

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DU TEMPS SÉJOUR PAR ANALYSE DE LA
PROPAGATION D'UN TRACEUR DANS UN
RÉSEAU D'EAU SOUS PRESSION

MARIANA RADOI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES)
DÉCEMBRE 1997

©Mariana Radoi, 1997



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.

0-612-37457-2

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DU TEMPS SÉJOUR PAR ANALYSE DE LA
PROPAGATION D'UN TRACEUR DANS UN
RÉSEAU D'EAU SOUS PRESSION

présenté par : RADOI Mariana

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

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

M. LECLERC Guy, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. DESJARDINS Raymond, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier à tous ceux qui ont pu m'aider, par leur appui, leur compréhension ou leur sourire à réaliser mon travail surtout les techniciens du laboratoire d'hydrodynamique de Polytechnique.

Merci à ma mère pour son soutien moral et sentimental, pour ses mots de sagesse et pour son acquis matériel.

J'adresse des remerciements spéciaux à mon directeur de projet , Claude Marche, qui parfois a une grande finesse dans la précision de ses exigences. Ses conseils, son soutien et sa disponibilité sont à souligner.

RÉSUMÉ

Le temps de séjour, qui est peu abordé dans la littérature de spécialité, fait le sujet d'un travail de recherche complexe à l'École Polytechnique de Montréal, génie civil, géologique et des mines. Le passage de l'eau entre l'usine de traitement et les consommateurs est fait par le réseau de distribution où la qualité de l'eau se détériore. Le régime hydraulique, le désinfectant, le degré d'encrassement ou les caractéristiques du réseau sont en discussion. Dans le laboratoire, à l'échelle réelle, on a utilisé le régime permanent d'écoulement, l'analyse de la propagation d'un traceur conservatif dans un nombre d'essais avec différentes vitesses d'écoulement. Dans ce contexte, on a trouvé les valeurs du temps de séjour moyen, maximal et minimal; dans le même temps on a fait l'étude du phénomène de dispersion des concentrations du traceur qui apparaissent pendant la propagation du mélange utilisé.

Tous ces facteurs énumérés aident à déterminer le régime hydraulique réel dans la canalisation, notamment pour l'intervalle du temps de séjour qui peut être utilisé dans le calcul de la répartition des vitesses réelles dans une section d'écoulement.

Les résultats d'étude soulignent aussi la véracité de la méthode de traçage pour mesurer le débit local dans une canalisation sous pression et avec un équipement simple à aborder.

ABSTRACT

The time of residence, which is scarcely talked about in the specialised literature, is the subject of a complex research at the École Polytechnique de Montréal, at the Department of Civil, Geological and Mining Engineering. The water passage from the treating plant to the consumers is done by a distribution network where the water quality deteriorates. The hydraulic regime, the disinfectant, the amount of dirt or the network characteristics are being discussed. In the laboratory, we used a permanent flow regime, the analysis of the propagation of a conservative tracer in a certain number of tests with different flow speeds. In this context, we found the values of the median time of stay, maximum and minimum; we also studied the dispersion phenomenon of the tracer's concentrations which appears during the propagation of the mix that was used.

All these factors help to determine the real hydraulic regime in the canalisation, specially for the interval of time of residence which can be used in the calculation of the assessment of the real speeds in a flow section.

The study's results also underline the truthness of the tracing method to measure the local flow rate within a canal under pressure with an easy to use equipment.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	xii
Liste des annexes	xvii
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Évolution de la qualité de l'eau - L'importance du temps de séjour	1
1.1.2 La méthode de traçage en réseau	2
1.1.3 Une méthode de simulation, le programme PADRE	3
1.1.4 Méthodologie de l'étude.....	4
1.1.5 Méthodologie de l'essai.....	5
1.2 Objectifs.....	6
Chapitre II - Les principes de base nécessaires au traçage.....	8
2.1 Le traçage en réseau.....	8
2.2 La dispersion et le mélange.....	10
2.3 Quelques solutions simples à l'équation de la dispersion	14
2.3.1 Traçage unidimensionnel - Régime d'écoulement permanent.....	14
2.3.2 Régime d'écoulement non-permanent	17
2.3.2.1 Solutions 1 : Injection instantanée.....	17
2.3.2.2 Solution 2 : Injection continue et constante.....	17
2.3.3 Élargissement et rétrécissement dans la même canalisation.....	18
2.3.4 Embranchement de canalisation	19
Chapitre III - Appareillage d'analyse	20
3.1 Méthode de simulation numérique - Programme PADRE.....	20

3.1.1	Programme PADRE appliqué au réseau du laboratoire	23
3.1.2	Le temps de séjour	25
3.2	Méthode de laboratoire	27
3.2.1	Traçage	27
3.2.2	Calibrage des appareils et standardisation des paramètres	29
3.2.3	Programme d'essai	31
3.2.4	Mode opérationnel	33
3.2.5	Valeurs mesurées	33
3.3	Conditions d'étude	34
3.3.1	Réseau d'essai	34
3.3.2	Régime d'écoulement permanent - turbulent	35
3.3.3	Le Nombre de Reynolds	37
	Chapitre IV - Résultats	38
4.1	Simulation numérique des essais	56
4.2	Discussion des résultats	57
	Chapitre V - Conclusion	61
	Bibliographie	63
	Annexes	67

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 3.1	Fichier de résultats PADRE point C - Essai 7	22
Tableau 3.2	Les cinq échantillons des solutions standard de sel	29
Tableau 3.3	Les caractéristiques du réseau d'essai	34
Tableau 4.4	La décroissance des concentrations et le taux de décroissance	49
Tableau 4.5	La variation de la dispersion/diffusion après 45 minutes	49
Tableau 4.6	Les intervalles de variation des temps de séjour et le coefficient d'erreur, point B	50
Tableau 4.7	Les intervalles de variation des temps de séjour et le coefficient d'erreur, point C	50
Tableau 4.8	Valeurs des concentrations avec la dispersion	51
Tableau 4.1.A.1	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 1	68
Tableau 4.2.A.1	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 1	69
Tableau 4.3.A.1	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 1	70
Tableau 4.1.A.2	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 2	74
Tableau 4.2.A.2	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 2	75
Tableau 4.3.A.2	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 2	76
Tableau 4.1.A.3	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 3	82
Tableau 4.2.A.3	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 3	83

Tableau 4.3.A.3	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 3	84
Tableau 4.1.A.4	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 4	91
Tableau 4.2.A.4	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 4	92
Tableau 4.3.A.4	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 4	93
Tableau 4.1.A.5	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 5	100
Tableau 4.2.A.5	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 5	101
Tableau 4.3.A.5	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 5	102
Tableau 4.1.A.6	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 6	109
Tableau 4.2.A.6	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 6	110
Tableau 4.3.A.6	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 6	111
Tableau 4.1.A.7	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 7	117
Tableau 4.2.A.7	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 7	118
Tableau 4.3.A.7	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 7	119
Tableau 4.1.A.8	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 8	126

Tableau 4.2.A.8	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 8	127
Tableau 4.3.A.8	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 8	128
Tableau 4.1.A.9	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 9	135
Tableau 4.2.A.9	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 9	136
Tableau 4.3.A.9	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 9	137
Tableau 4.1.A.10	Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 10	144
Tableau 4.2.A.10	Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 10	145
Tableau 4.3.A.10	Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 10	146

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	16
Figure 3.1	23
Figure 4.6	48
Figure 4.7	52
Figure 4.8	52
Figure 4.9	53
Figure 4.10	53
Figure 4.11	54
Figure 4.12	55
Figure 4.1.A.1	71
Figure 4.2.A.1	72
Figure 4.1.A.2	77

Figure 4.2.A.2	Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit, point B - Essai 2	78
Figure 4.3.A.2	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 2	79
Figure 4.4.A.2	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 2	80
Figure 4.1.A.3	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 3	85
Figure 4.2.A.3	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 3	86
Figure 4.3.A.3	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 3	87
Figure 4.4.A.3	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 3	88
Figure 4.5.A.3	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 3	89
Figure 4.1.A.4	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 4	94
Figure 4.2.A.4	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 4	95
Figure 4.3.A.4	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 4	96
Figure 4.4.A.4	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 4	97
Figure 4.5.A.4	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 4	98
Figure 4.1.A.5	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 5	103

Figure 4.2.A.5	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 5	104
Figure 4.3.A.5	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 5	105
Figure 4.4.A.5	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 5	106
Figure 4.5.A.5	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 5	107
Figure 4.1.A.6	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 6	112
Figure 4.2.A.6	Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit, point B - Essai 6	113
Figure 4.3.A.6	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 6	114
Figure 4.4.A.6	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 6	115
Figure 4.1.A.7	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 7	120
Figure 4.2.A.7	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 7	121
Figure 4.3.A.7	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 7	122
Figure 4.4.A.7	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 7	123
Figure 4.5.A.7	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 7	124

Figure 4.1.A.8	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 8	129
Figure 4.2.A.8	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 8	130
Figure 4.3.A.8	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 8	131
Figure 4.4.A.8	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 8	132
Figure 4.5.A.8	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 8	133
Figure 4.1.A.9	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 9	138
Figure 4.2.A.9	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point B - Essai 9	139
Figure 4.3.A.9	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point B - Essai 9	140
Figure 4.4.A.9	Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré, point C - Essai 9	141
Figure 4.5.A.9	Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit, point C - Essai 9	142
Figure 4.1.A.10	Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 10	147
Figure 4.2.A.10	Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit, point B - Essai 10	148
Figure 4.3.A.10	Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit, point C - Essai 10	149

Figure 4.7.B	La décroissance de la concentration vs la distance entre les points d'essai A, B, C - Essais 1 à 5	151
Figure 4.8.B	La décroissance de la concentration vs la distance entre les points d'essai A, B, C - Essais 6 à 10	152

LISTE DES ANNEXES

	Page
Annexe A	
Annexe A.1 - Les résultats de l'essai 1	67
Annexe A.2 - Les résultats de l'essai 2	73
Annexe A.3 - Les résultats de l'essai 3	81
Annexe A.4 - Les résultats de l'essai 4	90
Annexe A.5 - Les résultats de l'essai 5	99
Annexe A.6 - Les résultats de l'essai 6	108
Annexe A.7 - Les résultats de l'essai 7	116
Annexe A.8 - Les résultats de l'essai 8	125
Annexe A.9 - Les résultats de l'essai 9	134
Annexe A.10 - Les résultats de l'essai 10	143
Annexe B	150

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

1.1.1 ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU - L'IMPORTANCE DU TEMPS DE SÉJOUR

L'eau du réseau de distribution, utilisée pour boire, est une eau de qualité naturelle ou traitée et de plus en plus recherchée. L'influence du réseau sur la qualité est perçue comme de plus en plus importante.

À l'approche du 21^e siècle, l'environnement est devenu notre "préoccupation". Dans toutes les activités, les valeurs environnementales sont présentes, il faut les passer avant le progrès technologique et l'intérêt monétaire. Les questions sur la qualité de l'eau potable (eau et réseau) et sur l'environnement (pluies acides, pollution municipale, industrielle et souterraine, percée de la couche d'ozone) génèrent le doute et les gens achètent de l'eau embouteillée pour consommer à la place de l'eau du robinet.

Le rôle du réseau de distribution dans la détérioration de la qualité de l'eau est constatée sans savoir si le facteur déterminant est le désinfectant, le régime hydraulique, le degré d'encrassement ou d'autres caractéristiques du réseau. Cette combinaison des conditions-paramètres indique directement l'importance de déterminer le temps de séjour de l'eau dans le réseau. L'étude du temps de séjour peut aider à mieux comprendre l'interaction entre les paramètres chimiques et biologiques dans le réseau de distribution et la qualité de l'eau.

Le présent travail porte sur l'âge de la particule d'eau qui part en tête du réseau (l'usine de traitement) et le temps t où elle se retrouve à un point d'analyse P .

La période de temps pendant laquelle la particule reste dans les conduits représente le temps de séjour identifié comme étant un facteur important dans les changements de la qualité de l'eau délivrée au bout du réseau.

Dans la littérature spécialisée récente (Kennedy et al 1991), on dit que pour avoir une prédiction réaliste de la qualité de l'eau dans un réseau, deux modèles (hydraulique et qualité de l'eau) sont essentiels. Une grande précision de la calibration est nécessaire, notamment dans le champs des vitesses dans les éléments de canalisation.

L'étude d'un temps de séjour et de ses valeurs minimales et maximales, donne la possibilité d'affiner les calculs des champs de vitesse dans le réseau d'alimentation en eau.

L'étude de Maul et al (1991) démontre la complexité d'évaluer l'évolution de la qualité de l'eau dans les réseaux lorsque l'eau n'est pas analysée dans le réseau. Il existe, en eau froide et en eau chaude, une activité biologique importante dans le réseau alimenté par une usine classique ou biologique. Les changements de qualité de l'eau imputables aux réseaux sont beaucoup plus importants que ceux imputables à l'eau elle-même (Lavoie et al 1991). Le temps de séjour joue également un rôle très important dans la détermination du désinfectant résiduel.

1.1.2 LA MÉTHODE DE TRAÇAGE EN RÉSEAU

Dans un réseau de distribution, la technique du traçage consiste à imposer en un point en amont d'un écoulement une loi de variation de concentration d'une substance conservatrice, par injection dans l'écoulement d'eau, pour une période de temps continue ou intermittente et d'observer en aval la propagation de cette substance.

Le traceur idéal est conservatif et contrôlable au point d'admission. Le temps de séjour évalué par une étude de traçage dans le réseau d'alimentation est le temps demandé au traceur pour parcourir la distance entre le point d'entrée en amont (point d'injection) et le point d'analyse. Ce temps est directement lié au débit d'écoulement dans les conduites empruntées.

Le traçage est une source d'information unique sur les processus de transport dans un réseau et il est utilisé dans la calibration des modèles hydrauliques et de la qualité de l'eau. Dans la présente étude, il est utilisé pour la détermination de la vitesse et l'analyse du phénomène de dispersion.

Les résultats d'une étude sur les traçages qui utilisent un traceur conservatif indiquent que l'équipement de traçage est simple et représente "in situ" le mode le plus efficace pour déterminer le temps de séjour réel en réseau d'alimentation en eau (Kennedy et al 1991).

1.1.3 UNE MÉTHODE DE SIMULATION, LE PROGRAMME PADRE

Afin d'approfondir la compréhension et les connaissances sur l'effet du temps de séjour de l'eau dans un réseau de distribution, Marche (1995) a élaboré le Programme d'Aide à la Datation en Réseau d'Eau, PADRE.

Ce programme a pour objectif d'aider à déterminer la loi d'évolution de la concentration $C(t)$ d'un traceur dans un point d'analyse P pour une eau dont la concentration est connue à sa source. Il reconstitue le mélange dans chaque point d'échantillonnage sur la base du temps de séjour des différentes eaux constituant ce mélange. Le temps de séjour du mélange est la moyenne des temps de séjour cumulatifs dans chaque chemin du réseau, pondérée d'après leur proportion de débit.

1.1.4 MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES

Dans un réseau à l'échelle réelle, en régime permanent turbulent d'écoulement on a étudié les valeurs du temps de séjour de l'eau dans la conduite, le phénomène de dispersion par tous les aspects du mélange lié aux formes de diffusion et la validation de la méthode de traçage. Les changements temporels ou spatiaux en qualité de l'eau, approchés par l'évolution de la concentration du traceur sont reliés à la vitesse dans la conduite et la qualité des prévisions dépend de la précision de l'analyse hydraulique sur les vitesses, leur permanence et leur turbulence.

Après l'impulsion du mélange de sel, on observe en aval la propagation de ces concentrations. Les observations obtenues par échantillonnages sont comparées avec le temps de séjour T_s calculé par la simulation numérique avec le modèle PADRE.

L'ajustement des valeurs est fait sur le débit initial mesuré. Dans le phénomène global de dispersion, les particules de traceur se déplacent à cause de l'un des trois processus suivants :

- Le mouvement Brownien;
- La vitesse moyenne;
- Les fluctuations de la vitesse turbulente.

Le transport de la concentration de sel dans le fluide par le fluide comprend deux aspects :

- Dû à la convection par la vitesse moyenne;
- Dû à la diffusion par la diffusivité turbulente.

Le processus global de dispersion pour le traceur est un phénomène de convection :

- Convection - diffusion verticale;

- Convection - diffusion latérale;
- Convection - diffusion longitudinale qui est masquée après un certain temps par la dispersion longitudinale due à la répartition des vitesses.

On peut avoir la diffusion moléculaire masquée par la diffusion turbulente, qui elle, est masquée par la dispersion longitudinale.

Avec la modélisation utilisée dans le programme PADRE, on obtient la reconstitution du mélange par le temps de séjour des eaux mélangées, dans chaque point d'analyse avec une pondération de 100 % représentant un seul chemin d'écoulement.

1.1.5 MÉTHODOLOGIE D'ESSAIS

Après le calibrage d'appareils et la standardisation des paramètres, on a travaillé beaucoup sur des variantes du montage-schéma sur le réseau du laboratoire pour l'utilisation du logiciel Team Pro en conditions optimales.

On a établi la méthodologie d'essai qui comprend :

- Le traçage dans le réseau;
- Les mesures de la conductivité électrique enregistrées automatiquement par Team Pro.

On obtient alors les observations des valeurs des concentrations dans trois conditions :

- Enregistrement direct et lissage;
- Simulation numérique;
- Comparaison entre mesures et simulation après l'ajustement optimal du débit.

Les résultats des essais comprennent :

- Le débit ajusté;

- Le $\Delta T\%$ qui réduit l'erreur sur le temps de séjour calculé;
- La variation des concentrations maximales dans les trois points utilisés en analyse;
- La vérification de la masse du traceur observée, par l'intégration de la courbe des valeurs mesurées des concentrations, pour vérifier la conservation effective.

1.2 OBJECTIFS

Élément de validation du programme de traçage, le premier objectif de cette étude est de faire une évaluation du temps de séjour avec une analyse complexe de la propagation d'un traceur conservatif dans des écoulements en régime uniforme et permanent et de turbulence variable.

Le temps de séjour dans le réseau, qui est le temps nécessaire pour qu'une particule d'eau effectue un déplacement entre deux points du réseau d'écoulement, est utilisé principalement pour déterminer la vitesse de l'eau dans les conduits. En utilisant les valeurs d'écoulement moyennes, on obtient le cas simple d'un temps de séjour moyen. En réalité, la particule d'eau a un écoulement plus ou moins aléatoire. Dans un écoulement en régime turbulent, les fluctuations transversales des vitesses sont grandes; pour une section circulaire, on tend à égaliser les vitesses plus rapidement mais le rapport de la vitesse maximale à la vitesse moyenne reste de l'ordre de 1,2. Une prévision réaliste sur la qualité de l'eau dans le réseau, demande une bonne précision du champ de vitesse dans la section transversale de l'écoulement. On utilise le traçage dans le réseau, avec un traceur conservatif, afin d'être assuré d'avoir une concentration détectable qui persiste durant l'essai, et dont on peut vérifier la quantité totale.

Pour décrire le phénomène de mélange dans la conduite, la méthode la plus simple utilisée dans ce domaine est la méthode du fluide translaté (pas de mélange en direction

axiale). Les particules quittent la conduite à un moment t d'analyse, avec le même temps de séjour (T_s). Le mélange est considéré parfait dans le noeud où le temps de séjour correspond à la somme des temps de séjour ($\sum_i T_{S_i}$) de tout le chemin parcouru par l'eau et composé d'un nombre i des conduites. La concentration du traceur dans la conduite est différente à chaque moment t .

Le deuxième objectif de cette étude est de qualifier la précision de la méthode de translation et d'évaluer l'importance de la dispersion longitudinale du traceur dans l'écoulement sur les différences observées.

CHAPITRE II

LES PRINCIPES DE BASE NÉCESSAIRES AU TRACAGE

2.1 LE TRACAGE EN RÉSEAU

Le temps de séjour dans un réseau de distribution correspond au temps demandé par un traceur pour effectuer le parcours de l'entrée en amont (l'usine de traitement) au point d'analyse et est évalué à l'aide d'une étude par traçage.

Durant une période de temps, dans un écoulement uniforme permanent, les changements temporel et spatial de la concentration du traceur dans l'eau sont donnés par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial c}{\partial x} U + R \quad (2.1)$$

où

U = vitesse dans le conduit (LT^{-1})

c = concentration dans le conduit (ML^{-3})

R = taux de réaction ($M/L^3/T$) ($R = 0$ pour traceur conservateur) ($ML^{-3}T^{-1}$)

t = temps (t)

x = position de la particule au long de la conduite (L)

La vitesse de l'eau dans la conduite est déterminée indirectement par le temps de séjour (Kennedy et al 1991). Dans un réseau de distribution évalué par une étude de traçage, il s'agit du temps requis par un traceur pour aller du point d'entrée en amont (l'usine de traitement) au point d'analyse. Ce temps est directement lié au débit d'écoulement par la section de la canalisation et à la distance entre l'entrée du réseau et le point d'analyse.

Le traceur idéal est conservatif et contrôlable au point d'admission et en réseau d'alimentation. Il est choisi afin qu'il n'affecte pas l'intégrité du système ou ne compromette pas la santé du consommateur. Les concentrations à la sortie d'usine sont utilisées pour définir le traceur entré dans le système de distribution.

L'ajout ou l'arrêt de l'injection du traceur à l'usine produit une variation de concentration dans le réservoir principal, avant l'entrée dans le réseau. La concentration dans le réseau ne change pas simultanément avec l'ajout ou l'arrêt de l'injection du traceur à cause des réservoirs et des stockages qui atténuent le temps de réponse (Kennedy et al 1991).

Dans certains essais, le délai requis pour revenir aux valeurs de concentration initiales a été trois fois plus long que dans un cas idéal de translation à cause du phénomène de dispersion (Kennedy et al 1991). La dispersion dans un réseau de distribution est partiellement le résultat du mélange dans chaque conduit ou du mélange dans le noeud.

Dans la plupart des études de réseaux, le mélange est considéré seulement dans les noeuds et non en direction axiale. Les particules fluides bougent, se déplacent en translation parallèle. Toutes les particules fluides quittent donc la conduite étudiée avec le même temps de séjour T_s pour un moment t d'analyse. La concentration instantanée du traceur est différente tout au long du conduit (Kerneis et al 1995).

Les changements temporels ou spatiaux en qualité de l'eau, approchés par l'évolution de la concentration du traceur, sont reliés à la vitesse dans le conduit et la qualité des prévisions dépend de la précision de l'analyse hydraulique sur les vitesses, leur permanence et leur turbulence.

La vitesse est difficilement déterminée partout directement par mesure. L'étude du temps de séjour par l'analyse de la propagation d'un traceur conservatif aide à déterminer la vitesse d'écoulement de façon plus précise et en de multiples endroits.

Dans la présente étude, un réseau simple d'une seule conduite sera utilisé. On disposera de trois points d'échantillonnage pour évaluer l'évolution de la concentration du traceur injecté à l'amont. Un modèle numérique sert à prévoir le résultat du traçage aux différents débits.

La précision de l'analyse a été vérifiée en comparant le temps de séjour prévu par le modèle avec celui donné par l'échantillonnage. Si les valeurs du temps de séjour sont différentes, c'est que les vitesses dans les conduits ne sont pas bonnes. Minimiser ces différences permet d'ajuster l'analyse hydraulique du système de distribution, et de vérifier les données du réseau.

Il a été démontré que l'étude du temps de séjour en utilisant un traceur conservateur est un moyen efficace pour calibrer l'analyse hydraulique du système de distribution (Kennedy 1995).

2.2 LA DISPERSION ET LE MÉLANGE

La dispersion est le phénomène physique qui résulte du mélange des particules fluides entre elles. Généralement, la dispersion engendre la diminution des concentrations et le mélange.

Le phénomène de diffusion d'un produit dans un fluide suit la loi de Fick : le flux du traceur est proportionnel au gradient de concentration locale.

Plusieurs mécanismes différents, agissant séparément ou simultanément, sont à l'origine de la diffusion. On retrouve :

1. La diffusion moléculaire provoquée par le mouvement Brownien des particules. Il n'est pas nécessaire que la masse liquide soit en mouvement. Par exemple, pour une substance de densité locale $C_f(x, y, z, t) \equiv C$, le vecteur de densité du flux q_f est proportionnel au gradient de la densité et dirigé dans le sens (négatif) des densités décroissantes :

$$\overline{q_f} = -k \text{ grad } C_f ; q_{f_i} = -k \frac{\partial C_f}{\partial x_i} \quad (2.2)$$

où :

k = coefficient de diffusivité (diffusivité moléculaire)

La diffusion est un processus irréversible et produit une dissipation d'énergie dans le fluide (Graf et al, 1995).

2. La diffusion turbulente qui s'observe à deux échelles :
 - en microturbulence (turbulence naturelle), simplement due à l'écoulement de l'eau (vitesse).
 - en macroturbulence, lorsque l'écoulement donne lieu à des remous de grandes dimensions qui s'ajoutent à la turbulence naturelle. L'échelle du phénomène (dimensions de l'écoulement de l'eau) est le principal facteur responsable de la macroturbulence.
3. La diffusion forcée qui produit un mélange fortement accentué par un dispositif extérieur ou des dispositions hydrauliques particulières comme l'impact produit par la rencontre de deux écoulements. Dans ce cas, l'angle d'incidence

entre les deux écoulements et les vitesses respectives sont déterminantes pour la diffusion (Piette et al 1974).

D'une façon globale, le terme de dispersion regroupe tous les aspects du mélange liés à la diffusion sous toutes ses formes et tient compte des hypothèses d'étude des écoulements (1D, 2D, etc.).

Pour un régime permanent dans un écoulement unidimensionnel on suppose un mélange complet en direction verticale et latérale.

Les concentrations (ML^{-3}) de différents traceurs C_i , $i = 1, 2, \dots$ sont une fonction de leurs taux d'entrée et de sortie (source et décroissance), de leur dispersion, ainsi que de leurs réactions physiques, chimiques, biologiques et peut-être radiologiques. L'équation du traçage unidimensionnel, qui donne la variation de la concentration d'un traceur par rapport au temps t en un point P , dans une direction x est donné par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(EA \frac{\partial c}{\partial x} - UAC \right) \pm S \quad (2.3)$$

où :

x = distance (L) pour un point d'analyse P

t = temps (T)

$Q(x,t)$ = débit (L^3T^{-1})

$A(x)$ = section d'écoulement (L^2)

$U(x,t)$ = vitesse moyenne (LT^{-1})

$C(x,t)$ = concentration moyenne (ML^{-3})

E = coefficient de dispersion (L^2T^{-1})

S = terme source ($ML^{-3}T^{-1}$)

Les termes dans l'équation (2.3) sont :

$EA(\partial c)/(\partial x)$ = flux de dispersion (le changement du flux de traceur en direction x due à la dispersion. Il est supposé proportionnel au gradient de concentration).

UAC = flux d'advection (le changement du flux de traceur dû à l'advection) causé par le mouvement de l'eau qui contient le traceur à un taux U pour la section A .

Dans l'équation (2.3), la différence

$$EA \frac{\partial c}{\partial x} - UAC$$

représente le flux total (MT^{-1}). Le traceur est transféré par dispersion des zones de grande concentration vers des zones de concentration moindre.

S = inclut toutes les réactions qui gouvernent l'augmentation ou la diminution du taux de concentration du traceur. S est positif pour une source de traceur et négatif pour une décroissance de traceur.

E = coefficient de dispersion. Il dépend de l'amplitude et de la fréquence du flux du traceur ainsi que des turbulences d'écoulement. Il inclut les effets de distribution du traceur, ceux-ci ne pouvant être décrits par le transport d'advection.

Les termes dispersion et advection dépendent du champ des vitesses d'écoulement où le traceur est distribué. Une bonne description des caractéristiques de la vitesse permet une évaluation des effets réels de dispersion sur la concentration de traceur.

2.3 QUELQUES SOLUTIONS SIMPLES À L'ÉQUATION DE LA DISPERSION

2.3.1 TRAÇAGE UNIDIMENSIONNEL - RÉGIME D'ÉCOULEMENT PERMANENT - TURBULENT

C'est le cas le plus simple, on suppose :

- Tuyau de section constante
- Régime permanent d'écoulement ($\partial / (\partial t) = 0$)
- Coefficient de dispersion constant
- Hypothèse de Fick
- Injection à $x = 0$ à taux constant de constituant $Wo(MT^{-1})$

L'équation (2.3) devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} + S \quad (2.4)$$

($S = -KC$ si le taux de dégénérescence = $K (T^{-1})$)

Sa solution s'exprime par :

$$\begin{aligned} C(x) &= \frac{Wo}{Qm} \exp \left[\frac{U}{2E} (1+m)x \right], \quad x < 0 \\ &= \frac{Wo}{Qm} \exp \left[\frac{U}{2E} (1-m)x \right], \quad x \geq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

où :

$$m = \sqrt{1 + \frac{4KE}{U^2}} = \frac{\sqrt{U^2 + 4KE}}{U} \quad (2.6)$$

Pour trois cas classiques on obtient :

- a. E faible et donc advection seulement

$$m \rightarrow 1 \quad C(x) = \frac{Wo}{Q} \exp\left(-\frac{Kx}{U}\right) \quad (2.7)$$

Pour x grand, $C(x) \rightarrow 0$

- b. U faible et donc dispersion seulement

$$\begin{aligned} C(x) &= \frac{Wo}{2A\sqrt{KE}} \exp\left(x\sqrt{K/E}\right), \quad x < 0 \\ &= \frac{Wo}{2A\sqrt{KE}} \exp\left(-x\sqrt{K/E}\right), \quad x \geq 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

- c. E faible et $K = 0$; $x = 0$

$$m = 1$$

$$C(x) = \frac{Wo}{Q} = \text{const.} \quad (2.9)$$

Les solutions sont présentées selon l'ordre suivant :

- a - Figure 2.1.a
- b - Figure 2.1.c

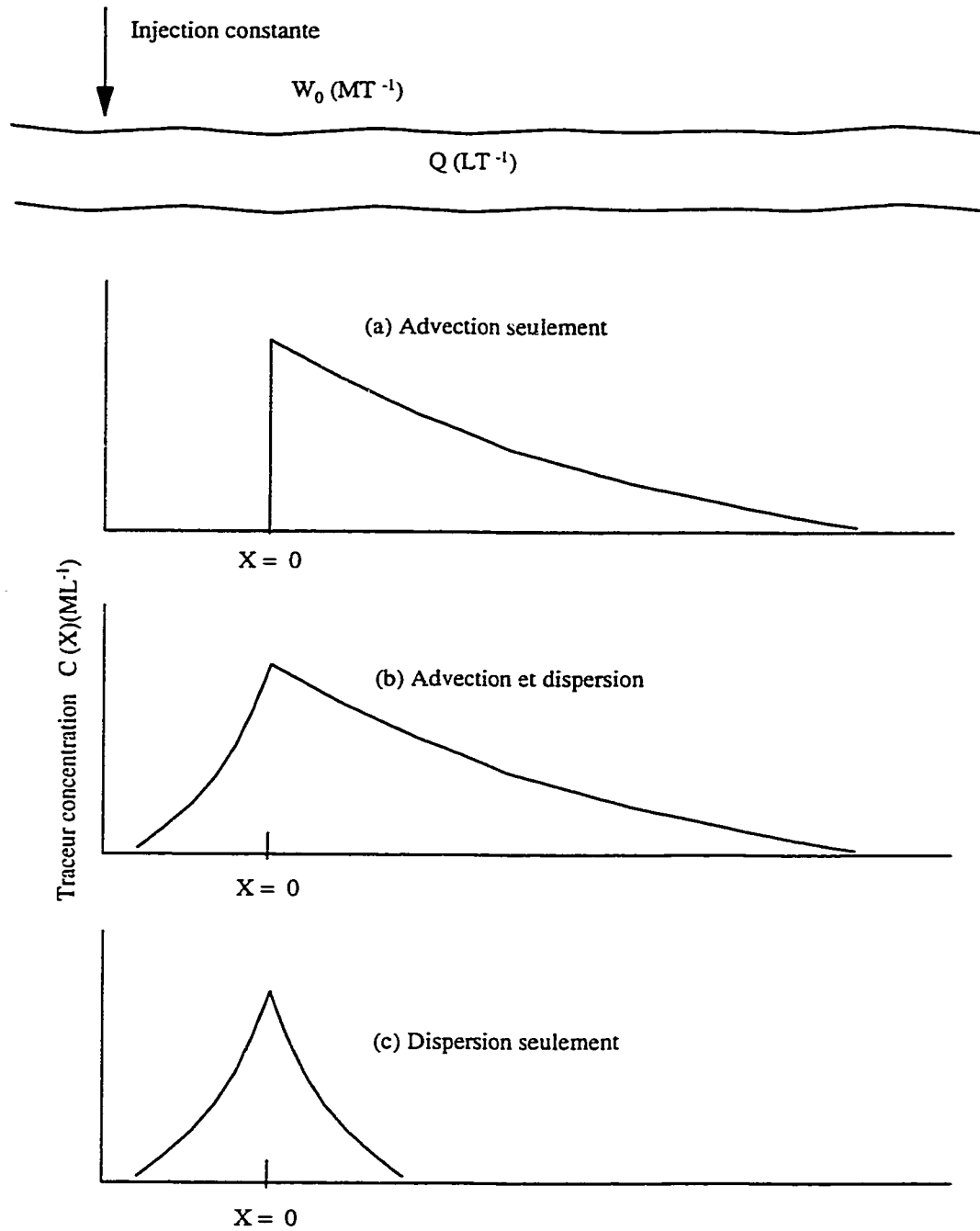


Figure 2.1 - La concentration d'un traceur injecté en un point de l'écoulement.

2.3.2 RÉGIME D'ÉCOULEMENT NON-PERMANENT

- Tuyau de section constante
- E constant
- Q variable dans le temps
- $S = 0$

L'équation (2.3) devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.10)$$

2.3.2.1 SOLUTION 1 : INJECTION INSTANTANÉE

Injection instantanée d'un volume V_0 de traceur à la concentration C_0 à $x = 0$.

$$C(x, t) = \frac{C_0 V_0}{2A\sqrt{\pi Et}} \exp\left[-\frac{(x - Ut)^2}{4Et}\right] \quad (2.11)$$

2.3.2.2 SOLUTION 2 : INJECTION CONTINUE ET CONSTANTE

Injection continue d'un traceur à $t = 0$ qui crée à $x = 0$ une concentration constante, C_0 .

Conditions frontières : $C(0, t) = C_0$, $0 < t < \infty$

Conditions initiales : $C(x, 0) = 0$, $0 < x < \infty$

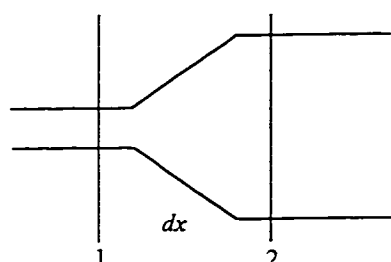
$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x - Ut}{\sqrt{4Et}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x + Ut}{\sqrt{4Et}}\right) \exp\left(\frac{Ux}{E}\right) \right] \quad (2.12)$$

et donc

$$C(x, t) \rightarrow C_0 \text{ pour } t \rightarrow \infty$$

2.3.3 ÉLARGISSEMENT ET RÉTRÉCISSEMENT DANS LA MÊME CANALISATION

Le cas peut se définir de la façon suivante :



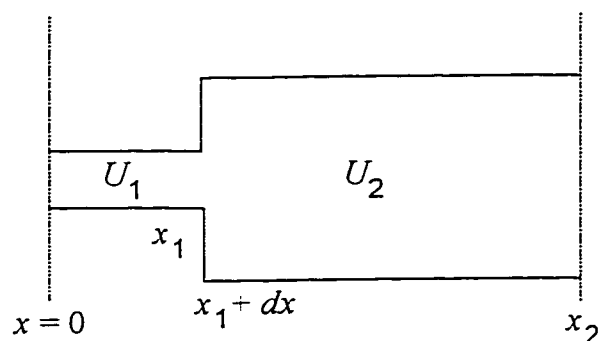
$$Q_1 = Q_2$$

$$C_1 Q_1 = C_2 Q_2$$

$$\text{donc } C_1 = C_2$$

$$dx \cong 0 \quad C_1(t) = C_2(t)$$

Pour une injection continue à $t = 0$, l'équation (2.12) donne



$C(0, t)$ connue (mesurée)

$C(x_1, t)$ obtenu à l'équation (2.12) avec : $U = U_1$ et $x = x_1$

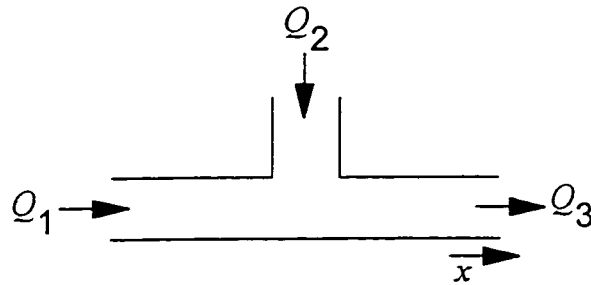
$$C(x_1 + dx, t) = C(x_1, t)$$

$C(x_2, t)$ obtenu à l'équation (2.12) avec : $U = U_2$; $C_0 = C(x_1 + dx, t)$; $x = x - x_1$;

$$t = t - x/U_1 .$$

2.3.4 EMBRANCHEMENT DE CANALISATION

Sa visualisation donne :



$$Q_1 + Q_2 = Q_3$$

$$C_1 Q_1 + C_2 Q_2 = C_3 Q_3$$

$$C_3 = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

$C_1(t)$ et $C_2(t)$ connues donc $C_3(t)$ connue. $C_3(t)$ devient la concentration d'origine à appliquer dans l'équation (2.12) pour trouver $C_3(x, t)$.

CHAPITRE III

APPAREILLAGE D'ANALYSE

3.1 MÉTHODE DE SIMULATION NUMÉRIQUE - PROGRAMME PADRE

PADRE (Programme d'Aide à la Datation dans un Réseau d'Eau) a été conçu au département de génie civil de l'École Polytechnique de Montréal (Marche, 1995). Le programme détermine la loi de variation de la concentration d'un constituant conservateur (traceur) en un point d'analyse de l'eau d'un réseau, alimenté à sa source par une eau à concentration connue.

Le programme PADRE, dans ses deux versions, traite le fonctionnement d'un réseau en régime permanent et non-permanent, réseau qui peut être ramifié et/ou maillé et alimenté par une ou plusieurs sources des produits conservateurs.

Le modèle donne aussi l'âge de la particule de l'eau qui part de l'usine au temps t , qui emprunte un chemin quelconque dans un réseau de distribution et qui se retrouve au point P à un moment d'analyse, où se mélangent des eaux ayant emprunté de multiples chemins et ayant des âges différents dans le réseau.

On trouvera « $t_{\Sigma}^{Pt}ch$ », soit le temps de séjour ou l'âge de la particule passant au point d'analyse « pt » et ayant pris le chemin « ch ».

Les calculs supposent l'information suivante :

- les points d'analyse (pt);
- les différents chemins empruntés par l'eau pour arriver au point d'analyse depuis la source (la succession des éléments de chaque chemin) (ch);

- les valeurs des longueurs (m), des sections (m^2), des éléments des canalisations et les débits (m^3/s) sur chaque chemin. La longueur de chaque élément est choisie en tenant compte de la particularité constructive de chaque réseau de calcul (coudes, appareils de mesures, etc.);
- la loi de variation de la concentration du traceur utilisé à la source en fonction du temps ($C(x=0, t)$).

Pour le régime permanent utilisé dans la présente étude, on a un débit constant dans le réseau et nous supposons que la demande en eau est constante et connue durant la simulation.

Chaque chemin apporte au point d'analyse une proportion de débit calculée comme étant le débit minimal instantané observé sur l'une des canalisations du chemin divisé par la somme des débits minimaux dans tous les chemins.

Pour un temps d'analyse $t^{pt}an$, la concentration $Ct^{pt}an$ peut être calculée comme la superposition directe et pondérée ($Pch\%$) des concentrations émises à la source aux temps d'émission ($tem^{pt}ch$) respectifs évalués.

Le temps d'émission est le temps auquel la particule a été émise à la source :

$$t_{em}^{pt} ch = t_{an} - t_S^{pt} ch \quad (3.1)$$

et la concentration est :

$$C_t^{pt} an = \sum_{ch} (Pch\%) C(x=0, t_{em}^{pt} ch) \quad (3.2)$$

Le langage utilisé pour le modèle PADRE est FORTRAN 77. L'exécution du programme a besoin d'un fichier de données d'entrée et d'un fichier de sortie. Les deux fichiers sont de type ASCII et sont éditables par l'éditeur DOS. Les fichiers de résultats sont de deux types :

- fichier présenté pendant l'exécution du programme PADRE qui affiche le temps de séjour T_s ;
- fichier de stockage qui contient les variations de la concentration observée et calculée (mg/l) du traceur en point d'analyse à chaque pas de temps (sec.) choisi (voir tableau 3.1 qui contient le calcul des temps de séjour en réseau).

Tableau 3.1 - Fichier de résultats PADRE, point C - Essai 7

Légende : ALTOT : L élément ch(m)

TEMPS : tem (sec)

PROP : %ch

CONC. : mg/l

PROGRAMME PADRE

CALCUL DES TEMPS DE SÉJOUR EN RÉSEAU

DÉBITS CONSTANTS DANS LE RÉSEAU

HYDROCOSME INC. 1994

Résultats	L(m)				
ALTOT	2,800	ALTOT	50,300		
ALTOT	3,800	ALTOT	62,700		
ALTOT	16,700	ALTOT	68,300		
ALTOT	17,900	ALTOT	70,700		
ALTOT	27,700	ALTOT	79,500		
ALTOT	45,700	ALTOT	82,300		
Point	Chemin	Premiers éléments			
12	1	12	11	10	9 8
Temps : 173,0		Concentration observée :		12,580	
Point	Chemin	Conc. origine	TS	PROP	
12	1	12,58	82,50	1,00	

Temps : 173,5		Concentration observée :		13,17
Point	Chemin	Conc. origine	TS	PROP
12	1	13,17	82,50	1,00
Temps : 174,0		Concentration observée :		13,76
Point	Chemin	Conc. origine	TS	PROP
12	1	13,76	82,50	1,00

3.1.1 PROGRAMME PADRE APPLIQUÉ AU RÉSEAU DU LABORATOIRE

Sur le réseau du laboratoire, le chemin de canalisation a été divisé en douze éléments PADRE en respectant les trois points d'analyse A, B, C (voir figure 3.1 _ .en détail dans L'ANNEXE B)

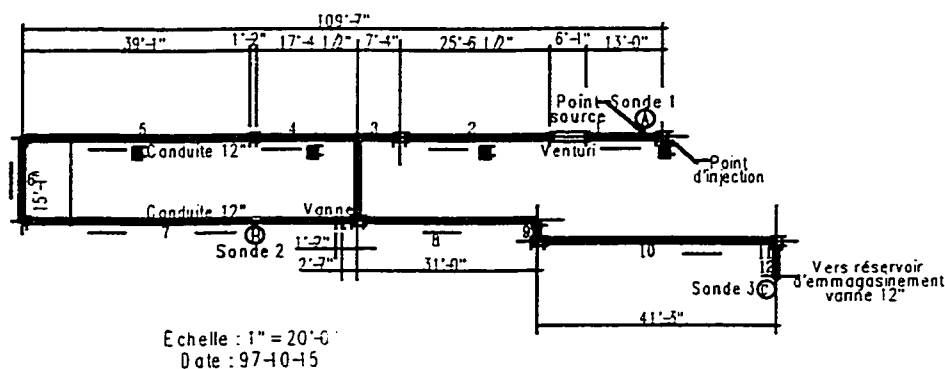


Figure 3.1 - Boucle d'essai du réseau du laboratoire d'hydrodynamique de l'ÉPM

Les points d'essai utilisés sont au nombre de quatre en incluant le point d'injection qui se trouve à 2,00 m en amont du premier point d'analyse A.

Le point d'analyse A se trouve au début du réseau d'essai $L = 0(\text{m})$ et il impose la courbe des valeurs de concentration du traceur.

Le point d'analyse B se trouve à une longueur de réseau $L = 51$ m et il délimite un réseau d'un chemin de sept éléments.

Le point d'analyse C est situé à la fin d'un réseau d'un chemin de douze éléments.

Un élément du chemin, c'est la partie de conduite qui a son temps de séjour :

$$T_{Si} = \frac{L_i}{v} . \quad (3.3)$$

Le point C se trouve à une longueur de réseau $L = 82.3$ m. Il s'agit du dernier point d'analyse et il délimite un chemin de douze éléments PADRE, soit cinq éléments de plus sur les premiers 7 (point B).

Les débits utilisés sont choisis dans un intervalle compris entre 8.5 l/s et 196 l/s. La période d'analyse a été établie à chaque temps de séjour pour chaque débit.

La courbe d'injection source, pour chaque débit d'essai, est représentée par dix points de la courbe des valeurs des concentrations $C(t)$ au point A.

Le pas de temps d'analyse a des valeurs de 1, 0,5 ou 0,25 secondes et il est choisi en fonction de l'échelle de temps pour une période d'échantillonnage de 16 minutes, 8 minutes ou 4 minutes. Les résultats apparaissent dans les chapitres 4 et 5.

L'injection d'une solution de NaCl est faite au début du réseau. Le point d'injection a été placé à 2,00 m avant le premier point considéré en échantillonnage afin d'avoir un mélange représentatif entre le débit d'injection Q_i et le débit dans la canalisation Q_c dès le premier point d'analyse.

3.1.2 LE TEMPS DE SÉJOUR

Les résultats de simulation de PADRE aident à comparer les valeurs des concentrations prévues dans les points d'analyse avec les observations mesurées par le système d'échantillonnage automatique. Les prédictions du temps de séjour qui ne coïncident pas avec le champ d'observation sont corrigées par ajustement du débit.

Pour un régime permanent qui passe de transition à turbulence complète, les valeurs du temps de séjour simulées par PADRE sont constantes.

Une comparaison entre les valeurs moyennes minimales et maximales des temps de séjour pour les valeurs des débits d'essai est présentée dans les tableaux 4.4 et 4.5 , page 49 .

Le calcul du temps de séjour, en utilisant les données d'un fichier d'entrée PADRE, est basé sur le principe suivant : en n'importe quel point pt du réseau se mélangent des eaux qui ont suivi différents parcours (chemin). Chaque chemin ch a son propre temps de séjour $Ts(pt, ch)$ et apporte, au point pt d'analyse, une proportion $Pch\%$ du débit total Q . Cette proportion du débit est calculée comme étant le débit minimal instantané observé sur l'une des canalisations du chemin divisé par la somme des débits minimaux dans tous les chemins.

Le principe de calcul des temps de séjour pour le programme PADRE dans un point du réseau en régime permanent d'écoulement est donc le suivant :

1. PADRE suppose un débit constant de la demande.

2. PADRE compare le débit à la somme des débits minimaux dans tous les chemins :

$$\sum Pch = Q \div \sum Q \min = 1 \quad (3.4)$$

3. PADRE calcule $Ts(pt, ch)$ comme étant la somme des temps de séjour de chaque tronçon du chemin de l'eau qui passe par le point d'analyse pt .

4. Pour un temps d'analyse Tan , PADRE calcule le temps d'émission d'une particule d'eau depuis la source.

$$Tem = Tan - Ts \quad (3.5)$$

5. Avec les temps d'émission respectifs, la concentration est calculée comme étant la superposition directe et pondérée des concentrations d'origine (à la source). Les concentrations $C(pt, Tan)$ calculées à chaque Tan représente la courbe $C(t)$ prédite par PADRE.

6. Pour plusieurs chemins, le temps de séjour global T_s^{pt} au point pt est calculé comme la moyenne pondérée des temps de séjour des différents chemins relativement à leur concentration selon leur pourcentage dans le réseau. Si pour deux chemins, PADRE a calculé $Tsch_1$ et $Tsch_2$, le temps de séjour total est :

$$Ts = \frac{Ts(ch_1) \times Q \min(ch_1) + Ts(ch_2) \times Q \min(ch_2)}{Q \min(ch_1) + Q \min(ch_2)} \quad (3.6)$$

7. PADRE affiche dans le premier fichier de résultats le temps de séjour sur chaque chemin global et pour chaque temps d'analyse, la concentration qui a été prise en compte dans chaque chemin. Il affiche dans le deuxième fichier de résultats la loi de la variation de la concentration. C'est la courbe des

valeurs des concentrations mesurées à la source, translatée au point d'analyse. Le temps de séjour représente l'intervalle de temps entre deux points de même concentration sur ces deux courbes des valeurs $C(t)$.

3.2 MÉTHODE DE LABORATOIRE

3.2.1 TRAÇAGE

Le but des essais est l'étude du temps de séjour par l'analyse de la propagation d'un traceur dans un réseau d'eau sous pression et la validation de la méthode de traçage dans ce réseau.

Les essais sont effectués pour vérifier l'importance pratique du phénomène de dispersion grâce à l'étude du temps de séjour réel attaché aux particules d'eau empruntant un réseau d'eau sous pression.

La méthode expérimentale est celle d'un traçage chimique à l'aide d'un traceur conservatif. Elle consiste à injecter un traceur en amont du réseau et à interpréter la loi de concentration de ce traceur mesurée en aval en fonction du temps.

La transformation qui affecte la loi de la concentration connue du traceur injecté en amont pour produire la loi de la concentration en aval dépend des caractéristiques de l'écoulement dans le réseau choisi et des régimes d'écoulement observés (écoulements permanents, écoulements turbulents ou laminaires, les champs des vitesses, taux de dispersion, etc.).

Le traceur utilisé est le chlorure de sodium (NaCl) et est injecté en solution dans l'eau à un débit d'injection constant, $Q_i = 0,042$ l/s et une concentration variable du

traceur en fonction du débit d'écoulement est calculée afin d'obtenir la concentration finale de 30 mg/l.

Le montage utilisé en laboratoire comprend :

- une boucle de réseau de canalisations sous pression ayant les caractéristiques présentées au tableau 3.3;
- trois conductimètres HANNA INSTRUMENTS HI8936C;
- un système d'acquisition automatique des données sur l'ordinateur du laboratoire (logiciel TEAM PRO).

L'injection de la solution salée est faite avant le premier élément du schéma utilisé par le programme PADRE.

Les sondes (1, 2, 3) des conductimètres installés aux points A, B, C (voir figure 3.1) d'échantillonnage automatique, mesurent en continu la conductivité électrique de l'eau. Ils mesurent le voltage qui passe entre deux électrodes immergées dans la solution et l'information est transmise à l'ordinateur par le système d'acquisition de données.

En plaçant les électrodes dans les conduites, en écoulement, les courbes des valeurs des tensions électriques sont dans le sens négatif. Le signal est changé à cause d'une perte de tension électrique causée par le métal des conduites et l'eau.

On a dû recréer les conditions de mélange à chaque point d'analyse dans des montages annexes reliés au réseau d'essai. Pour maintenir la précision des mesures, on utilise une simulation des concentrations (programme MEL3) qui reconstitue les conditions d'écoulement principal.

À cause de la différentielle de concentration en formule de calcul de la concentration, les valeurs mesurées sont beaucoup plus irrégulières et nécessitent un lissage.

Le montage annexé, identique en composantes et dimensions pour les trois points d'analyse, comprend des boyaux qui descendent des conduits dans les points A, B et C dans des récipients ayant un trop plein qui dirige le débit (≈ 1 l/s) vers l'extérieur. Les trois sondes immergées dans ces trois récipients et qui contrôlent chacune un volume $V \approx 1$ l sont reliées au système d'acquisition automatique des données.

3.2.2 CALIBRAGE DES APPAREILS ET STANDARDISATION DES PARAMÈTRES

Les trois conductimètres ont été étalonnés individuellement sur les valeurs standards de trois échantillons d'une concentration de 0, 10 et 50 mg/l. La formule utilisée est fournie par le manufacturier et peut donc être vérifiée.

Une deuxième calibration pour ces trois appareils HI8936C a été faite sur le montage réel avec ses connexions au système d'acquisition automatique des données mais les électrodes sont immergées dans cinq échantillons de solution standard de sel allant de 0 mg/l à 300 mg/l (tableau 3.2).

Tableau 3.2 - Les cinq échantillons des solutions standard de sel.

Nr. l'échantillon	1	2	3	4	5
Salinité mg/l	0	30	50	90	300
Conduct. HI microS	322	377	418	482	957
Conduct.Porta.microS	316	365	403	463	912
Temperature Celsius	24,2	24,3	24,2	23,7	24,3
Cond.Team Pro. A mV	274	312	345	395	778
Cond.Team Pro. B mV	277	313	352	405	835
Cond.Team Pro. C mV	277	313	342	406	824

Les résultats sont lus par le logiciel TEAM PRO qui donne, en tensions électriques, les valeurs enregistrées par les conductimètres HI8936C.

La position des appareils aux points A, B, C a été maintenue dans le même ordre pour les deux calibrations et tout au long des essais et des simulations.

D'après les valeurs obtenues, on remarque que l'appareil HI8936C en position B présente une augmentation sur la moyenne des valeurs données aux conductimètres en positions A et C.

Trois lois de régression ont été établies entre la salinité (mg/l) de ces cinq échantillons de solution NaCl et les conductivités affichées par TEAM PRO pour les trois appareils HI8936C.

Ces lois sont :

$$\begin{aligned}
 C_A &= a_1 S_1 + b_1 \\
 a_1 &= 260 \\
 b_1 &= 1,71 \\
 r_1 &= 0,998
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
 C_B &= a_2 S_2 + b_2 \\
 a_2 &= 258 \\
 b_2 &= 1,90 \\
 r_2 &= 0,998
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
 C_C &= a_3 S_3 + b_3 \\
 a_3 &= 257 \\
 b_3 &= 1,87 \\
 r_3 &= 0,998
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Elles servent à transformer durant nos essais, les conductivités mesurées en salinité.

3.2.3 PROGRAMME D'ESSAI

Sur le réseau choisi, 4 points représentatifs seront utilisés pour tous les essais :

- Un point d'injection à un débit contrôlé pour chaque essai, $Q_i = 0,042$ l/s.
- Trois points A, B, C, d'échantillonnage TEAM PRO.

La durée d'un essai est différente en fonction de chaque vitesse d'écoulement et elle comporte trois phases :

- Phase 1 : $t = 0$ min. à $t = 1$ min.
Injection nulle
Départ du logiciel TEAM PRO
- Phase 2 : $t = 1$ min. à $t = 3$ min.
Injection à débit contrôlé de 0,042 l/s
- Phase 3 : Comprend les deux phase précédentes
 $t = 0$ à $t = 4$ à 16 min.
Échantillonnage automatique TEAM PRO.

Dans la troisième phase, la conductivité de l'eau (sans ou avec sel) est mesurée aux trois points A, B, C à chaque pas de temps imposé par le nombre des mesures fixé à l'aide du logiciel TEAM PRO.

Les valeurs des conductivités mesurées au point A sont représentatives de celles du mélange obtenu entre le traceur et le débit du circuit et en termes de concentration saline (mg/l), elles représentent la courbe-source $C(t)$ pour la simulation PADRE. Les valeurs dépendent de la concentration de traceur, du débit d'injection et du débit dans le circuit.

Ces valeurs caractérisent la dilution initiale du traceur que l'on retrouve dans le principe de conservation de la masse du traceur :

$$\begin{aligned}
 Q_i C_i + Q_c C_o &= (Q_c + Q_i) C_A \\
 Q_i C_i + Q_c C_o + Q_c C_A + Q_i C_A & \\
 Q_c (C_A - C_o) &= Q_i (C_i - C_A) \\
 Q_c &= Q_i (C_i - C_A) / (C_A - C_o) \\
 C_i &= Q_c / Q_i (C_A - C_o) + C_A
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

où

Q_c = débit dans le circuit (l/s)

Q_i = débit d'injection (l/s)

C_i = concentration d'injection (mg/l)

C_A = concentration du mélange (mg/l)

C_o = concentration initiale (mg/l)

Les mesures effectuées aux points A, B, C sont des conductivités et non des concentrations. Les trois lois présentées à la section 3.2.2 sont utilisées pour obtenir les concentrations en sel (mg/l).

Un total de 10 essais a été réalisé pour des débits de 8,5; 24,0; 36,0; 42,0; 48,0; 59,0; 71,0; 86,0; 105,0; 196,0 l/s .

3.2.4 MODE OPÉRATIONNEL

L'essai commence par :

1. La préparation du réservoir utilisé comme dispositif d'injection : mise en vide partiel, remplissage d'un volume de 5 l de solution d'eau et de sel (NaCl) et pressurisation à environ 70 PSI (lb/in²) ou 700 kPa.
2. La mesure du débit d'écoulement et fixation à la valeur d'essai.
3. Le départ du logiciel TEAM PRO (enregistrement automatique de l'échantillonnage).
4. L'injection pendant deux minutes du mélange de traceur après une minute de fonctionnement du logiciel TEAM PRO.

3.2.5 VALEURS MESURÉES

Dans un essai, les valeurs mesurées sont :

- Concentration saline du mélange injecté (g/l).
- Débit de l'essai (l/s).
- Volume (l) et débit (l/s) dans le montage annexe.
- Débit d'injection (GIPM).
- Conductivités électriques (mV).
- Concentrations simulées numériques par PADRE(mg/l).
- Concentrations simulées (mg/l).
- Temps de séjour (sec.).
- Débit réel (l/s).
- Quantité de sel passée par les trois points d'échantillonnage A, B, C.
- Concentrations enregistrées valeurs maximales dans les points A, B, C.

3.3 CONDITIONS D'ÉTUDE

3.3.1 RÉSEAU D'ESSAI

Le réseau d'essai est une boucle d'essai du laboratoire d'hydrodynamique de l'EPM, qui apparaît à la figure 3.1.

Dans la version choisie, la boucle des conduites comporte douze tronçons (éléments PADRE) de canalisation de longueurs différentes, connues, et de même diamètre.

Tableau 3.3 - Les caractéristiques du réseau d'essai du laboratoire d'hydrodynamique -
- Simulation PADRE .

Tronçon	L m	Debit m ³ /s	D mm	S m ²
1	2,8	0,071	300	0,071
2	8,8	0,071	300	0,071
3	2,4	0,071	300	0,071
4	5,6	0,071	300	0,071
5	12,4	0,071	300	0,071
6	4,6	0,071	300	0,071
7	18	0,071	300	0,071
8	9,8	0,071	300	0,071
9	1,2	0,071	300	0,071
10	12,9	0,071	300	0,071
11	1	0,071	300	0,071
12	2,8	0,071	300	0,071

La boucle des conduites représente le chemin connu emprunté par l'eau depuis la source pour atteindre les points d'analyse.
choisi le point source A où on a la loi de variation de la concentration du traceur en

fonction du temps ($C(x = 0, t)$). Le premier point d'analyse B est à 51 m et le deuxième point d'analyse C est à 82.3 m. Les débits sont mesurés à l'aide d'un tube Venturi ou avec une balance hydraulique.

Les conduits sont en acier, installés depuis 40 ans et on a estimé le coefficient de rugosité f à 0.003.

3.3.2 RÉGIME D'ÉCOULEMENT PERMANENT - TURBULENT

On utilise un débit uniforme pour tout le parcours du chemin PADRE, représentant une consommation en eau ou une demande constante. Le débit est constant dans le temps et en chaque élément de canalisation. L'écoulement est turbulent avec des valeurs du nombre de Reynolds variant de $NR = 30\ 000$ à $740\ 000$.

La valeur de la rugosité conduit à un écoulement en régime de transition pour $NR < 90\ 000$ et un régime de pleine turbulence pour valeur $NR > 90\ 000$.

La vitesse moyenne est constante en direction et en intensité mais une particule P située quelque part en aval du point d'injection subit une vitesse qui varie au hasard en magnitude et en direction d'un moment à l'autre, autour de la valeur moyenne d'écoulement. Ces variations contribuent à la dispersion du traceur et à la diminution des concentrations maximales.

À peu de distance du point d'injection, les petites particules sont dispersées par la turbulence. On retrouve le comportement d'un nuage qui s'étend en se déplaçant vers l'aval.

Il est possible de considérer un écoulement permanent turbulent comme résultant d'une superposition de fluctuations turbulentes instantanées sur un temps d'écoulement moyen permanent dans la direction d'écoulement.

En tout point, la vitesse a deux composantes :

- la vitesse moyenne;
- la vitesse instantanée.

Les particules du traceur subissent trois influences :

- la diffusion moléculaire;
- la vitesse moyenne (du temps moyen);
- les fluctuations de la vitesse turbulente.

Leur déplacement individuel est donc dû à une résultante de ces trois processus, évalué grâce au concept de Prandtl :

- Les fluctuations turbulentes sont liées directement à la vitesse de cisaillement (vitesse de friction).

$$U_* = \left(\frac{\tau_o}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

où

τ_o = tension tangentielle (cisaillement)

ρ = densité du fluide

La longueur du mélange est proportionnelle à la distance y de la particule par rapport à la paroi.

$$l = Ky \quad (3.12)$$

où

K = constante de von Karman

y = distance de la paroi

La distribution due à la diffusion turbulente n'est pas uniforme et dépend de l'orientation des vitesses instantanées et de la distance y de la paroi.

3.3.3 LE NOMBRE DE REYNOLDS

Le nombre de Reynolds caractérise la nature de l'écoulement et sa turbulence pour chaque débit d'essai :

$$NR = \frac{VD}{\nu} \quad (3.13)$$

où

V = vitesse moyenne dans le conduit (LT^{-1}) T^{-1}

D = diamètre du conduit (L)

ν - viscosité cinématique du fluide (L^2T^{-1}) T^{-1}

Dans la présente étude, où nous avons utilisé un coefficient de rugosité f à 0,003, un $NR < 90\,000$ caractérise un écoulement en régime de transition et un $NR > 90\,000$, un régime de pleine turbulence.

Pour les essais effectués en laboratoire, les valeurs des nombres de Reynolds varient entre $NR = 30\,000$ et $740\,000$ (voir tableau 4.6 et 4.7).

On a déterminé une corrélation à partir de chaque essai, entre les coefficients de dispersion dans les points d'analyse B et C (K_x) et le Nombre de Reynolds (voir tableau 4.5). Les résultats apparaissent à la figure 4.11 et 4.12.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Les 10 essais retenus ont permis d'obtenir un ensemble complet de résultats donné de façon détaillée à l'annexe A.

Tous les essais ont été analysés de façon identique et l'annexe A présente les résultats d'essais, donc successivement les caractéristiques de chaque essai, le tableau des valeurs des concentrations 4.1, 4.2, 4.3 et le graphique des valeurs des concentrations 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ou 4.5 selon le cas.

L'évolution des concentrations est représentée par plusieurs types de tableaux et de courbes. L'essai 7 est pris comme exemple pour les tableaux et les figures résultants :

Dans les tableaux, on a choisi des valeurs de concentrations obtenues après chaque essai, vingt valeurs représentatives sur 1 024 valeurs mesurées en échantillonnage.

Pour chaque temps choisi, on a pour les trois points A, B et C, les valeurs des concentrations correspondantes.

Le tableau 4.1.A.7 donne les valeurs des concentrations enregistrées obtenues après lissage et les valeurs de la courbe de la concentration $c(t)$ - PADRE marquée différemment par des nombres de 1 à 10. Ce sont les valeurs des concentrations utilisées en simulation numérique.

Le lissage des valeurs est fait avec un logiciel programmé en FORTRAN. Le lissage utilisé prend 20, 40 ou 60 valeurs en fonction de l'irrégularité des courbes des valeurs mesurées et à la condition de garder la même pente initiale des courbes.

Tableau 4.1.A.7 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage - Essai 7

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	90	1	11,99	141	11,77	173	12,48
2	92		13,62	146	14,55	176	13,65
3	93	2	15,53	148	17,58	179	16,96
4	95		19,31	150	20,90	181	19,54
5	96	3	20,53	151	23,31	183	22,46
6	100		30,89	152	24,69	185	24,84
7	104	4	35,12	154	27,95	187	26,13
8	108		36,00	156	31,16	190	28,85
9	110	5	36,29	158	32,24	195	31,76
10	150		37,11	181	35,03	201	32,29
11	207	6	37,97	218	35,04	206	33,08
12	208		37,40	222	34,74	263	35,00
13	209	7	35,95	260	34,23	270	35,00
14	211		31,22	263	30,68	288	34,89
15	213	8	26,42	265	27,80	294	31,02
16	215		21,78	267	24,40	296	28,67
17	218	9	15,23	269	20,80	298	25,73
18	219		14,58	271	17,41	300	22,62
19	220	10	14,11	273	15,88	312	15,62
20	222		13,96	275	15,24	320	13,97

La figure 4.1.A.7 donne les valeurs des concentrations enregistrées obtenues après lissage.

On voit sur les courbes l'effet de la dispersion sur les concentrations de traceur et aussi la réduction des valeurs maximales et les décroissances avec les distances parcourues aux points B et C.

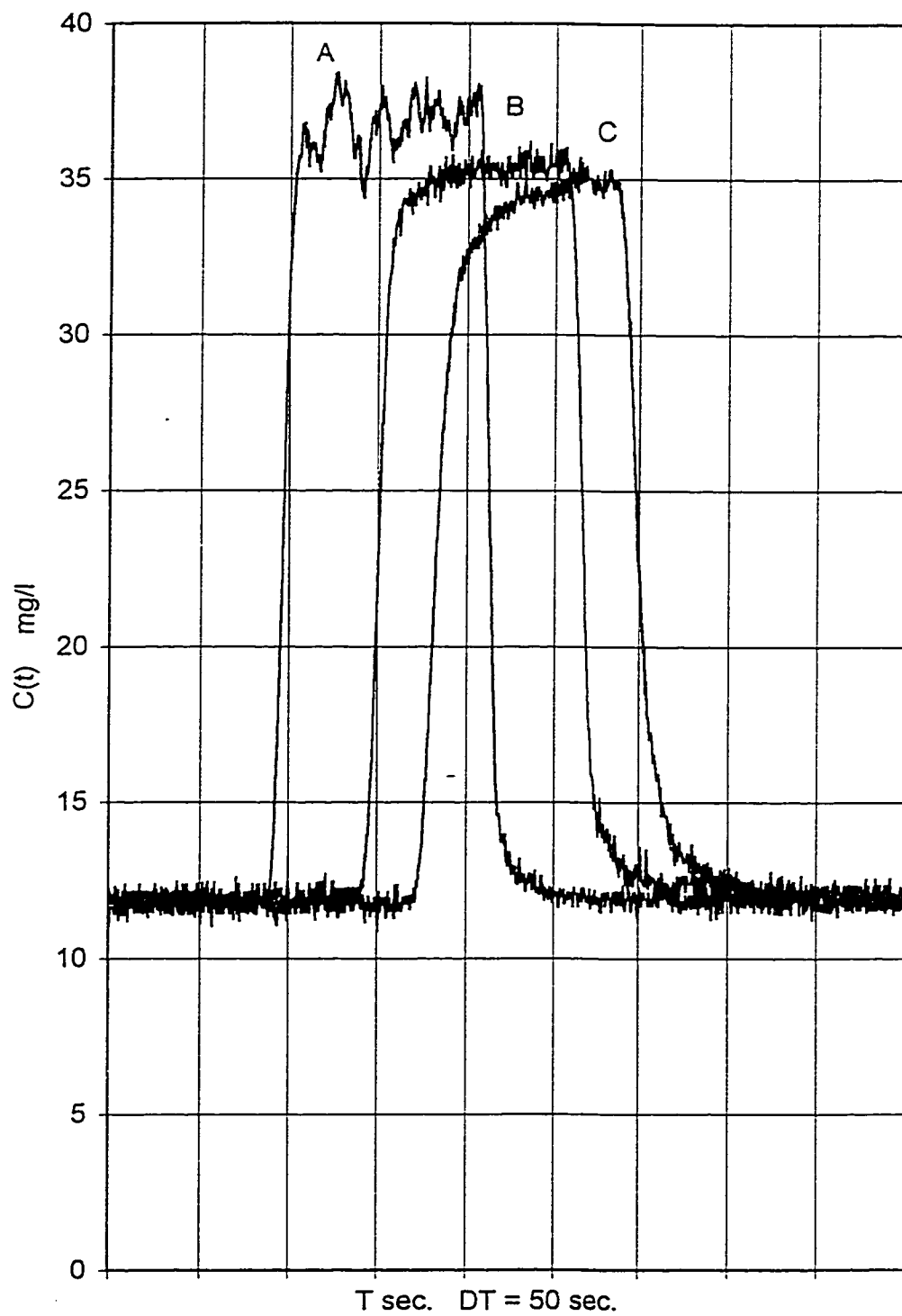


Figure 4.1 A7 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 7

Le tableau 4.2.A.7 donne les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré, avant l'injection et en choisissant le temps de début et de fin d'analyse d'après le temps obtenu pour les points B et C en échantillonnage.

Tableau 4.2.A.7 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 7

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	141	11,99	172,5	11,99
2	144	14,94	175,0	14,94
3	145	17,24	177,0	18,82
4	146	19,92	178,0	21,02
5	147	22,11	179,0	23,21
6	149	26,50	180,0	25,40
7	150	28,70	181,0	27,60
8	151	30,89	183,0	31,42
9	152	31,95	184,0	32,48
10	155	35,12	186,5	35,12
11	161	36,29	192,5	36,29
12	258	37,97	289,5	37,97
13	260	35,95	292,0	34,76
14	262	31,18	293,0	32,38
15	264	26,42	294,0	30,00
16	265	24,18	295,0	27,61
17	266	21,94	296,0	25,30
18	267	19,71	297,0	23,06
19	269	15,23	298,0	20,83
20	271	14,11	302,5	14,11

La figure 4.2.A.7 donne les valeurs des concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré au point B.

On voit les différences entre les valeurs de la courbe translatée par PADRE et les valeurs observées en échantillonnage. Les vitesses dans la conduite, utilisées par PADRE, ne sont pas réelles. On cherche à minimiser les différences de superposition des valeurs par l'ajustement optimal du débit utilisé par PADRE.

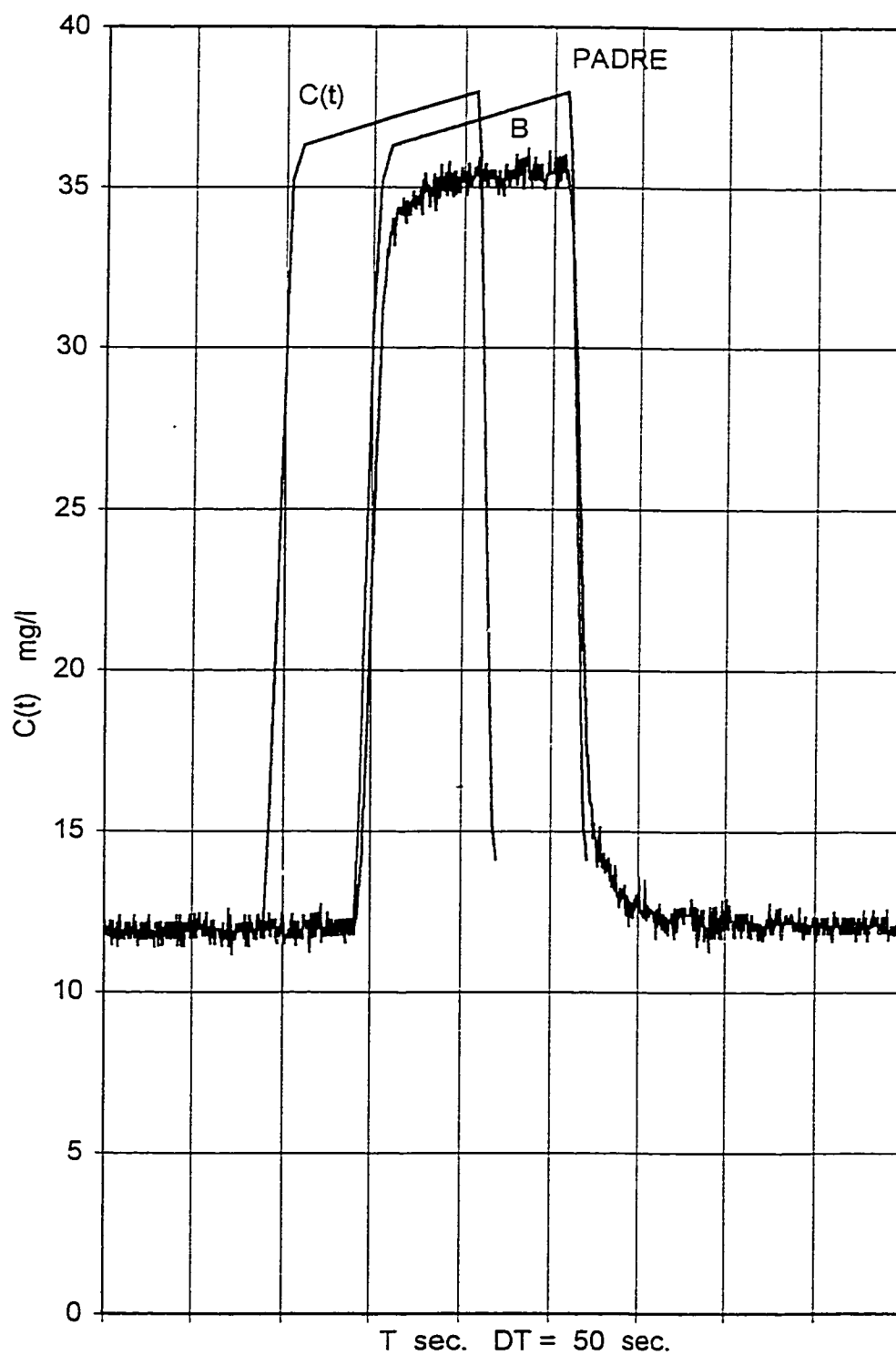


Figure 4.2 A7 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 7

Le tableau 4.3.A.7 donne les comparaisons des concentrations mesurées et simulées après l'ajustement optimal du débit. On a évalué aussi l'erreur $\Delta\%$ pour la précision de translation du mélange utilisé par PADRE dans les points d'analyse B et C.

Tableau 4.3.A.7 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées après l'ajustement optimal du débit - Essai 7

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	144,5	13,35	10	11,99	177,5	14,72	24	11,99
2	148,0	16,43	5	15,53	180,0	17,29	18	14,94
3	149,0	19,06	2	17,72	182,0	20,06	13	18,21
4	150,0	20,30	2	19,92	183,0	21,44	7	19,92
5	151,0	23,31	0	23,21	184,0	23,53	1	23,21
6	152,0	24,69	3	25,40	185,0	24,84	2	25,40
7	153,5	27,19	5	28,70	187,0	26,64	8	28,70
8	154,5	28,97	7	30,89	188,0	26,97	14	30,89
9	157,0	31,85	5	33,53	192,0	29,94	17	35,12
10	165,0	34,35	6	36,29	288,0	34,89	8	37,86
11	258,0	35,52	7	37,91	295,0	30,00	26	37,97
12	262,0	32,79	16	37,97	297,0	28,19	27	35,95
13	264,0	30,47	18	35,95	298,0	25,73	26	32,38
14	265,0	27,80	16	32,38	299,0	24,95	20	30,00
15	266,0	25,46	18	30,00	300,0	22,62	22	27,61
16	267,0	24,40	13	27,61	302,0	21,25	14	24,18
17	268,0	22,54	12	25,30	303,0	19,84	5	20,82
18	269,0	20,80	11	23,10	305,0	18,87	7	17,47
19	271,0	17,98	10	19,71	306,0	17,73	14	15,23
20	274,5	14,79	4	14,11	307,5	17,24	18	14,11

Erreur moyenne : 11 %

La figure 4.3.A.7 donne les valeurs des concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit au point B. La figure 4.4.A.7 donne les concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré au point C. La figure 4.5.A.7 donne les concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit au point C.

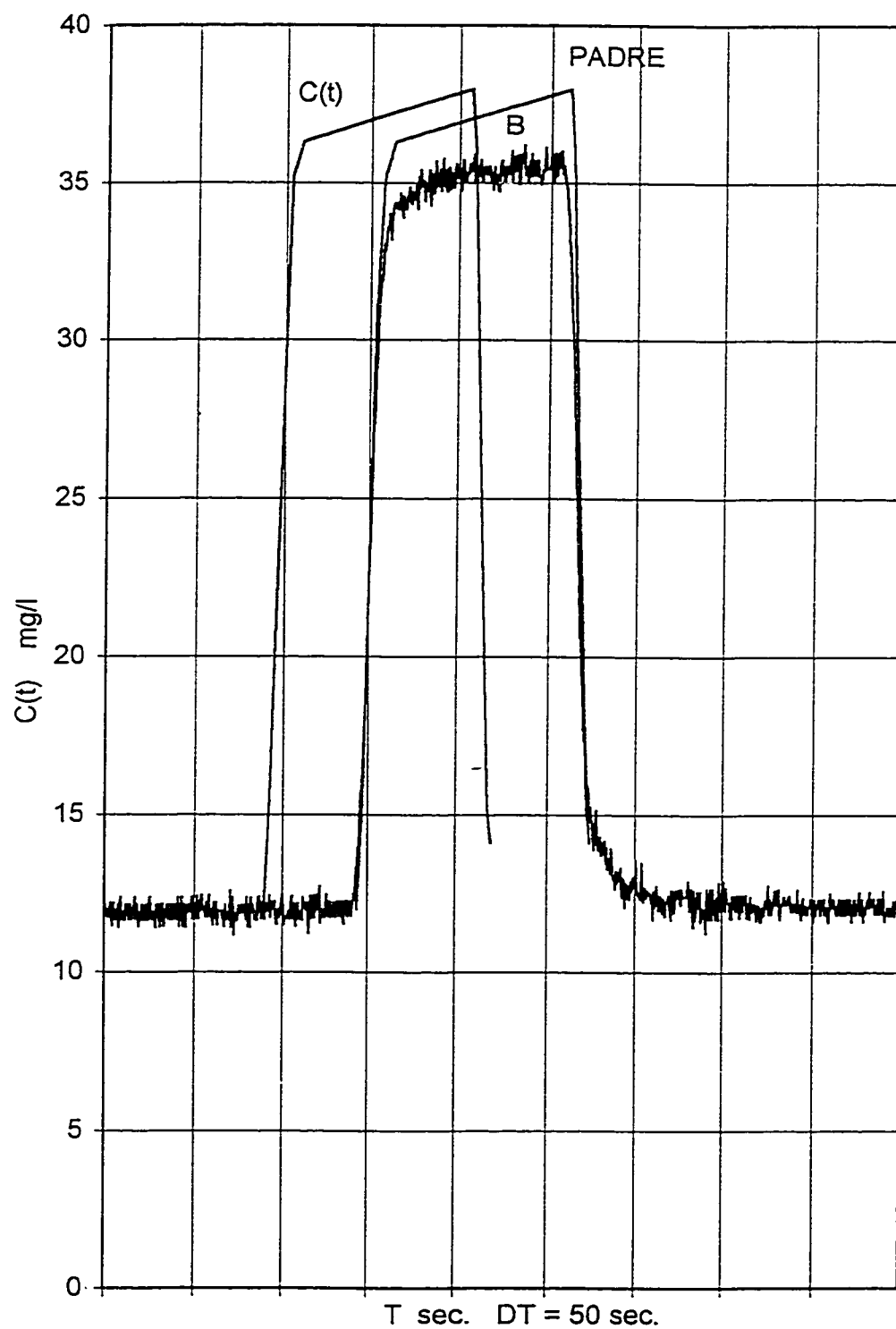


Figure 4.3 A7 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 7

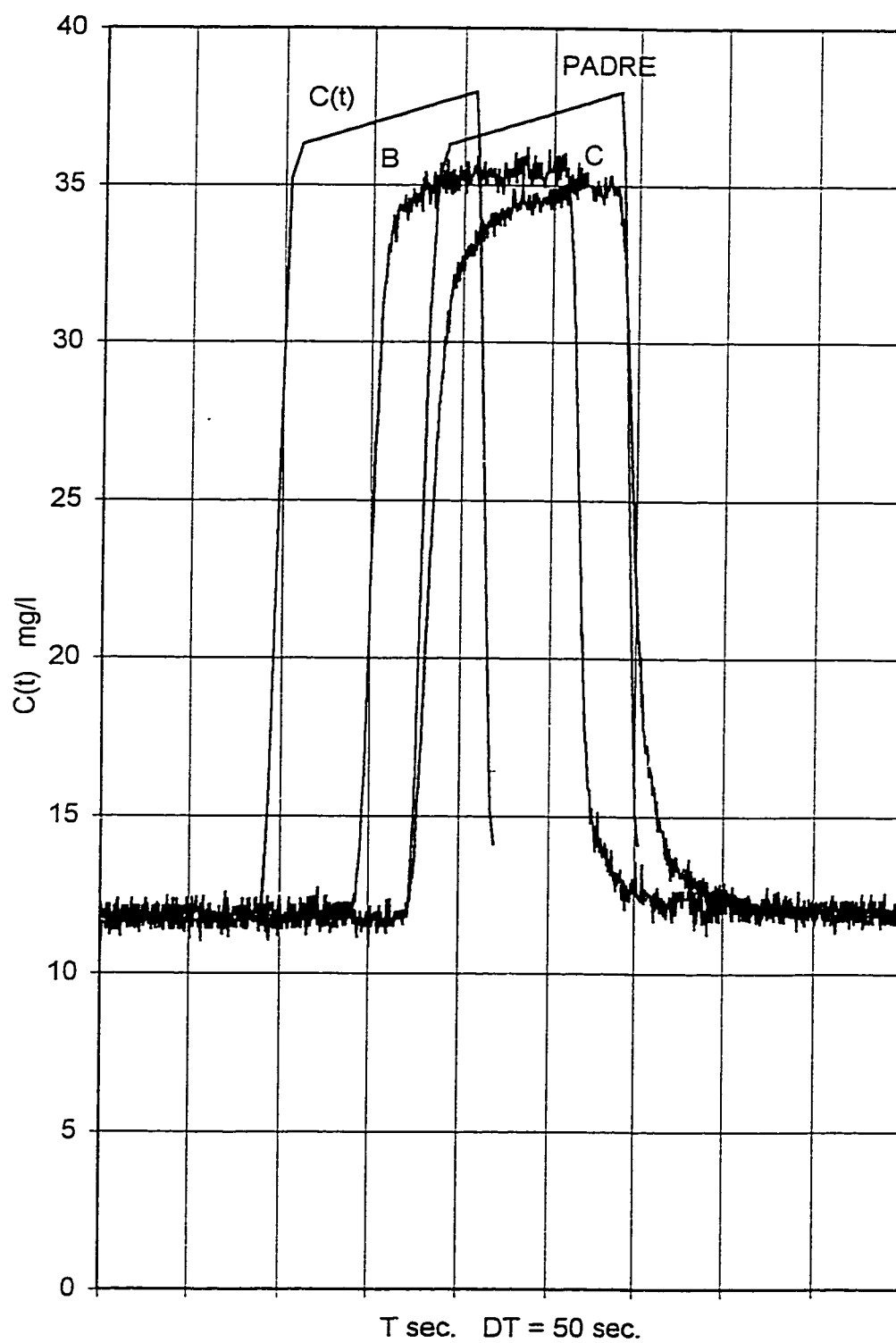


Figure 4.4 A7 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 7

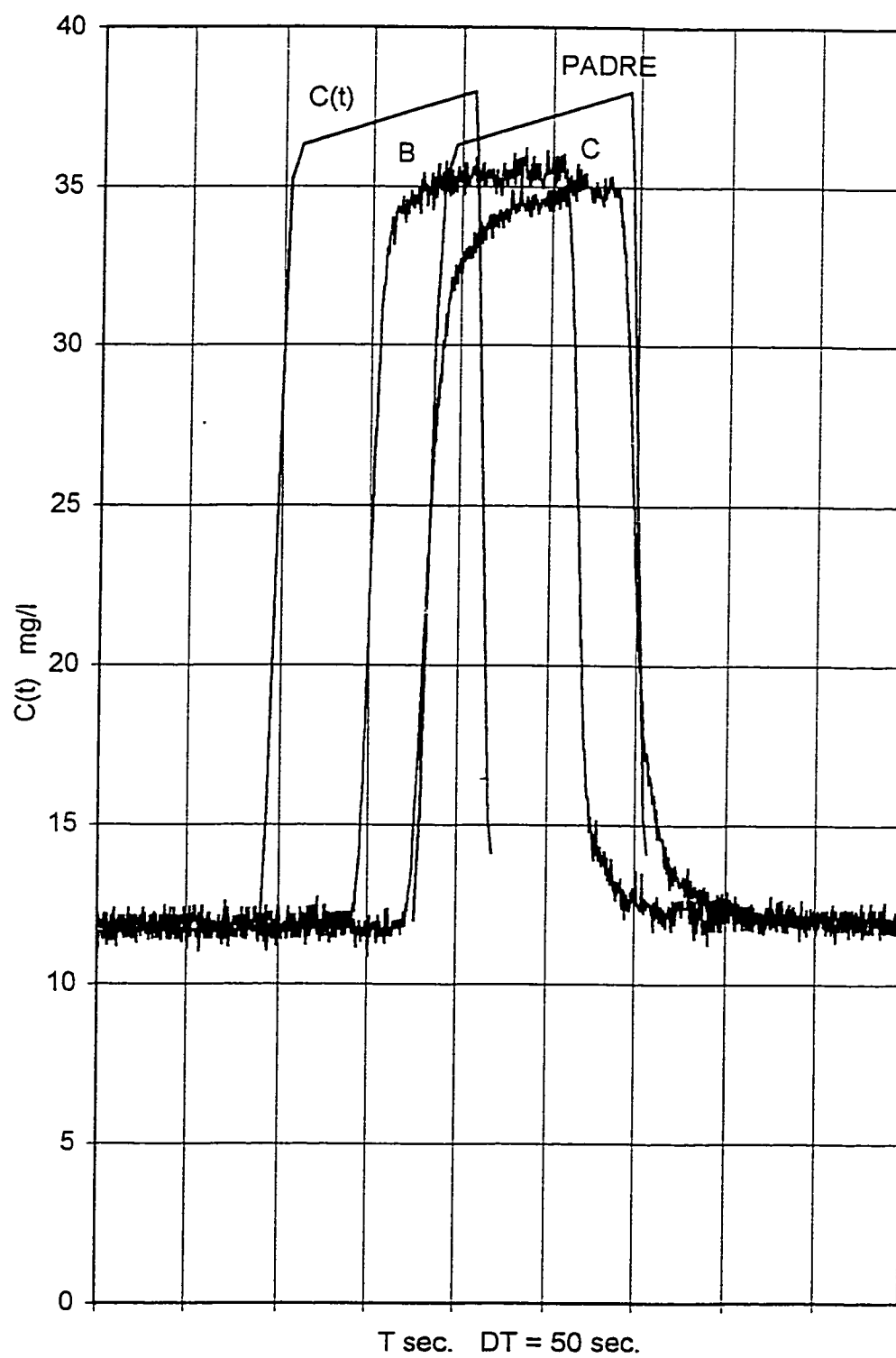


Figure 4.5 A7 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 7

Pour comprendre l'analyse effectuée sur ces essais, on explicitera la démarche sur un exemple, soit celui de l'essai 7.

Ajustement de débit

Le débit mesuré au Venturi étant de 71 l/s, la vitesse d'écoulement de 1 m/s et le nombre de Reynolds de 270 000. Un ajustement du débit à la valeur de 67 l/s, après comparaison des temps de séjour entre les différents points, permettait de minimiser l'erreur sur le temps de séjour au deuxième point à 26 % et au troisième point à 29 %. Sur d'aussi petits débits, une erreur de cet ordre au Venturi est inévitable.

Vérification de la masse du traceur

Une vérification de la masse totale du traceur, observée par l'intégration des concentrations, donnait respectivement des valeurs de 320 g, 319 g et 318 g de sel transporté et permettait d'en vérifier la conservation effective.

Décroissance dans les concentrations

Les valeurs des concentrations maximales pour l'essai 7 sont :

$$C_{\max}^A = 37.97 \text{ mg/l} \quad C_{\max}^B = 35.04 \text{ mg/l} \quad C_{\max}^C = 34.89 \text{ mg/l}$$

On présente à la figure 4.6 la décroissance de concentration en fonction de la distance entre le point source A et les points d'analyse B et C.

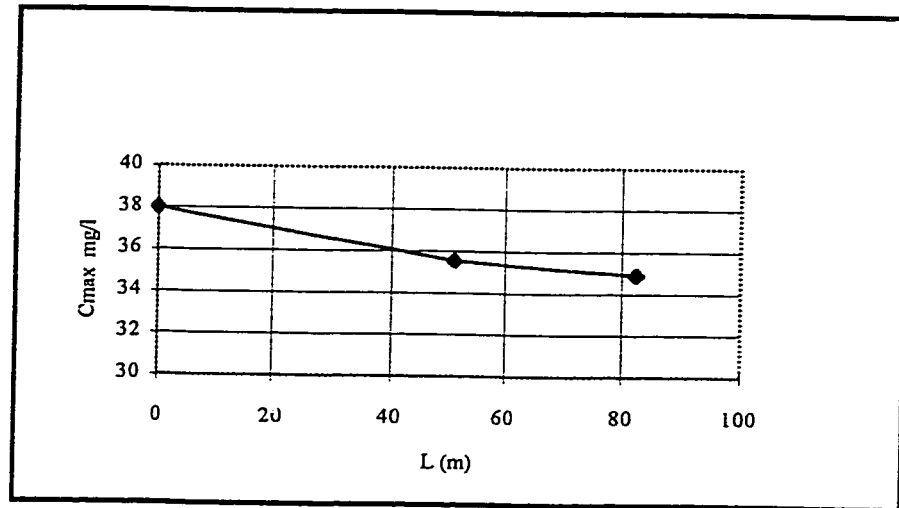


Figure 4.6 - Décroissance des concentrations vs distance, points A, B, C - Essai 7

L'ensemble des courbes correspondantes pour les 10 essais est donné à l'annexe B, figures 4.7 et 4.8.

Pour l'essai 7, la décroissance des concentrations en fonction de Δx a été établi à

$$\frac{\frac{\Delta C}{C}_B}{\Delta x} = 0.15 \% \quad \text{entre A et B} \quad (4.1)$$

$$\frac{\frac{\Delta C}{C}_C}{\Delta x} = 0.1 \% \quad \text{entre A et C}$$

Le tableau 4.4 compare les taux des décroissances des concentrations pour les 10 essais et les valeurs des débits, les distances entre les points source et d'analyse et le Nombre de Reynolds, donc le niveau de turbulence observée. Dans le tableau 4.5, on a la variation du Nombre de Reynolds et le coefficient de dispersion/diffusion K_x (voir figures 4.11 et 4.12)

Tableau 4.4 - La décroissance des concentrations et le taux de décroissance.

Essai	Q l/s	Q _{ajusté} l/s	ΔC_B %	$\Delta_{B/A}$ %	Dist _{A-B} m	ΔC_C %	$\Delta_{C/A}$ %	Dist _{A-C} m
1	8,5	8,5	0,3	86	51			
2	24	26	0,6	70	51	0,5	61	82,3
3	36	32	0,1	95	51	0,1	92	82,3
4	42	38	0,1	93	51	0,1	90	82,3
5	48	45	0,2	91	51	0,1	93	82,3
6	59	55	0,17	89	51	0,2	86	82,3
7	71	67	0,15	92	51	0,1	92	82,3
8	86	80	0,15	92	51	0,1	91	82,3
9	105	107	0,1	95	51	0,05	96	82,3
10	196	196	0,1	93	51	0,1	93	82,3

Tableau 4.5 - La variation de dispersion/diffusion après 45 m.

Essai	Q l/s	Q _{ajusté} l/s	NR	T _{sA-B} sec	T _{sA-C} sec	Kx B m ² /s	Kx C m ² /s
1	8,5	8,5	30 000	427		-	-
2	24	26	91 000	151	225	-	-
3	36	32	140 000	117	172	70	30
4	42	38	158 000	96	150	150	80
5	48	45	180 000	82,5	130	110	40
6	59	55	223 000	64	107	220	180
7	71	67	270 000	54,5	87,5	500	375
8	86	80	320 000	45	73,5	698	600
9	105	107	400 000	36,5	55	1400	1200
10	196	196	740 000	18,5	30	4100	4100

Les tableaux 4.6 et 4.7 montre la variabilité des temps de séjour calculée selon la définition employée et le coefficient d'erreur $\Delta T\%$ pour le temps de séjour dans le point B et le point C.

Tableau 4.6 - Les intervalles de variation des temps de séjour et le coefficient d'erreur, point B.

Essai	Q l/s	Q _{ajusté} l/s	NR	T _{sA-B min} sec	T _{sA-B max} sec	A-B $\Delta T \%$
1	8,5	8,5	30 000	395	390	1
2	24	26	91 000	155	162	5
3	36	32	140 000	101	125	22
4	42	38	158 000	88	104	16
5	48	45	180 000	82	99	29
6	59	55	223 000	58	64	10
7	71	67	270 000	53	65	26
8	86	80	320 000	56	46	21
9	105	107	400 000	36	34	6
10	196	196	740 000	18	24	30

Tableau 4.7 - Les intervalles de variation des temps de séjour et le coefficient d'erreur, point C.

Essai	Q l/s	Q _{ajusté} l/s	NR	T _{sA-C min} sec	T _{sA-C max} sec	A-C $\Delta T \%$
1	8,5	8,5	30 000			
2	24	26	91 000	217	234	8
3	36	32	140 000	161	196	22
4	42	38	158 000	141	157	10
5	48	45	180 000	128	108	15
6	59	55	223 000	104	124	19
7	71	67	270 000	82	104	29
8	86	80	320 000	82	72	14
9	105	107	400 000	53	41	23
10	196	196	740 000	29	33	14

Le tableau 4.8 donne les valeurs de concentration dans les points d'analyse B et C en tenant compte de la dispersion. On a obtenue les valeurs de coefficient de dispersion K_x indirectement a partir des valeurs observees dans les essais effectuees. Pour des coefficients K_x obtenues avec la formule de calcul la solution de l'equation de tracage unidimensionnel ne verifie pas les valeurs des concentrations des essais.

Pour nos essais on est dans le cas d'injection d'une masse de substance sur une periode de temps fini, M_0/T , qui peut-etre assimilee par une serie d'injection de petites masses, $m_i = (M_0/T) \cdot \Delta\tau$, pendant un temps infiniment petit $\Delta\tau$. La concentration totale $C(x,t)$ est la somme des valeurs des concentrations de chaque des mini-injections.

$$C(x,t) = \sum_{i=1}^n \Delta C_i = \frac{1}{S\sqrt{4\pi K_x}} * \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\sqrt{t - \tau_{ii}}} * \exp\left[-\frac{[x - U(t - \tau_i)]^2}{4K_x(t - \tau_i)}\right] \quad (4.2)$$

Tableau 4.8 - Valeurs des concentrations avec la dispersion :

E	$K_x B$ m^2/s	$K_x C$ m^2/s	t_S^B sec	t_S^C sec	$C(x,t) B$ Kg/m ³	$C(x,t) C$ Kg/m ³
1	-	-	427	-	-	-
2	-	-	151	225	-	-
3	70	30	117	172	0,03	0,025
4	150	80	96	150	0,034	0,033
5	110	40	82,5	130	0,036	0,036
6	220	180	64	107	0,030	0,029
7	500	375	54,5	87,5	0,035	0,035
8	698	600	45	73,5	0,034	0,034
9	1400	1200	36,5	55	0,039	0,039
10	4100	4100	18,5	30	0,038	0,038

Les figures 4.7 et 4.8 présentent le taux de variation de la concentration en fonction du Nombre de Reynolds.

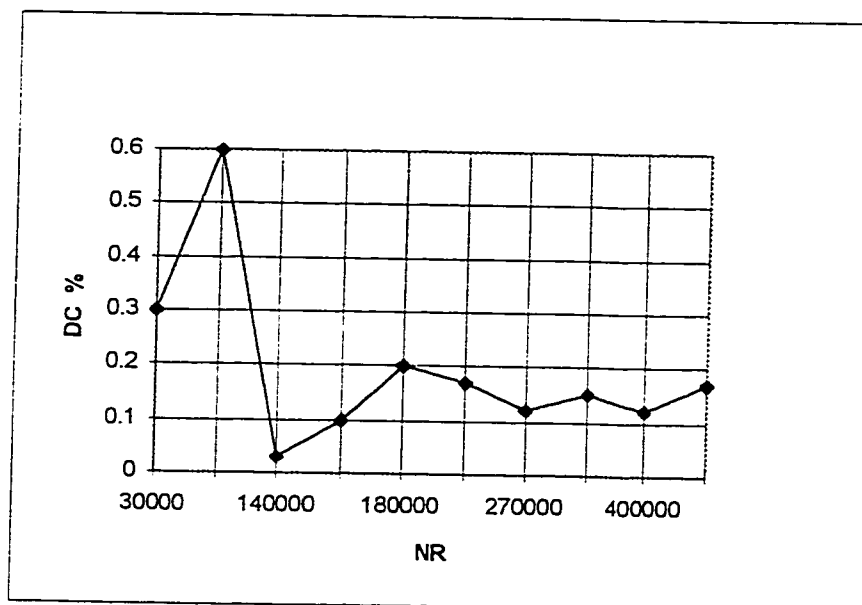


Figure 4.7 - Le taux de variation de la concentration vs Nombre de Reynolds, point B

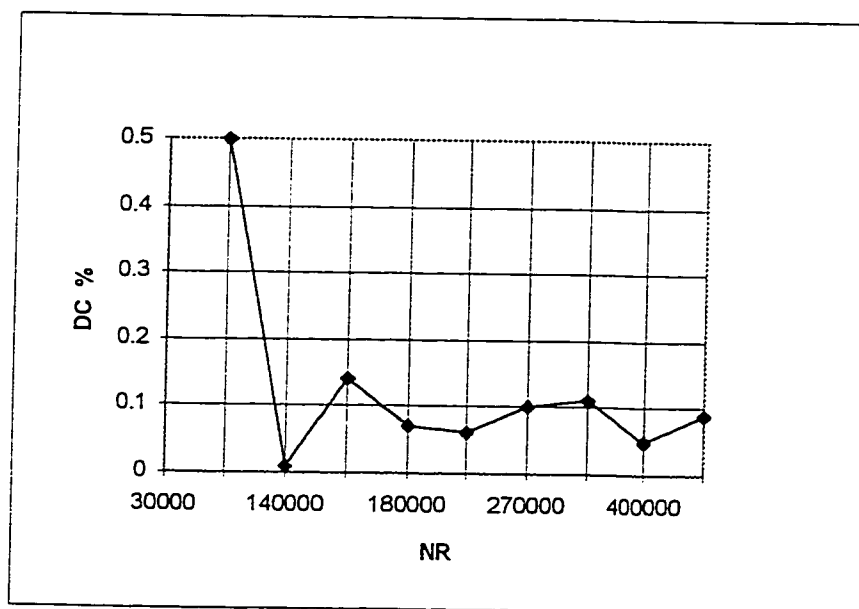


Figure 4.8 - Le taux de variation de la concentration vs Nombre de Reynolds, point C .

Les figures 4.9 et 4.10 montrent ces variations de taux de décroissance en fonction du Nombre de Reynolds.

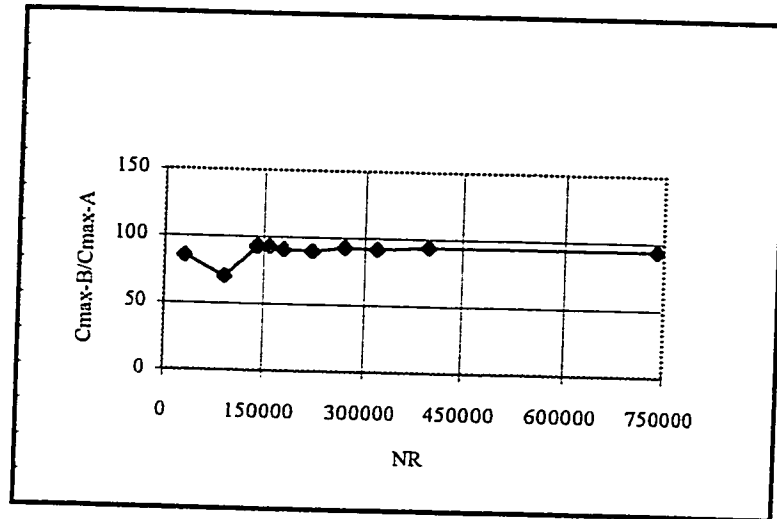


Figure 4.9 - Le taux de décroissance des concentrations vs Nombre de Reynolds, point B.

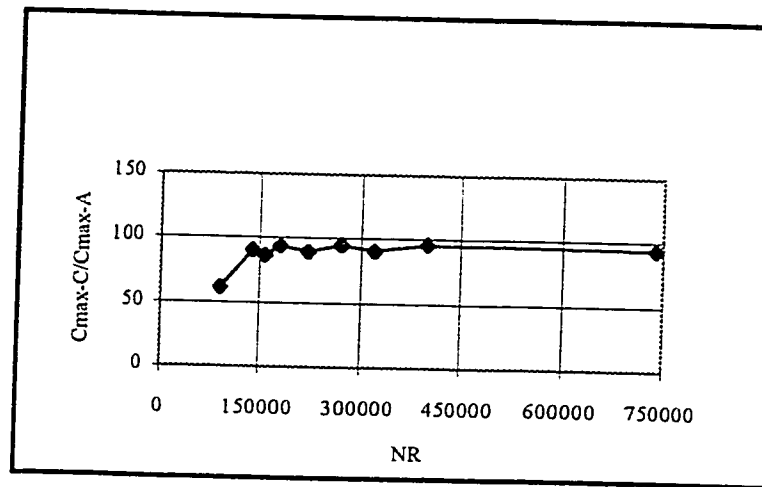


Figure 4.10 - Le taux de décroissance des concentrations vs Nombre de Reynolds, point C.

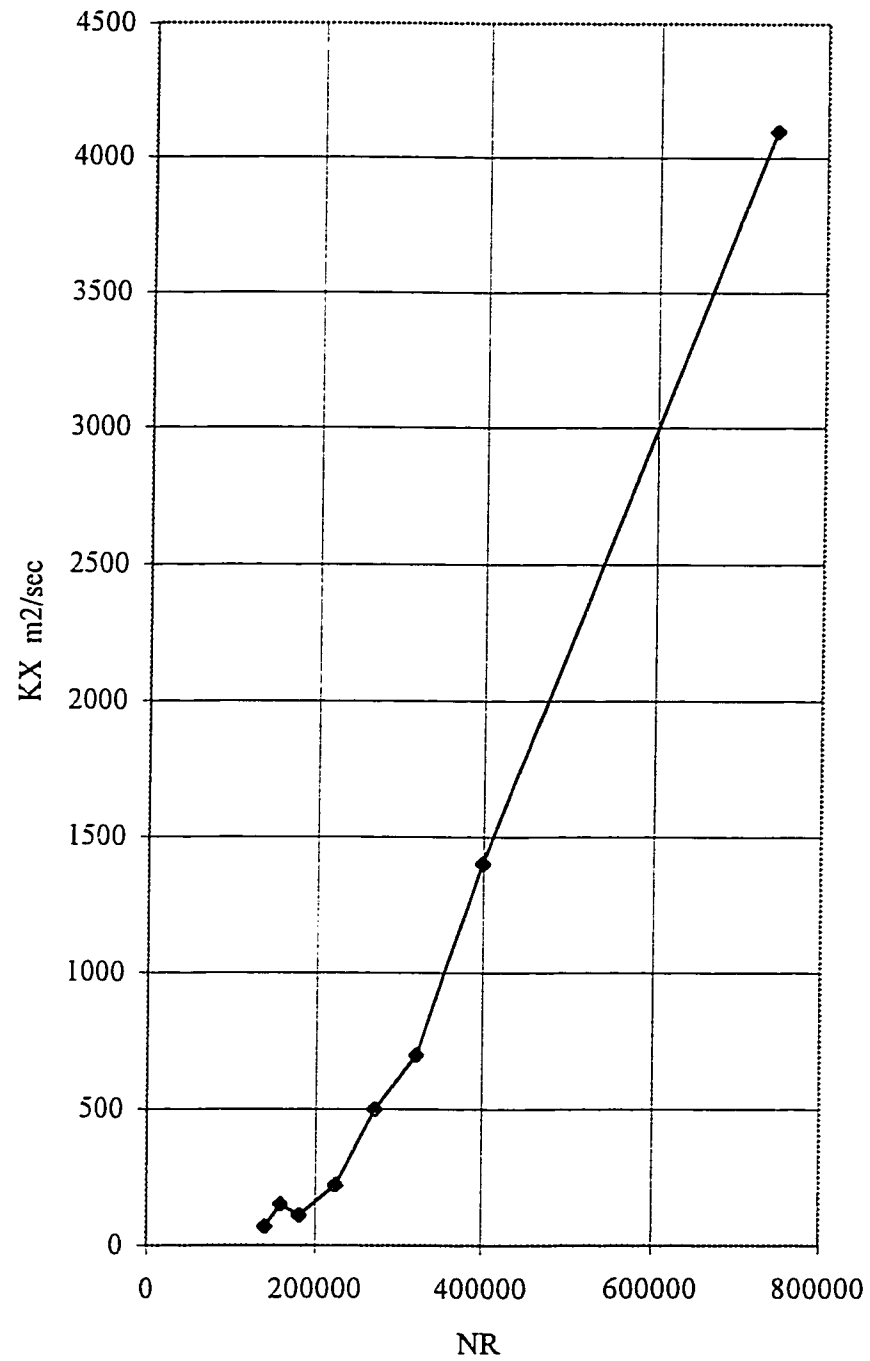


Figure 4.11 KX - Le Coefficient de Dispersion/Diffusion
fonction de Nombre de Reynolds

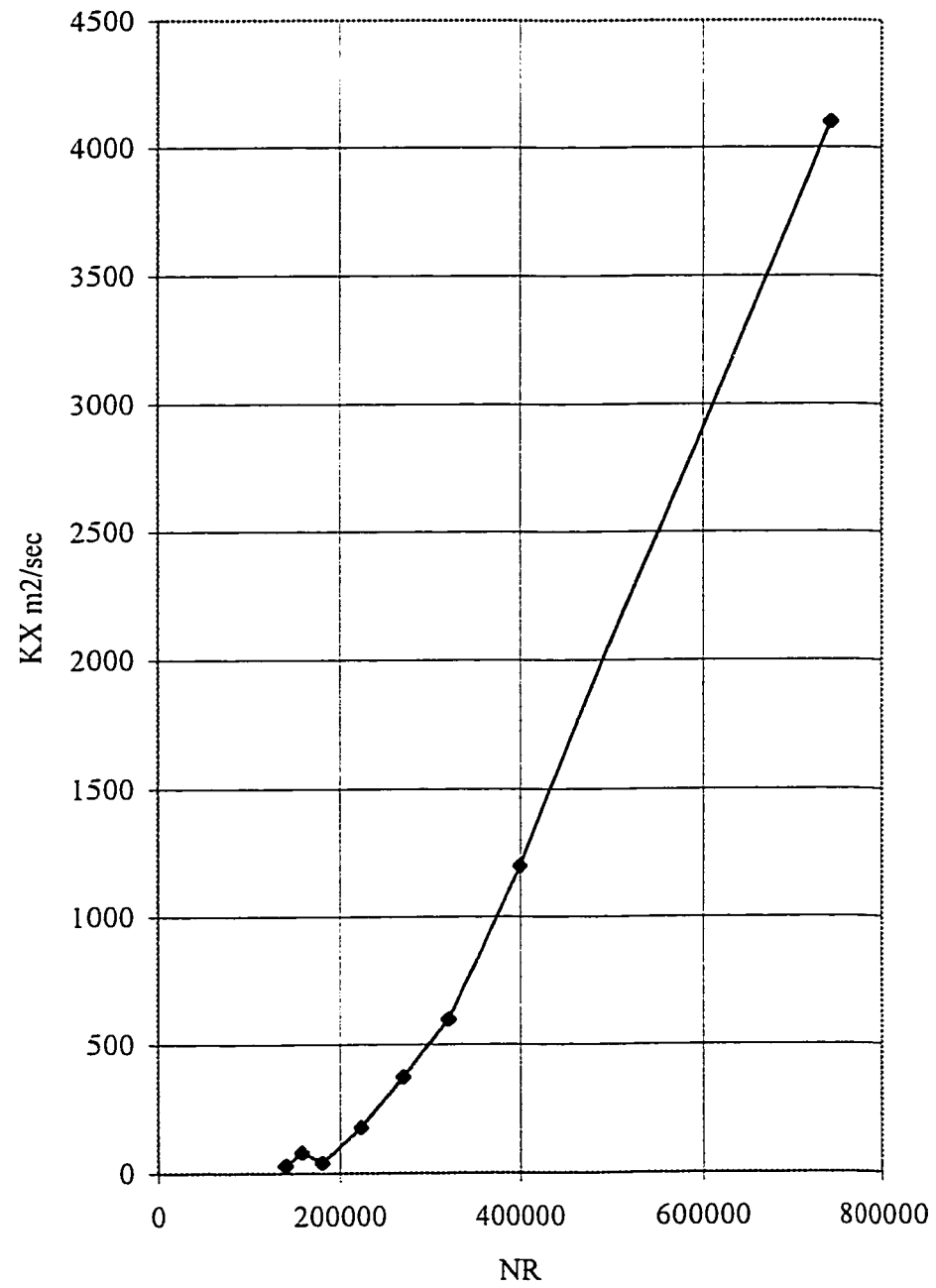


Figure 4.12 KX - Le Coefficient de Dispersion/Diffusion fonction de Nombre de Reynolds - Point C

4.1 SIMULATION NUMÉRIQUE DES ESSAIS

Pour obtenir plusieurs informations complémentaires sur les essais réalisés, les conditions particulières à chacune ont été recalculées à l'aide de PADRE.

Pour l'essai 7, pris comme exemple, on a utilisé comme pour tous les essais, les concentrations source en 10 points qui donne la définition la plus fidèle de la courbe des mesures enregistrées au point A, pour une simulation PADRE avec un débit mesuré au Venturi de 71 l/s.

On compare les courbes des concentrations mesurées qui donnent les valeurs maximales.

$$C_A^M = 37.97 \text{ mg/l} \quad C_B^M = 35.04 \text{ mg/l} \quad C_C^M = 34.89 \text{ mg/l}$$

avec les courbes simulées aux valeurs maximales :

$$C_A^S = 37.97 \text{ mg/l} \quad C_B^S = 37.97 \text{ mg/l} \quad C_C^S = 37.97 \text{ mg/l}$$

pour un temps de séjour :

$$T_S^B = 51.0 \text{ sec} \quad T_S^C = 82.5 \text{ sec}$$

On déduit de cette comparaison, un décalage en temps de séjour entre les deux courbes et un ajustement de la vitesse d'écoulement et du débit.

On trouve de cette façon à l'aide de PADRE, pour un débit ajusté optimal de 67 l/s, une courbe des concentrations observées recalculées déplacée vers la droite pour un temps de séjour réel de :

$$T_S^B = 54.5 \text{ sec} \quad \text{et} \quad T_S^C = 87.5 \text{ sec}$$

L'erreur moyenne entre les valeurs des concentrations mesurées et simulées après correction du débit dans les deux points B et C est en valeur moyenne de 11 %.

4.2 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans le programme de traçage, l'injection de solution saline dure deux minutes. L'eau est à 20° C et le niveau de la concentration initiale avant injection est de 0 ou 10 mg/l. Les points d'analyse A, B, C correspondent aux sondes 1, sondes 2, sondes 3 d'échantillonnage

Pour les dix essais, on a cherché à obtenir une concentration finale du mélange finale en écoulement, de 30 mg/l qui définit mieux le traceur en simulation et dans le phénomène de dispersion-transport. Mais en régime de transition de l'écoulement où la dispersion est très faible $Kx < 70 \text{ m}^2/\text{s}$, les concentrations varient entre 50 et 80 mg/l.

Les trois tableaux de l'annexe A représentatifs pour chaque essai donnent les valeurs des concentrations mesurées, simulées et leur comparaison après l'ajustement optimal du débit suite à l'information donnée par les résultats PADRE.

La comparaison des courbes des concentrations initiales, à la source et mesurées après ajustement du débit dans un point cible du réseau, fournit le temps de séjour réel moyen entre les deux points comparés directement au temps de séjour moyen calculé lors d'une simulation PADRE dans les mêmes conditions d'écoulement (voir tableaux 4.5 et 4.6).

Sur les mêmes courbes des concentrations d'origine et mesurées après l'ajustement du débit, on obtient les valeurs moyennes, minimum et maximum du temps de séjour. On définit donc un intervalle possible de variation du temps de séjour (voir tableaux 4.6 et 4.7).

En analysant l'aire sous les courbes des concentrations à l'origine au point A et dans les points d'analyse B et C, on constate que la surface reste presque constante, le petit écart était dû à différentes phases de la dispersion.

Le processus de dispersion du traceur conservatif est associé aux différents échanges entre particules qui ont des vitesses différentes et des concentrations différentes. On le voit dans les modifications de forme de la courbe des concentrations dans les points B et C et dans les modifications du temps de séjour selon la concentration de référence.

Dans en régime permanent d'écoulement, la vitesse moyenne est faible et uniforme (sans répartition). Le transport des concentrations moyennes est fait par la vitesse moyenne et la diffusion se produit en même temps par une diffusivité ε_μ des concentrations.

La diffusion verticale et latérale sont considérées achevées dans les premiers moments de l'injection des concentrations. Dans un régime d'écoulement permanent turbulent la diffusion est toujours réalisée par des tourbillons qui transportent des nuages des concentrations. L'écoulement se manifeste par une répartition des vitesses qui doit être prise en compte.

L'allure de la courbe des répartitions des vitesses dépend dans une grande mesure de la valeur du nombre de Reynolds. Cette courbe s'aplatit de plus en plus à mesure que le nombre de Reynolds augmente. La stabilisation de la turbulence démontre aussi l'importance de la dispersion longitudinale sur les différences observées dans la précision de la méthode de translation du mélange.

Pour des vitesses grands $v = 2.76$ m/s, l'erreur de superposition des courbes translaté et observées est réduit à une $\Delta\% = 5\%$ valeur moyenne entre les points B et C, l'effet opposé à une $\Delta\% = 21\%$ pour une vitesse $v = 0.12$ m/s.

Pour les points B, dans tous les essais, l'erreur de translation du mélange a une valeur plus petite que pour le point C. L'effet des distances par rapport au point source est mis en évidence. Par exemple, sur l'essai 7, pour $v = 0.94$ m/s, $\Delta\%$ en B = 8% et $\Delta\%$ en C = 14%.

On fait l'hypothèse que la diffusion de traceur est totale et immédiate au point de source. Or des formules courants indiquent qu'une distance durent de 1,2 m à plusieurs dizaine des mètres est nécessaire pour une diffusion latérale ou verticale complète. C'est n'est qu'après cette distance qu'on a une stabilisation de la dispersion de concentrations.

En réalité, pour les valeurs des vitesses de l'écoulement dans nos essais et pour les distances existantes entre les points d'analyse et le point source, ceci explique qu'il y a une grande instabilité pour le coefficient de dispersion K_x .

La solution pour l'équation du traçage unidimensionnel ne vérifie pas les valeurs des concentrations obtenues en essai effectué pour le K_x calculé avec les formules de calcul. On a obtenu les valeurs de K_x indirectement à partir des valeurs pratiques des concentrations observées dans les essais effectués.

On a une stabilisation de la turbulence, le rapport v_m/v_{max} reste entre 0.84 — 0.9 après une valeur du nombre de Reynolds de 150 000, sur le diagramme de Nikuradze et dans nos essais la stabilisation de la dispersion apparaisse pour des valeurs près de 180 000 du

nombre de Reynolds , supérieur a ce qui est conforme avec les valeurs des diagramme. A partir de cette étude , la loi Kx vs NR est bien définie .

Les valeurs des concentrations décroissent différemment selon le nombre de Reynolds (voir figures 4.9 et 4.10). On voit une zone dans le domaine du régime d'écoulement de transition (NR entre 30 000 et 91 000) où la variation prend un écart de 40 mg/l, suivi d'une zone d'un régime en pleine turbulence (NR entre 140 000 et 740 000) où la décroissance des concentrations est plus stable dans un écart de 10 mg/l. Les deux points de mesure B et C présentent la même allure de la courbe des décroissances des concentrations .

CHAPITRE V

CONCLUSION

1. Sur les dix essais effectués pour une gamme des débits de 8,5 l/s à 196 l/s, on observe sur les concentrations du traceur une influence nette du passage du régime d'écoulement de transition au régime de pleine turbulence :

a) Le taux de la variation de la concentration présente un écart de 40 mg/l pour des nombre de Reynolds en régime de transition. C'est deux fois plus que pour la pleine turbulence (variation de 20 mg/l).

b) Le taux de décroissance de la concentration présente les mêmes deux zones en suivant une variation inverse.

2. La décroissance de la concentration maximale en fonction de la distance entre le point source A et les deux points d'analyse B et C suit une loi de variation linéaire ou courbe, descendante pour les dix essais.

3. Pour le concept de translation du mélange dans le conduit utilisé par PADRE sur l'écoulement moyen, on trouve par la superposition entre des valeurs simulées et mesurées, une erreur comprise entre 21% et 5% . L'importance de la dispersion longitudinale sur la précision du concept de translation du mélange est vérifié : la valeur la plus grande , $\Delta\% = 21$, correspond au petite débit , $v = 0.12$ m/s et la valeur la plus petite , $\Delta\% = 5$ au grande débit , $v = 2,76$ m/s . Une moyenne de 14% pour les dix essais représente une valeur de précision acceptable.

On peut augmenter la précision de la superposition par une description de la courbe des concentrations PADRE par plus de 10 points.

4. Pour les distances existantes entre les points d'analyse pour les premiers essais dans la zone de régime d'écoulement de transition ou en pleine turbulence au tour de 180000 NR on obtienne des valeurs instables du K_x pour le phénomène de dispersion .Après 45 m du point source où l'achèvement de la diffusion verticale et longitudinale est complet, la dispersion longitudinale présente un coefficient K_x proportionnel au Nombre de Reynolds, en pleine turbulence pour une valeur plus grande que 180000 NR . Le phénomène de dispersion devienne plus stable après cette valeur .

5. Dans un phénomène de dispersion turbulente, la répartition des vitesses doit être prise en compte. Le calcul des T_s max et T_s min peut réduire les erreurs par rapport à l'écoulement moyen mesuré d'habitude par le débit.

Les valeurs de $\Delta T_s \% = (T_{\max} - T_{\min})/T_{\text{moy}}$ données pour chaque essai, varient entre 1 % et 30 %. En plus , avec PADRE on peut les faire en des multiples endroits .

6. La méthode du traçage dans un réseau en charge sous pression, lorsqu'elle est interprétée correctement en toute connaissance de la dispersion et de la variabilité des vitesse, est donc une méthode de mesure des débits locaux simple, fiable et peu coûteuse.

BIBLIOGRAPHIE

BAILLARGEON, G. et RAINVILLE, J. Statistique appliquée T1, T2, Les Éditions SMG (Science-Mathématique-Gestion), Trois-Rivières.

BAUDET, R. et CHAUVIN, A. (1996). Mécanique des milieux continus, Édition Hermès, Paris.

BRIÈRE, F.G., ing. et DESJARDINS, R., ing. (1990). Distribution des eaux de consommation et collecte des eaux usées en zone urbaine, École Polytechnique de Montréal, Génie Civil, septembre.

CARLIER, M. (1986). Hydraulique générale et appliquée, Eyrolle.

CHAUDRY, M.H. (1993). “Open Channel Flow”, Prentice Hall.

CLAYTON, C.G. (1972). “Modern Developments in Flow Measurements”, Peter Peregrins, London.

COMOLET, R. Mécanique expérimentale des fluides, T1, T2 et T3, Masson.

CUNGE, J.A., HOLLY, F.M. et VERWEY, A. (1980). “Practical Aspects of Computational River Hydraulics”, Pitman.

Étude du fleuve St-Laurent - Diffusion des eaux usées de Trois-Rivières et de Sorel, Mars 1974.

FRENCH, R.H. (1985). "Open Channel Hydraulics", McGraw Hill.

GRAF, W.H. et ALTINAKAR, M.S. (1995). Hydrodynamique, une introduction, Presses Polytechnique et Universitaires Romande.

GERHART, P.M. et GROSS, R.J. (1985). "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison-Wesley.

HENDERSON, F.M. (1966). "Open Channel Flow", New York.

HILL, K.D., DAUPHINEE, T.M. et WOODS, D.J. (1986). "IEEE Journal of Oceanic Engineering", "The Extension of the Practical Salinity Scale 1978 to Local Salinities", Vol-OE-11, No. 1, January.

KENNEDY, M.S., SARIKELLE, S. et SURAVALLON, K. "Management and Operations Calibrating Hydraulic Analysis of Distribution Systems Using Fluoride Tracer Studies", Journal AWWA.

KERNEIS, A., BLAUDIN DE THÉ, C., PHILIPOTEAUX, H., DEGUIN, A. et FEINBERG, M. (1993). Application d'une méthode de traçage à la validation d'un algorithme de calcul de temps de séjour dans les réseaux de distribution, Technique Science & Méthodes.

LAURENT, P., GERVAIS, P. et RANDON, G. (1993) "Bacterial Development in Distribution Networks - Study and Modeling, Water Supply, 387-398.

LAVOIE, J (1991). Étude des paramètres influençant la qualité de l'eau dans un réseau de distribution d'eau potable, mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Génie Civil, 89 p.

LION, C.P. et KROON, J.R. (1987). "Modeling the Propagation of Waterborne Substances in Distribution Networks", Journal AWWA, Novembre.

LINFORD, A., "Flow Measurement and Meters".

LOUKS, D.P., STEDINGER, J.R. et HAITH, D.A.. (1981). "Water Resources Systems Planning and Analysis", Prentice Hall.

MARCHE, C. (1995). Programme d'aide à la datation dans réseau d'eau potable, École Polytechnique de Montréal.

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

MAUL, A., EL SHAARAWI, A.H. et BLOCK, J.C. (1985). "Heterotrophic Bacteria in Water Distribution Systems - Spatial and Temporal Variation", Sci. Total Environmental.

MAUL, A., VAGAST, 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.

MUNSON, B.R., YOUNG, D.F. et OKIISHI, T.H. (1990). "Fundamentals of Fluid Mechanics", Wiley.

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 p.

STREETER et WYLIC (1985). "Fluid Mechanics", Eighth Edition, McGraw Hill.

TAYLOR, G.I. (1954). "The dispersion of Watter in Turbulent Flow through a Pipe", London.

TRESKOLANSKI, A.T. (1962). Théorie et pratique des mesures hydrauliques, Paris.

VECTEUR ENVIRONNEMENT, Vol. 30, n° 3, juin 1997.

"Water Research - Journal of the International Association on Water Quality",
Volume 29, Numéro 7, Juillet 1995.

WHITE, F.M. (1986). "Fluid Mechanics", McGraw Hill.

Annexe A1

ESSAI NO 1

Débit mesuré au Venturi		8,5	l/s
Vitesse		0,12	m/s
Nombre de Reynolds		30 000	
Débit ajusté		8,5	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	1	%
	C	-	
Quantité de sel passée	A	85	g
	B	78	g
	C	-	
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		50,85	mg/l
C_B^M		43,56	mg/l
C_C^M		-	
T séjour (Q = 8,5 l/s)	B	427	sec
	C	-	

Tableau 4.1.A.1 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 1

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l
1	65	1	15,91	460	17,60
2	68		18,04	471	20,27
3	70	2	20,93	477	22,53
4	73		27,01	483	25,00
5	75	3	31,40	487	27,03
6	77		35,56	491	29,10
7	79	4	40,00	498	32,70
8	81		44,50	502	34,57
9	84	5	49,83	509	37,41
10	106		50,33	518	39,23
11	136	6	50,85	522	40,07
12	172		50,34	528	41,24
13	173	7	50,14	536	42,26
14	186		50,00	550	43,31
15	188	8	50,04	558	43,59
16	192		46,91	576	42,90
17	198	9	39,74	589	40,78
18	210		22,88	618	30,21
19	221	10	20,10	655	20,77
20	224		19,27	699	17,69

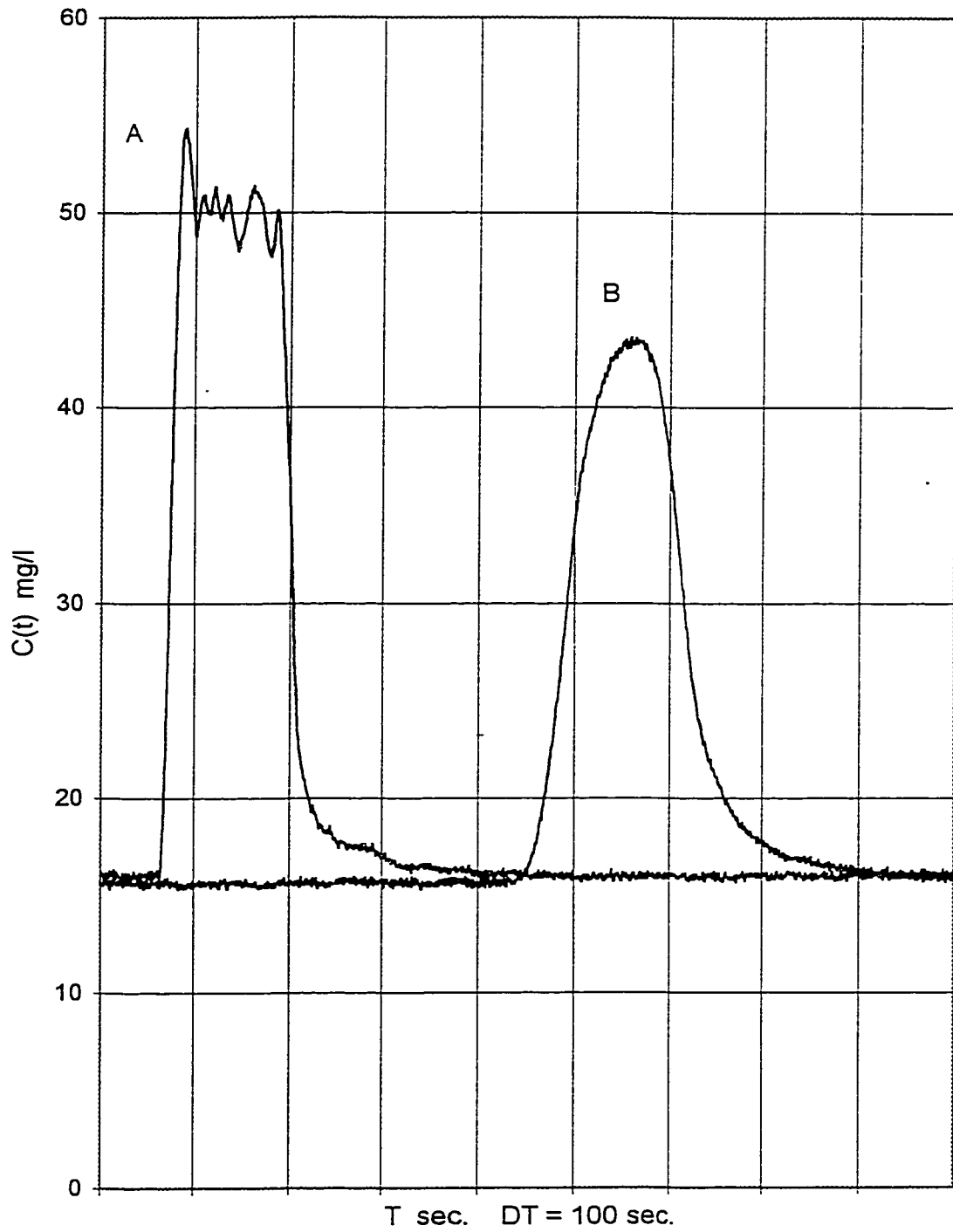
Tableau 4.2.A.1 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 1

No	t sec	PtB mg/l
1	492	15,04
2	497	20,93
3	500	27,21
4	501	29,31
5	504	35,70
6	506	40,00
7	508	43,93
8	514	49,89
9	525	50,10
10	535	50,30
11	543	50,46
12	554	50,67
13	563	50,85
14	568	50,74
15	573	50,64
16	622	42,82
17	636	30,35
18	640	26,93
19	645	22,66
20	648	20,10

Tableau 4.3.A.1 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 1

No	t sec	PtB		
		M mg/l/l	Δ %	S mg/l
1	492	29,33	49	15,04
2	497	32,10	35	20,93
3	500	33,59	19	27,21
4	501	34,08	14	29,31
5	504	35,32	1	35,70
6	506	36,38	10	40,00
7	508	36,79	19	43,93
8	514	38,50	29	49,89
9	525	40,52	24	50,10
10	535	41,90	20	50,30
11	543	42,52	19	50,46
12	554	43,03	18	50,67
13	563	43,56	17	50,85
14	568	43,36	17	50,74
15	573	42,96	18	50,64
16	622	20,58	50	42,82
17	636	23,85	27	30,35
18	640	22,73	18	26,93
19	645	21,97	3	22,66
20	648	21,55	7	20,10

Erreur moyenne : 20 %



T sec. DT = 100 sec.
Figure 4.1 A1 - Concentrations enregistrées obtenues après lissage -
Essai 1

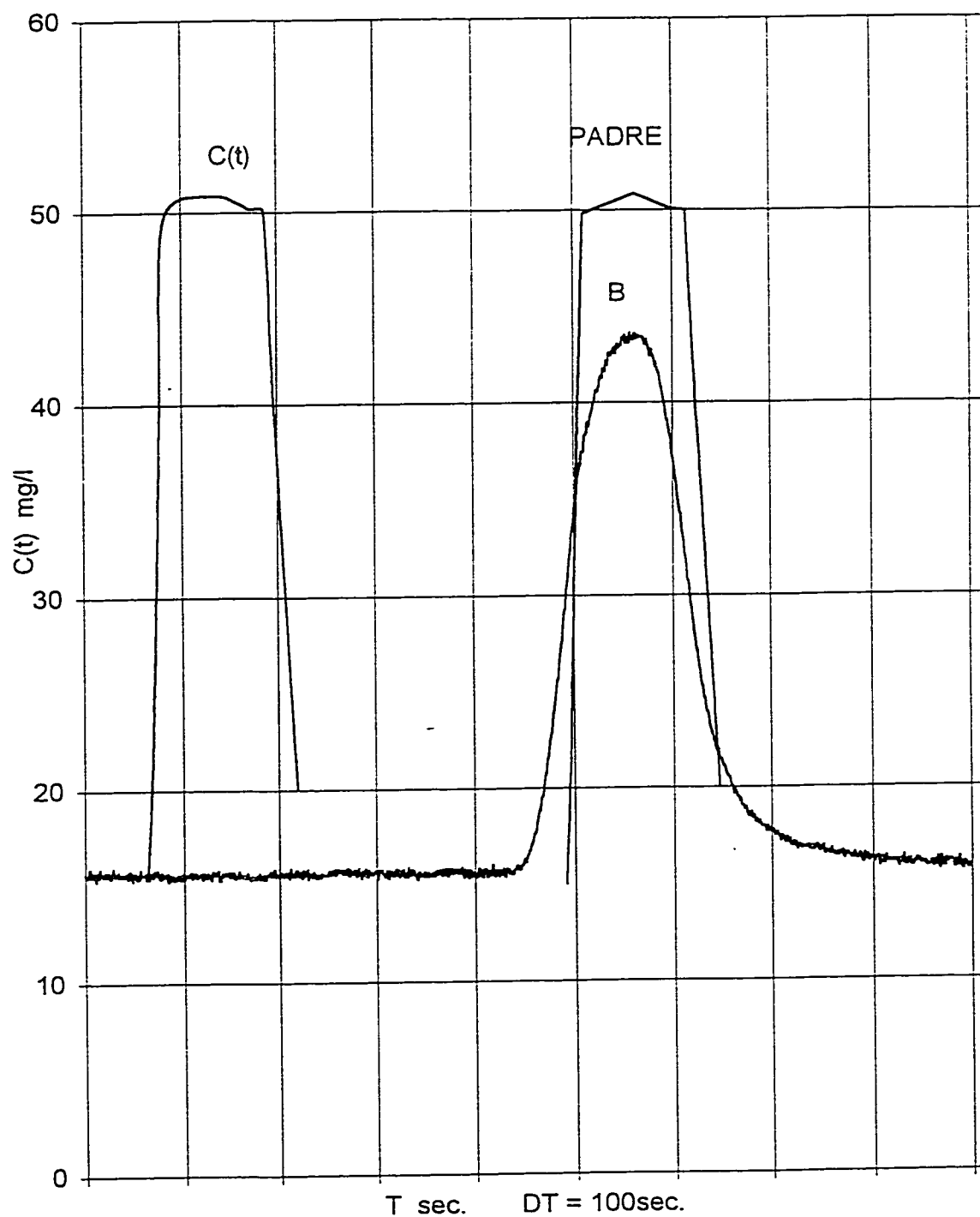


Figure 4.2 A1 - Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit point B - Essai 1

Annexe A2

ESSAI NO 2

Débit mesuré au Venturi		24	l/s
Vitesse		0,34	m/s
Nombre de Reynolds		91 000	
Débit ajusté		26	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	5	%
	C	8	%
Quantité de sel passée	A	153	g
	B	142	g
	C	141	g
		133	
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		115,37	mg/l
C_B^M		80,63	mg/l
C_C^M		70	mg/l
T séjour réel (Q = 26 l/s)	B	151	sec
	C	225	sec

Tableau 4.1.A.2 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 2

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	98	1	8,71	258	20,30	317	6,97
2	110	2	8,92	263	22,95	334	9,87
3	120		10,76	271	27,50	354	41,20
4	130	3	31,34	276	38,10	372	70,00
5	140		68,10	282	55,30	391	50,62
6	152	4	115,37	291	77,40	410	37,71
7	162		84,22	300	80,63	419	34,98
8	172	5	39,41	309	80,60	424	33,87
9	180		38,00	319	67,34	431	33,85
10	185	6	39,00	330	53,63	436	34,69
11	196		36,00	340	50,17	441	32,40
12	213		43,00	350	46,97	448	29,68
13	231	7	31,00	361	46,80	455	26,67
14	236		19,60	370	45,98	460	19,79
15	240	8	16,70	380	41,67	470	11,56
16	247		12,25	385	38,19	480	9,60
17	258	9	5,10	390	33,04	490	6,95
18	274		6,30	395	27,50	498	5,08
19	288	10	5,42	400	23,61	504	5,45
20	289		5,50	408	18,14	508	4,95

Tableau 4.2.A.2 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 2

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	249	8,71	342	8,71
2	259	8,90	362	17,89
3	269	17,89	372	29,10
4	279	29,10	382	61,90
5	289	61,90	392	100,10
6	299	100,10	396	115,37
7	303	115,37	406	77,39
8	320	50,80	416	39,41
9	330	39,19	426	39,10
10	340	38,30	436	37,78
11	350	36,56	446	36,04
12	360	34,83	456	34,30
13	370	33,09	466	32,56
14	380	31,35	476	29,41
15	390	18,29	486	15,41
16	400	10,90	493	10,90
17	410	5,10	502	5,10
18	420	5,08	514	5,08
19	430	5,06	522	5,06
20	439	5,04	532	5,04

Tableau 4.3.A.2 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 2

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	249	5,36	62	8,71	323	6,39	36	8,71
2	259	7,41	20	8,89	333	9,31	4	8,90
3	269	13,31	34	17,89	343	22,55	21	17,89
4	279	34,91	16	29,10	353	45,64	36	29,10
5	289	63,19	2	61,90	363	62,76	1	61,90
6	300	80,63	28	103,91	372	70,00	43	100,10
7	303	79,68	47	115,37	377	68,20	69	115,37
8	310	67,70	31	88,78	387	53,82	44	77,39
9	315	55,05	27	69,79	397	39,73	0	39,41
10	322	43,29	0	43,21	407	34,60	13	39,10
11	328	39,43	0	39,25	417	34,98	8	37,78
12	334	37,09	5	39,06	427	34,04	6	36,04
13	342	32,93	15	37,96	433	30,35	15	35,00
14	347	32,28	15	37,09	443	28,76	16	33,26
15	350	32,49	12	36,56	447	28,92	12	32,56
16	360	33,13	5	34,82	457	20,69	42	29,41
17	370	31,61	5	33,09	467	13,19	17	15,41
18	385	20,36	29	26,23	477	8,10	11	8,97
19	439	3,21	69	5,42	493	6,62	23	5,08
20	416	3,00	44	4,32	513	6,43	22	5,04

Erreur moyenne : 21 %

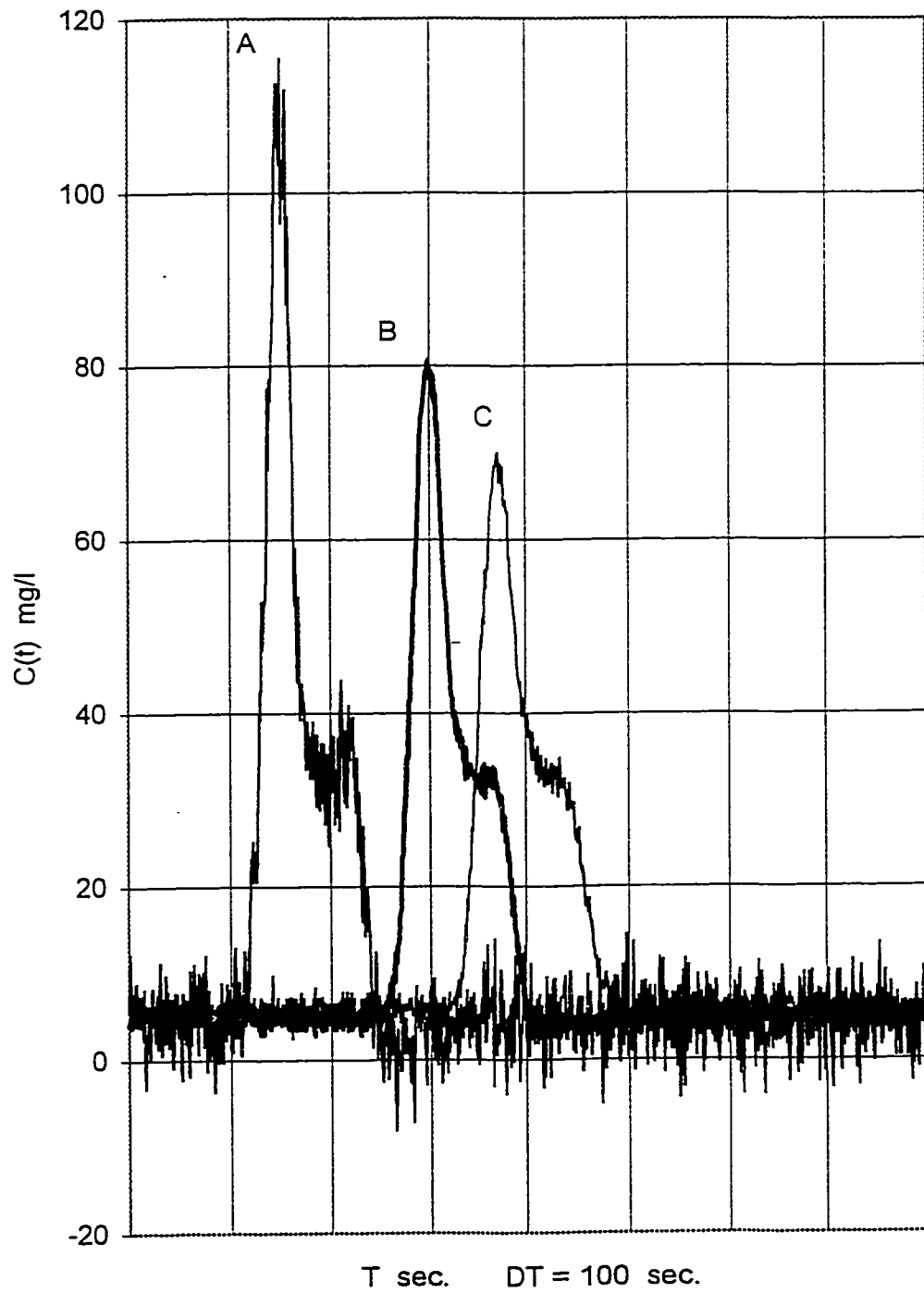


Figure 4.1 A2 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 2

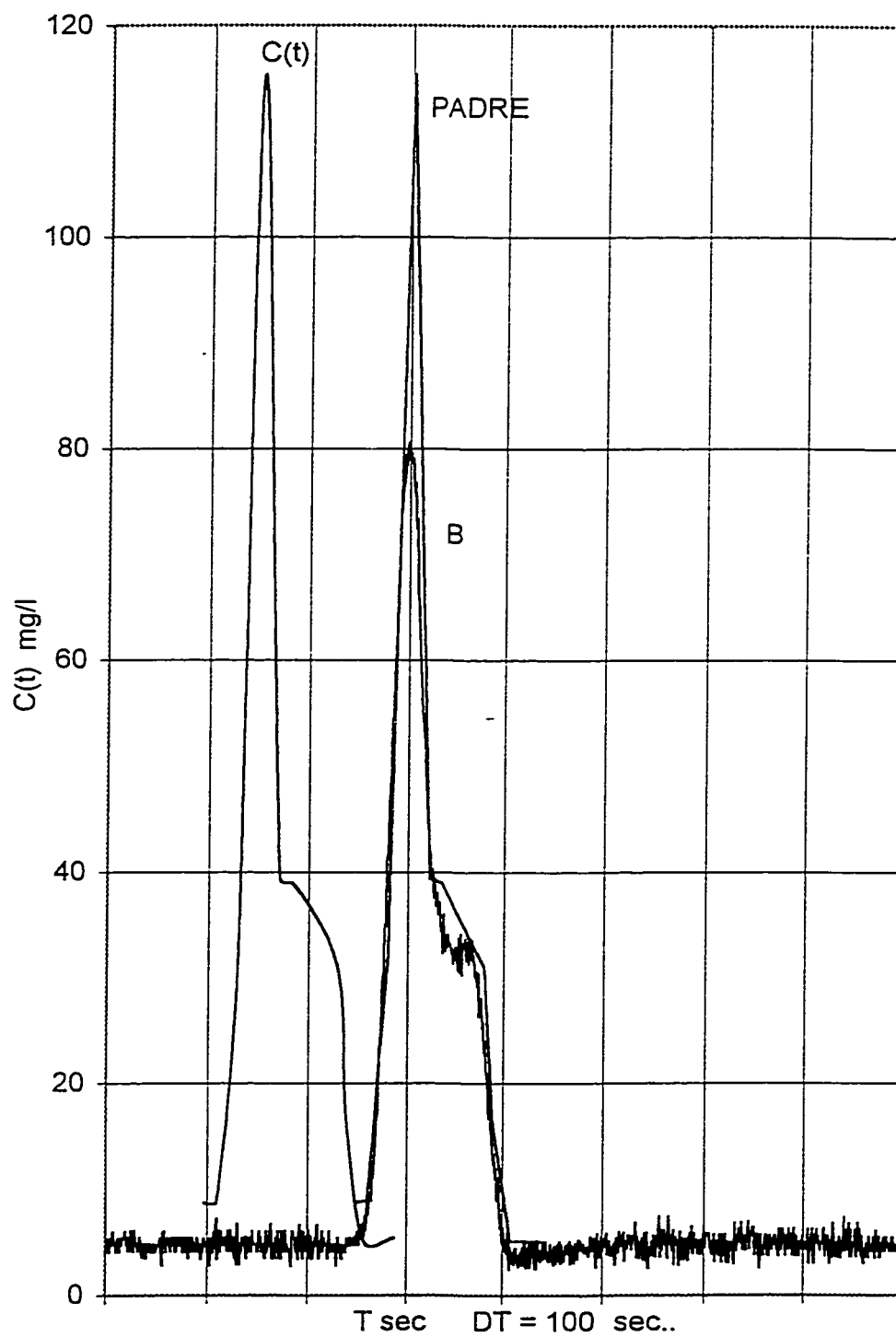


Figure 4.2 A2 - Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit point B - Essai 2

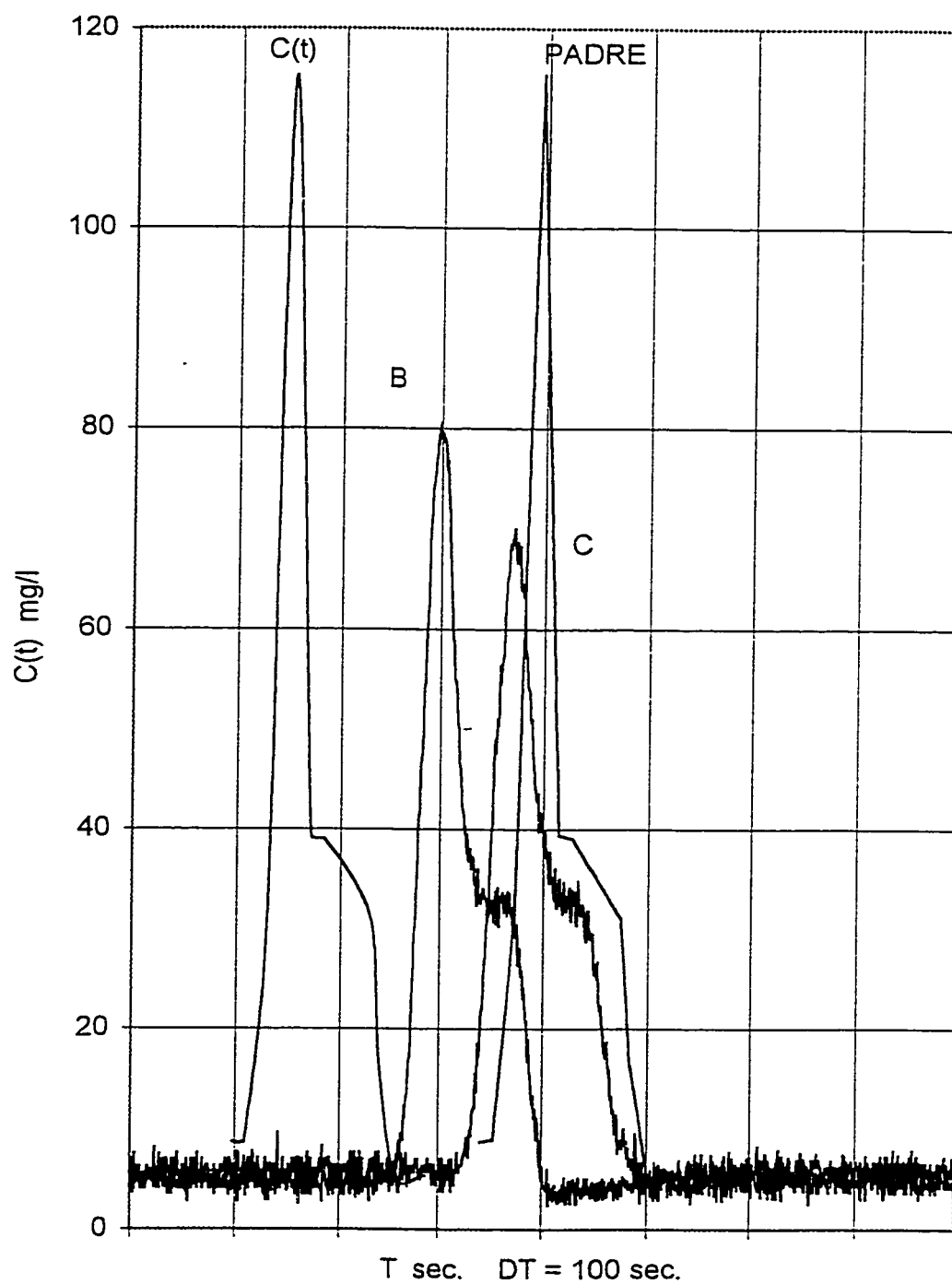


Figure 4.3 A2 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 2

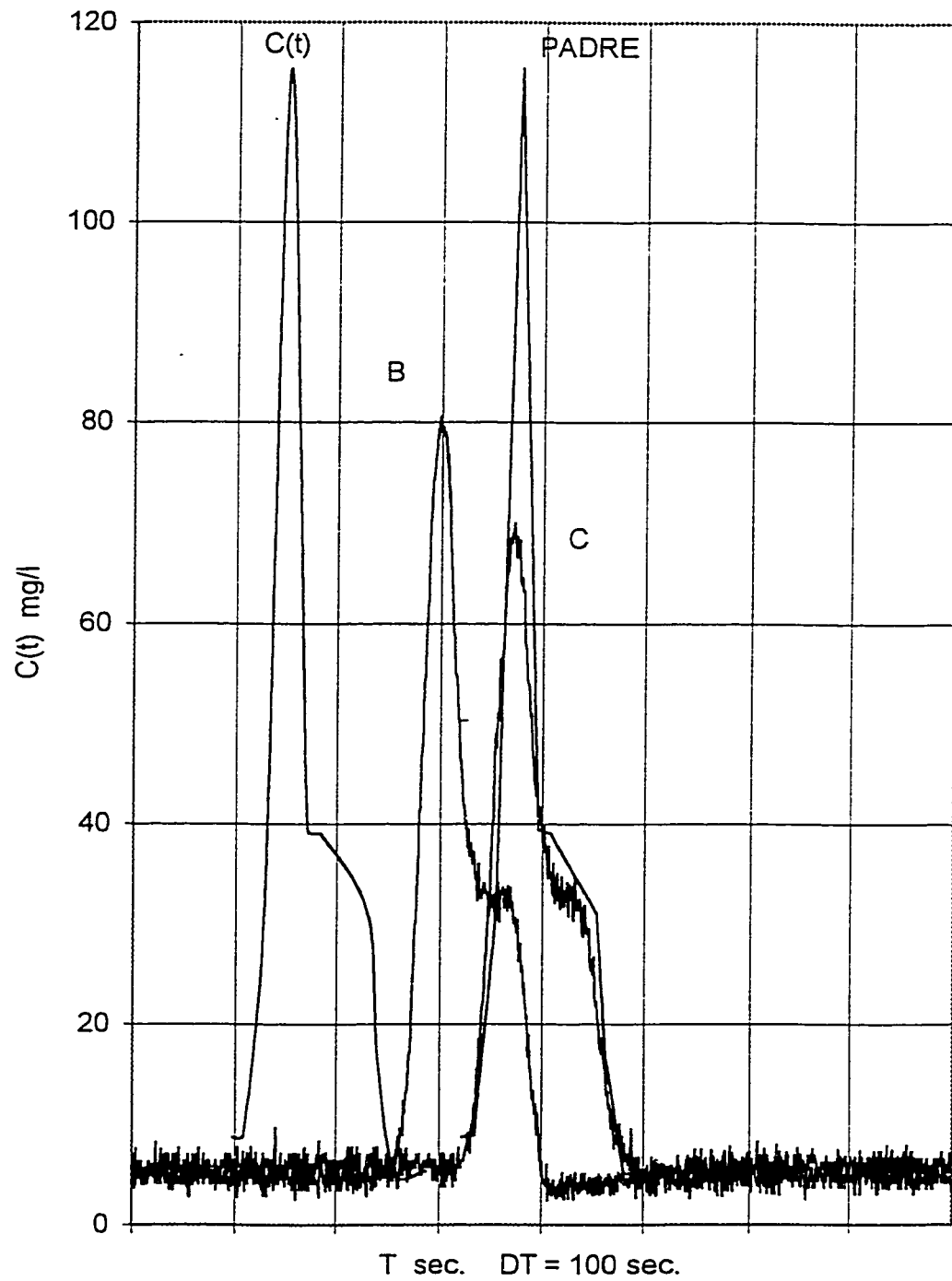


Figure 4.4 A2 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 2

Annexe A3

ESSAI NO 3

Débit mesuré au Venturi		36	l/s
Vitesse		0,51	m/s
Nombre de Reynolds		140 000	
Débit ajusté		32	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	22	%
	C	22	%
Quantité de sel passée	A	134	g
	B	134	g
	C	133	
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		30,99	mg/l
C_B^M		29,47	mg/l
C_C^M		28,66	
T séjour réel (Q = 34 l/s)	B	117	sec
	C	172	sec

Tableau 4.1.A.3 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage
Essai 3

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	60	1	7,65	161	7,76	223	7,02
2	71		20,67	169	8,59	232	10,78
3	76	2	26,28	179	12,84	242	17,63
4	79		28,68	189	19,28	252	23,62
5	97		29,61	199	23,86	262	25,94
6	100	3	29,10	209	26,09	272	26,91
7	130		29,12	220	27,03	282	26,63
8	143		30,38	230	27,43	287	27,08
9	155	4	30,99	240	28,09	291	27,23
10	166		30,84	255	28,90	296	27,14
11	174	5	30,73	267	29,47	300	27,74
12	178	6	29,77	274	29,08	305	28,16
13	180	7	26,45	285	27,89	312	27,72
14	184		22,43	300	20,33	318	28,66
15	187	8	18,60	315	12,70	331	27,85
16	188		17,08	325	10,83	340	27,05
17	190		16,50	340	9,09	355	19,85
18	191		15,44	355	8,15	364	13,64
19	192	9	12,12	376	7,87	374	10,65
20	194	10	10,97	383	7,75	394	7,32

Tableau 4.2.A.3 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 3

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	161	7,65	223	7,65
2	187	27,45	227	12,77
3	188	27,57	232	17,88
4	194	28,27	237	23,95
5	200	28,98	242	26,60
6	210	29,14	246	27,10
7	220	29,75	251	27,69
8	234	30,23	256	28,28
9	245	31,08	261	28,87
10	249	30,75	266	29,31
11	253	30,90	280	29,69
12	267	30,89	292	30,10
13	271	30,10	297	30,28
14	274	30,91	305	30,55
15	279	29,77	311	30,90
16	284	23,10	320	30,97
17	288	18,60	325	30,90
18	291	14,71	329	30,96
19	293	12,12	337	30,73
20	295	10,97	357	10,97

Tableau 4.3.A.3 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 3

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	177	10,26	25	7,65	232	10,64	28	7,65
2	181	13,05	22	15,74	236	13,62	6	12,80
3	187	18,45	24	22,88	241	17,74	0	17,88
4	197	23,24	19	27,60	250	23,15	15	26,75
5	207	25,87	9	28,49	255	24,74	9	27,00
6	217	27,00	10	29,64	260	25,24	9	27,58
7	240	28,10	8	30,00	266	26,01	8	28,07
8	250	28,32	4	30,49	271	26,16	9	28,64
9	266	28,72	4	30,90	276	27,08	8	29,22
10	267	29,47	5	31,00	281	26,72	11	29,80
11	271	29,00	7	31,00	286	26,95	11	29,87
12	276	28,41	8	30,69	291	27,23	10	29,95
13	279	28,67	8	30,85	296	27,14	10	29,96
14	284	27,47	12	30,78	318	28,66	7	30,69
15	289	26,52	15	30,49	320	28,28	8	30,70
16	294	24,30	9	26,60	328	28,08	10	30,99
17	299	21,33	2	21,00	348	23,91	26	30,06
18	304	18,28	19	14,75	356	18,54	18	21,97
19	306	16,51	25	12,30	363	14,07	6	13,19
20	308	15,99	31	10,97	366	12,70	14	10,97

Erreur moyenne : 12 %

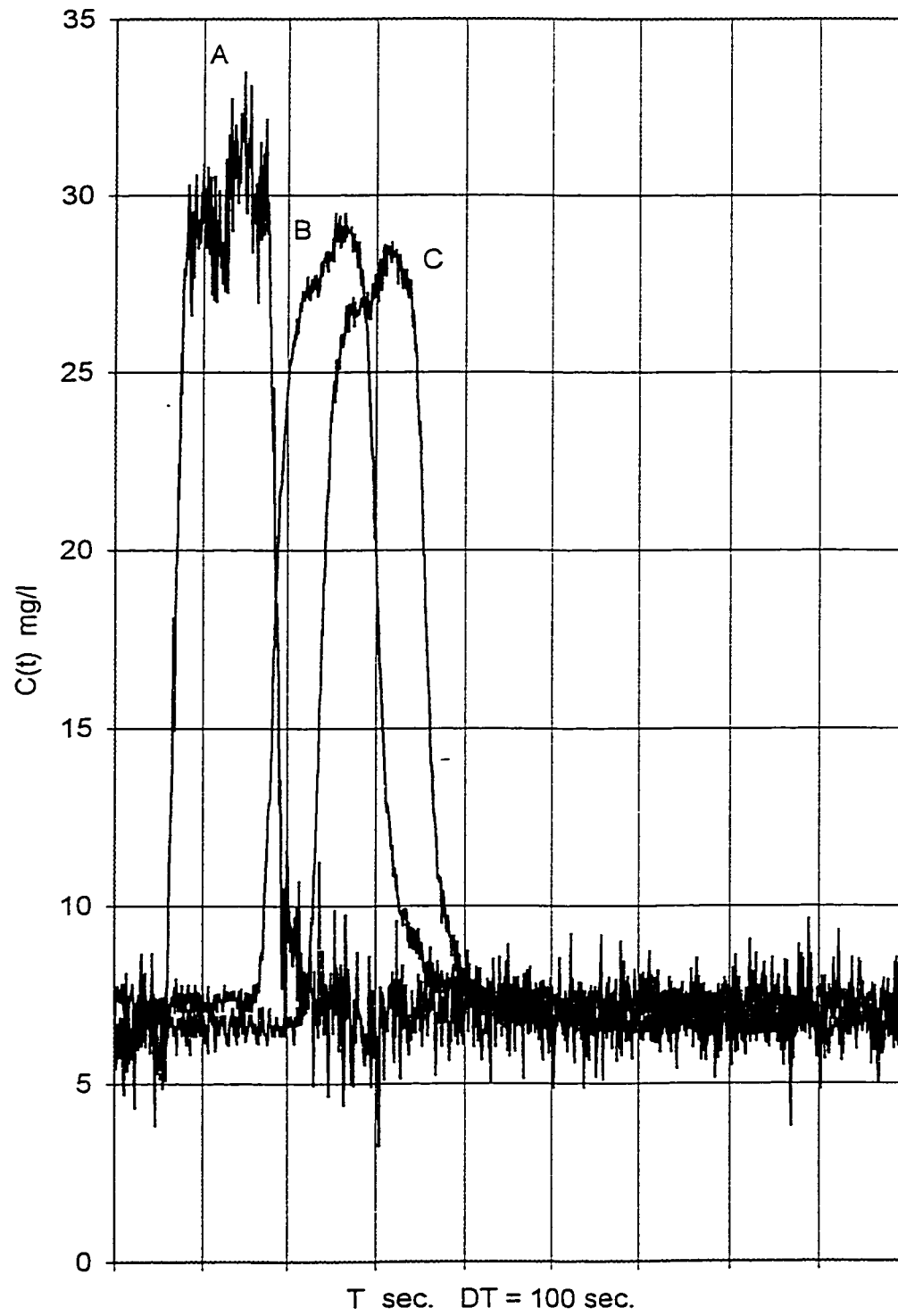


Figure 4.1 A3 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 3

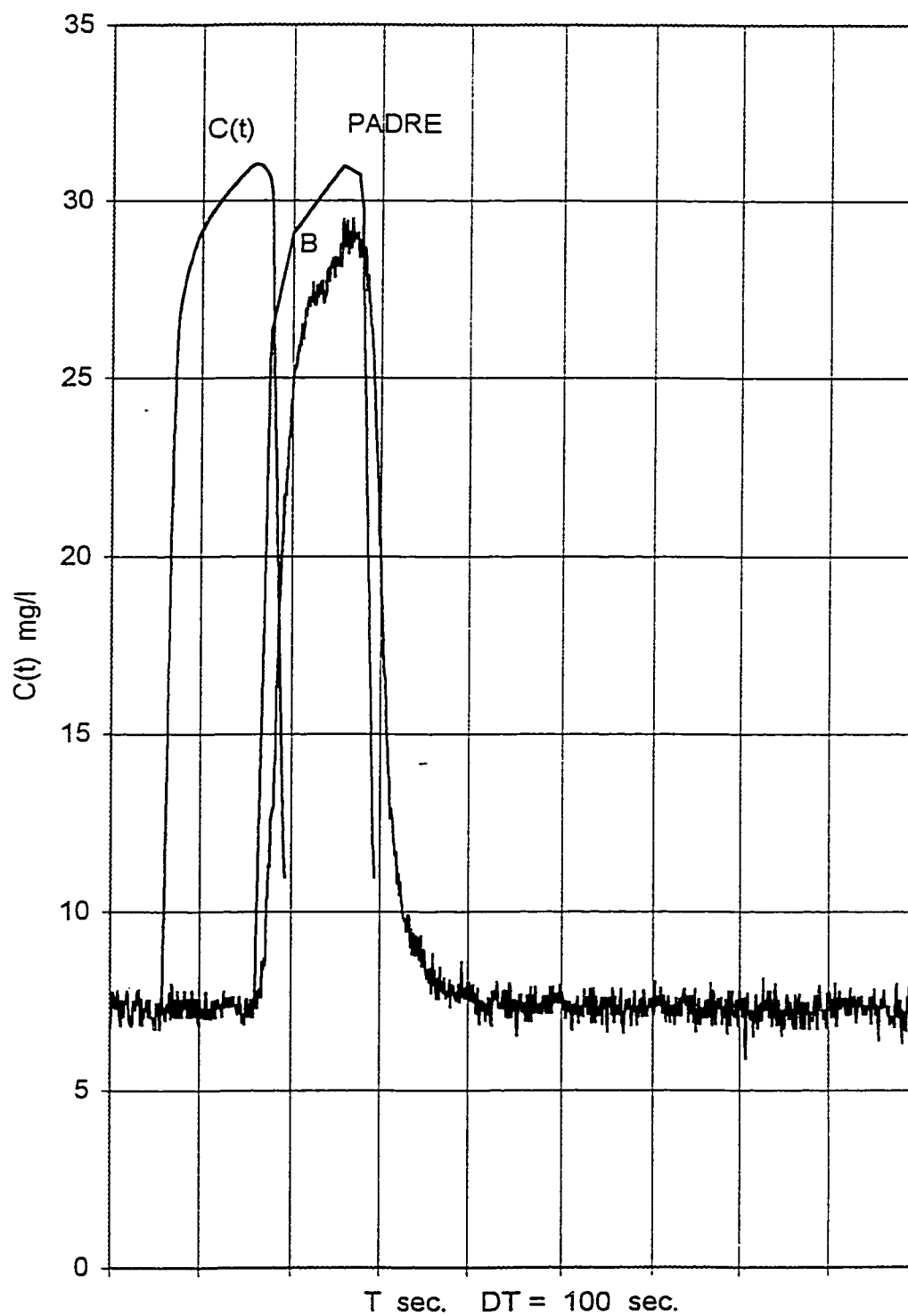


Figure 4.2 A3 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 3

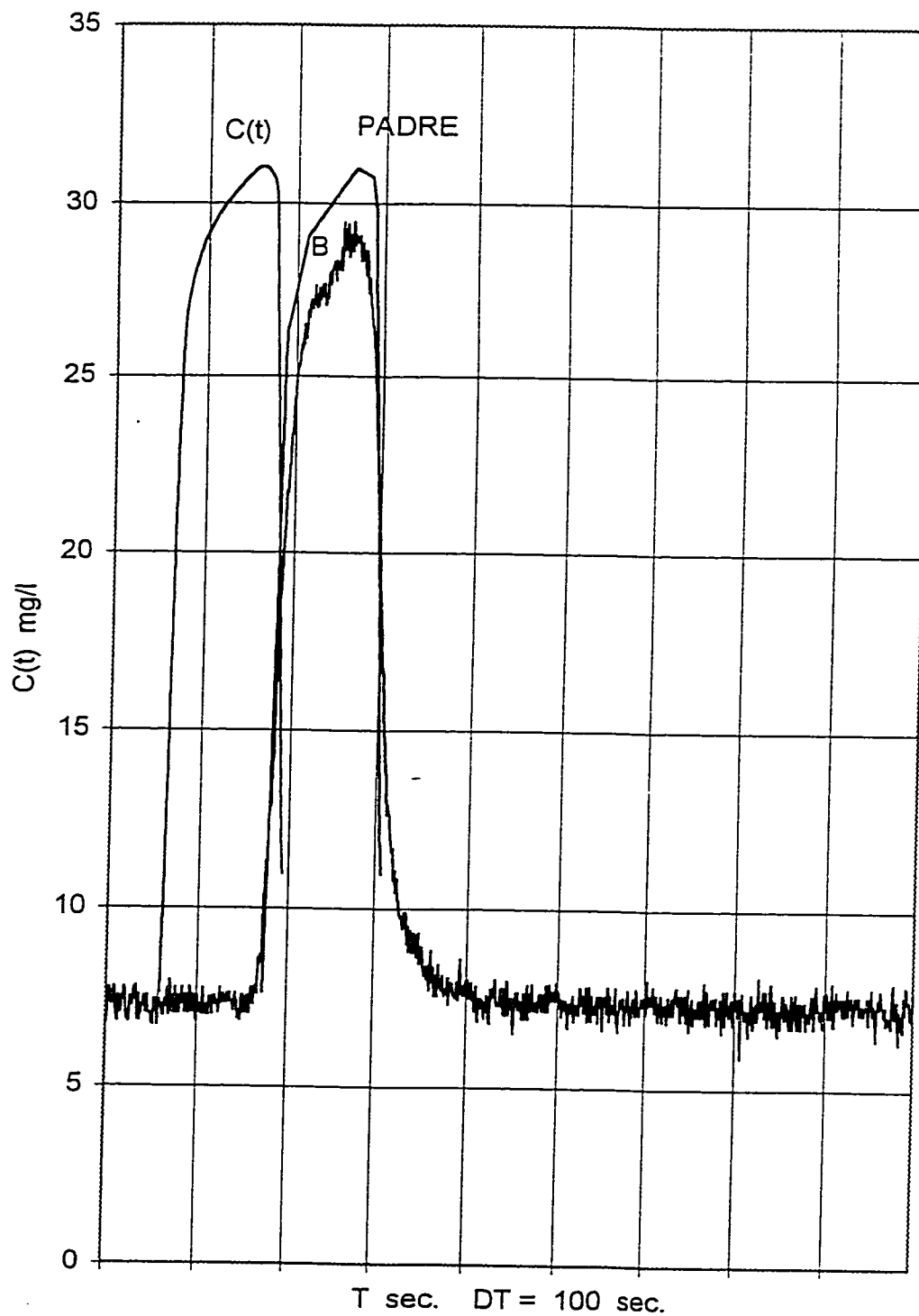


Figure 4.3 A3 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 3

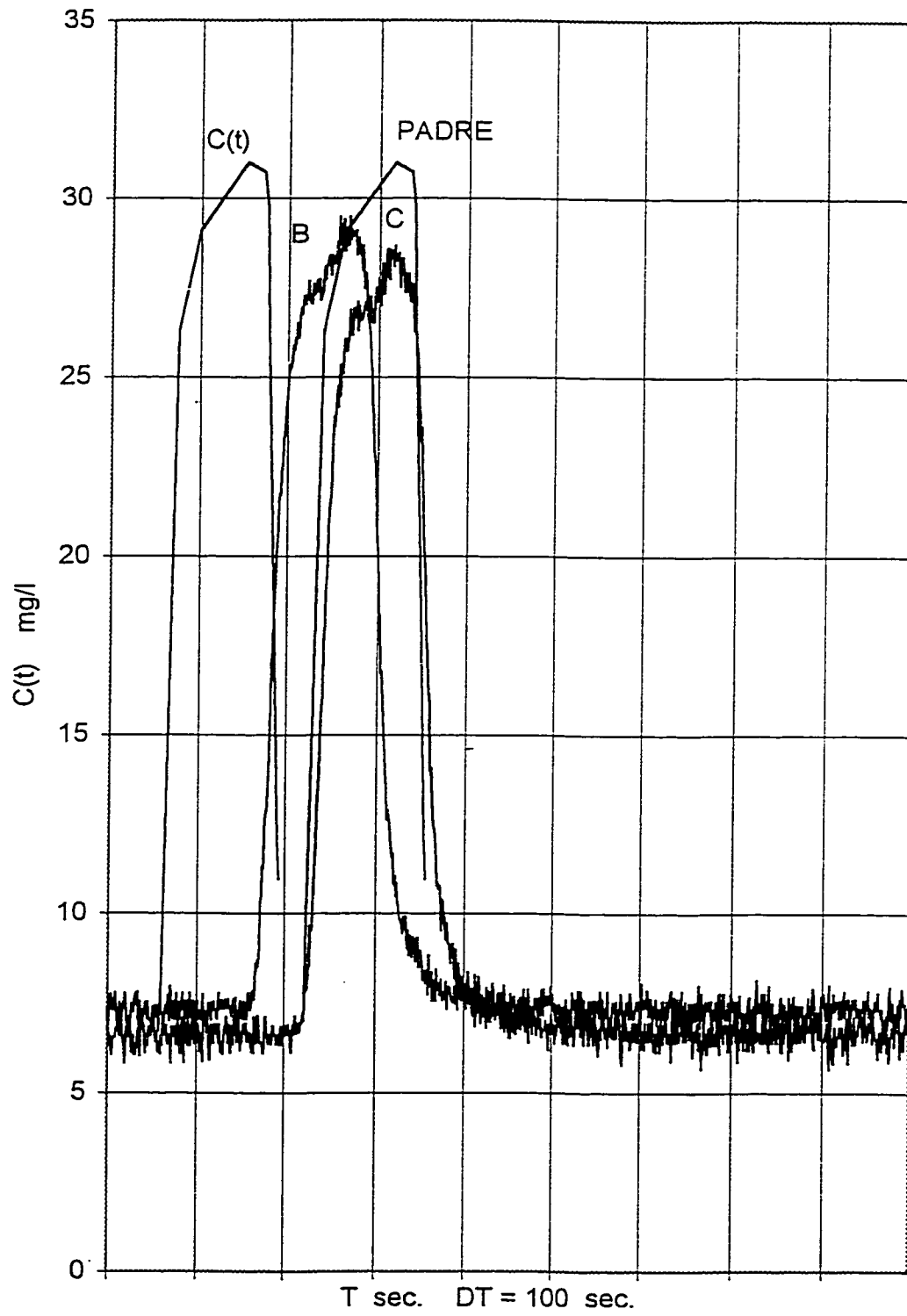


Figure 4.4 A3 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 3

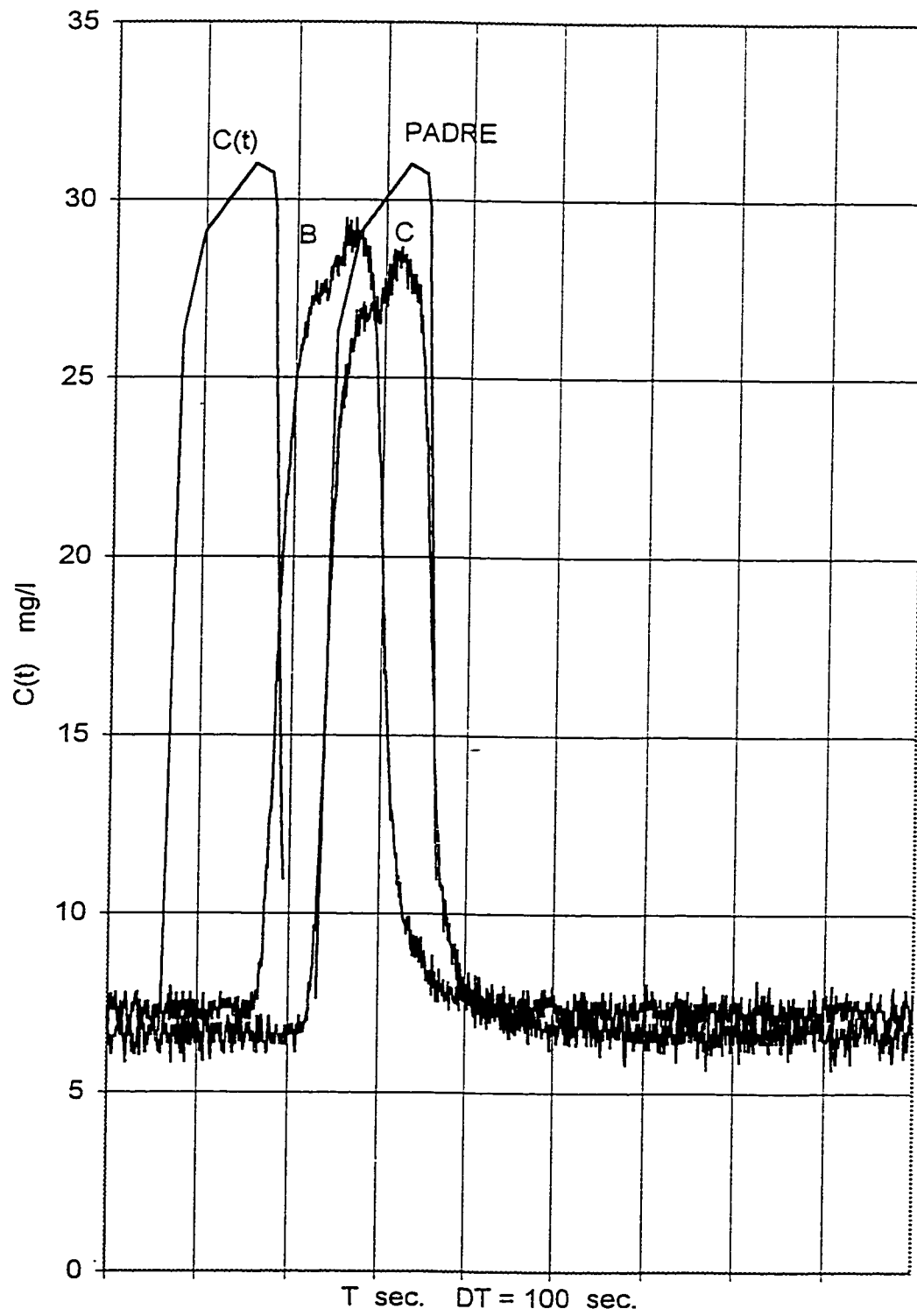


Figure 4.5 A3 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 3

Annexe A4

ESSAI NO 4

Débit mesuré au Venturi		42	l/s
Vitesse		0,59	m/s
Nombre de Reynolds		158 000	
Débit ajusté		39	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	16	%
	C	10	%
Quantité de sel passée	A	197	g
	B	195	g
	C	193	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		36,59	mg/l
C_B^M		33,97	mg/l
C_C^M		33,14	mg/l
T séjour réel (Q = 39 l/s)	B	96	sec
	C	150	sec

Tableau 4.1.A.4 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 4

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	70	1	10,00	157	10,38	212	10,33
2	77	2	15,10	167	13,23	216	11,09
3	81	3	20,16	178	20,28	226	15,11
4	86	4	25,12	187	24,86	236	21,24
5	96	5	30,00	197	27,71	246	25,12
6	108		33,42	207	30,64	256	28,01
7	116	6	35,00	217	31,85	266	29,87
8	125		35,20	227	32,95	276	31,10
9	133		35,93	237	33,11	286	31,81
10	146		36,27	247	33,48	296	32,46
11	164		36,10	257	33,21	306	32,57
12	169		36,26	267	33,97	316	33,04
13	178	7	36,59	277	33,10	326	33,14
14	185		36,11	287	27,80	336	30,77
15	186		35,82	297	21,85	346	25,72
16	196	8	25,71	307	17,64	356	20,72
17	202		20,89	317	15,07	366	17,34
18	212	9	15,86	327	13,10	376	14,98
19	237	10	10,81	337	12,27	386	13,57
20	240		10,77	347	11,26	407	11,84

Tableau 4.2.A.4 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 4

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	157	10,36	210	10,36
2	164	15,73	217	15,73
3	166	18,26	221	20,66
4	168	20,66	226	25,36
5	173	25,36	230	27,32
6	178	27,80	236	30,12
7	183	30,12	251	33,87
8	196	33,37	256	35,01
9	203	35,01	262	35,17
10	250	36,22	288	35,83
11	264,5	36,59	317,5	36,59
12	267	35,08	320	35,08
13	269	33,87	325	32,06
14	274	30,85	328	30,24
15	283	25,40	332	27,83
16	288	22,32	336	25,40
17	291	20,50	344	20,48
18	299	15,76	350	16,78
19	302	15,15	355	15,15
20	323,5	10,81	376,5	10,81

Tableau 4.3.A.4 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 4

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	166	13,44	23	10,36	220	12,39	19	10,00
2	169	14,46	13	12,55	227	15,86	5	15,10
3	173	17,45	10	15,73	231	18,14	11	20,16
4	175	17,94	2	18,26	233	19,46	14	22,14
5	177	19,86	4	20,66	236	21,24	18	25,12
6	180	21,88	8	23,63	240	22,82	19	27,07
7	182	22,18	14	25,36	246	25,12	19	30,00
8	187	24,86	12	27,80	255	27,86	16	32,25
9	192	26,91	12	30,12	262	29,28	16	34,00
10	203	29,42	12	32,88	326	33,14		36,54
11	212	31,30	12	35,01	328	32,93		36,59
12	227	32,95		35,40	331	32,43	7	34,80
13	234	33,24		35,58	338	29,83	2	30,55
14	264,5	33,93	8	36,59	344	26,84	0	26,92
15	267	33,97	3	35,08	347	25,20	0	25,09
16	274	33,38	0	33,27	350	23,44	0	23,25
17	283	30,53	1	30,85	355	21,10	4	20,17
18	292	24,14	5	25,40	361	18,83	12	16,48
19	300	19,86	3	20,50	366	17,34	13	15,05
20	332,5	12,70	15	10,81	387	13,44	19	10,81

Erreur moyenne : 10 %

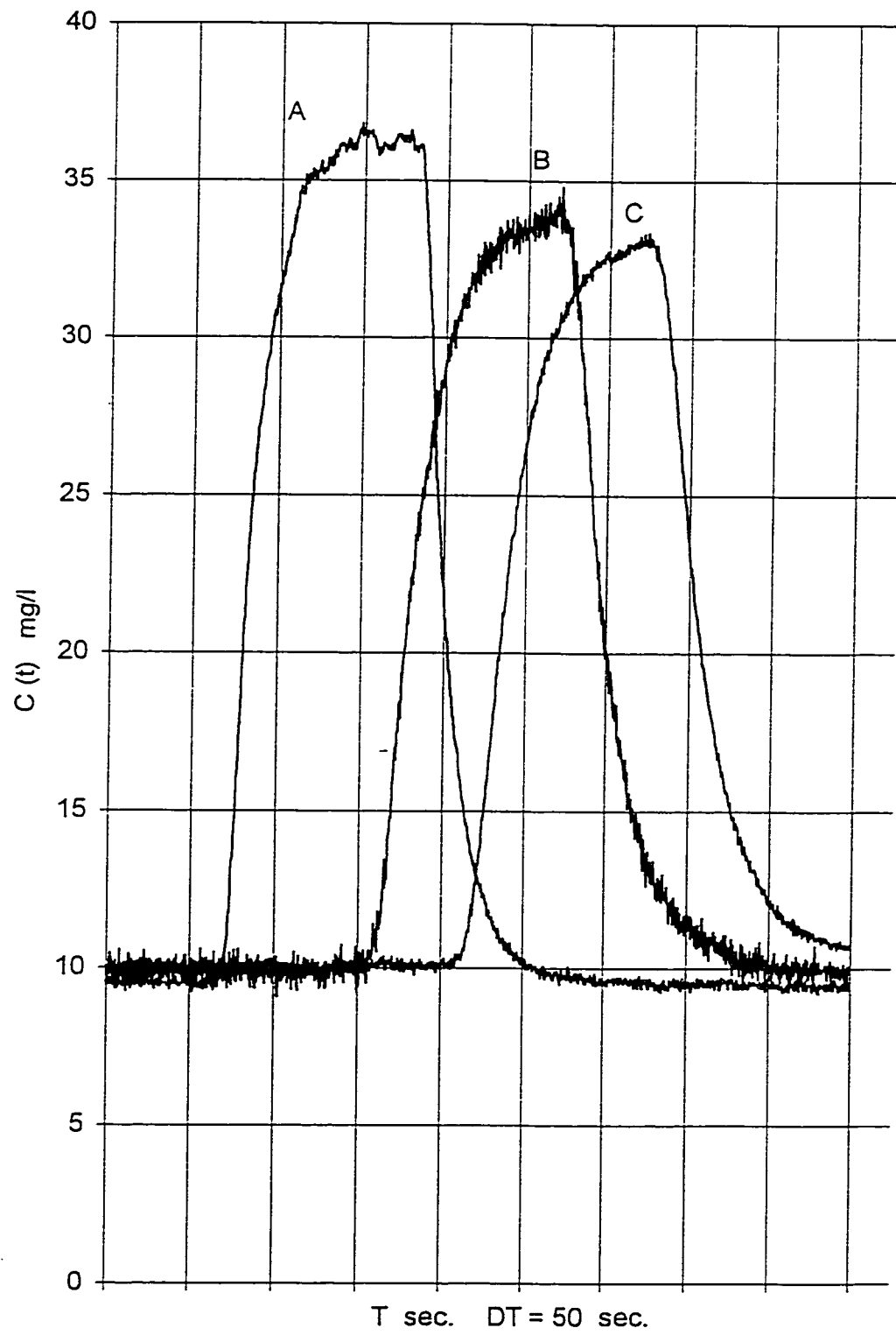


Figure 4.1 A4 - Concentrations enregistrées obtenues après
lissage - Essai 4

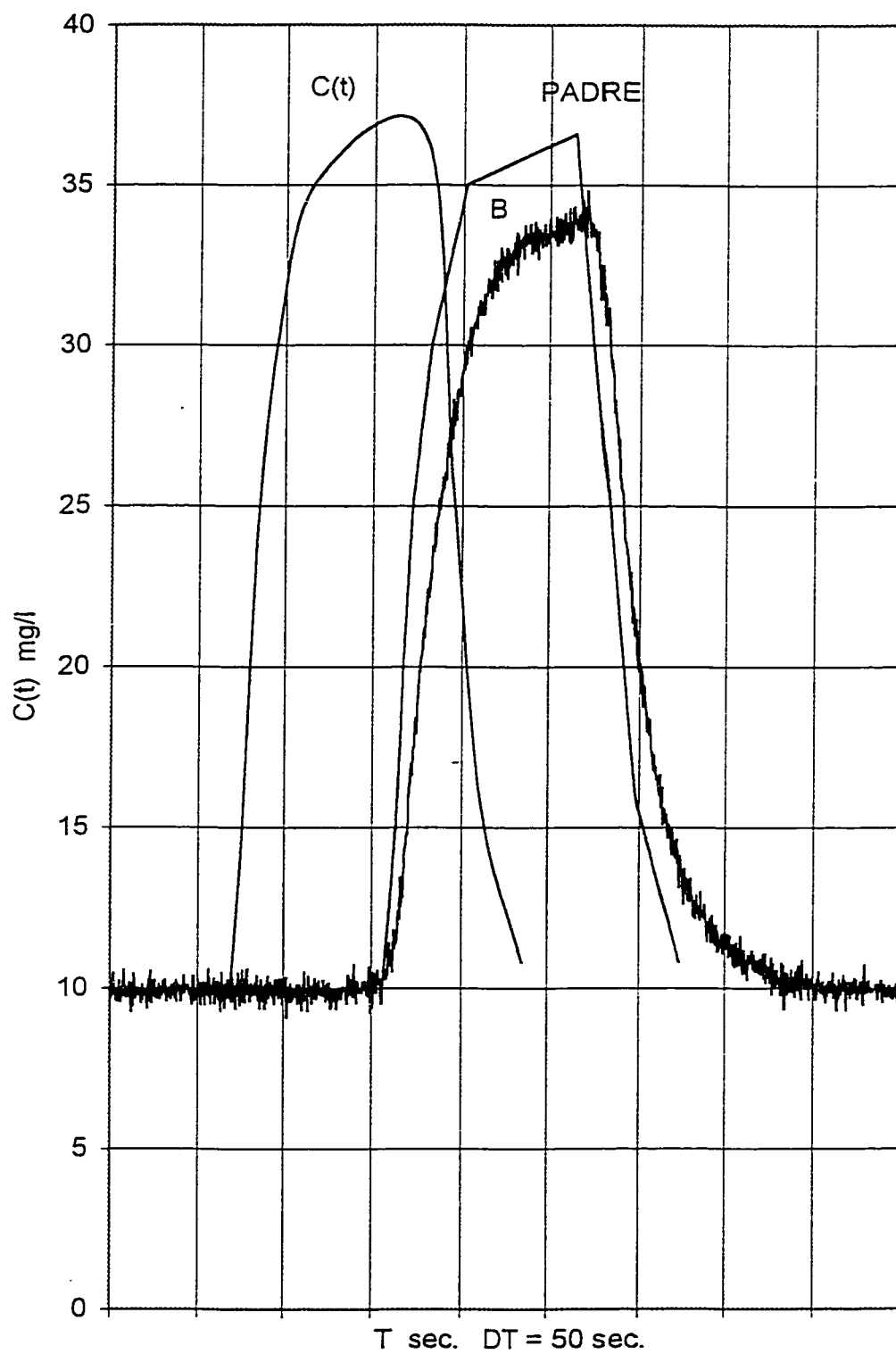


Figure 4.2 A4 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 4

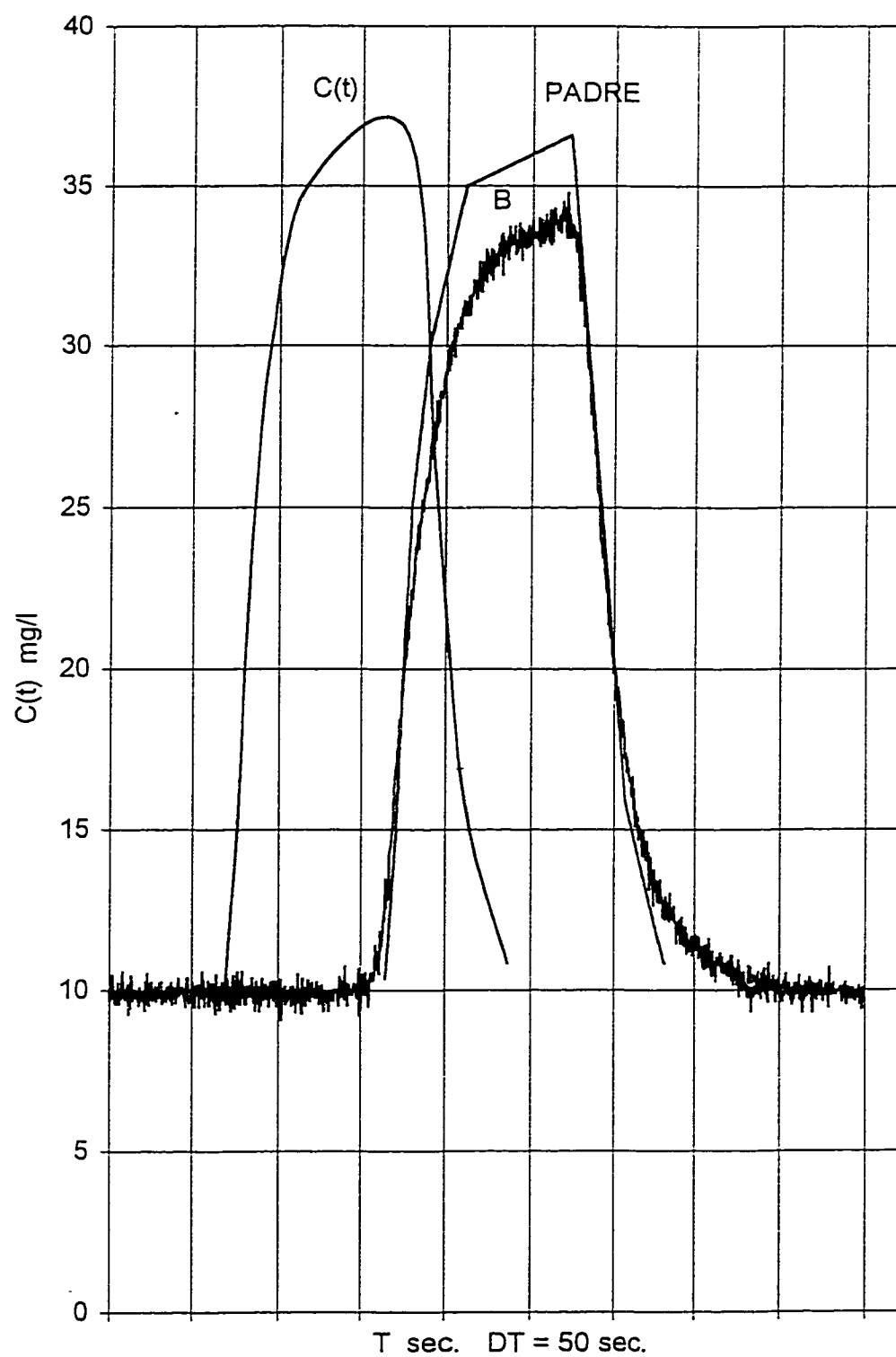


Figure 4.3 A4 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 4

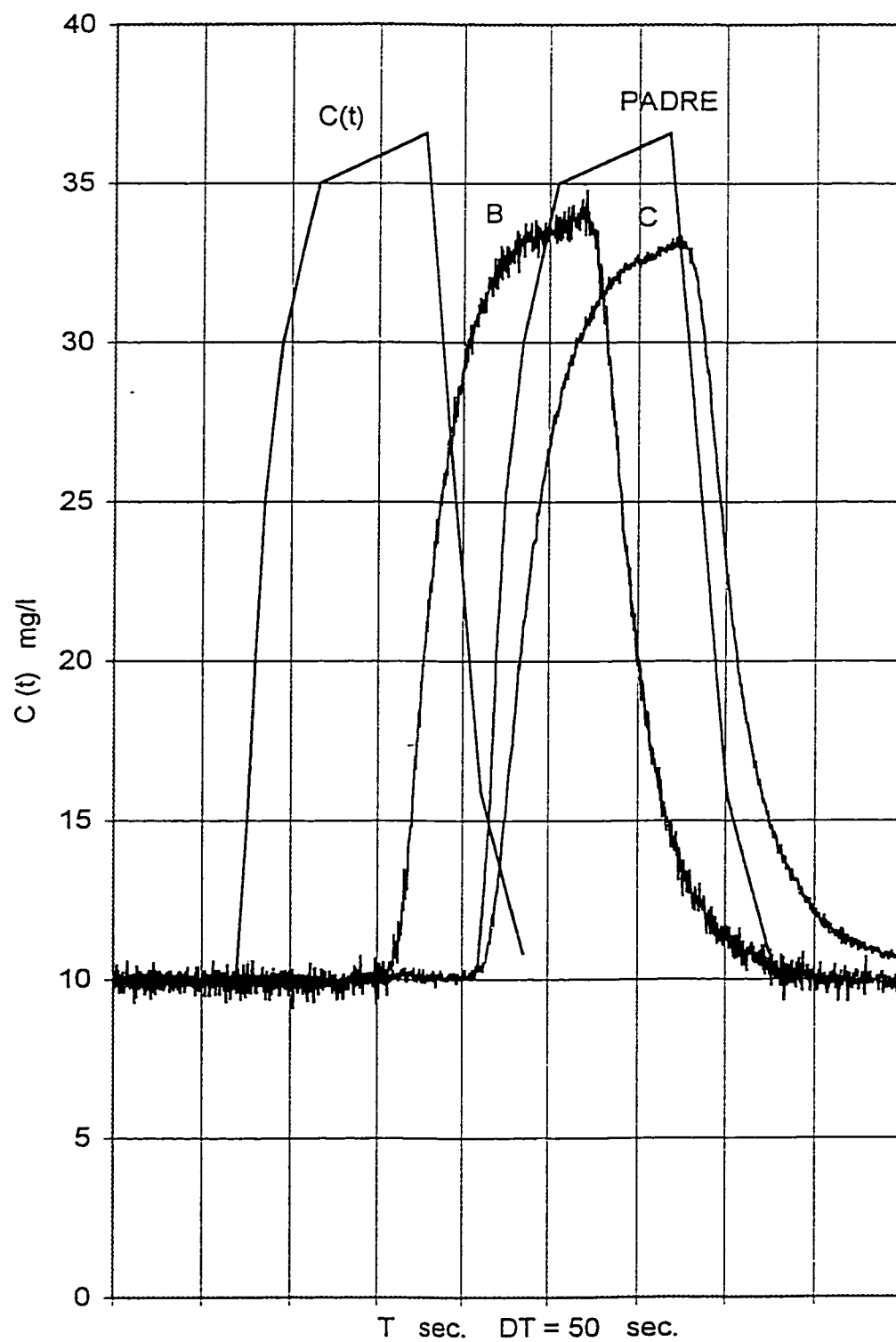


Figure 4.4 A4 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 4

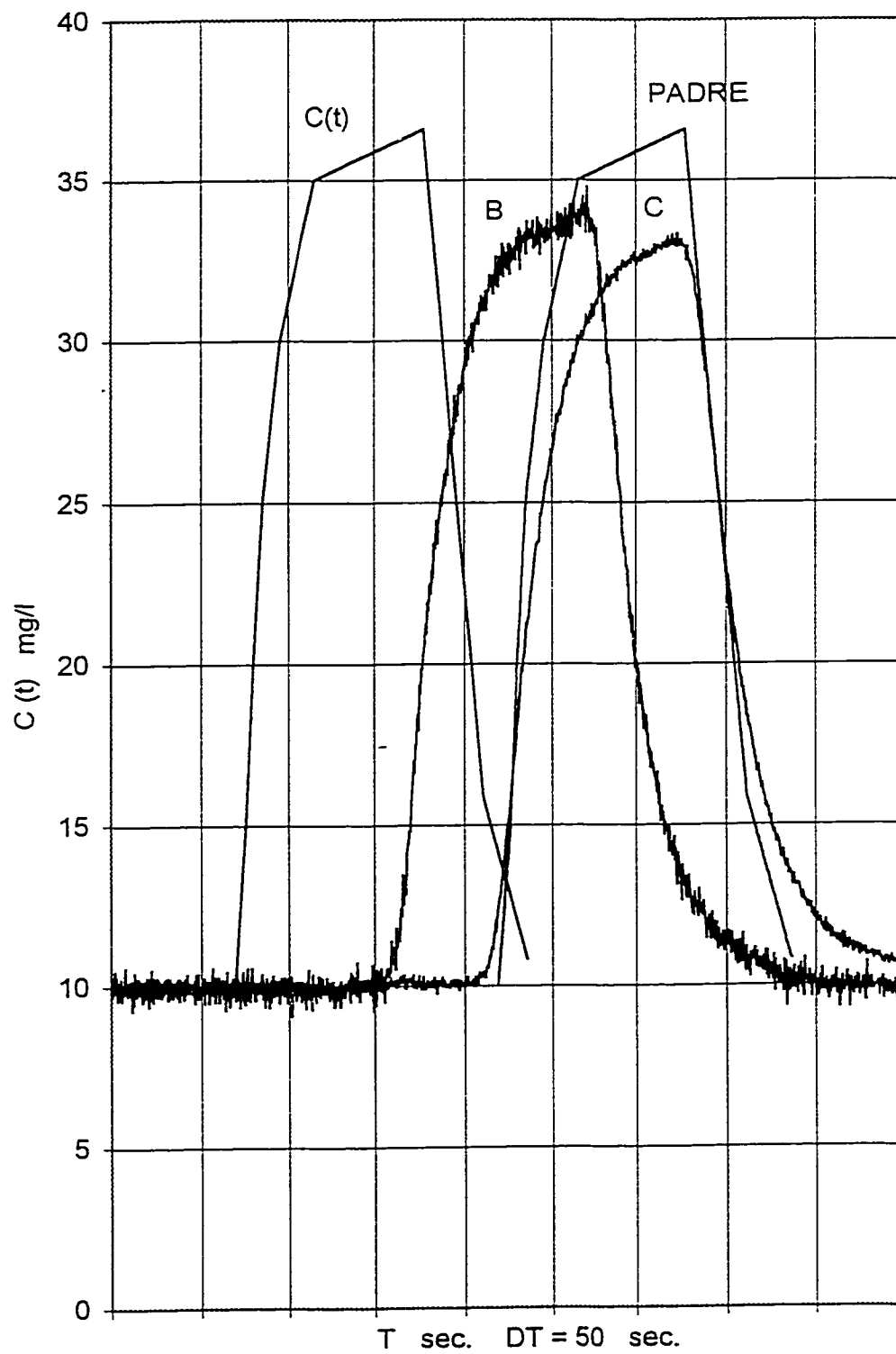


Figure 4.5 A4 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 4

Annexe A5

ESSAI NO 5

Débit mesuré au Venturi		48	l/s
Vitesse		0,68	m/s
Nombre de Reynolds		180 000	
Débit ajusté		45	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	19	%
	C	15	%
Quantité de sel passée	A	182	g
	B	171	g
	C	171	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		38,50	mg/l
C_B^M		34,94	mg/l
C_C^M		35,80	mg/l
T séjour réel (Q = 45 l/s)	B	82,5	sec
	C	130	sec

Tableau 4.1.A.5 - Les valeurs de concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 5

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	67	1	1,81	150	2,92	200	5,74
2	70		8,63	155	15,55	201	8,42
3	72	2	10,49	160	30,85	202	10,56
4	75		15,97	165	33,16	203	12,14
5	77	3	21,89	170	33,35	204	13,84
6	80		26,33	173	33,81	205	17,42
7	83	4	29,39	185	33,87	206	19,26
8	90		32,28	200	33,62	208	24,98
9	96,5	5	34,80	260	32,86	209	25,80
10	112		35,70	260,5	30,87	210	27,88
11	131	6	37,78	264	25,81	212	31,60
12	150		36,89	265	23,55	214	32,30
13	174	7	38,50	266	21,21	250	32,72
14	177		28,92	267	15,44	275	36,30
15	180	8	29,21	268	12,83	280	36,20
16	184		19,91	269	8,15	288	35,71
17	188	9	19,86	270	7,29	290	34,66
18	194		7,25	271	3,09	311	30,78
19	203	10	4,89	271,5	1,94	314	25,89
20	204		6,73	272	2,76	322	6,10

Tableau 4.2.A.5 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 5

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	142,5	1,81	189	1,81
2	144	4,41	191	5,28
3	147	9,62	194	10,49
4	150	16,19	195	12,77
5	151	18,47	196	15,05
6	152	20,75	198	19,61
7	154	23,76	200	23,14
8	155	25,01	201	24,39
9	157	27,51	202	25,64
10	160	30,00	204	28,14
11	174	34,97	206	29,81
12	206,5	37,78	220	34,97
13	249,5	38,50	253	37,78
14	252	34,63	296	38,50
15	255	29,98	298	35,40
16	259	25,12	302	29,21
17	263	20,44	310	19,86
18	268	15,37	315	14,87
19	273	10,38	320	9,88
20	278,5	4,89	325	4,89

Tableau 4.3.A.5 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 5

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	149,5	2,85	36	1,81	197	3,43	47	1,81
2	151	3,71	19	4,41	199	5,50	4	5,30
3	152	5,90	4	6,15	201	8,40	4	8,75
4	154	11,79	18	9,62	202	10,56	0	10,49
5	155	15,55	25	11,63	203	12,14	5	12,77
6	157	22,81	29	16,19	204	13,84	9	15,05
7	158	26,30	30	18,47	205	17,42	0	17,33
8	160	30,85	27	22,51	206	19,26	2	19,61
9	182	31,54	-	35,06	208	25,00	7	23,14
10	242,5	34,94	-	38,27	210	27,88	8	25,64
11	256,5	32,83	-	38,50	212	31,60	11	28,14
12	259	33,50	3	34,63	214	32,30	8	29,81
13	262	28,77	4	29,98	228	33,00	-	34,97
14	266	21,21	18	25,12	281,5	35,80	-	38,12
15	270	7,29	64	20,44	304	33,37	-	38,50
16	275	4,39	71	15,37	306	33,41	-	35,40
17	277	3,23	76	13,73	310	32,11	9	29,21
18	280	3,27	68	10,38	318	16,02	24	19,86
19	282	1,20	85	8,38	328	1,66	83	9,88
20	285,5	1,00	79	4,89	333	2,68	45	4,89

Erreur moyenne : 27 %

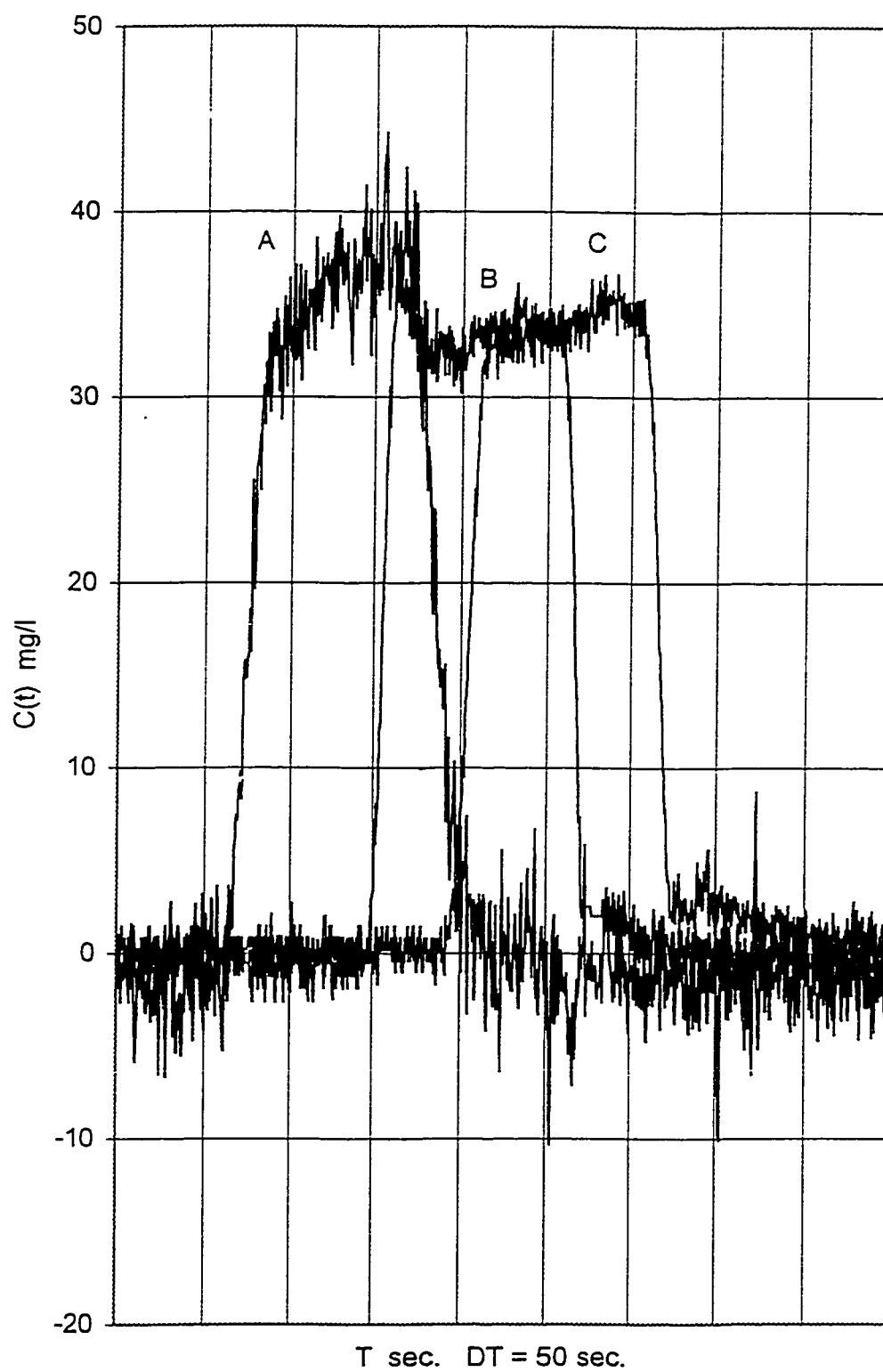


Figure 4.1 A5 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 5

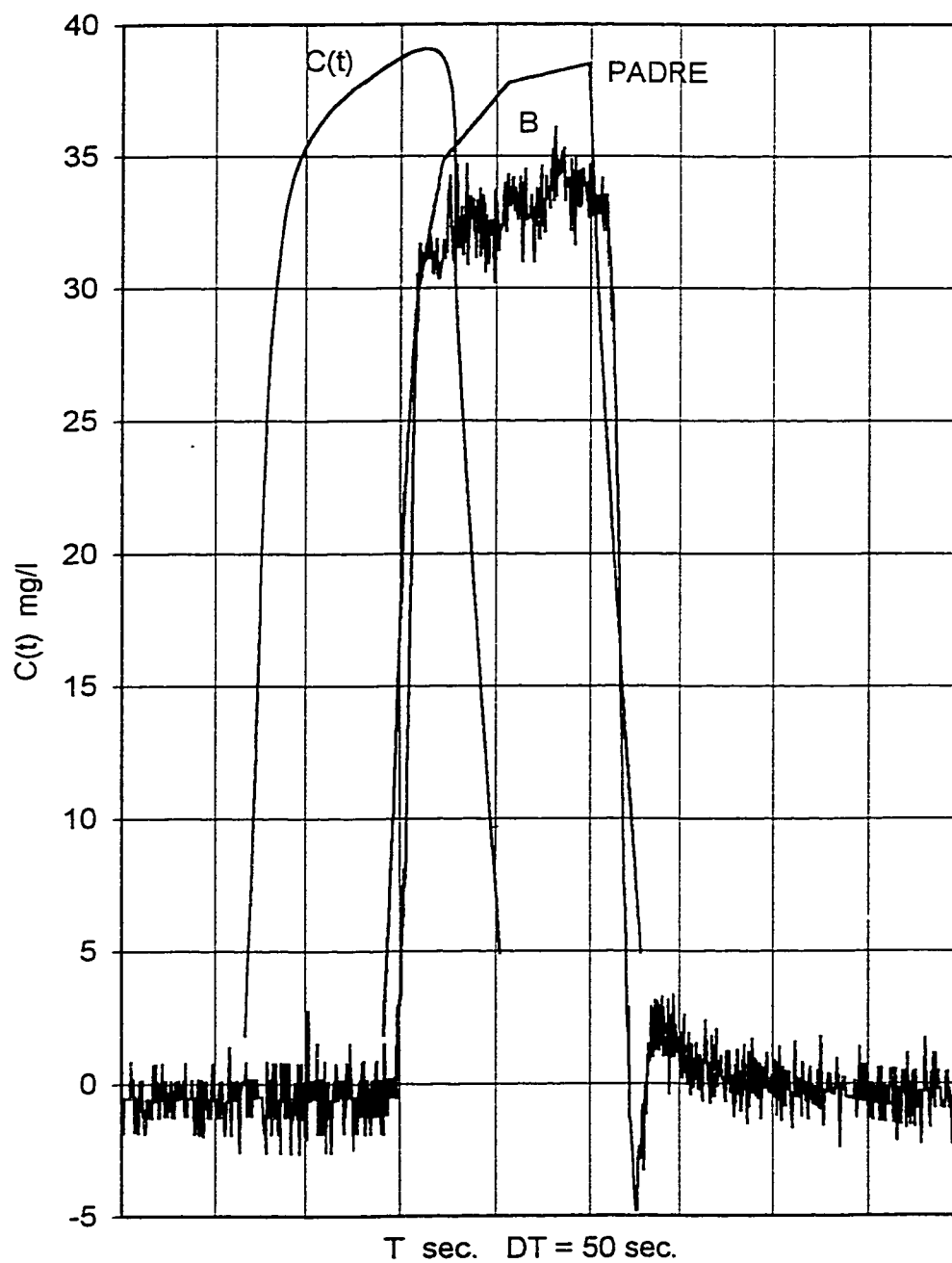


Figure 4.2 A5 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 5

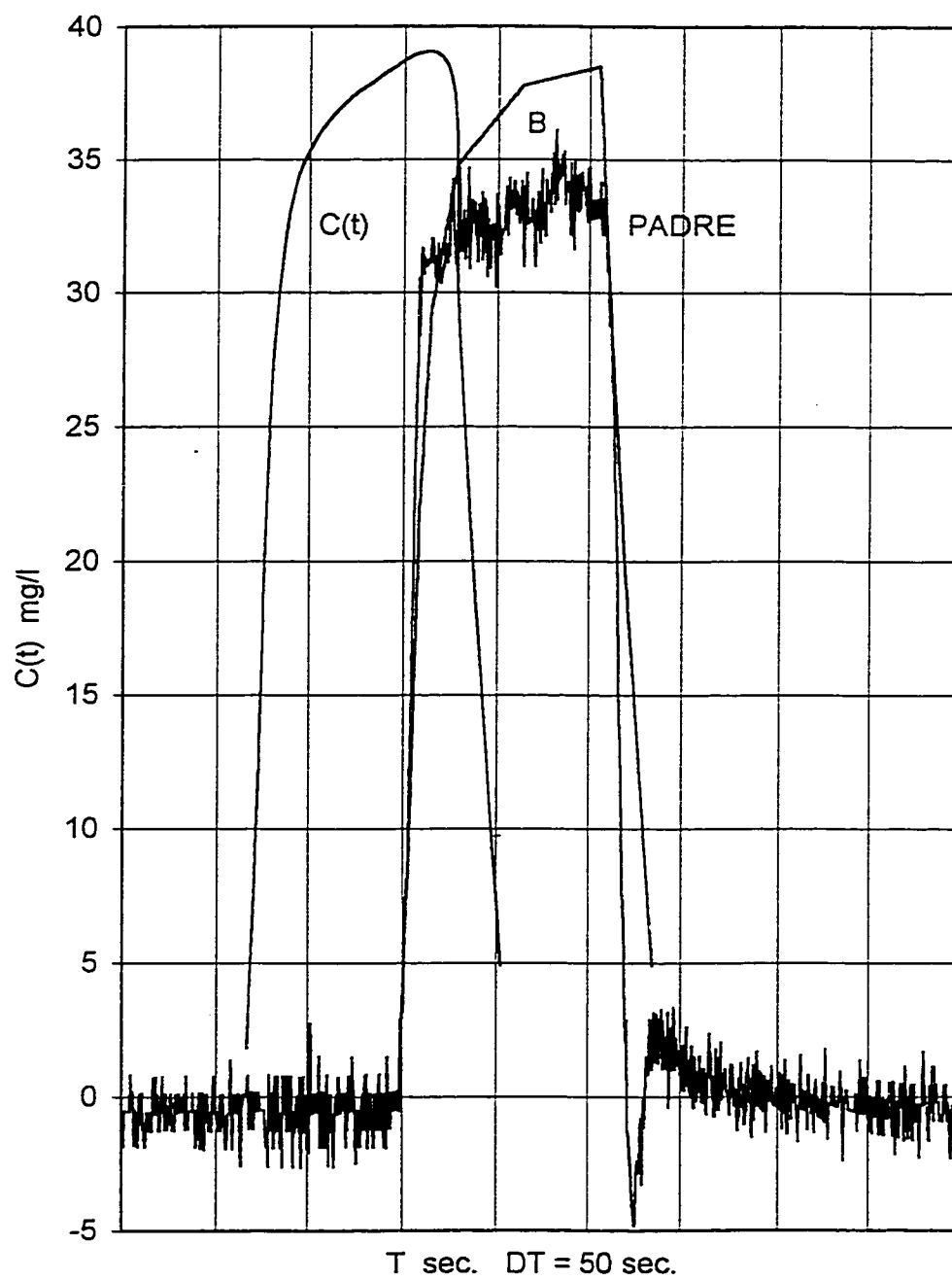


Figure 4.3 A5 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 5

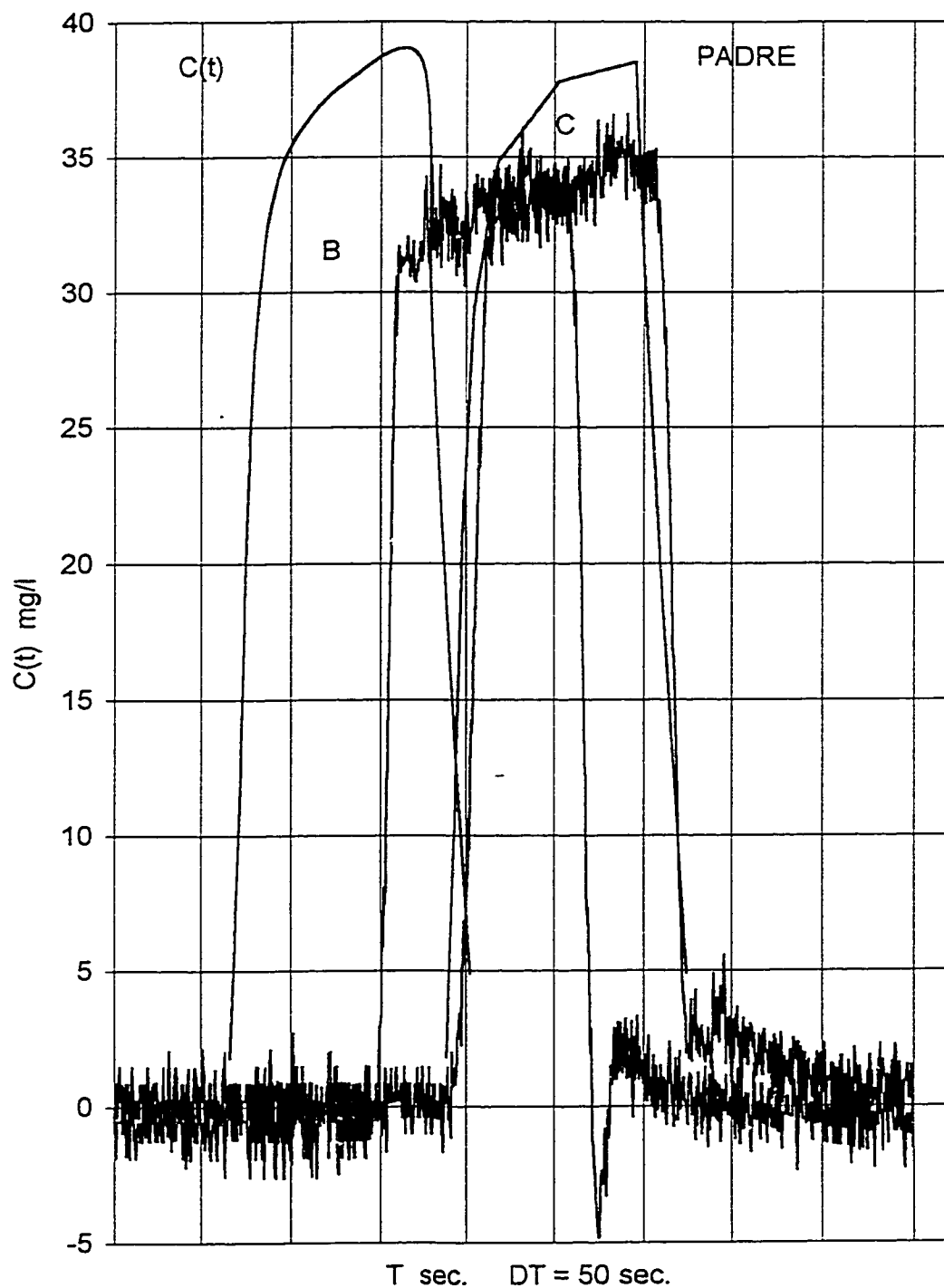


Figure 4.4 A5 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 5

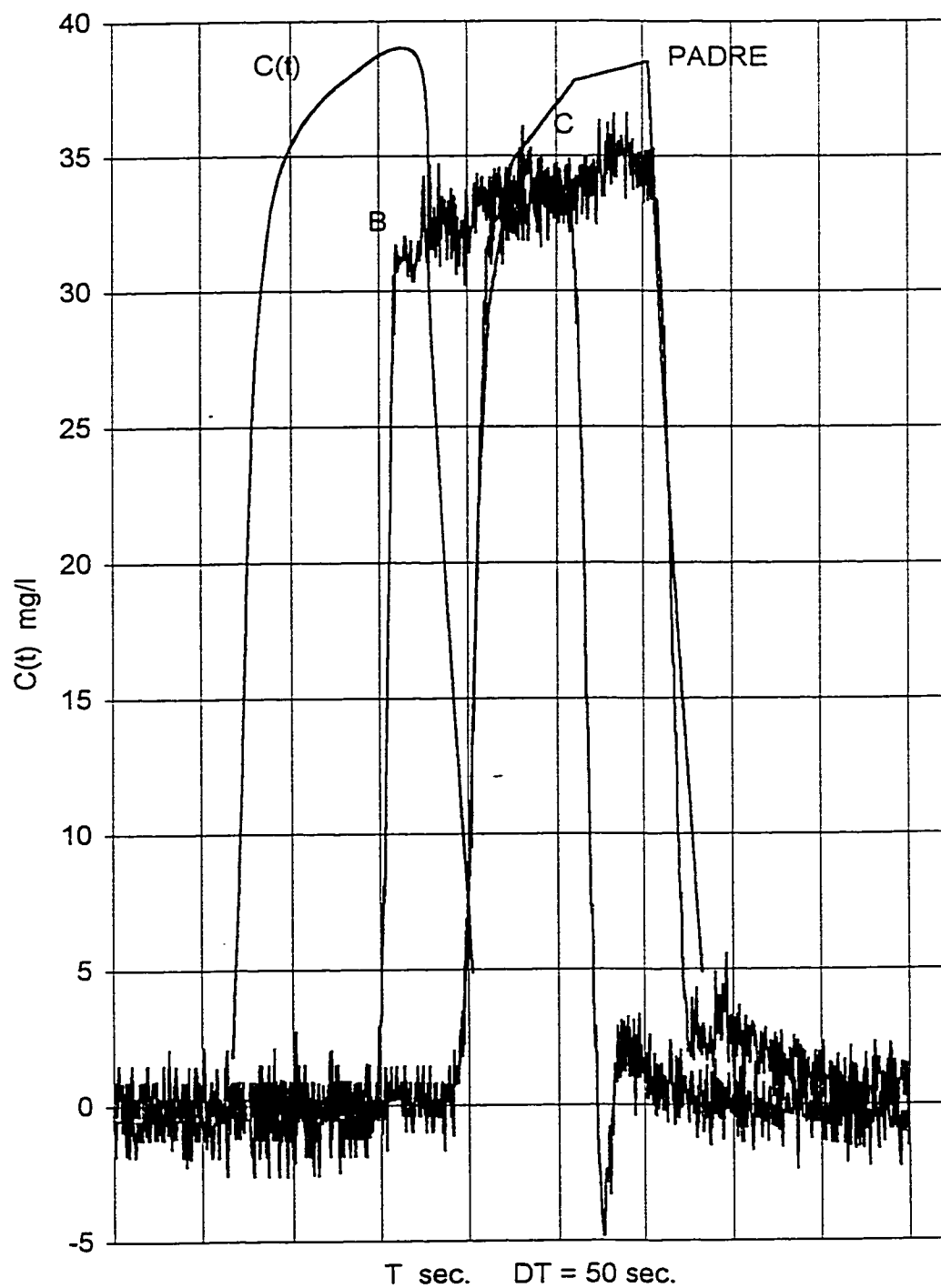


Figure 4.5 A5 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 5

Annexe A6

ESSAI NO 6

Débit mesuré au Venturi		59	l/s
Vitesse		0,83	m/s
Nombre de Reynolds		223 000	
Débit ajusté		55	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	10	%
	C	19	%
Quantité de sel passée	A	210	g
	B	192	g
	C	181	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		33,29	mg/l
C_B^M		29,81	mg/l
C_C^M		28,73	mg/l
T séjour réel (Q = 55 l/s)	B	64	sec
	C	107	sec

Tableau 4.1.A.6 - Les valeurs de concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 6

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	78	1	4,52	136,5	5,64	178,5	4,10
2	81		8,62	143	10,42	188	8,65
3	83	2	10,55	146	15,06	194	13,23
4	88		16,70	150	20,31	200	18,10
5	91	3	20,64	154	24,91	208	23,02
6	95		24,48	157	27,75	214	25,31
7	97	4	26,70	159	29,18	229	27,17
8	111		28,35	165	28,72	243	28,04
9	128	5	30,12	170	28,32	275	29,53
10	143		32,42	219	29,45	292	29,18
11	166	6	33,29	239	30,39	295	28,10
12	185		32,21	244	29,43	301	25,49
13	189	7	31,81	252	29,21	303	23,49
14	193		28,10	256	25,27	307	20,50
15	196	8	25,26	260	19,66	309	18,34
16	201		18,90	263	15,91	314	13,76
17	204	9	15,37	267	10,90	324	8,40
18	207		12,23	268	9,73	335	6,50
19	210	10	8,68	270	7,70	343	5,77
20	212,5		7,12	272	5,82	359	4,89

Tableau 4.2.A.6 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 6

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	142	7,53	177,5	5,10
2	145	10,55	185	10,00
3	149	15,59	187	15,00
4	152	17,49	190	20,00
5	153	20,01	195	25,00
6	156	23,67	198	26,98
7	158	25,18	215	28,50
8	162	26,98	230	30,00
9	171	27,97	244	32,16
10	175	28,46	270	33,30
11	185	29,57	284	31,78
12	189	30,01	292	30,10
13	210	31,79	295	27,16
14	221	32,70	298	25,01
15	228	33,30	300	22,50
16	250	31,87	304	20,01
17	252	30,87	306	17,10
18	258	25,73	308	15,10
19	266	15,37	309	10,25
20	272	8,68	310	8,91

Tableau 4.3.A.6 - Comparaison des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 6

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	PtB Δ %	S mg/l
1	142	10,42	28	7,50	185	6,15	17	5,12
2	145	13,77	23	10,55	190	9,42	12	10,55
3	147	16,20	19	13,07	191	10,78	15	12,44
4	149	19,42	20	15,60	194	12,48	25	15,60
5	151	21,83	17	18,12	196	14,11	28	18,12
6	153	23,72	13	20,64	197	15,95	25	20,01
7	156	27,13	13	23,67	202	19,97	26	25,19
8	158	28,56	10	25,69	207	23,00	17	27,03
9	159	29,18	4	26,70	221	26,58	8	28,63
10	174	28,16	0	28,35	234	27,56	9	30,07
11	189	28,61	5	30,01	248	28,43	10	31,25
12	212	29,81	7	31,96	273	28,73	16	33,29
13	228	29,80	12	33,29	295	28,24	13	31,84
14	251	29,42	8	31,81	297	27,22	12	30,41
15	252	29,21	6	30,87	302	24,47	5	25,73
16	256	25,27	7	27,13	305	22,16	0	22,17
17	258	21,57	17	25,26	307	20,50	4	19,70
18	262	16,42	24	20,31	310	17,65	9	16,00
19	266	11,45	34	15,37	315	13,32	22	10,35
20	272	6,00	45	8,68	317	12,20	29	8,68

Erreur moyenne : 15 %

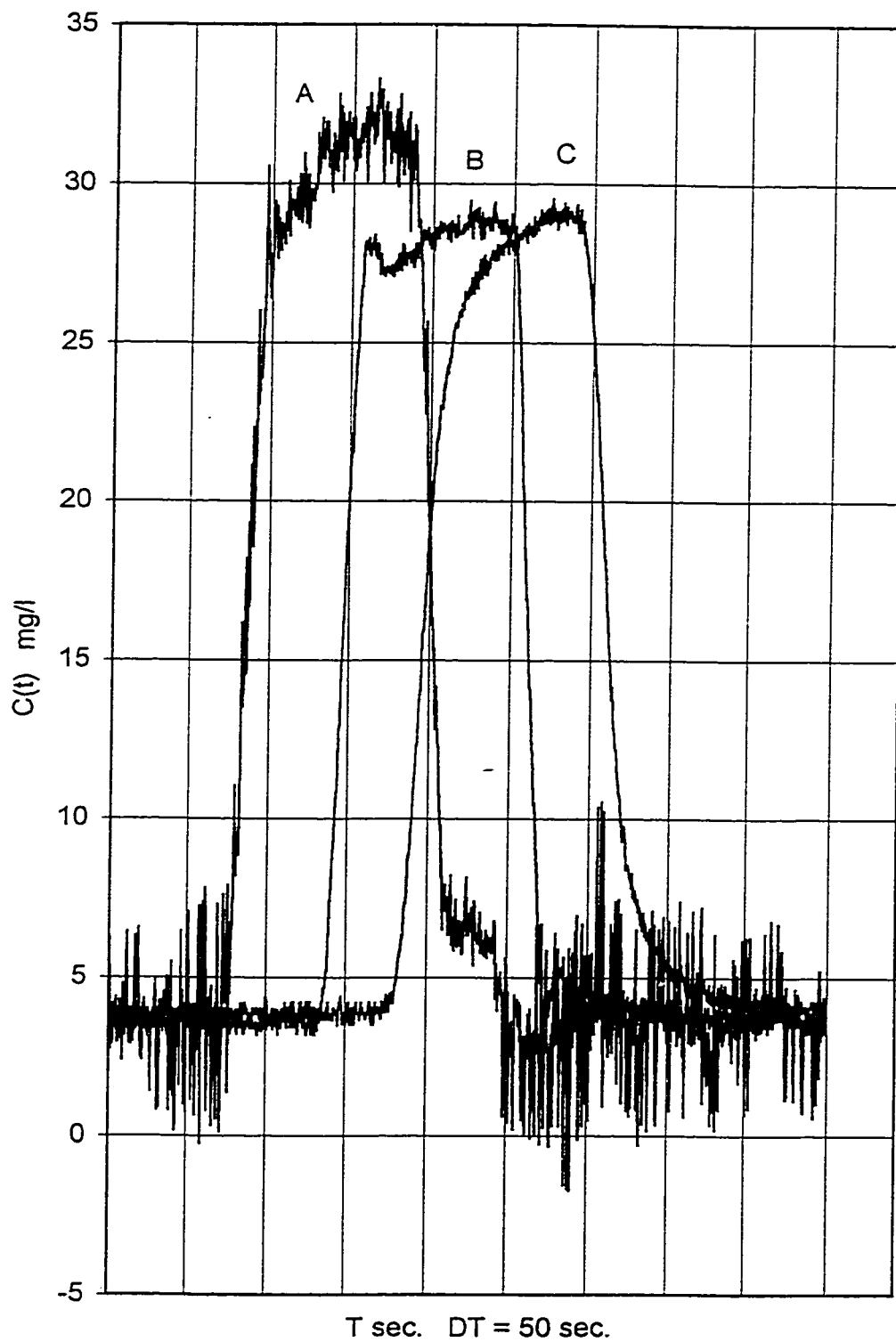


Figure 4.1 A6 - Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 6

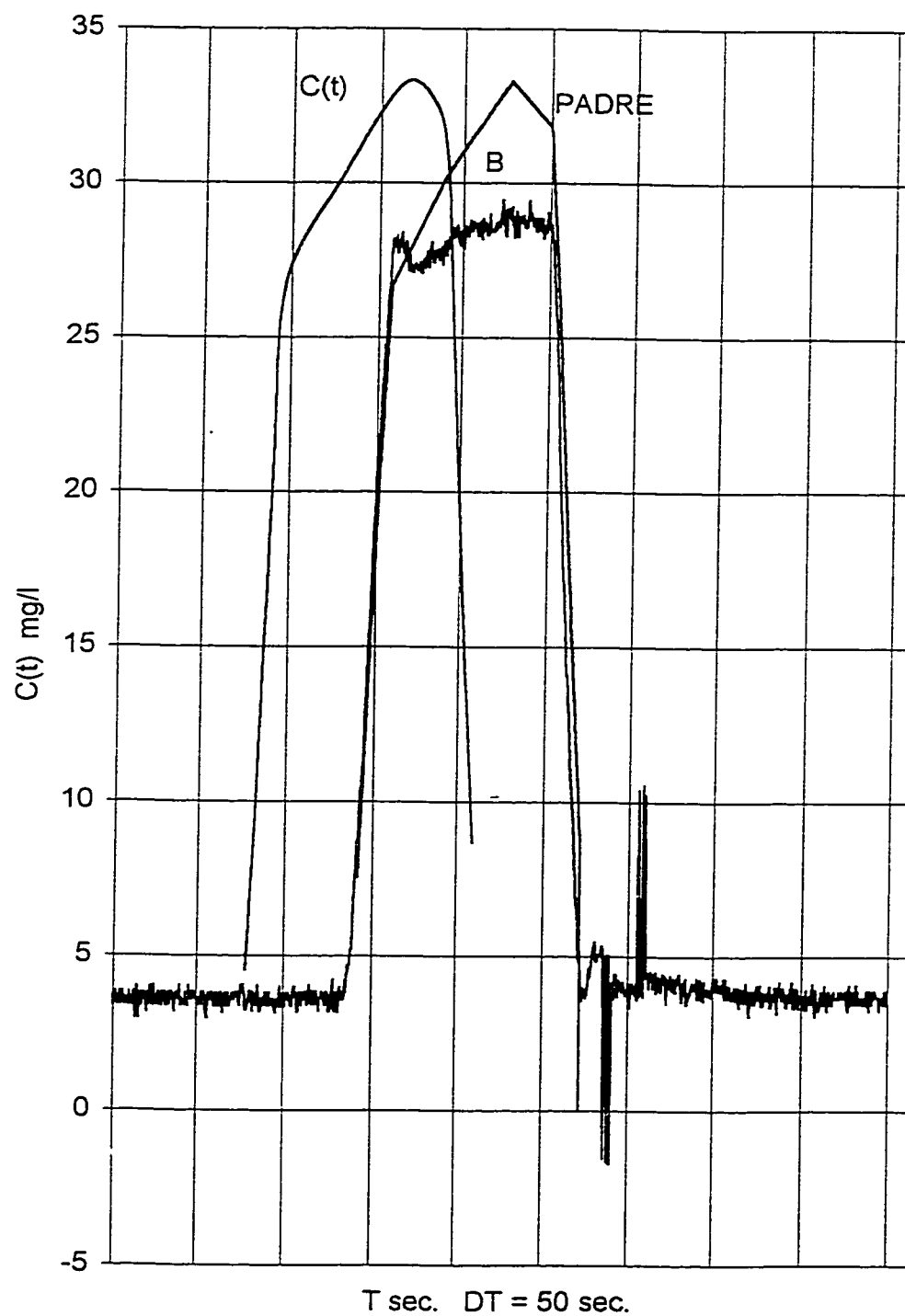


Figure 4.2 A6 - Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit point B - Essai 6

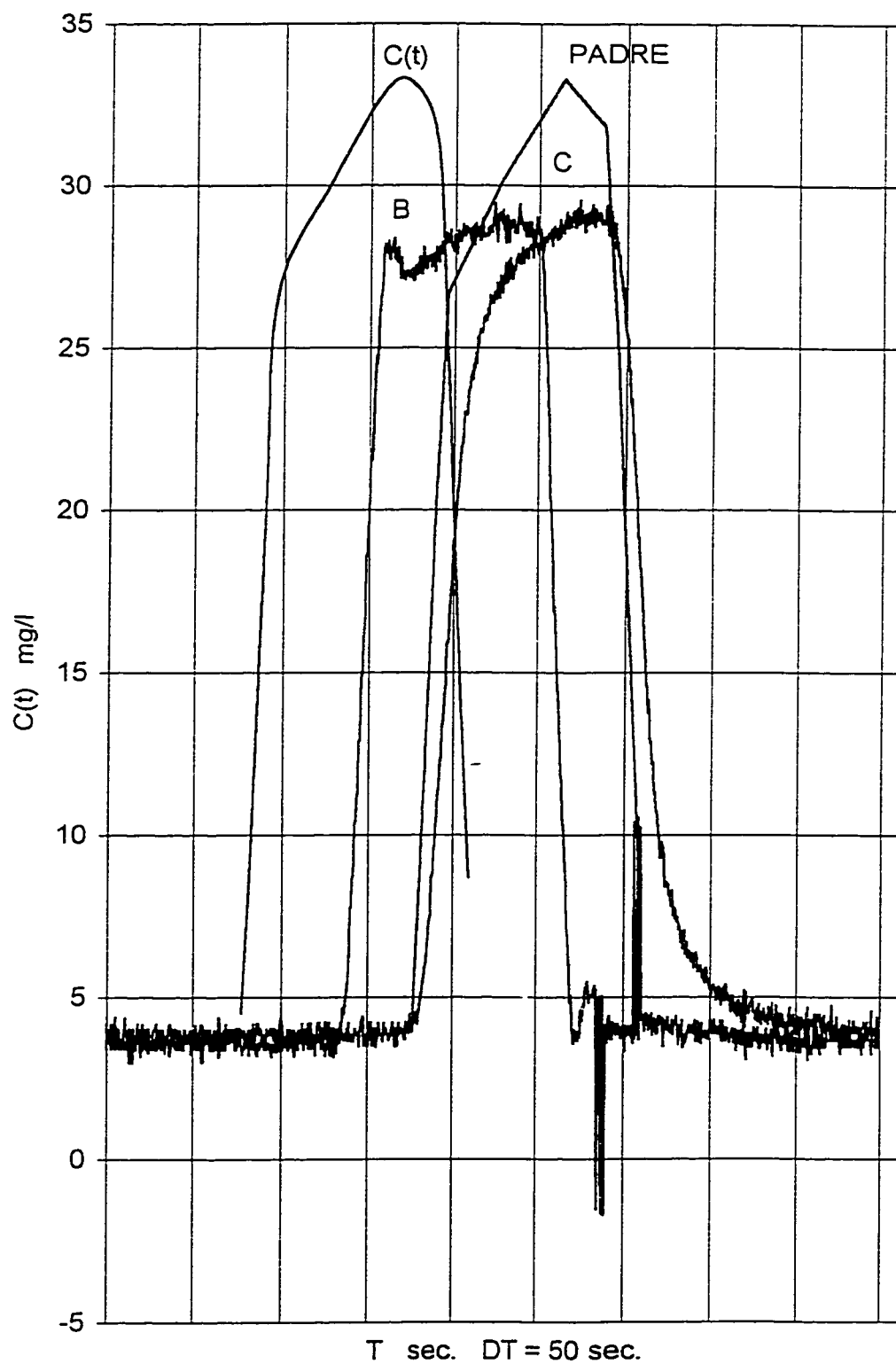


Figure 4.3 A6 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 6

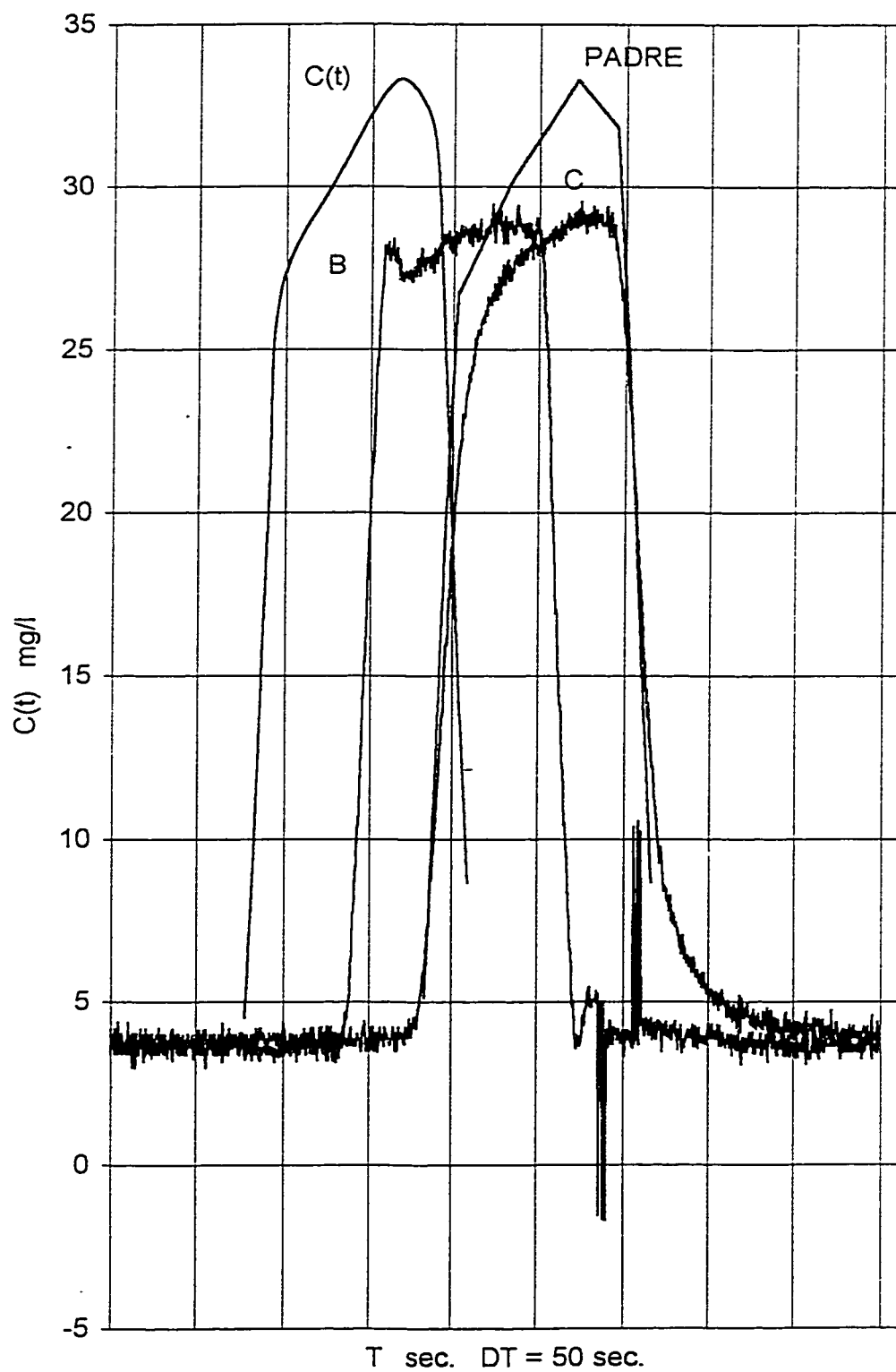


Figure 4.4 A6 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 6

Annexe A7

ESSAI NO 7

Débit mesuré au Venturi		71	l/s
Vitesse		1	m/s
Nombre de Reynolds		270 000	
Débit ajusté		67	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	26	%
	C	29	%
Quantité de sel passée	A	320	g
	B	319	g
	C	318	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		37,97	mg/l
C_B^M		35,04	mg/l
C_C^M		34,89	mg/l
T séjour réel (Q = 67 l/s)	B	54,5	sec
	C	87,5	sec

Tableau 4.1.A.7 - Les valeurs des concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 7

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	90	1	11,99	141	11,77	173	12,48
2	92		13,62	146	14,55	176	13,65
3	93	2	15,53	148	17,58	179	16,96
4	95		19,31	150	20,90	181	19,54
5	96	3	20,53	151	23,31	183	22,46
6	100		30,89	152	24,69	185	24,84
7	104	4	35,12	154	27,95	187	26,13
8	108		36,00	156	31,16	190	28,85
9	110	5	36,29	158	32,24	195	31,76
10	150		37,11	181	35,03	201	32,29
11	207	6	37,97	218	35,04	206	33,08
12	208		37,40	222	34,74	263	35,00
13	209	7	35,95	260	34,23	270	35,00
14	211		31,22	263	30,68	288	34,89
15	213	8	26,42	265	27,80	294	31,02
16	215		21,78	267	24,40	296	28,67
17	218	9	15,23	269	20,80	298	25,73
18	219		14,58	271	17,41	300	22,62
19	220	10	14,11	273	15,88	312	15,62
20	222		13,96	275	15,24	320	13,97

Tableau 4.2.A.7 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 7

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	141	11,99	172,5	11,99
2	144	14,94	175	14,94
3	145	17,24	177	18,82
4	146	19,92	178	21,02
5	147	22,11	179	23,21
6	149	26,50	180	25,40
7	150	28,70	181	27,60
8	151	30,89	183	31,42
9	152	31,95	184	32,48
10	155	35,12	186,5	35,12
11	161	36,29	192,5	36,29
12	258	37,97	289,5	37,97
13	260	35,95	292	34,76
14	262	31,18	293	32,38
15	264	26,42	294	30,00
16	265	24,18	295	27,61
17	266	21,94	296	25,30
18	267	19,71	297	23,06
19	269	15,23	298	20,83
20	271	14,11	302,5	14,11

Tableau 4.3.A.7 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 7

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	144,5	13,35	10	11,99	177,5	14,72	24	11,99
2	148	16,43	5	15,53	180	17,29	18	14,94
3	149	19,06	2	17,72	182	20,06	13	18,21
4	150	20,30	2	19,92	183	21,44	7	19,92
5	151	23,31	0	23,21	184	23,53	1	23,21
6	152	24,69	3	25,40	185	24,84	2	25,40
7	153,5	27,19	5	28,70	187	26,64	8	28,70
8	154,5	28,97	7	30,89	188	26,97	14	30,89
9	157	31,85	5	33,53	192	29,94	17	35,12
10	165	34,35	6	36,29	288	34,89	8	37,86
11	258	35,52	7	37,91	295	30,00	26	37,97
12	262	32,79	16	37,97	297	28,19	27	35,95
13	264	30,47	18	35,95	298	25,73	26	32,38
14	265	27,80	16	32,38	299	24,95	20	30,00
15	266	25,46	18	30,00	300	22,62	22	27,61
16	267	24,40	13	27,61	302	21,25	14	24,18
17	268	22,54	12	25,30	303	19,84	5	20,82
18	269	20,80	11	23,10	305	18,87	7	17,47
19	271	17,98	10	19,71	306	17,73	14	15,23
20	274,5	14,79	4	14,11	307,5	17,24	18	14,11

Erreur moyenne : 11 %

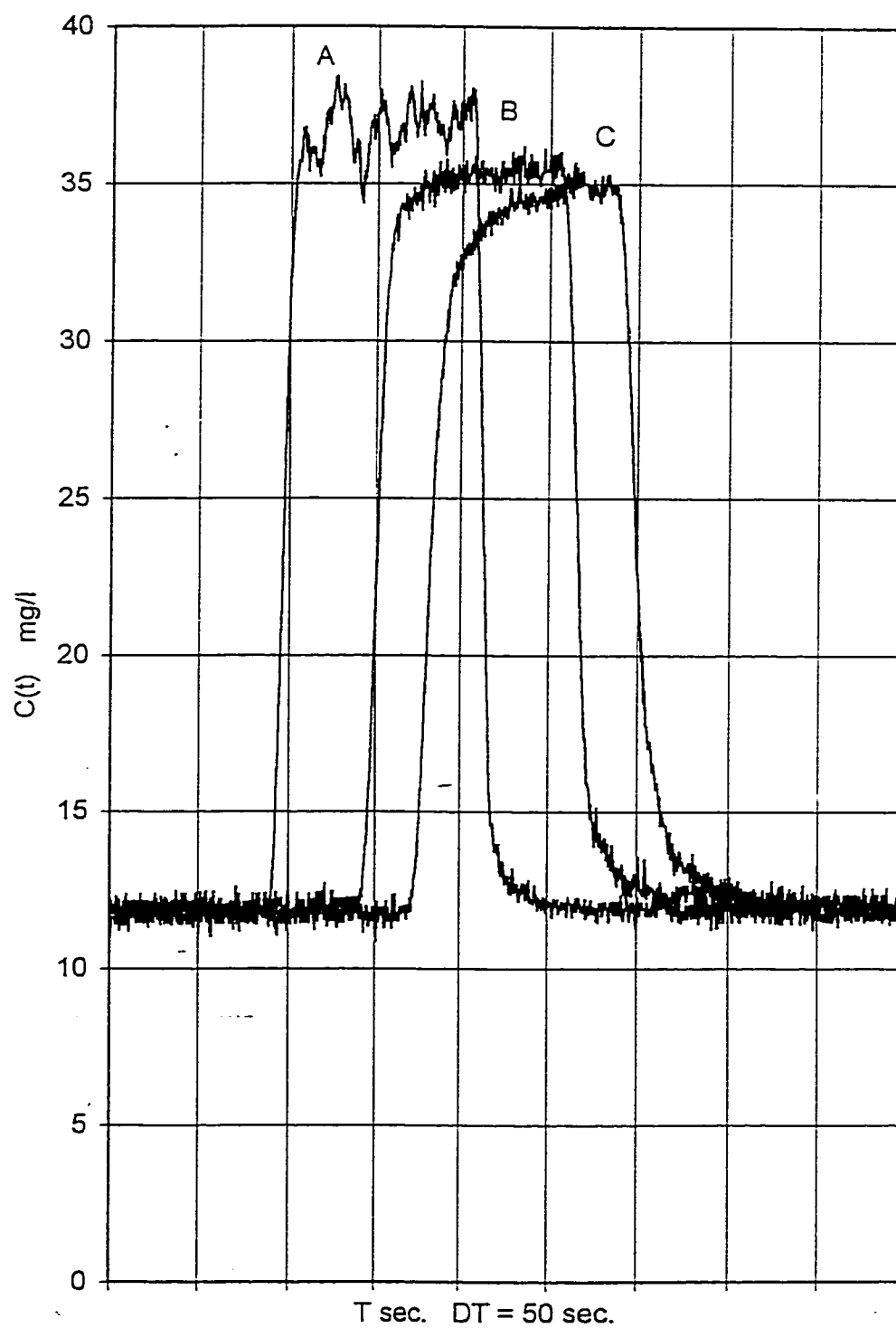


Figure 4.1 A7 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 7

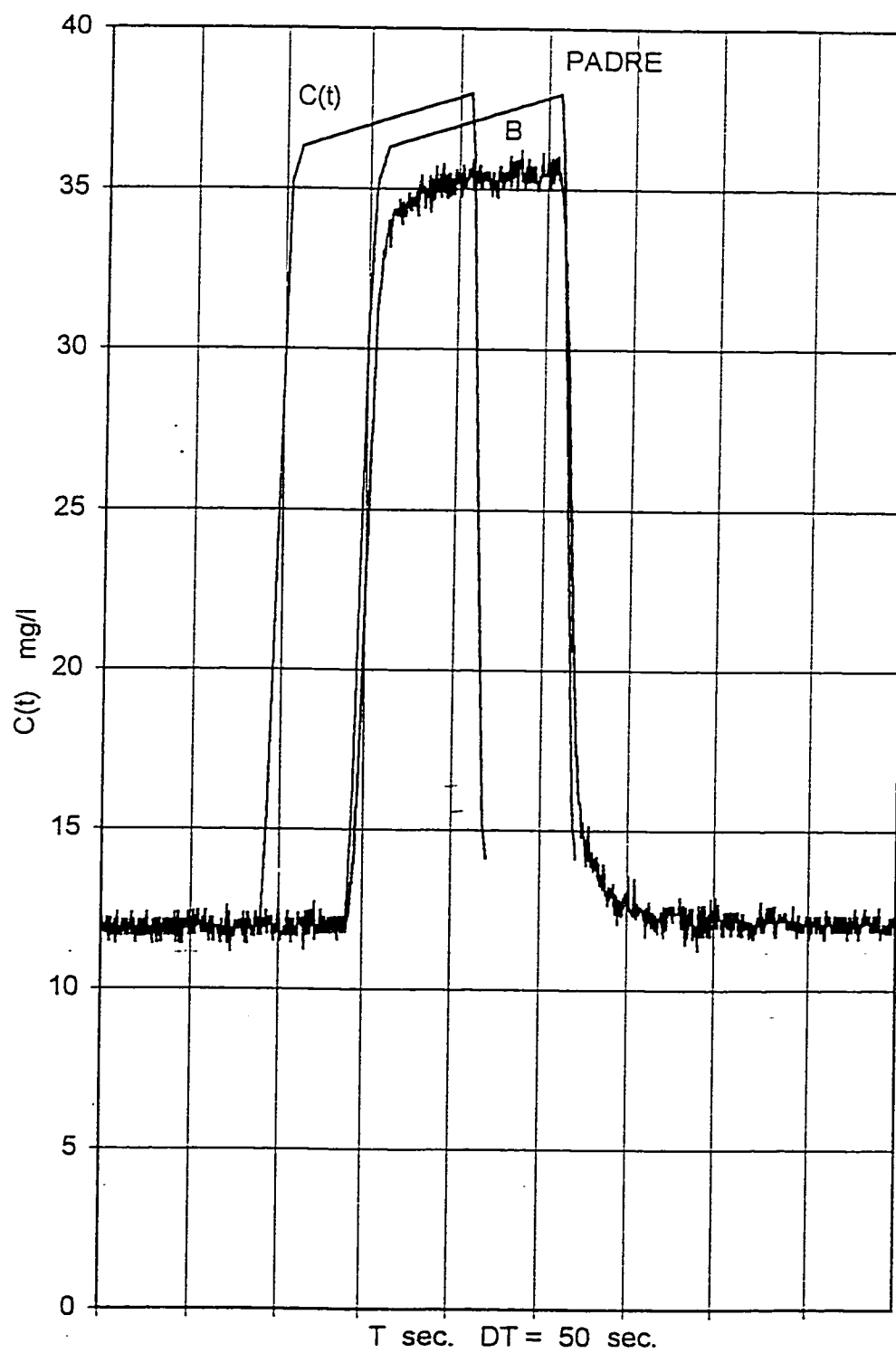


Figure 4.2 A7 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 7

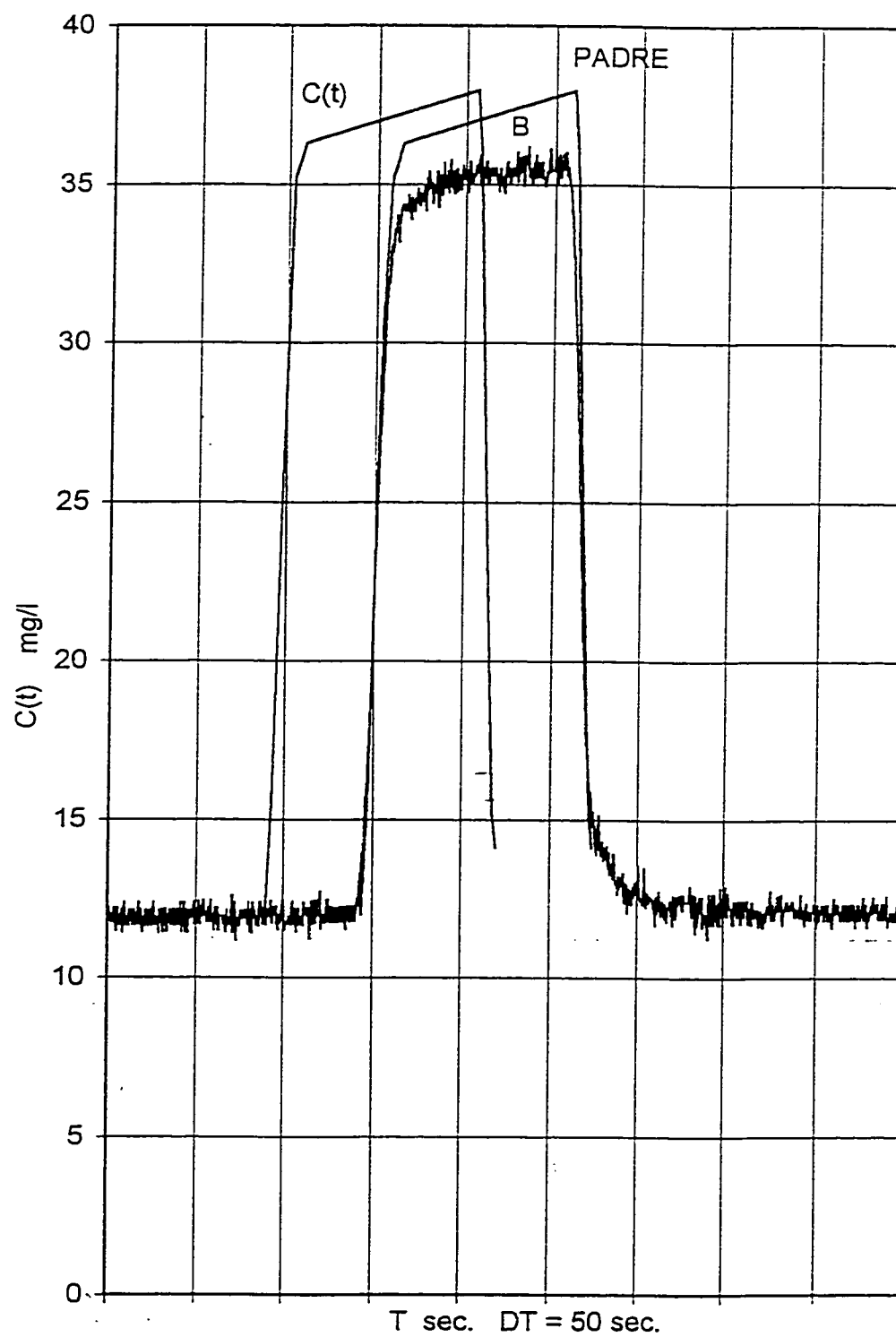


Figure 4.3 A7 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 7

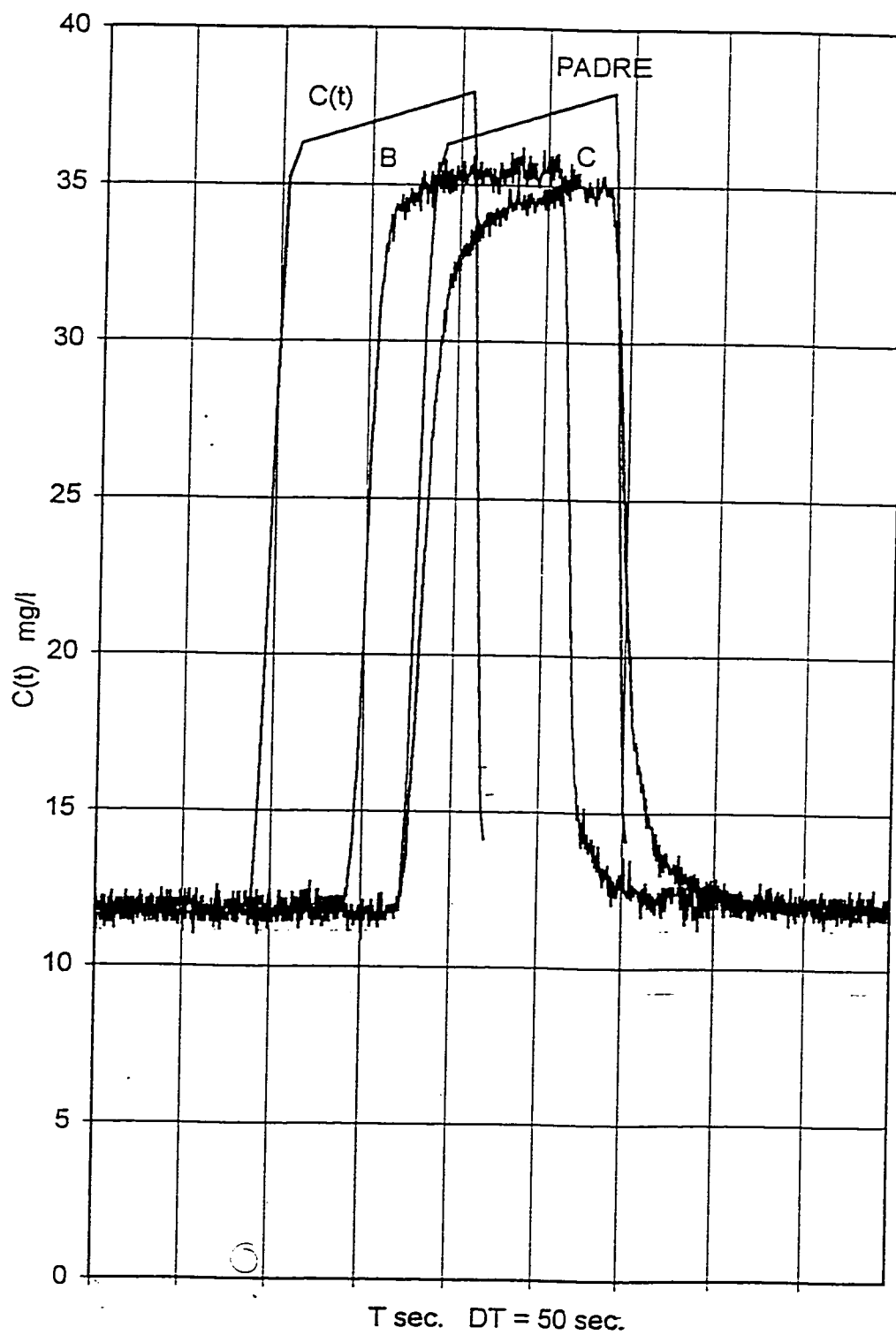


Figure 4.4 A7 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 7

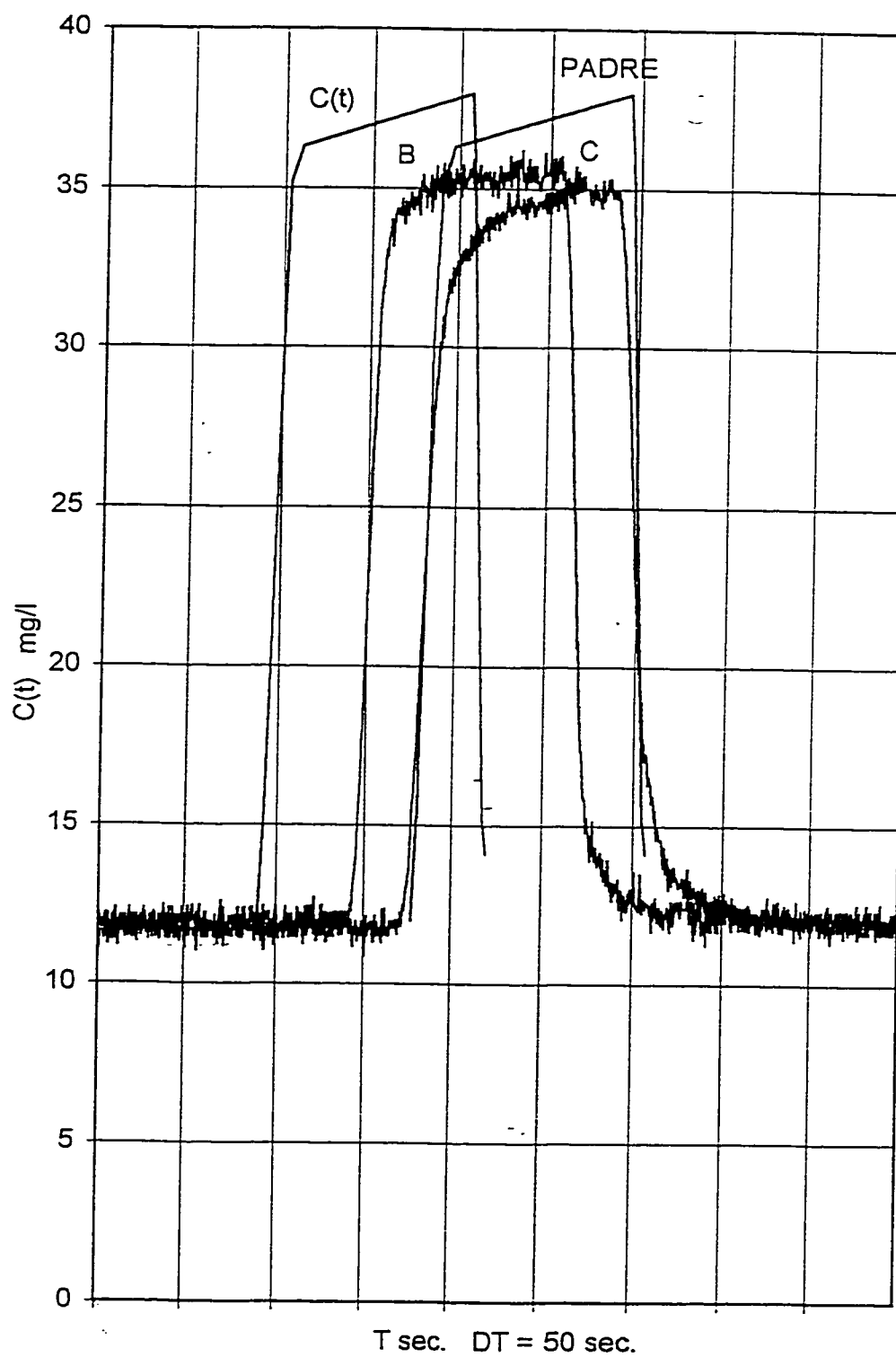


Figure 4.5 A7 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 7

Annexe A8

ESSAI NO 8

Débit mesuré au Venturi		86	l/s
Vitesse		1,2	m/s
Nombre de Reynolds		320 000	
Débit ajusté		80	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	21	%
	C	14	%
Quantité de sel passée	A	368	g
	B	325	g
	C	325	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		37	mg/l
C_B^M		34,14	mg/l
C_C^M		33,6	mg/l
T séjour réel (Q = 80 l/s)	B	45	sec
	C	73,50	sec

Tableau 4.1.A.8 - Les valeurs de concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 8

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	63,5	1	9,50	106	6,45	130	7,31
2	64		11,83	112	8,18	135	9,52
3	65	2	16,56	114	10,12	137	12,28
4	66		13,51	116	11,81	139	16,14
5	68	3	20,42	118	15,07	141	19,78
6	71		23,79	120	18,67	143	23,84
7	74	4	30,13	121	20,56	145	27,86
8	77		34,43	123	24,55	148	30,41
9	78	5	33,74	125	26,97	151	31,63
10	80		35,30	127	28,17	174	33,40
11	82	6	36,00	130	29,65	229	33,11
12	107,5		33,27	133	30,10	238,5	33,60
13	165	7	37,00	137	31,31	244	33,23
14	172		36,15	142	32,10	250	30,63
15	175	8	35,66	215	34,14	252	28,12
16	177		29,39	228	31,43	254	24,27
17	184,5	9	19,48	229	30,47	256	19,61
18	188		17,23	235	19,94	259	13,80
19	190	10	10,73	239	15,00	261	11,65
20	192		10,86	245,0	10,46	262	10,91

Tableau 4.2.A.8 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 8

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	106	9,50	131,5	9,50
2	107	14,21	132	11,85
3	108	17,20	133	16,56
4	109	18,49	135	19,13
5	110	19,78	136	20,42
6	112	22,85	138	23,66
7	113	24,47	139	25,27
8	115	27,70	141	28,51
9	117	30,58	142	30,13
10	119	32,39	148,5	35,15
11	123	34,91	149	35,43
12	129,5	37,00	150	36,00
13	217,5	35,66	233	37,00
14	219	33,10	243	35,66
15	221	29,70	245	32,25
16	223	26,29	246	30,55
17	224	24,59	248	27,14
18	226	21,18	250	23,74
19	229	16,30	255	15,50
20	232,5	10,73	258	10,73

Tableau 4.3.A.8 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 8

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	113,5	8,76	8	9,50	137	12,28	23	9,50
2	114	10,12	17	11,85	137,5	13,78	14	11,85
3	115	10,28	61	16,56	138	13,67	4	14,21
4	117	13,39	43	19,13	140	18,07	2	18,49
5	118	15,07	35	20,42	141	19,78	0	19,77
6	120	18,67	27	23,66	143	23,84	4	22,85
7	121	20,56	23	25,27	144	25,83	5	24,47
8	123	24,55	16	28,51	146	28,95	4	27,70
9	124	24,87	21	30,13	148	30,41	0	30,58
10	126	26,94	18	31,93	156	30,94	16	36,01
11	131	29,56	20	35,43	233	33,52	10	36,93
12	132	29,85	21	36,00	238,5	33,60	10	37,00
13	200	32,95	12	36,82	244	33,23	9	36,26
14	215	34,14	8	37,00	249	32,41	7	34,81
15	216	33,31	11	36,87	252	28,12	6	29,70
16	225	32,44	10	35,66	255	22,65	8	24,59
17	228	31,43	3	30,55	258	15,49	26	19,48
18	234	20,96	3	20,33	259	13,80	30	17,89
19	237	16,49	6	15,50	261	11,65	26	14,71
20	240	13,81	22	10,73	263,5	9,04	19	10,73

Erreur moyenne : 15 %

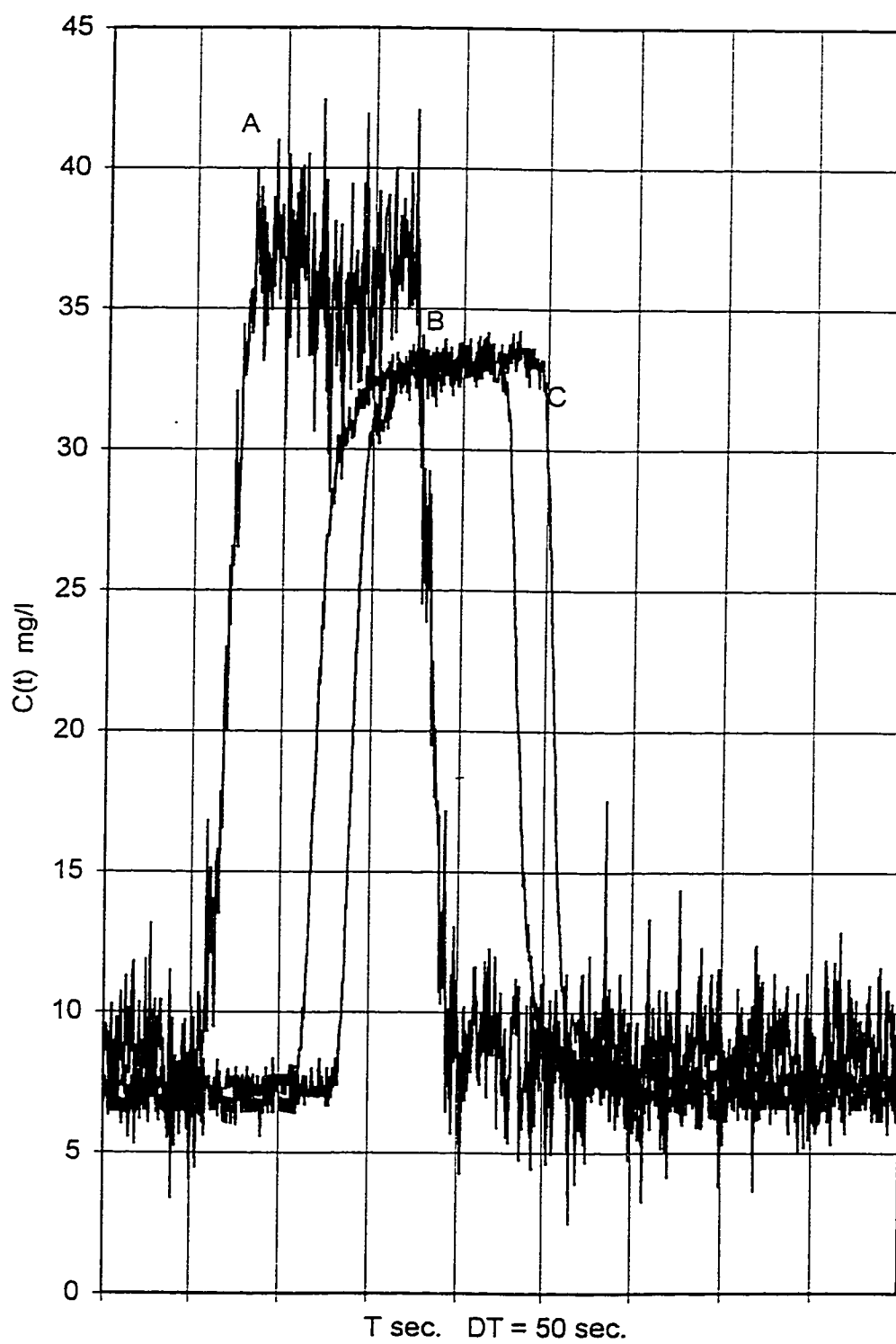


Figure 4.1 A8 - Concentrations enregistrées obtenues après lissage - Essai 8

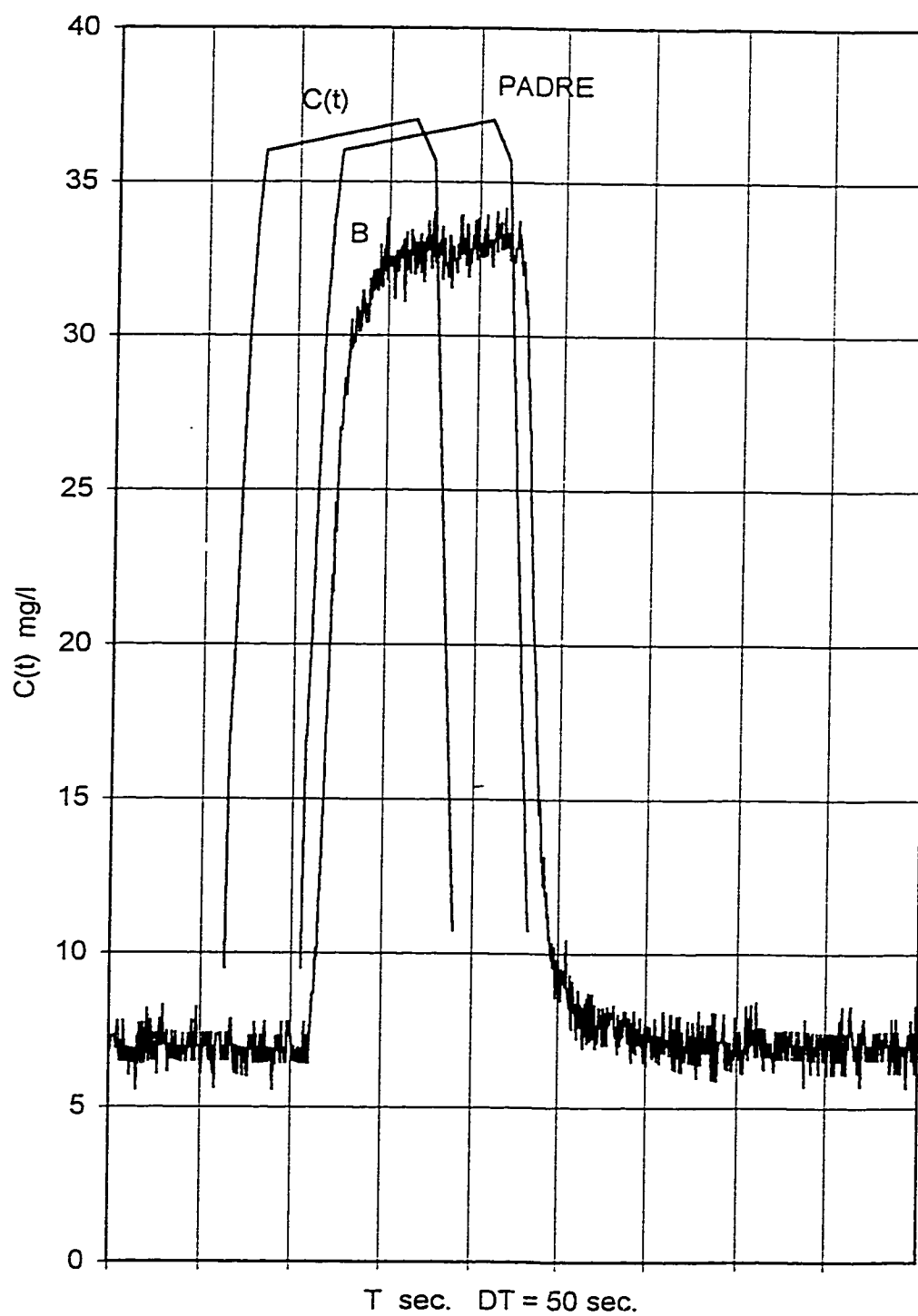


Figure 4.2 A8 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 8

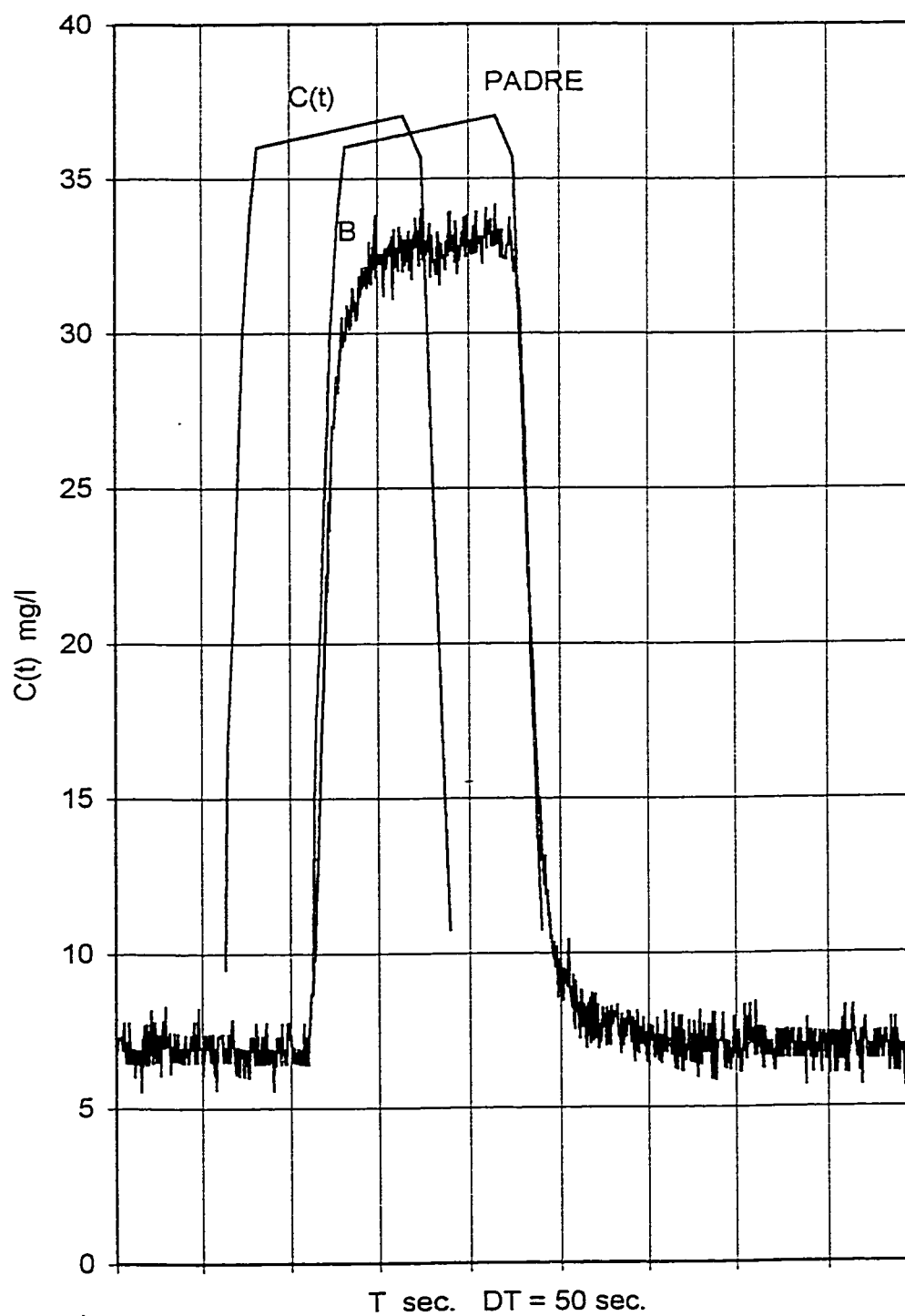


Figure 4.3 A8 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 8

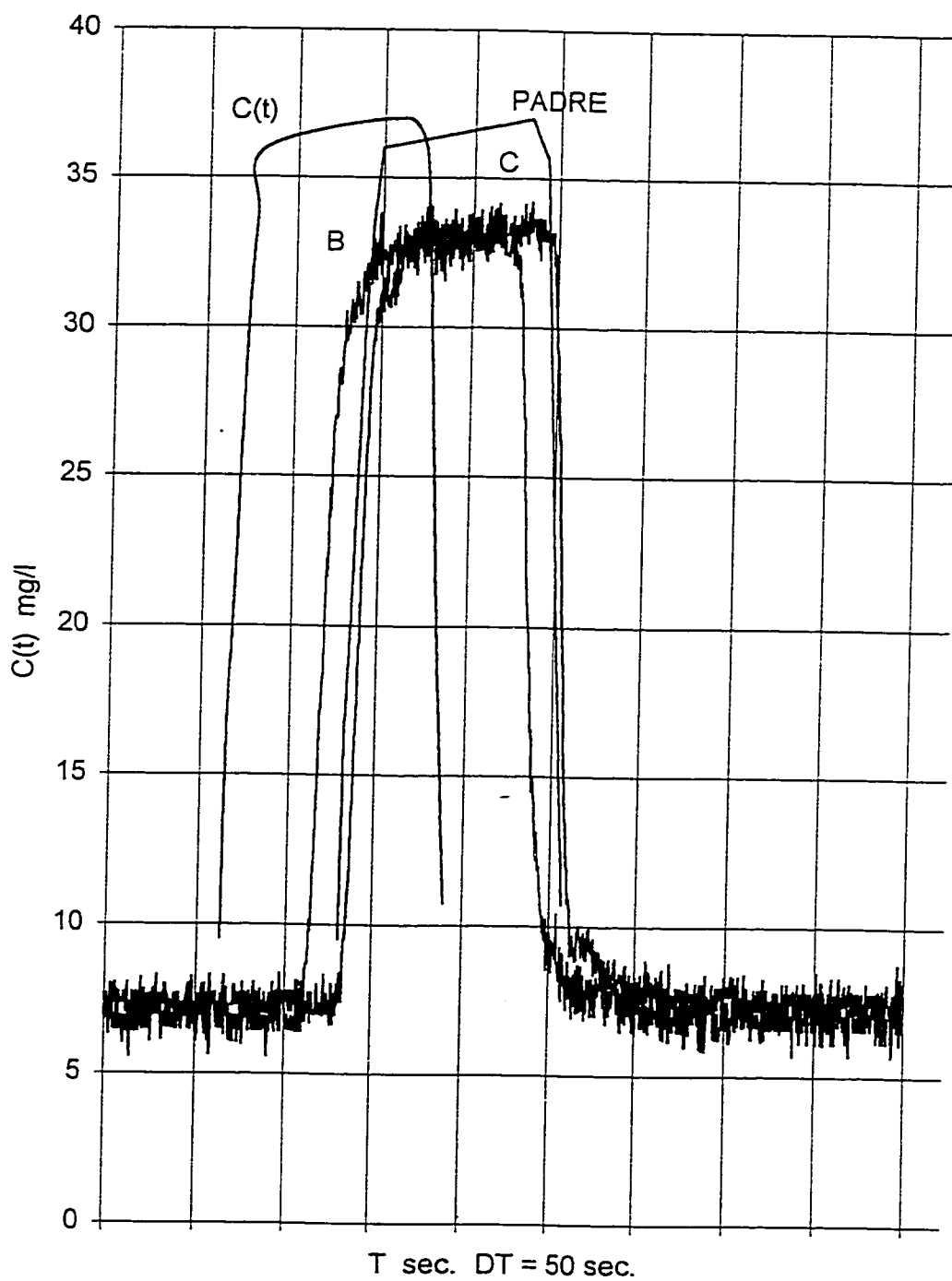


Figure 4.4 A8 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 8

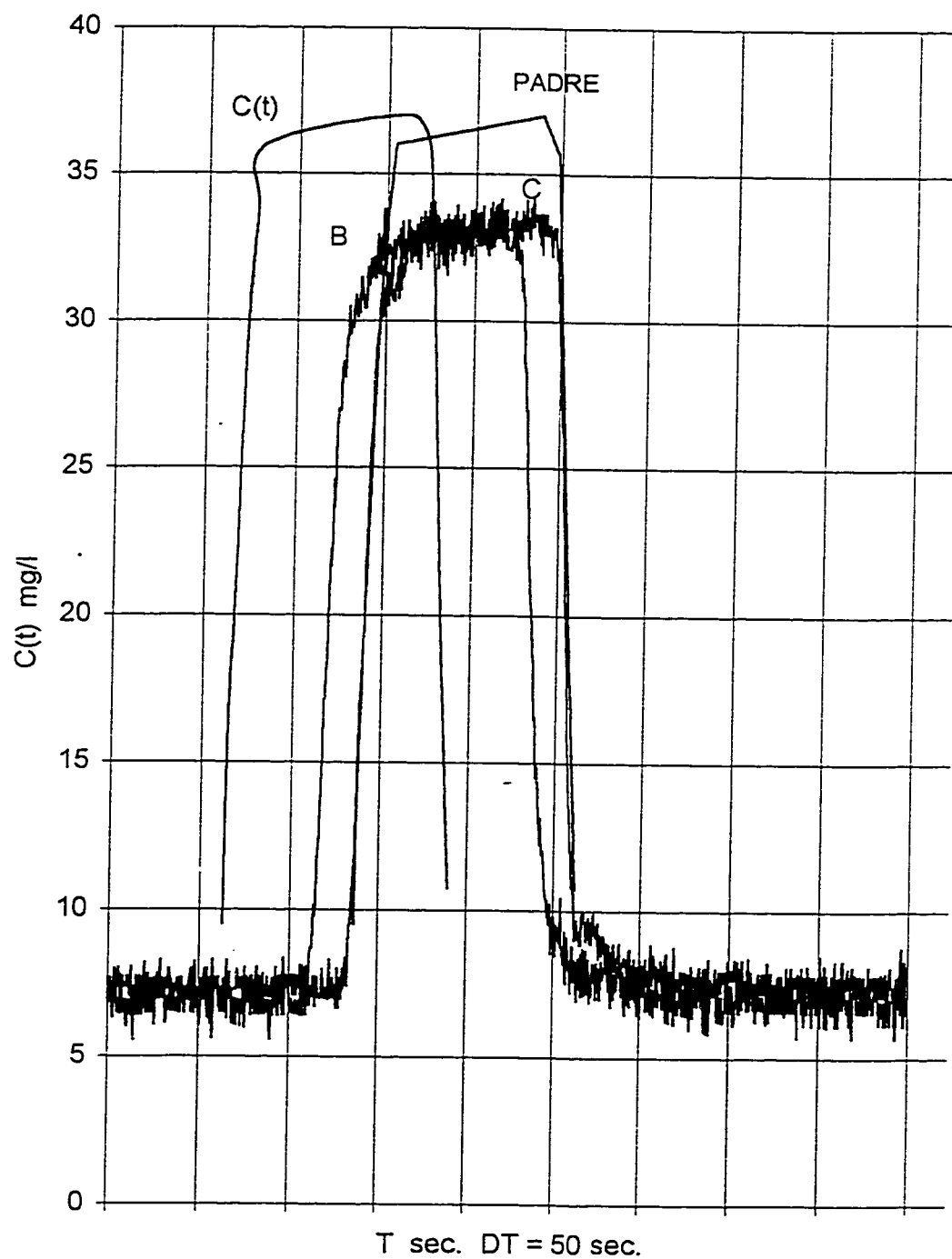


Figure 4.5 A8 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 8

Annexe A9

ESSAI NO 9

Débit mesuré au Venturi		105	l/s
Vitesse		1,48	m/s
Nombre de Reynolds		400 000	
Débit ajusté		107	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	6	%
	C	23	%
Quantité de sel passée	A	564	g
	B	539	g
	C	519	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		40,97	mg/l
C_B^M		39	mg/l
C_C^M		39,27	mg/l
T séjour réel (Q = 107 l/s)	B	36,5	sec
	C	55	sec

Tableau 4.1.A.9 - Les valeurs de concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 9

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	85	1	17,08	121	17,16	142	18,03
2	88		19,86	125	19,94	144	19,96
3	89	2	20,39	127	21,48	147	23,19
4	95		27,25	131	25,28	149	25,86
5	98	3	20,60	134	28,29	151	28,66
6	100		33,43	136	30,39	154	33,03
7	105	4	38,07	139	33,54	156	35,74
8	108		38,98	142	35,12	166	37,89
9	116	5	40,03	148	35,51	187	37,92
10	125		40,55	150	37,17	220	38,69
11	196	6	40,97	174	37,94	240,5	38,86
12	197		40,62	222,5	38,96	250,5	39,27
13	198	7	40,00	232	38,06	255	36,39
14	200		38,29	234	37,53	260	30,65
15	203	8	35,21	236,5	36,21	264	26,14
16	205		33,07	237	35,66	268	20,40
17	216	9	20,21	249	24,54	270	17,97
18	217		19,30	253	21,03	272	15,74
19	220	10	17,57	260	17,67	272,5	15,38
20	224		16,82				

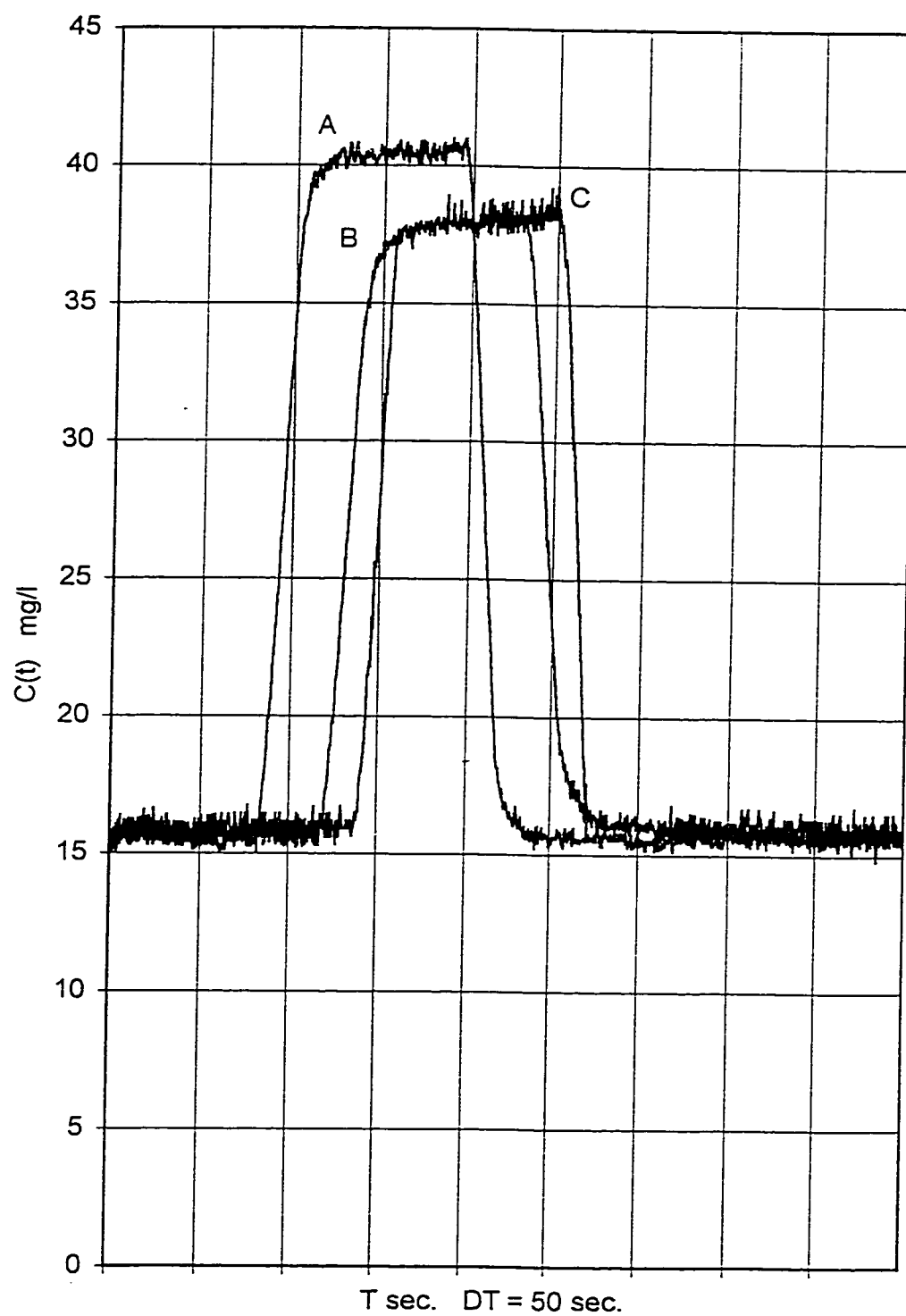
Tableau 4.2.A.9 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 9

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	119,5	17,08	141	17,08
2	123,5	20,39	143	18,73
3	126	23,25	145	20,39
4	128	25,53	148	23,82
5	130	27,81	149	24,96
6	132	30,10	152	28,39
7	134	32,26	154	30,67
8	187	35,53	156	32,78
9	139,5	39,07	158	34,90
10	146	39,23	161	38,07
11	151	40,04	172	40,03
12	230,5	40,97	200	40,36
13	235	37,60	252	40,97
14	237	35,69	257	37,13
15	242	30,02	259	35,21
16	245	26,56	263	30,60
17	247	24,25	268	24,83
18	248	21,94	270	22,52
19	250	20,79	272	20,21
20	254,5	17,57	276	17,57

Tableau 4.3.A.9 - Comparaisons des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 9

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	121,5	17,37	2	17,08	140	16,51	3	17,08
2	124	18,90	1	19,15	142	18,03	4	18,73
3	126	20,68	1	20,96	146	21,80	4	22,67
4	128	22,01	6	23,25	148	25,49	2	24,96
5	131	25,28	5	26,67	151	28,66	1	28,39
6	133	27,68	5	28,96	153	31,67	3	30,67
7	136	30,39	6	32,26	155	34,80	6	32,78
8	138	32,64	5	34,37	158	37,50	4	35,96
9	140	34,46	6	36,48	160	37,45	2	38,07
10	143	35,48	8	38,34	250,5	39,27	4	40,96
11	160	37,24	8	40,12	251	37,62	9	40,97
12	222,5	38,96	6	40,85	253	37,88	6	40,00
13	232,5	37,90	8	40,97	255	36,39	5	38,08
14	238	35,48	3	36,65	258	34,14	3	35,21
15	240	33,41	4	34,63	262	29,16	5	30,59
16	246	27,47	1	27,71	265	24,85	9	27,13
17	248	25,64	1	25,40	267	22,38	11	24,82
18	250	23,89	3	23,10	270	17,97	19	21,36
19	253	21,03	5	19,88	271	17,56	15	20,21
20	256,5	18,66	6	17,57	275	13,28	32	17,57

Erreur moyenne : 6 %



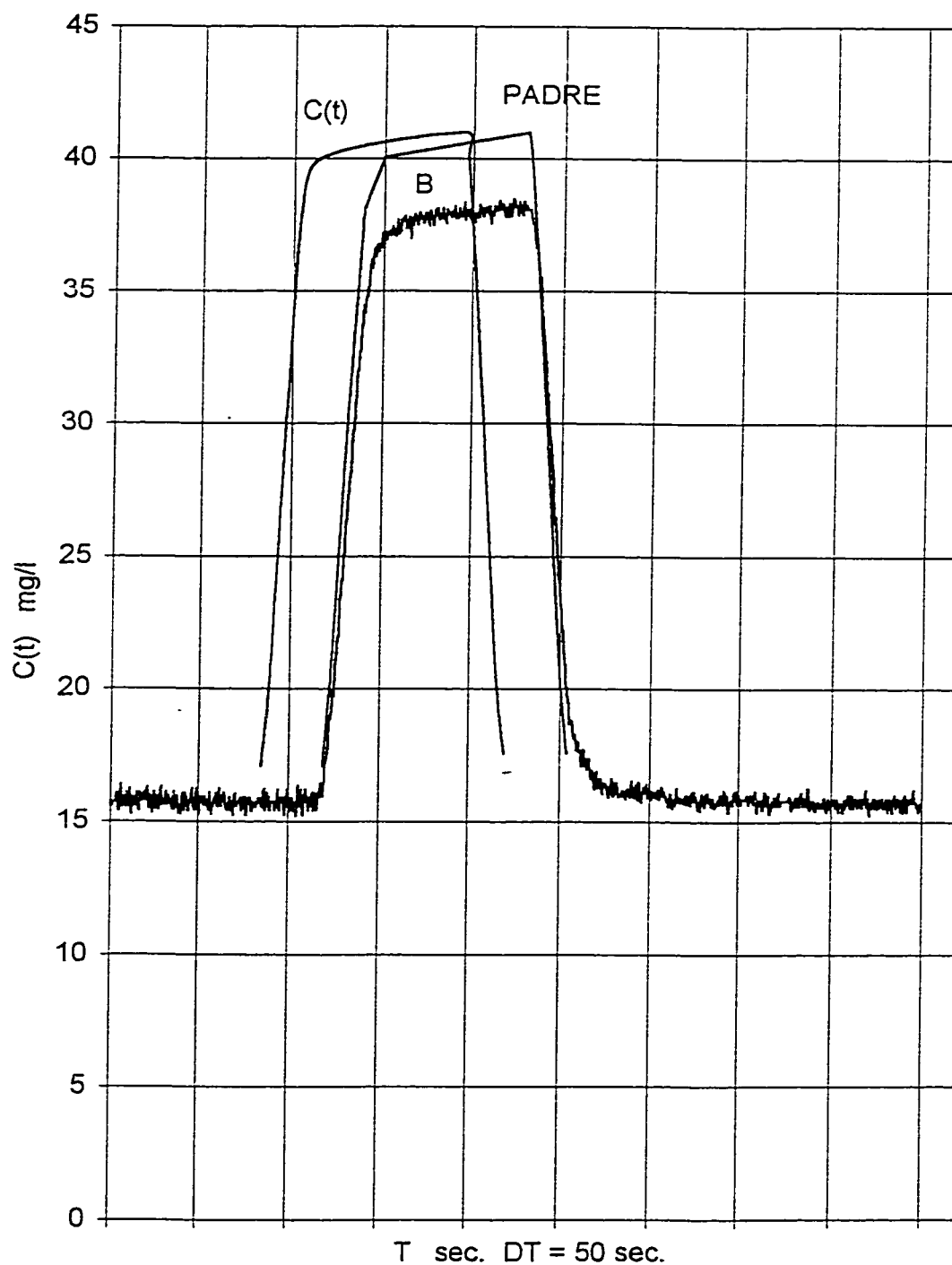


Figure 4.2 A9 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point B - Essai 9

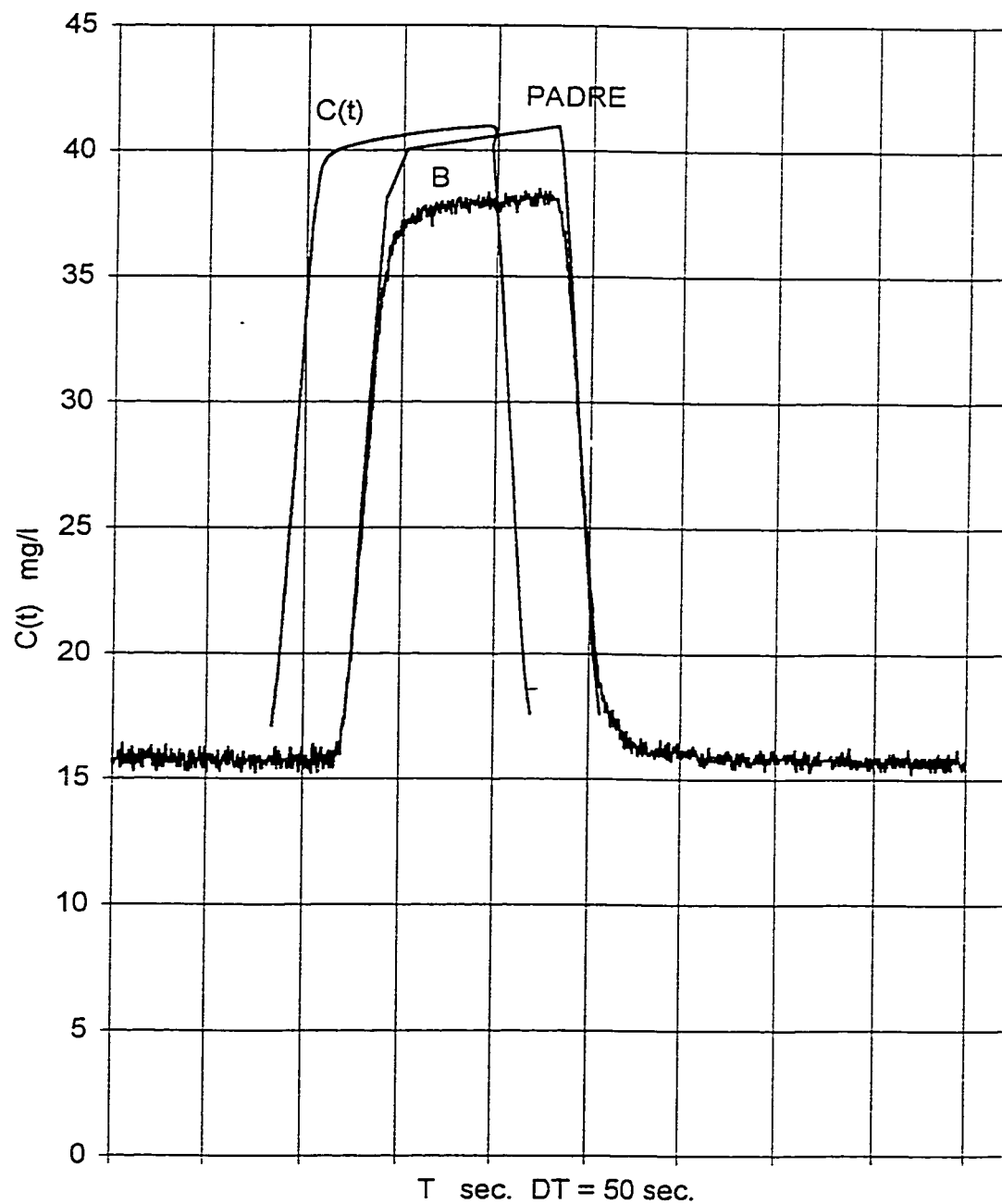


Figure 4.3 A9 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point B - Essai 9

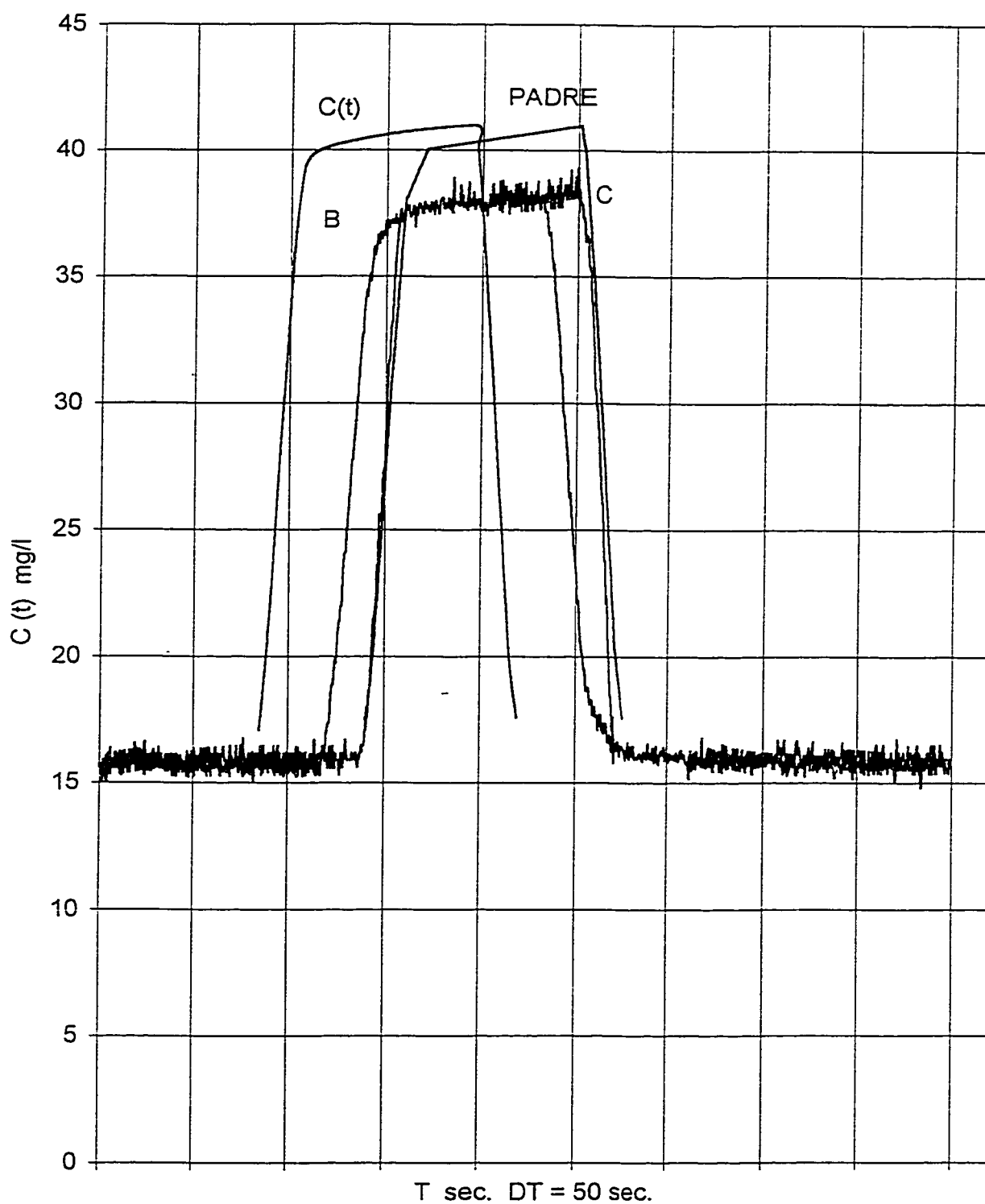


Figure 4.4 A9 - Concentrations simulées par PADRE avec le débit mesuré point C - Essai 9

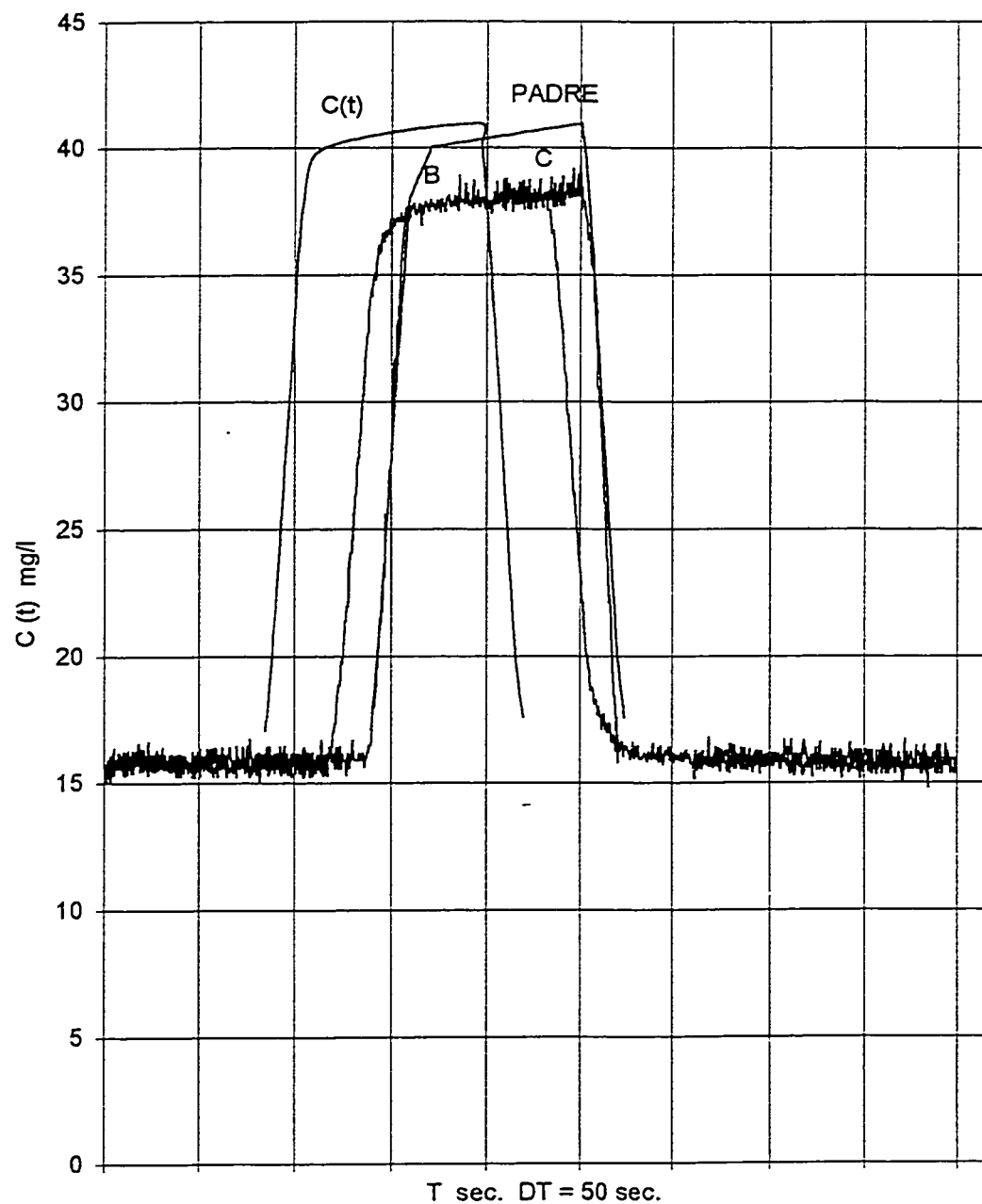


Figure 4.5 A9 - Concentrations mesurées et simulées après ajustement optimal du débit point C - Essai 9

Annexe A10

ESSAI NO 10

Débit mesuré au Venturi		196	l/s
Vitesse		2,76	m/s
Nombre de Reynolds		740 000	
Débit ajusté		196	l/s
$\Delta T\% = \frac{T_s \text{ max} - T_s \text{ min}}{T_s \text{ moy}}$	B	30	%
	C	13	%
Quantité de sel passée	A	934	g
	B	913	g
	C	902	g
Valeurs maximales :			
M - mesurée S - simulée			
$C_A^M = C_B^S = C_C^S$		40,23	mg/l
C_B^M		37,56	mg/l
C_C^M		37,65	mg/l
T séjour réel (Q = 196 l/s)	B	18,5	sec
	C	30	sec

Tableau 4.1.A.10 - Les valeurs de concentrations enregistrées, obtenues après lissage -
Essai 10

No	t sec	C(t) PADRE	PtA mg/l	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	66,50	1	15,20	85	15,13	96,5	15,2
2	68,75		19,24	86	16,86	97,5	17,45
3	69,50	2	21,35	87	20,48	98,75	20,26
4	70,50		27,21	88,25	24,28	100	23,93
5	72,00		33,03	88,75	25,20	100,5	25,92
6	72,75	3	34,84	89,50	28,57	101	27,9
7	73,50		36,70	90,25	31,30	102	31,86
8	74,25	4	38,83	91	32,09	102,5	33,85
9	75,00		38,54	91,75	33,69	103	35,51
10	76,75	5	39,33	95,25	36,72	104	38,16
11	79,50		39,19	99,50	37,56	106,75	39,33
12	84,50	6	40,23	101,25	36,80	114,5	40,23
13	131,00		38,75	103	37,35	210,5	37,95
14	180,50	7	37,95	116	37,11	212,75	35,42
15	182,00		37,06	199	35,83	213,5	33,49
16	182,75	8	35,42	201	34,1	214,75	30,27
17	187,00		22,43	203	29,7	216	27,05
18	188,75	9	19,97	205	23,5	218,75	19,97
19	19,50		18,15	207	19,78	226	16,2
20	198,00	10	15,16	216,5	16,60	228	15,16

Tableau 4.2.A.10 - Les valeurs des concentrations simulées par PADRE en considérant le débit mesuré - Essai 10

No	t sec	PtB mg/l	t sec	PtC mg/l
1	85	15,20	96,5	15,20
2	86	17,45	97,5	17,45
3	87,3	20,26	98,8	20,26
4	88,3	22,94	100	23,93
5	89	25,92	100,5	25,92
6	90	29,88	101	27,90
7	81	33,85	102	31,86
8	91,5	35,51	102,5	33,85
9	92,3	37,50	103	35,51
10	93,8	39,03	104	38,16
11	101,3	40,03	106,8	39,33
12	103	40,23	114,5	40,23
13	196,5	38,01	210,5	37,95
14	199	37,95	212,8	35,42
15	201,3	35,42	213,5	33,49
16	203,3	30,27	214,8	30,27
17	205,3	25,12	216	27,05
18	207,3	19,97	218,8	19,97
19	210	18,54	226	16,20
20	216,5	15,16	228	15,16

Tableau 4.3.A.10 - Comparaison des valeurs de concentrations Mesurées et Simulées
après l'ajustement optimal du débit - Essai 10

No	t sec	PtB			t sec	PtC		
		M mg/l	Δ %	S mg/l		M mg/l	Δ %	S mg/l
1	85	15,13	0	15,20	96,5	16,54	8	15,20
2	86	16,86	3	17,45	98	18,17	2	18,57
3	87	20,48	4	19,70	98,8	21,71	7	20,26
4	88,3	24,28	6	22,94	99,8	25,75	11	22,94
5	88,8	25,20	1	24,92	100,3	26,39	5	24,92
6	89,5	28,57	2	27,90	101	28,79	3	27,90
7	90,3	31,30	1	30,87	101,5	29,56	1	29,88
8	91	32,09	5	33,85	102,5	31,18	8	33,85
9	91,8	33,69	7	36,17	103,5	32,73	12	36,83
10	95,3	36,72	7	39,33	106,8	35,76	10	39,33
11	99,5	37,56	6	39,82	114,5	36,20	11	40,23
12	101,3	36,80	9	40,03	116,5	37,61	7	40,18
13	103	37,35	8	40,23	208	36,63	4	38,01
14	116	37,11	7	39,92	211	35,18	6	37,39
15	199	35,83	6	37,95	212,8	32,67	8	35,42
16	201	34,10	5	35,70	213,8	30,02	9	32,80
17	203	29,70	4	30,81	214,5	28,03	10	30,91
18	205	23,50	10	25,76	216,5	23,63	9	25,76
19	207	19,78	4	20,61	218,5	20,90	1	20,61
20	216,5	16,60	9	15,16	228	17,04	11	15,16

Erreur moyenne : 6 %

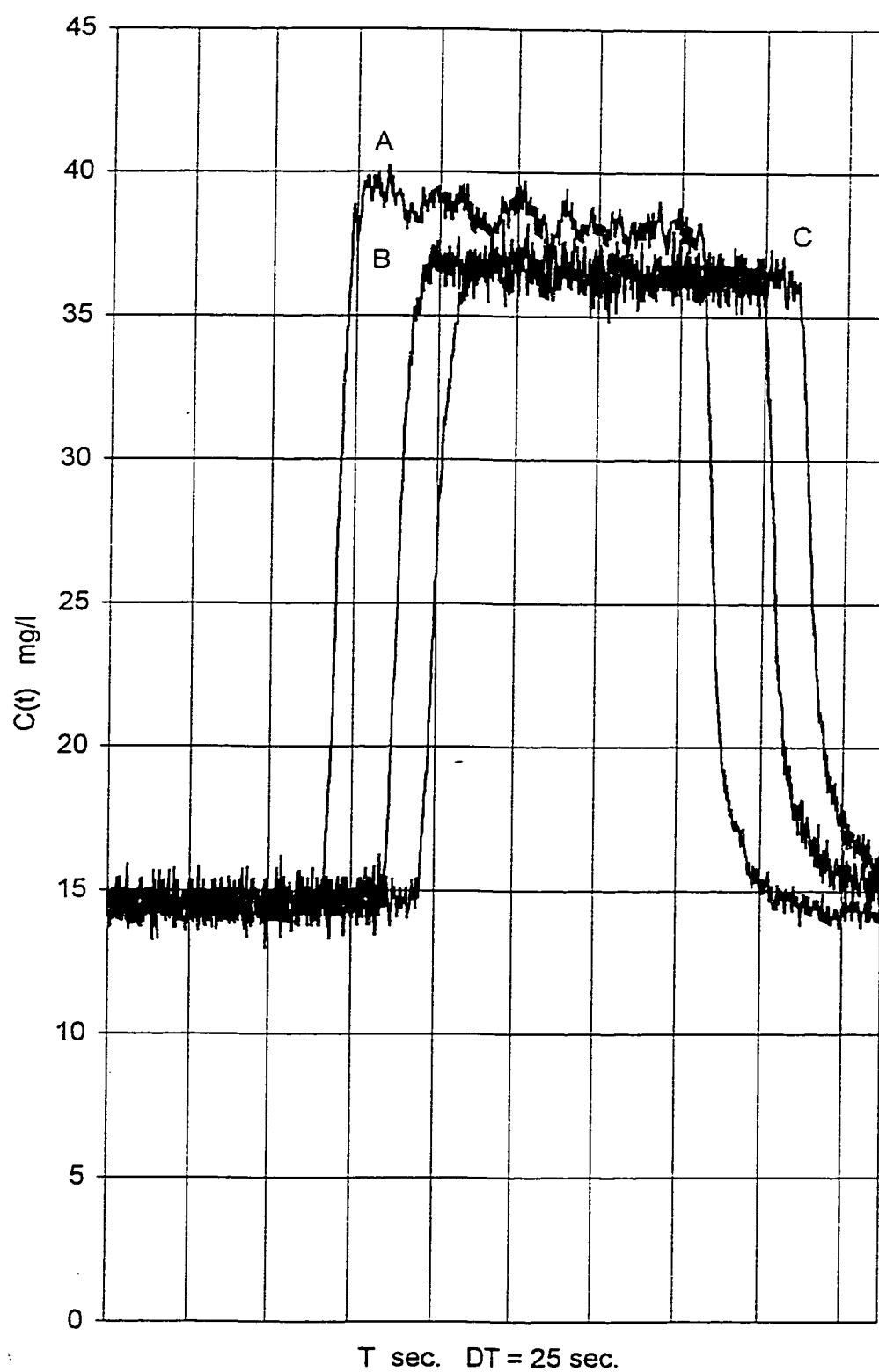


Figure 4.1 A10 - Concentrations enregistrées obtenues après
lisage - Essai 10

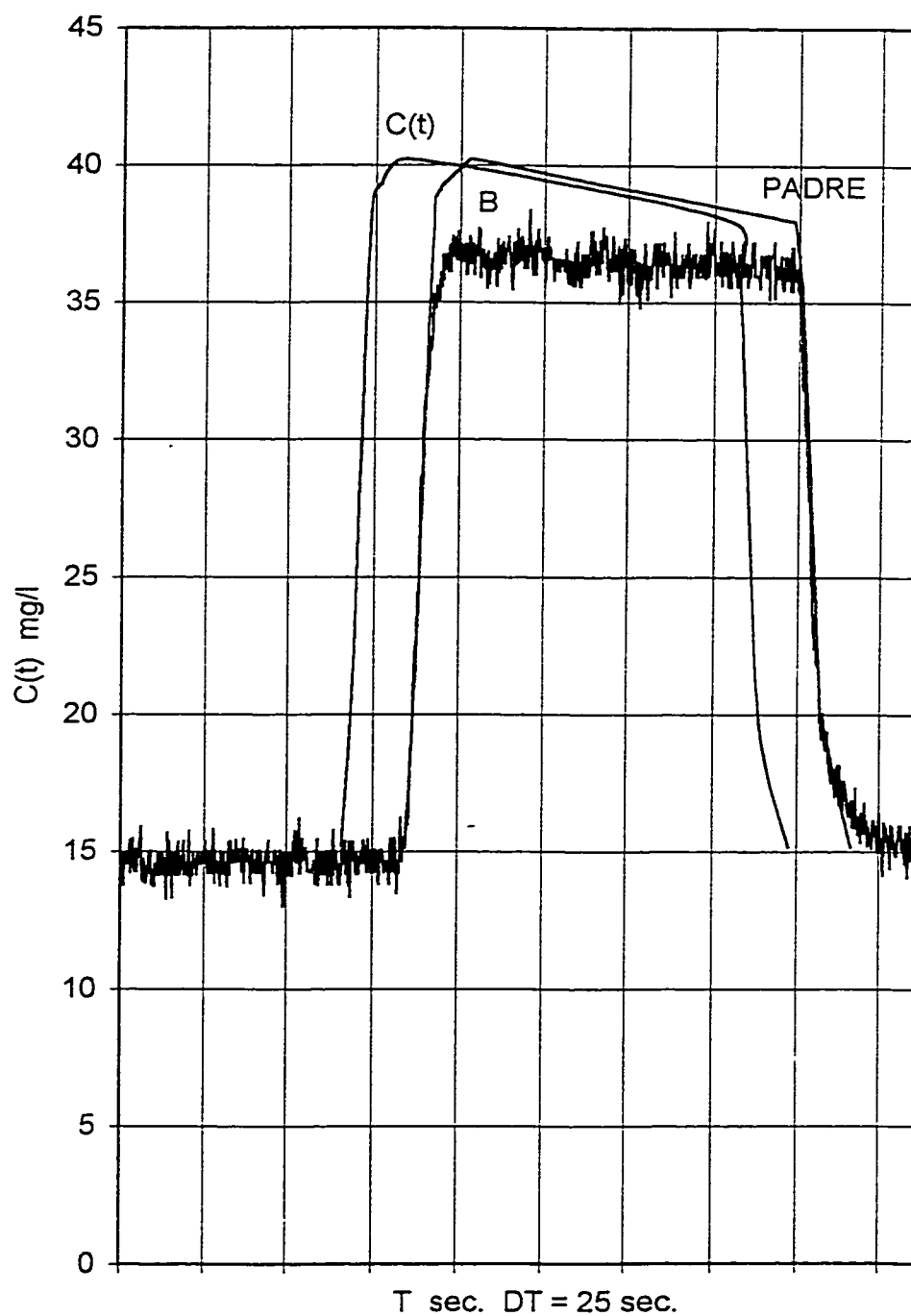


Figure 4.2 A10 - Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit point B - Essai 10

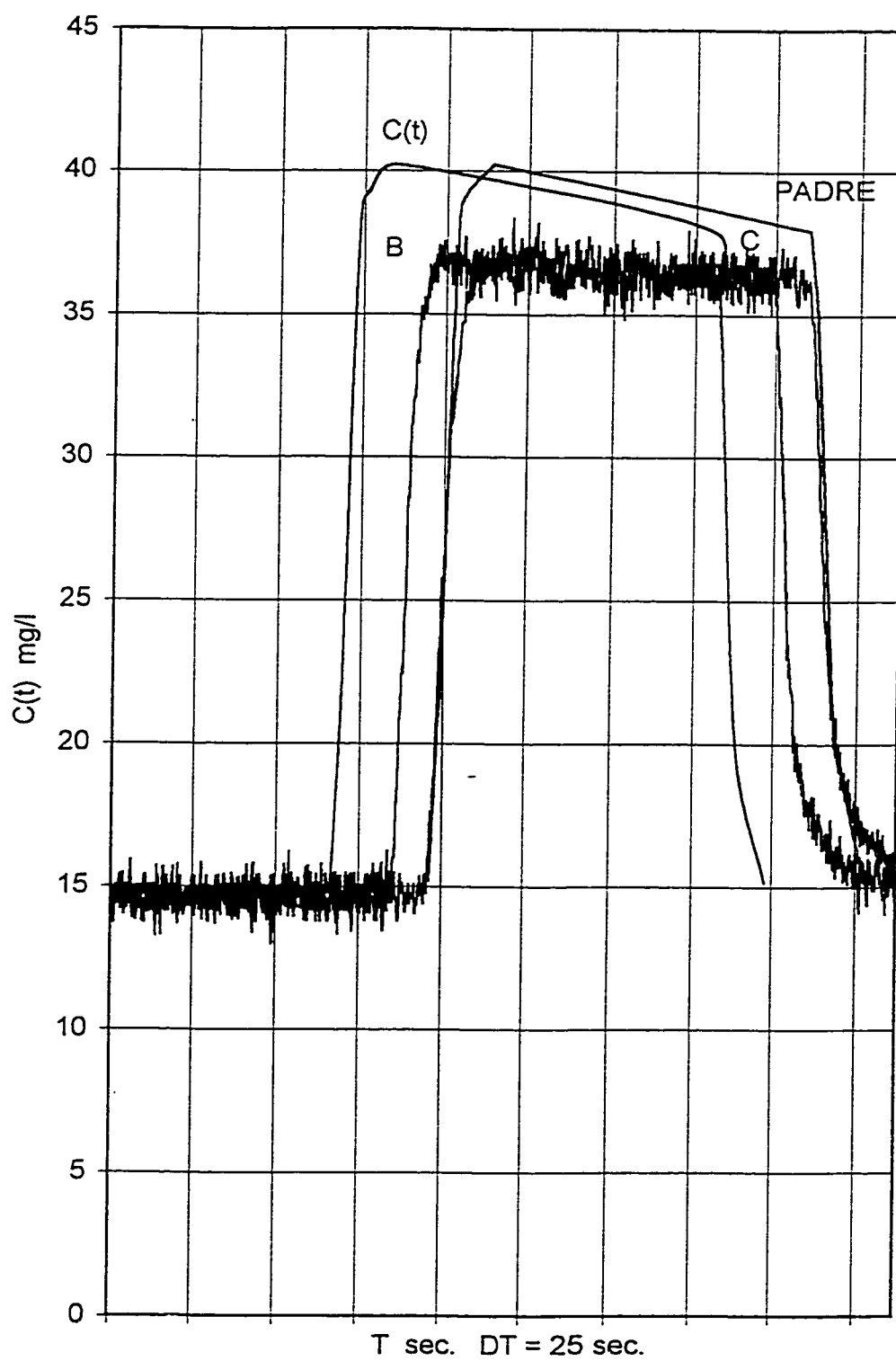


Figure 4.3 A10 - Concentrations mesurées et simulées avant et après ajustement optimal du débit point C - Essai 10

ANNEXE B

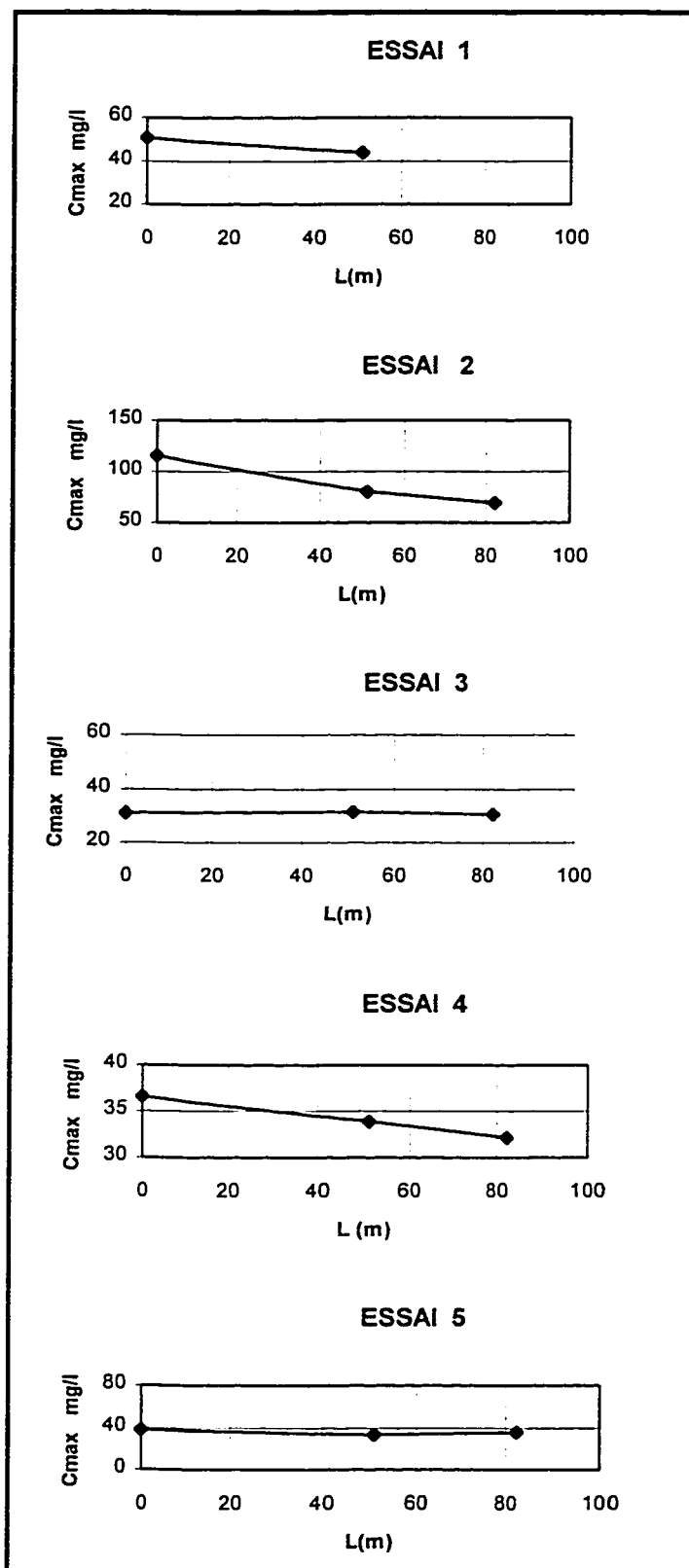


Figure 4.7 - La décroissance de la concentration vs la distance entre les points d'essai A, B, C - Essais 1 à 5

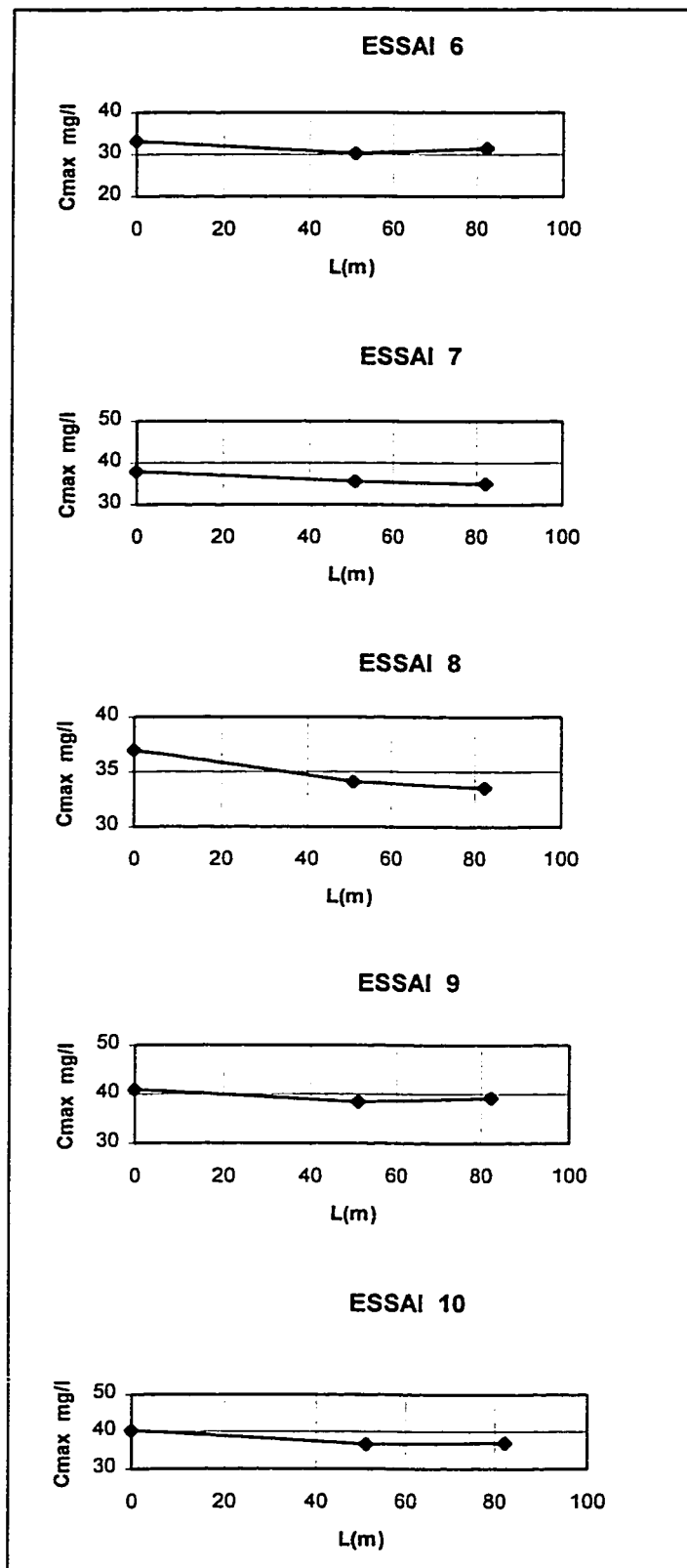
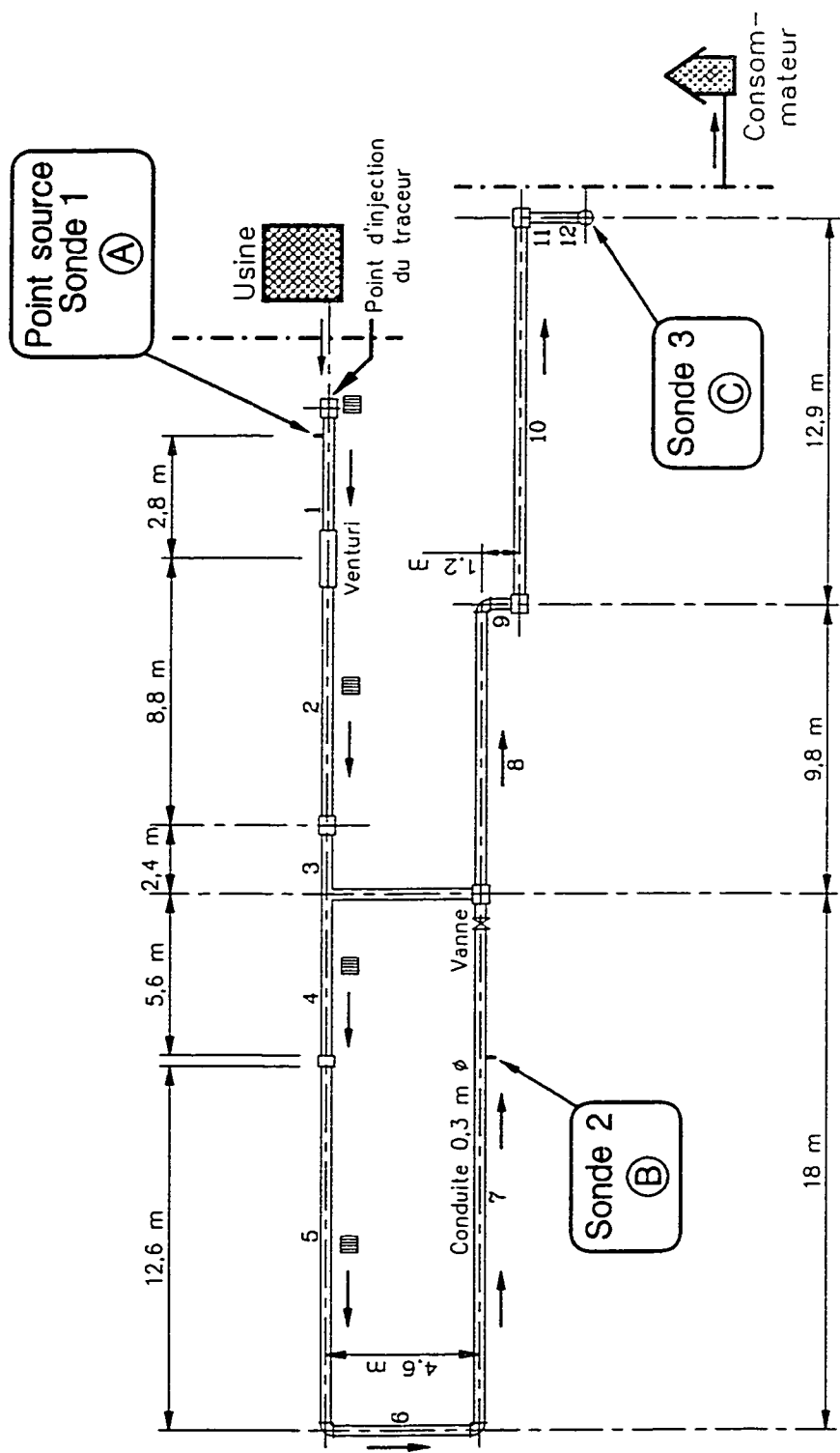
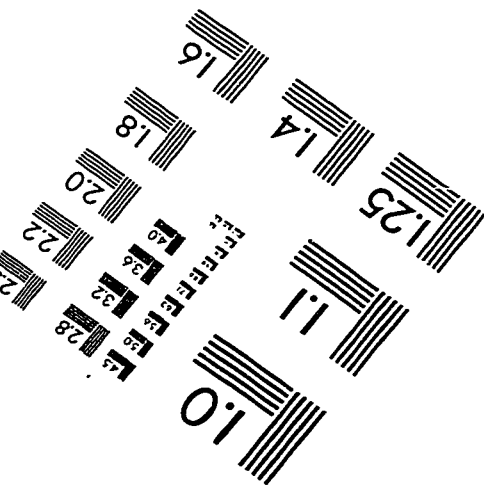
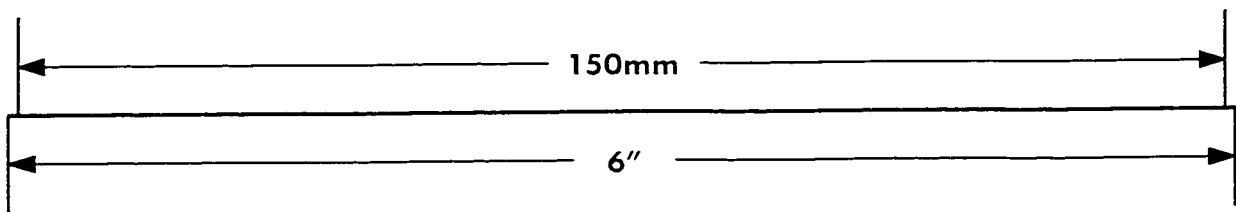
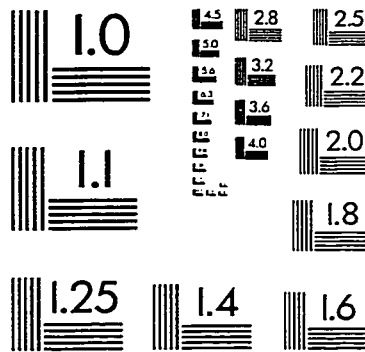
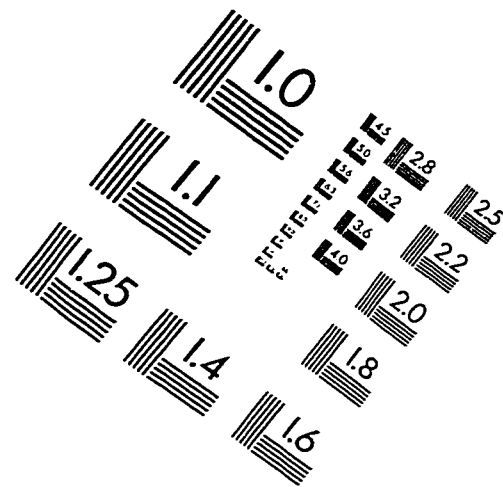
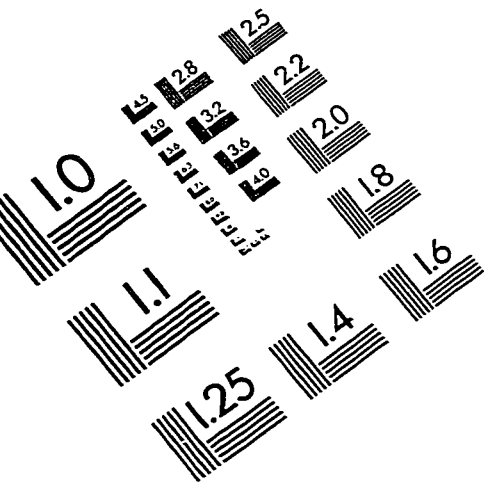


Figure 4.8 - La décroissance de la concentration vs la distance entre les points d'essai A, B, C - Essais 6 à 10



Boucle d'essai du réseau
du laboratoire d'hydrodynamique de L'ÉPM

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

