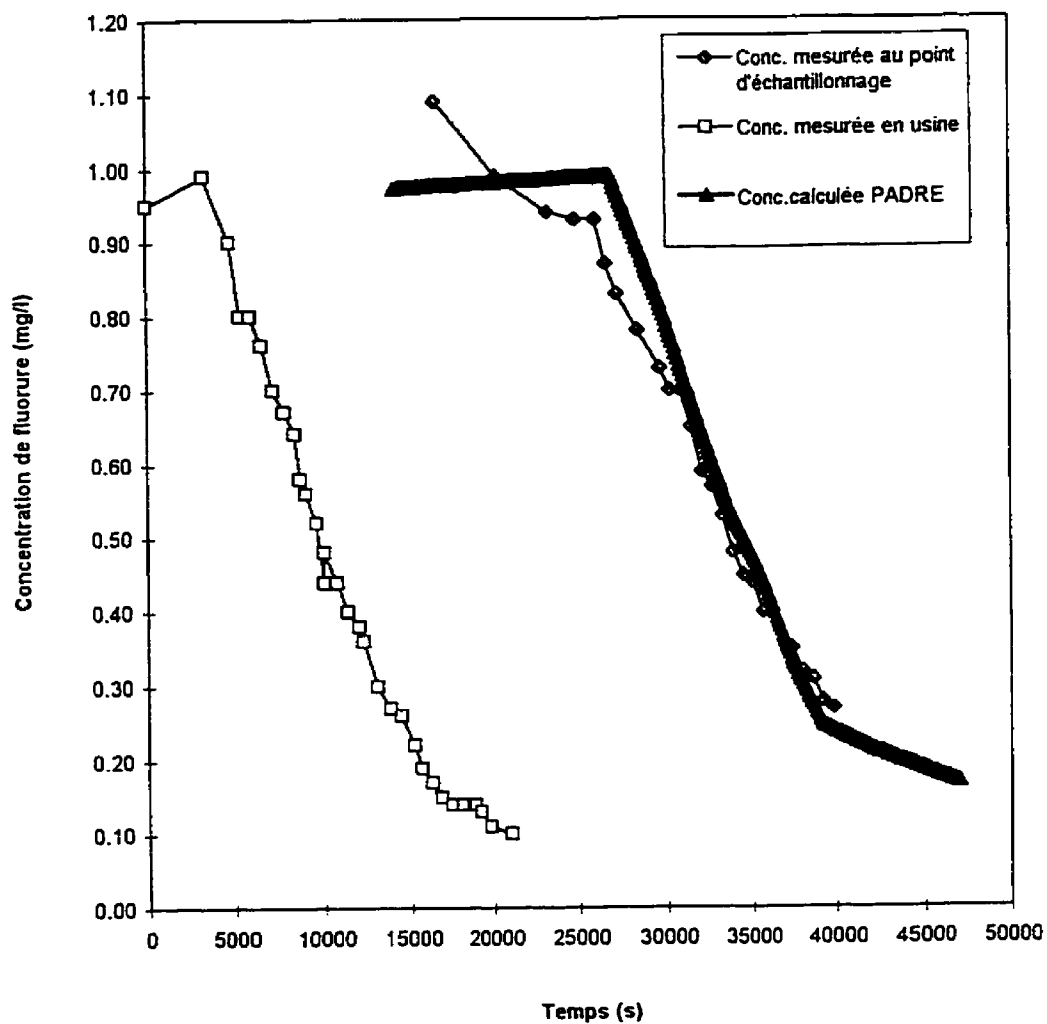
Point d'échantillonnage Q308
Réseau de Pont-Viau



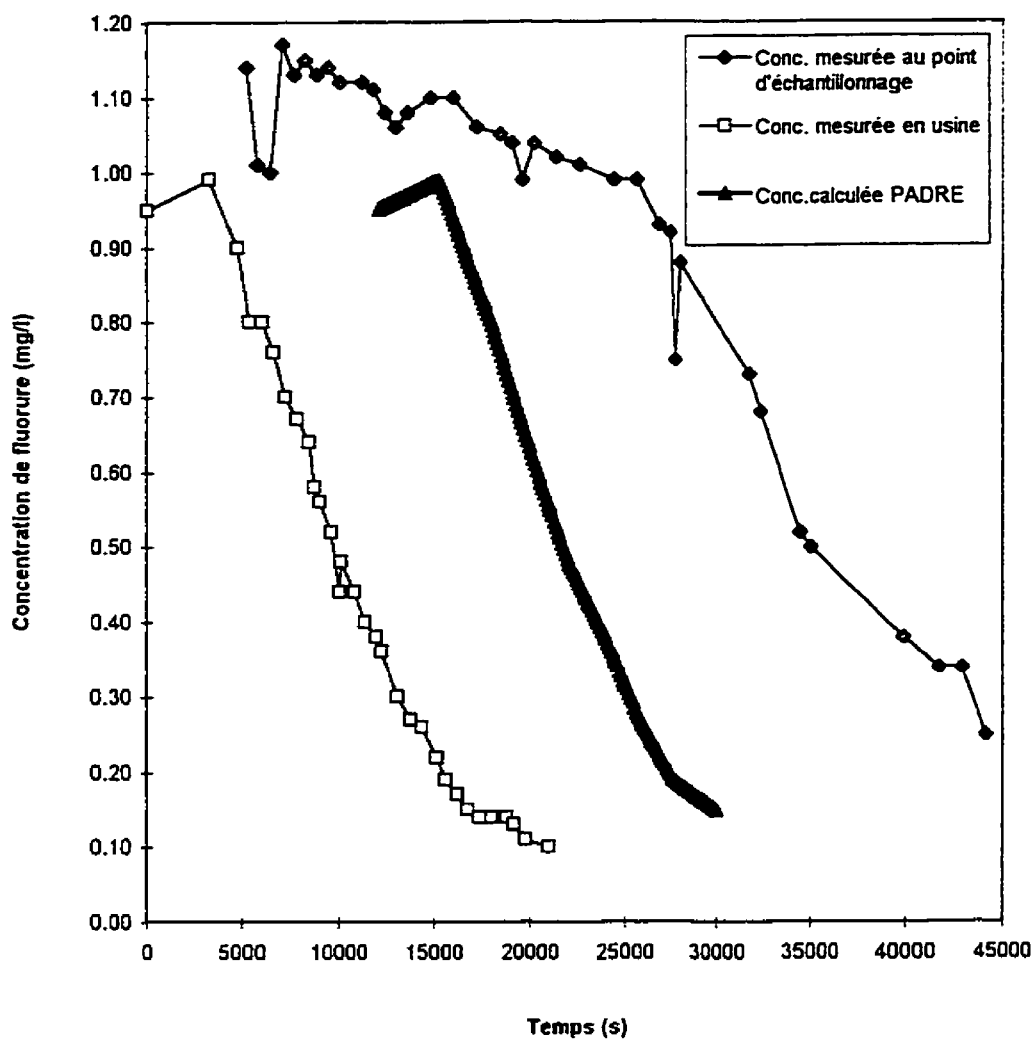
Point d'échantillonnage AX443
Réseau de Chomedey



Point d'échantillonnage BQ303
Réseau de Chomedey



Point d'échantillonnage AX503
Réseau de Chomedey



Point d'échantillonnage AV328
Réseau de Chomedey

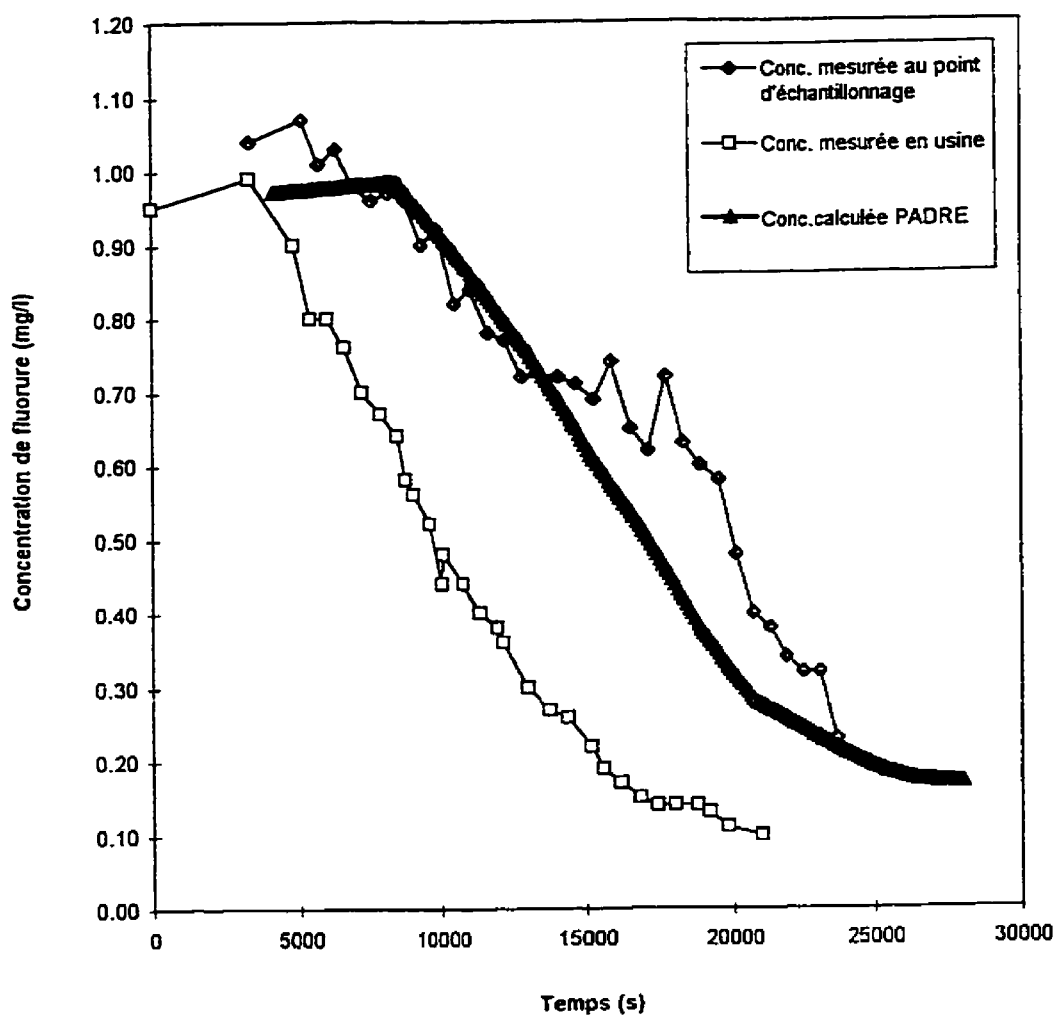
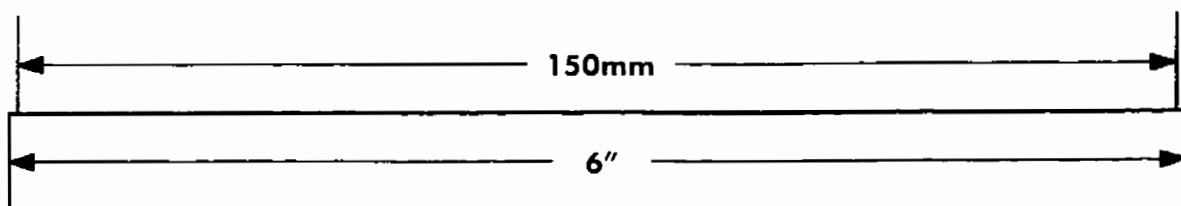
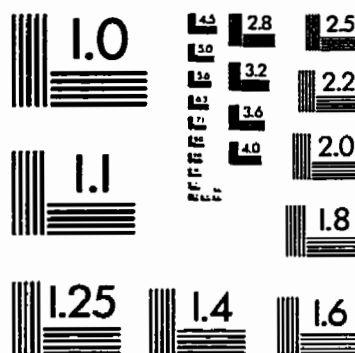
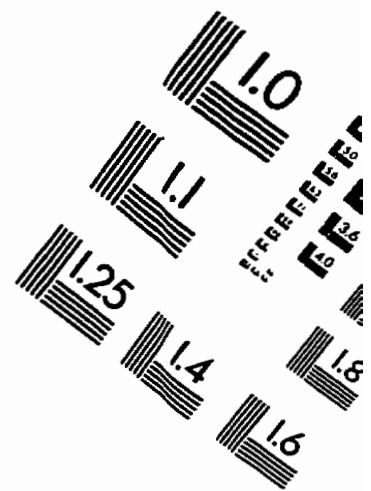
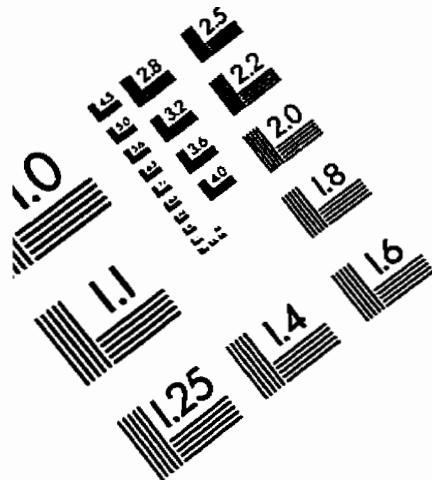


IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



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

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

