



**Réseau de recherche
en écotoxicologie
du Saint-Laurent**

STATION DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DE L'ÎLE AUX-VACHES

**RÉVISION DES TAUX DE DILUTION DE L'EFFLUENT
DE L'ÎLE-AUX-VACHES DANS LE FLEUVE SAINT-LAURENT
PAR SIMULATION NUMÉRIQUE**

Recherche réalisée dans le cadre du

**Réseau de Recherche en
Écotoxicologie du Saint-Laurent
(RRESL)**

En collaboration avec la Ville de Montréal



Rapport INRS-ETE #R-794

Mars 2005



SOMMAIRE



Référence pour fins de citation : Boudreau, Paul, Michel Leclerc et Yves Secretan (2005). Révision des taux de dilution de l'effluent de l'Île-aux-Vaches dans le fleuve Saint-Laurent par simulation numérique. Étude réalisée dans le cadre du Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent en collaboration avec la Ville de Montréal (Environnement). Rapport INRS-ETE #R-794. 33 pages.

© INRS-ETE

Résumé :

L'analyse des conditions de réalisation d'essais de traçage à la rhodamine WT de l'effluent de la ville de Montréal en 1983 révèle que la courte durée d'injection du traceur (une heure) a compromis la validité des résultats obtenus en transgressant le critère de stationnarité des conditions de mélange transversal et longitudinal requis pour de tels essais. Les conditions de cisaillement latéral des écoulements au point d'injection, et dans la trajectoire du panache, situés à la limite nord du chenal de navigation sont associés à de forts gradients latéraux de vitesses eux-mêmes liés aux changements rapides de profondeur permettant la navigation. Des vitesses lentes dans les faibles profondeurs se jouxtent avec des vitesses rapides dans le chenal profond de sorte que le traceur injecté a tendance à se disperser de manière différentielle à droite et à gauche de son trajet, et de décaler dans le temps son passage à chacune des sections contrôles. Le décalage qui devient graduellement supérieur à la durée d'injection est d'autant plus grand qu'on s'éloigne en aval de l'émissaire.

Il en résulte des mesures de concentration maximale par section la plupart du temps sous-évaluées, des facteurs de dilution systématiquement surévalués, typiquement par un facteur 2, une non conservation (estimée) de la masse de traceur d'une section à l'autre ainsi qu'une incertitude significative sur la trajectoire et la largeur de l'emprise du panache.

Un exercice de simulation à l'aide du modèle DISPERSIM de l'INRS-ETE a été réalisé en vue d'abord de reproduire les conditions des essais réalisés avec comme objectifs de calibrer-valider le modèle sur les mesures. Ultimement, l'objectif est d'appliquer le modèle à des conditions hydrologiques de référence répondant mieux aux critères de conception d'un système d'épuration des eaux usées municipales, soit normalement le Q_{2-7} , qui correspond à des conditions d'étiages normées dans la réglementation de la qualité de l'eau. Les données disponibles pour procéder à l'étape de calibration-validation s'étant avérées pour les causes mentionnées non utilisables à cette fin, l'exercice de modélisation a donc été entrepris pour un événement hydrologique similaire aux essais de traçage en faisant appel à la meilleure

connaissance possible de la paramétrisation des diffusivités déjà validée lors d'exercice similaire réalisés antérieurement dans le tronçon.

Un événement de référence hydrologique a été puisé (4p) dans la banque de données d'Environnement Canada afin de reproduire au mieux les conditions des essais et un maillage de calcul a été reconfiguré pour capter optimalement les conditions de mélange au point d'injection et dans le trajet anticipé du panache. Ce maillage a été étendu jusqu'à Trois-Rivières afin d'extrapoler les résultats dans toute la mesure du possible.

Les résultats de simulation ont démontré une grande consistance au niveau de la conservation de la masse de traceur, en plus de reproduire la tendance générale révélée par les observations *in situ*, notamment à l'égard de la trajectoire générale (du moins sur l'horizon limité de 10 km des essais) et de l'emprise latérale. Dans certains cas (certaines sections), les mesures ont pu être fidèlement reproduites surtout lorsque celles-ci satisfaisaient mieux le principe de conservation de la masse.

L'INRS-ETE considère que le concept de dilution moyenne utilisé dans les études classiques de traçage n'est pas suffisamment défini et rigoureux pour être applicable tel quel, et suggère de le reformuler pour tenir compte de conditions de troncature latérale de l'emprise du panache, dictées par la dynamique transitoire du phénomène, la limite de détection du traceur par les instruments disponibles, et la pondération requise par le débit spécifique passant la section du panache. Pour ces raisons, aucun résultat de dilution moyenne n'est présenté dans ce rapport.

Des résultats de dilution maximale à différentes distances, jusqu'à 45 km en aval du point d'injection, sont proposés. Si les valeurs n'ont pas fait l'objet de validation pleines et entières, leur validité apparaît certainement supérieure à celles utilisées à ce jour pour la conception des ouvrages d'épuration de Montréal. Par contre, il serait important en guise de recommandation de reprendre les essais présentés en ciblant un événement de référence mieux défini et plus représentatif des conditions de contamination du milieu en aval, notamment à l'égard des autres usages.

Enfin, afin de démontrer la faisabilité et les capacités de la modélisation de simuler des panaches sur des distances très supérieures à celles permises par les essais *in situ*, une simulation est présentée montrant l'évolution potentielle du panache de la ville de Montréal sur l'ensemble de son trajet au moins jusqu'à Trois-Rivières. Les taux de dilution (minimum de la section transversale) augmentent rapidement à partir du point d'injection et ils tendent vers un plafond asymptotique voisin de 425 à partir de l'entrée du lac Saint-Pierre, ce qui signifie que plus de 55% du débit du fleuve, du côté nord de celui-ci, subit l'impact du panache à la hauteur de Trois-Rivières. Le maximum asymptotique de dilution qui serait obtenu avec un mélange complet de l'effluent dans l'ensemble du milieu récepteur n'est donc pas encore atteint à la sortie du lac Saint-Pierre. Le panache n'atteint donc pas encore les masses d'eau transitant du côté sud du fleuve à cet endroit. Par contre, il est vraisemblable que les effets de l'effluent puissent se faire sentir en rive gauche dès l'entrée du delta du lac Saint-Pierre et, fort probablement aussi sur plusieurs kilomètres à l'amont.

COLLABORATEURS

Pour la Ville de Montréal

Collaborateur

Patrick Cejka

Pour l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement

Chargé de projet, simulations numériques, rapport:

Paul Boudreau, M.Sc.-Eau., Agent de recherche

Responsable vis-à-vis du Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent (RRESL)
protocole d'analyse, rapport

Michel Leclerc, Ph.D., Ing. Professeur d'hydraulique fluviale

Méthodes numériques

Yves Secretan, Ph.D., Professeur d'hydroinformatique

Analyse des tests de diffusion *in situ*

Patricia Johnston, M.Sc., Assistante de recherche

Pour l'INRS-IAF

Maître-d'œuvre et premier répondant du Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent (RRESL)

Michel Fournier, M.Sc., Ph.D., Professeur

Pour Environnement Canada (Direction de l'Environnement atmosphérique)

Événements de référence hydrologiques et hydrodynamiques

Jean Morin, M.Sc., Ph.D., Chercheur

Coordination au sein du Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent (RRESL)

Jean-François Cantin, M.Sc.-Eau, Gestionnaire

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	ii
1. CONTEXTE ET PORTÉE DE L'ÉTUDE :	1
2. LOCALISATION DE L'ÉMISSAIRE DE LA C.U.M.	3
3. DESCRIPTION DES ESSAIS DE 1983	5
4. ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE 1983	9
4.1 Conditions hydrodynamiques lors des essais de 1983	9
4.2 Stationnarité des essais	10
4.3 Dilution moyenne.	14
4.4 Débit massique	15
5. RÉSULTATS DE TAUX DE DILUTION SIMULÉS	18
6. EXTENSION DU PANACHE DANS LE LAC SAINT-PIERRE	21
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	22
8. REMERCIEMENTS	24
9. BIBLIOGRAPHIE	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation et disposition des émissaires de l'usine d'épuration de la Ville de Montréal à l'Île-aux-Vaches (Source : C.U.M.).....	4
Figure 2. Module de la vitesse de courant tracé par incréments de 0,1 m/s, les x rouges sont les émissaires de la C.U.M., les x noirs sont les points mesurés lors de l'essai du 2 novembre 1983.....	11
Figure 3. Profondeur tracé par incréments de 1 m, les x rouges sont les émissaires de la C.U.M., les x noirs sont les points mesurés lors de l'essai du 2 novembre 1983.	12
Figure 4. Relevé des vitesses d'écoulement en bordure de l'Île Sainte-Thérèse mesurées le 23 novembre 1983 (tiré de Boulanger 1984b).	13
Figure 5. Section 10 du panache simulé avec injection pendant 1 heure correspondant à l'essai #2 de 1983 (noir =1h, bleu = 2h, rouge =3h et rose = 4 h). Les unités de l'axe y sont arbitraires et l'axe x est en mètres.	13
Figure 6. Coupe typique d'un panache de forme gaussienne. (Auteur Serge Garneau)	15
Figure 7 : Bilan massique de l'essai #2 du 2 novembre 1983.....	17
Figure 8. Panache simulé jusqu'à Trois-Rivières.....	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Conditions lors des essais de traçage de la C.U.M.....	6
Tableau 2 : Dilutions obtenues de l'essai #1 (concentration à l'origine de l'émissaire : 705 ppb) .	7
Tableau 3 : Dilutions obtenues de l'essai #2 (Concentration à l'origine de l'émissaire de 525 ppb).....	8
Tableau 4. Débits à différents endroits dans le fleuve Saint-Laurent pour le scénario 4p, les essais 1 et 2 et le relevé des vitesses de 1983	10
Tableau 5. Facteur de dilution de l'effluent de la CUM pour état de l'automne 1983 selon la CUM, Laboratoire d'hydraulique Lasalle et INRS-ETE	19
Tableau 6. Conservation de la masse à différentes sections de la simulation DISPERSIM	20

1. Contexte et portée de l'étude :

Cette étude par modèle du panache d'eaux usées de l'émissaire de l'Île-aux-Vaches a été réalisée dans le cadre des travaux de recherche du Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent (RRESL) dont la Direction est assumée par l'INRS - Centre de Santé humaine / Institut Armand-Frappier à Laval.

Les taux de dilutions utilisés actuellement par la Ville de Montréal (autrefois la C.U.M) pour décrire la propagation des eaux usées traitées de l'effluent de l'Île-aux-Vaches dans le fleuve Saint-Laurent sont basés sur deux essais de traçage à la rhodamine effectués *in situ* en 1983 après entente avec le ministère de l'Environnement du Québec. Les détails et les résultats de ces essais sont présentés dans les rapports présentés à la C.U.M. par le Laboratoire d'Hydraulique Lasalle (Boulangier 1984a et b).

La durée d'injection de ces essais n'a pas dépassé une heure. Selon les auteurs des essais, cette durée « a permis de former un panache dont l'étirement en longueur permettait de s'assurer de la stabilité des conditions de diffusion au moment du prélèvement des échantillons ». « Stabilité » signifie ici « stationnarité du régime de propagation du colorant ». Comme il sera démontré ci-après, un avis contraire doit être émis et les nouveaux résultats qui seront présentés pourraient avoir des conséquences sur les attentes qu'on avait placées sur l'ouvrage d'assainissement lors de sa conception dans les années 1970-80. Cette note technique effectuera une appréciation des essais de 1983, de leurs limites méthodologiques et proposera des taux de dilution alternatifs estimés à partir de simulations effectuées par l'INRS.

Pour cette étude, la portée de l'exercice de simulation numérique se limite donc à reproduire les conditions de dispersion de l'effluent telles que recherchées lors de la réalisation des tests de 1983, c'est-à-dire en respectant les conditions hydrologiques et hydrodynamiques de référence prévalant lors des tests, et en appliquant une démarche permettant d'obtenir un régime permanent de propagation. Ce régime, comme il sera démontré plus loin, est loin d'avoir été atteint lors des tests *in situ* en raison de la grande variabilité latérale des écoulements dans la région des émissaires. Les forts gradients latéraux de vitesse créent un contexte de propagation de l'effluent qui pouvait difficilement être capté avec un test de traçage d'une si courte durée (une heure d'injection), pour laquelle la phase transitoire (établissement du panache) est encore nettement dominante.

Remarque : Quoiqu'elle le permettrait, cette étude ne cherche pas pour le moment à mettre en évidence la sensibilité du panache de l'Île-aux-Vaches à la gamme des conditions de propagation dans le milieu, notamment en fonction des saisons (débit d'étiage, état des plantes aquatiques), et de la répartition des sources de débit entre le cours principal du fleuve et ses affluents formés par la rivière des Prairies et l'Assomption qui en sont les principaux déterminants. Par contre, étant donné la disponibilité d'un modèle hydrodynamique calibré et validé pour plusieurs conditions

hydrodynamiques de référence (numériques) sur l'ensemble du tronçon du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Trois-Rivières, il est possible d'étendre la portée de la présente analyse à certains événements correspondant à la réglementation (ex : le $Q_{2.7}$) et d'extensionner les résultats sur une très grande distance en aval. Il est ainsi possible de confronter les concentrations théoriques de contaminants obtenues aux usages présents, notamment, les prises d'eau, le récréo-tourisme et la faune aquatique.

Enfin, il est nécessaire de faire remarquer qu'en l'absence de données terrain fiables, et pour cause, sur la propagation du panache, nos simulations n'ont pu être pleinement validées. Il apparaît donc encore nécessaire de s'assurer idéalement de la validité des résultats obtenus à partir de mesures *in situ* ayant elles-mêmes satisfait aux critères de validation requis, notamment au niveau du principe de stationnarité. Par contre, des étapes importantes ont été franchies dans le processus de validation des simulations numériques ce qui permet de procéder dès maintenant, et en attendant mieux à leur publication. Ainsi, les conditions hydrodynamiques du milieu qui forment le principal déterminant des simulations de dispersion (courants et diffusivités) ont fait l'objet d'exercices poussés de calibration-validation à Environnement Canada (Service Météorologique Canadien ou SMC) et lors d'expériences antérieures réalisées lors du premier Plan d'Action Saint-Laurent (références).

2. Localisation de l'émissaire de la C.U.M.

L'émissaire de la C.U.M. est situé à environ 50 mètres de la limite nord du chenal de navigation et à environ 135 m de l'île aux Vaches. En fait, l'émissaire comporte deux embranchements nommés embranchement est et ouest (voir la Figure 1 tirée des plans de construction, C.U.M. 1976). Les deux embouchures sont localisées à 45 m l'une de l'autre dans l'axe du courant, de façon parallèle à la rive. Avec cette disposition particulière, les deux panaches résultant se combinent rapidement pour n'en former qu'un seul.

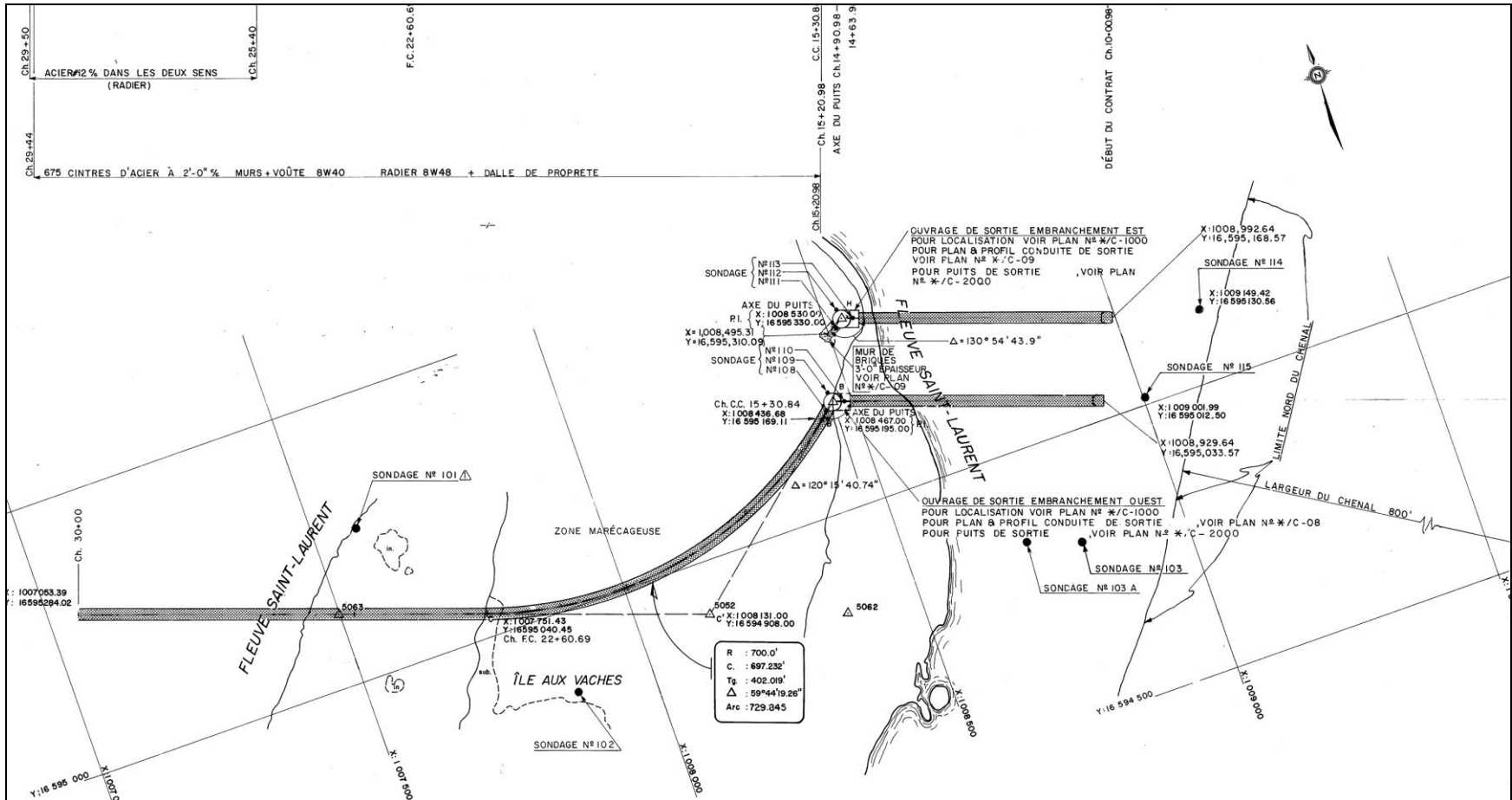


Figure 1 : Localisation et disposition des émissaires de l'usine d'épuration de la Ville de Montréal à l'Île-aux-Vaches (Source : C.U.M.)

3. Description des essais de 1983

La rhodamine WT, substance soluble dans l'eau et ayant un faible coefficient d'adsorption, a été utilisée comme colorant traceur dans les essais de diffusion. Cette dernière a été injectée à l'amont de l'émissaire de façon à ce que le colorant fasse partie intégrante du débit de l'effluent.

Le débit d'injection du colorant a été fixé de manière à obtenir des concentrations minimales mesurables dans le mélange (Tableau 1). La durée d'injection était de moins d'une heure, ce qui semblait suffisant, aux dires des auteurs de l'étude de 1983, pour former un panache présentant des conditions de diffusion stables (régime permanent) au moment du prélèvement des échantillons. Ces derniers ont été prélevés à l'aide d'un échantillonneur dans un certain nombre de sections transversales, à la surface et/ou à 5 m de profondeur. Le nombre d'échantillons prélevés par section transversale était dépendant de la largeur du panache détectée visuellement ou à l'aide d'un fluorimètre. Chaque point de prélèvement était localisé au moyen d'un système de positionnement. Les conditions dans lesquelles les essais de traçage ont été effectués sont présentées au Tableau 1. Dix sections transversales ont fait l'objet de mesures sur une distance de 5300 m pour l'essai 1 et sections ont été caractérisées sur une distance de 10600 m pour l'essai 2. Les dilutions déduites de ces essais sont respectivement données au Tableau 2 et au Tableau 3.

Les résultats de dilution de dilution présentés dans ces tableaux ont été obtenus en divisant simplement la concentration à l'origine de l'émissaire (valeur maximale) par la valeur maximale obtenue en travers des sections pour le cas de dilution minimale, et par la concentration moyenne dans le panache pour la dilution moyenne. Il est remarquable de constater le fort effet de dilution obtenu dès le point d'émission (typiquement des facteurs de 5 à 9).

Tableau 1. Conditions lors des essais de traçage de la C.U.M.

	1 ^{er} essai	2 ^{ième} essai
Date	18 octobre 1983	2 novembre 1983
Injection de rhodamine WT		
- débit (l/min)	10 (0,000167 m ³ /s)	9,5 (0,000158 m ³ /s)
- concentration (x 10 ⁶ ppb)	59,8	44,8
Effluent de l'émissaire (par titrage)		
- débit (m ³ /s)	14,2	13,5
- concentration (ppb)	705	525
Vent		
- direction	ouest	sud
- intensité (Km/h)	28	9
Débit du fleuve		
- Île Sainte-Thérèse (m ³ /s) (sans Des Prairies et Mille Îles)	8590	8545
- Îles de Verchères (m ³ /s) (avec Des Prairies et Mille Îles)	9520	9550
Niveau d'eau du fleuve		
- Pointe-aux-Trembles (m, RIGL)	5.4	5.5

Tableau 2 : Dilutions obtenues de l'essai #1 (concentration à l'origine de l'émissaire : 705 ppb)

Section	Distance (m) depuis le point d'émission	Valeurs ponctuelles		Valeurs moyennes	
		Concentration maximale C (ppb)	Dilution minimale N	Concentration moyenne C_{mo} (ppb)	Dilution moyenne N_{mo}
1	0	78,7	9	-	-
2	170	81,5	9	40	18
3	570	19,1	37	25	28
4	920	30,3	23	15	47
5	1350	30,9	23	14	50
6	1860	25,3	28	17	41
7	2360	17,0	41	11	64
8	3400	11,9	59	6	118
9	3800	13,3	53	6	118
10	5300	5,3	133	3	235

Tableau 3 : Dilutions obtenues de l'essai #2 (Concentration à l'origine de l'émissaire de 525 ppb)

Section	Distance (m) depuis le point d'émission	Valeurs ponctuelles		Valeurs moyennes	
		Concentration maximale C (ppb)	Dilution minimale N	Concentration moyenne C_{mo} (ppb)	Dilution moyenne N_{mo}
1	0	103,5	5	-	-
2	80	86	6	-	-
3	200	69,3	8	34	15
4	460	58,8	9	41	13
5	800	36,3	15	24	38
6	1150	16,1	33	9	58
7	1570	15	35	11	48
8	1750	15,5	34	9	58
9	1950	20,3	26	13	40
10	2500	13,5	39	7	75
11	3300	6,7	78	5	105
12	4800	6,2	85	4	131
13	6000	5,8	91	4	131
14	7400	2,6	200	1	525
15	8400	2,5	214	1	525
16	10600	2,5	214	1	525

4. Analyse des résultats des essais de 1983

4.1 Conditions hydrodynamiques lors des essais de 1983

Afin de mieux comprendre les résultats des essais réalisés en 1983 par le Laboratoire Hydraulique Lasalle et par la suite de les simuler à l'aide d'un modèle numérique, il faut disposer des données de courant et de niveau d'eau du fleuve correspondant à cet état. Ces données permettent de sélectionner les résultats hydrodynamiques disponibles les plus représentatifs des conditions prévalant lors des tests et ils permettent donc de paramétrer le potentiel de transport (courants) et de diffusivité (turbulence) des écoulements dans le modèle de transport-diffusion DISPERSIM de l'INRS-ETE.

Environnement Canada (Service Météorologique Canadien) a caractérisé le comportement temporel et spatial des débits, des niveaux d'eau, du vent et de la température dans le tronçon Montréal/Trois-Rivières afin de produire des simulations hydrodynamiques représentatives de ce milieu (Morin et Bouchard 2000). En tout, 13 scénarios de référence de base ont été identifiés à partir de la distribution des débits du fleuve à Sorel. Ces scénarios correspondent aux saisons hydrauliques du printemps, de l'été et de l'hiver.

Parmi ces scénarios calibrés et validés, le scénario 4p est celui qui se rapproche le plus des conditions prévalant lors des essais de 1983 (voir Tableau 4). C'est donc celui utilisé pour analyser et tenter de reproduire ces essais. L'indice p de 4p désigne les événements de référence qui se produisent au printemps après la fonte du couvert de glace et alors que les plantes aquatiques, à l'origine d'une structuration importante des courants et masses d'eau, ne sont pas encore entrées dans leur saison de croissance. Ce scénario est valable également pour la période automnale des tests; à cette époque particulière, les plantes ont complété leur saison végétative caractérisée par leur sénescence. On pourrait ajouter que l'absence d'effet hydrodynamique associé aux plantes aquatiques (retarder l'écoulement) favorise le déploiement du panache vers les zones normalement occupées par les plantes, particulièrement près des rives et en zone peu profonde. C'est une raison de plus pour choisir cet événement en particulier. Par contre, les conditions hydrologiques de l'événement ne correspondent pas exactement aux exigences de la réglementation qui sont plutôt basées sur le Q_{2-7} . Il faut donc interpréter les résultats en tenant compte de cette restriction.

Le scénario 4p a été simulé à nouveau sur un maillage adapté à la problématique de l'émissaire de la ville de Montréal. Ainsi, la densité des mailles du modèle a été considérablement accrue autour de l'émissaire lui-même ainsi qu'à l'aval de celui-ci afin de pouvoir capter le panache de façon adéquate en minimisant la diffusion artificielle associée aux modèles numériques. Par

exemple, autour de l'émissaire, la taille des maille est passée d'environ 250 m sur le maillage original d'Environnement Canada à 1 m sur le maillage adapté de l'INRS-ETE. En fait, cette taille est beaucoup plus petite que ce que le modèle numérique d'élévation du lit (bathymétrie) est capable de fournir en précision. En allant vers l'aval, la taille des mailles a été augmentée graduellement dans le couloir anticipé du panache pour atteindre 125 m à mi-chemin de Sorel. Pour montrer l'effort additionnel de calcul que cette configuration représente, le maillage résultant de Montréal à Trois-Rivières comporte 235 232 nœuds et 115 007 éléments montés dans un seul ensemble. Le maillage original, composé de deux ensembles distincts (Montréal/Sorel et Sorel/Trois-Rivières), comprenait au total 166 217 nœuds et 81 322 éléments pour le tout.

Tableau 4. Débits à différents endroits dans le fleuve Saint-Laurent pour le scénario 4p, les essais 1 et 2 et le relevé des vitesses de 1983

Débits (m ³ /s)	Scénario 4P	Essai 1	Essai 2	Relevé des vitesses
Sorel	9500	9520	9550	10900
Lasalle	8304	8590	8545	9440
Riv. Prairies et Mille-Îles	1196	930	1005	1460

4.2 Stationnarité des essais

L'émissaire de la C.U.M. se rejette dans le fleuve à un endroit possédant un fort gradient de vitesse et de profondeur (voir la Figure 2 pour les vitesses et la Figure 3 pour les profondeurs). C'est un endroit qui favorise, de par ses caractéristiques de cisaillement latéral associées aux forts gradients de vitesse, la diffusion latérale de l'émissaire. Par contre, ses différentes parties voyagent à des vitesses très différentes dépendant si l'on considère la gauche ou la droite du panache en regardant vers l'aval. Ainsi, dès l'ouverture du panache résultant de l'émissaire, la partie plus près de la rive nord (gauche) a tendance à voyager beaucoup plus lentement (environ 0,3-4 m/s) que la partie jouxtant le chenal de navigation (typiquement 1.0 m/s).

Selon cette simulation hydrodynamique, l'écart de vitesse de l'écoulement peut facilement atteindre 60 cm/s d'un bord à l'autre d'une section (voir Figure 2). Malgré des débits légèrement différents (voir Tableau 4), les mesures de vitesse du 23 novembre 1983 obtenues dans le cadre de l'étude confirment ce fait. Aux sections 3, 5 et 7 des écarts de vitesse 0.67, 0.46 et 0.33 m/s sont observés dans le tracé du panache (voir Figure 4). En advection pure, cela veut dire qu'un côté du panache aura parcouru pratiquement 1.5 km de plus que l'autre au bout d'une période d'une heure en considérant un écart de vitesse de 40 cm/s. Dans ces conditions, les panaches mesurés en 1983 ne représentent certainement pas un état stationnaire ou permanent. L'état permanent étant défini comme le moment où même si l'injection de rhodamine continue, les

concentrations dans le fleuve ne changent plus autrement qu'en raison des processus turbulents transitoires à court terme (tourbillons de von Karman, notamment) dont l'effet est normalement atténué par une durée suffisante des mesures locales (*in situ*) ou encore par une simulation en régime permanent avec les modèles numériques. Dans le cas présent, la durée d'injection, et vraisemblablement, la durée d'échantillonnage des prélèvements *in situ* semblent loin de garantir l'obtention de valeurs mesurées stabilisées dans le temps (régime permanent) .

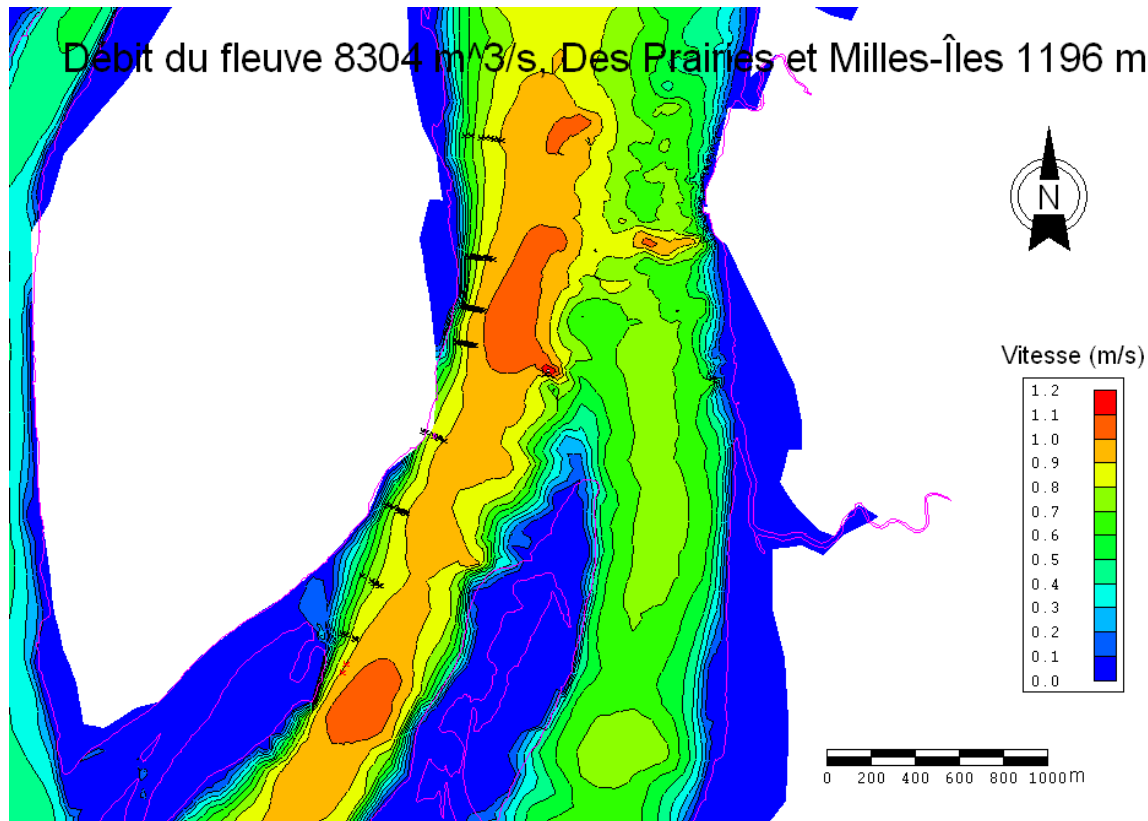


Figure 2. Module de la vitesse de courant tracé par incréments de 0,1 m/s, les x rouges sont les émissaires de la C.U.M., les x noirs sont les points mesurés lors de l'essai du 2 novembre 1983.

Il semble donc difficile de fonder trop d'attentes *a priori* par rapport à la concordance entre les résultats obtenus *in situ* et les simulations, principalement en raison de l'hétérogénéité des conditions de réalisation des deux jeux de données. Dans ces conditions, une simulation transitoire similaire à l'essai sur le terrain et d'obtenir ainsi des conditions de concordance permettant d'illustrer l'effet de non stationnarité bien qu'ils ne répondent pas au critère de régime permanent recherché. La Figure 5 illustre pour la section 10 (2.5 km du point d'émission) une simulation numérique transitoire de panache reproduisant l'essai #2 de 1983. Afin de respecter les conditions de l'essai #2, l'injection a duré une heure et la simulation a duré quatre heures. La charge polluante est fictive et il n'y a pas de calibration effectuée pour cette simulation. Il ne s'agit que de démontrer les effets d'un important gradient latéral de vitesse d'écoulement présent dans le panache. Il est facile d'observer que le panache arrive plus tardivement près de la rive nord (coordonnée x près de zéro) car le courant y est beaucoup plus faible que près du chenal maritime. Après 2 h (en bleu) le pic est passé mais des concentrations résiduelles demeurent en rive nord.

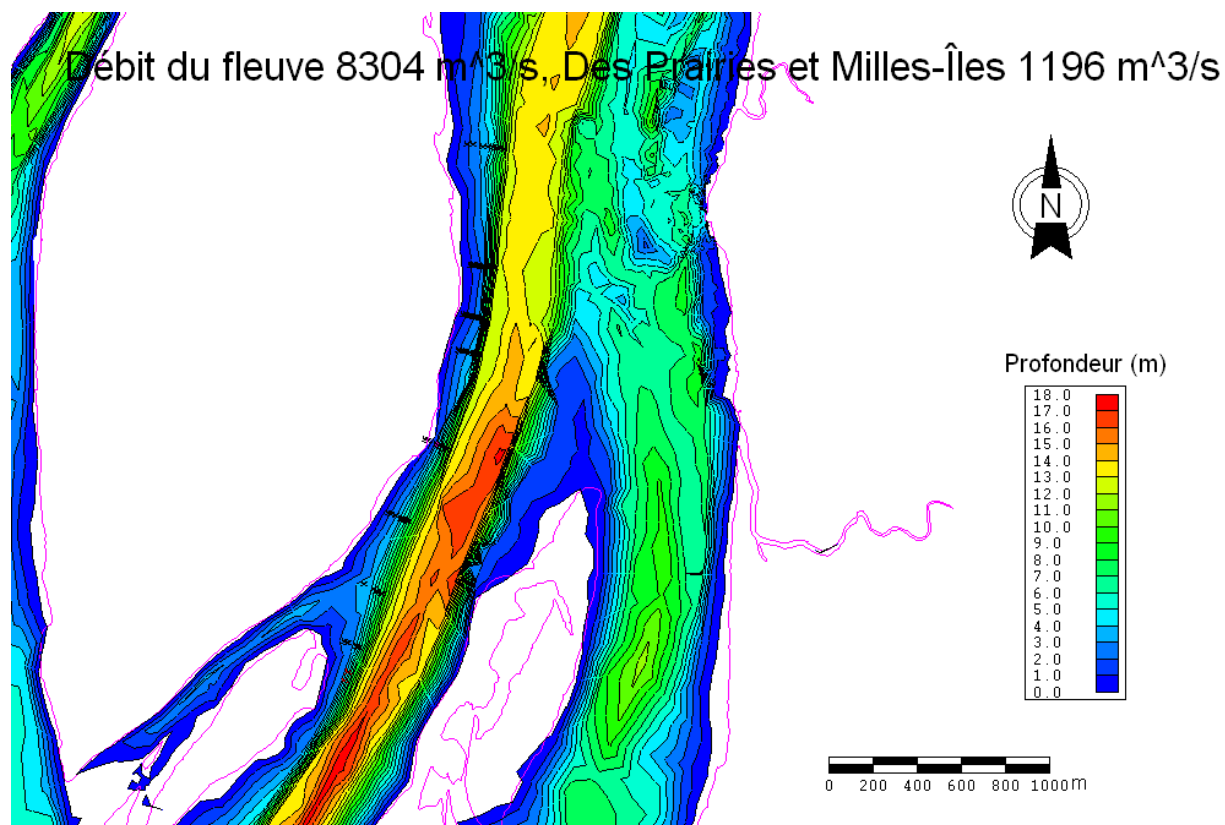


Figure 3. Profondeur tracé par incrément de 1 m, les x rouges sont les émissaires de la C.U.M., les x noirs sont les points mesurés lors de l'essai du 2 novembre 1983.

Tel que décrit précédemment, on constate que le maximum de concentration simulé en travers d'une section située à 2.5 km en aval du point d'injection migre de la droite (côté sud) vers la gauche (côté nord) ce qui démontre que la vitesse plus grande des courants transporte plus rapidement la masse de traceur (numérique) du côté nord que de l'autre côté. En conséquence la passage de la masse de traceur atteint son maximum plus de quatre heures plus tard avec un décalage de plus de 300 m vers le nord. Dépendant du moment exact de réalisation de la mesure avec un temps d'injection d'une heure, les résultats peuvent donc varier considérablement, et ce pour tous les paramètres considérés : concentration maximale, largeur du panache, concentration moyenne, conservation de la masse, trajectoire du maximum et extension de l'emprise.

On peut donc en conclure que les concentrations mesurées et la largeur du panache auraient pu être plus grandes si l'état stationnaire avait été atteint lors des essais *in situ* de 1983 même en supposant que le moment de la mesure aurait été parfaitement choisi pour détecter le maximum dans le temps. Par conséquent, les valeurs de concentration mesurées sur le terrain pour ce cas transitoire sont certainement sous-estimées pour la plupart et elles ne pourraient être que plus élevées dans un cas représentatif du régime permanent. En faisant abstraction des erreurs de mesures, les dilutions déduites à partir des essais de 1983 sont donc sur-évaluées par une marge très significative. Les dilutions réelles ne peuvent qu'être plus faibles, en particulier pour les dilutions moyennes dont le calcul dépend largement d'une distribution latérale de traceur sous-estimée systématiquement.

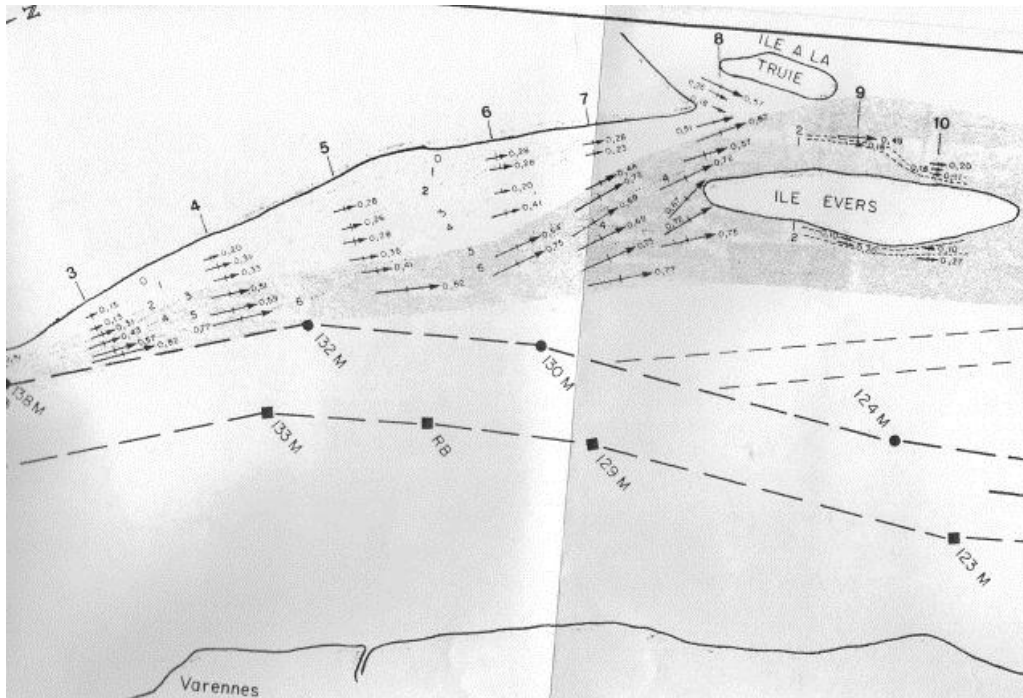


Figure 4. Relevé des vitesses d'écoulement en bordure de l'Île Sainte-Thérèse mesurées le 23 novembre 1983 (tiré de Boulanger 1984b).

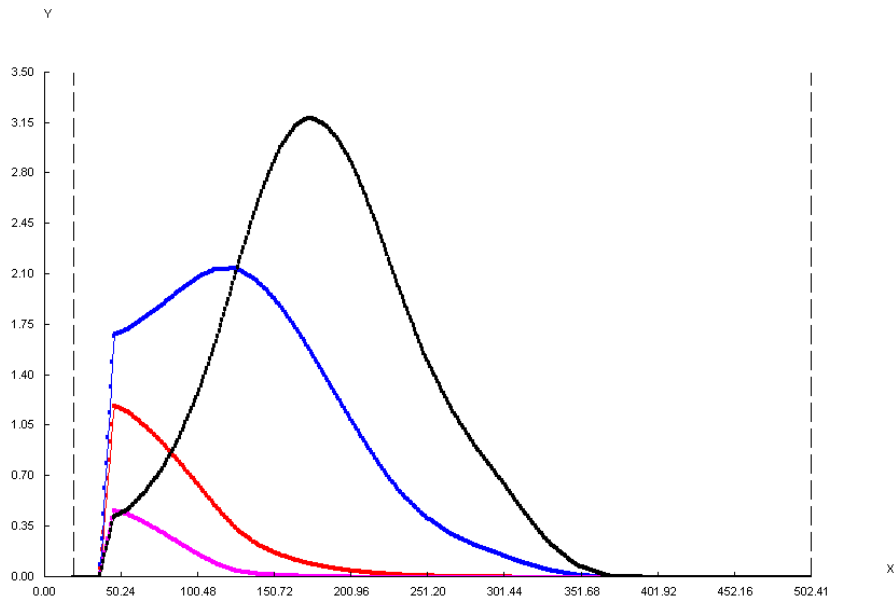


Figure 5. Section 10 du panache simulé avec injection pendant 1 heure correspondant à l'essai #2 de 1983 (noir =1h, bleu = 2h, rouge =3h et rose = 4 h). Les unités de l'axe y sont arbitraires et l'axe x est en mètres.

4.3 Dilution moyenne.

L'analyse des résultats de dilution moyenne démontre de manière encore plus éloquente le biais résultant de l'approche méthodologique appliquée lors des essais sur le terrain. Analysons la dilution moyenne de l'essai du 2 novembre 1983 (Tableau 3). La *dilution* est définie comme la concentration de l'effluent divisée par la concentration observée à un endroit. La méthode de calcul de la *dilution moyenne* exposée dans le rapport des essais de 1983 est basée sur l'aire de la courbe circonscrite par l'ensemble des points de mesures de concentrations définissant le panache à chacune des sections relevées, ce qui revient à diviser l'aire sous la courbe des concentrations par la largeur entre les deux points les plus éloignés du profil transversal.

Lors de l'essai du 2 novembre 1983, le débit de l'émissaire était de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le débit du milieu récepteur était de $9550 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 1). Pour obtenir la dilution moyenne de 525 rapportée pour ce test à la distance de 7,4 km en aval de l'injection (section 14), il fallait donc que l'emprise du panache dans le débit du fleuve atteigne $7087,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($525 * 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$), c'est-à-dire, pratiquement 75% du débit total du fleuve à cet endroit ($7088 \text{ m}^3/\text{s}$ sur $9550 \text{ m}^3/\text{s}$). Or, la section 14 n'a été échantillonnée que sur 250 m de largeur alors que la largeur du fleuve à cet endroit est de 2200 m. De plus, la section 14 n'est pas localisée dans le chenal de navigation, là où transitent les débits les plus importants. Il est donc évident par cette démonstration que la section mesurée n'était pas à l'état permanent au moment de la mesure.

Même en régime permanent, la dilution moyenne est en soi un concept flou et inconsistant. Le concept de dilution moyenne implique le calcul d'une concentration moyenne sur une section donnée, la pondération des concentrations étant assurée par la largeur au miroir de l'emprise du panache. Or, la troncature s'effectue de chaque côté du panache à un point de mesure où une concentration est encore observable, ce qui présuppose une limite de détection très basse et de nouveau des conditions stationnaires. Or, les limites de troncature pour le calcul de la concentration moyenne ont un impact important sur le calcul de la dilution moyenne. La Figure 6 illustre ce propos avec une panache théorique de distribution gaussienne. La concentration moyenne de ce panache ne sera pas la même si les bornes choisies sont 80 et 120 ou 70 et 130 ou encore 60 et 140.

De plus, il est aussi important de considérer le débit passant dans la section plutôt que la largeur au miroir de l'emprise. Ainsi, quand un panache comme celui de la ville de Montréal transite dans des zones montrant des gradients latéraux de profondeur et de vitesse, il apparaît essentiel dans un tel cas de prendre en compte le débit total contaminé par l'effluent pour le calcul de la dilution moyenne.

C'est pour ces diverses raisons que, faute de pouvoir compter sur une définition rigoureuse de la dilution moyenne, notamment à l'égard des limites de troncature et de pondération par le débit influencé par la charge de contaminant, l'INRS-ETE ne recommande pas l'utilisation du concept de concentration ou de dilution moyenne tel que défini dans le rapport du Laboratoire Hydraulique Lasalle. Une définition précise pourrait prendre appui sur des limites de troncature calculées statistiquement (ex : 3-4 écarts-types, % au dépassement de 95-99% des concentrations dans le panache) à partir des observations. La pondération latérale des concentrations pourrait être obtenue à l'aide d'un estimé de la répartition latérale du débit (débit spécifique).

Alternativement, le concept de *dilution maximale théorique (DMT)* ou valeur limite correspondant à une dilution *parfaite et uniforme* dans l'ensemble du débit du milieu récepteur pourrait aussi être considéré pour fixer les bornes de troncature pour calculer la dilution moyenne du panache.

La *dilution maximale théorique* est obtenue très simplement par la formule suivante :

$$DMT = (Q_e + Q_f) / Q_e$$

Où

DMT est la dilution maximale théorique

Q_e est le débit de l'émissaire

Q_f est le débit total du milieu récepteur

Ainsi, le débit du fleuve pour l'essai #1 était $9520 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit $14.2 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'émissaire donnant ainsi une dilution maximale de 671. Pour l'essai #2, le débit du fleuve était $9550 \text{ m}^3/\text{s}$ de pour un débit $13.5 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'émissaire donnant ainsi une dilution maximale de 717.

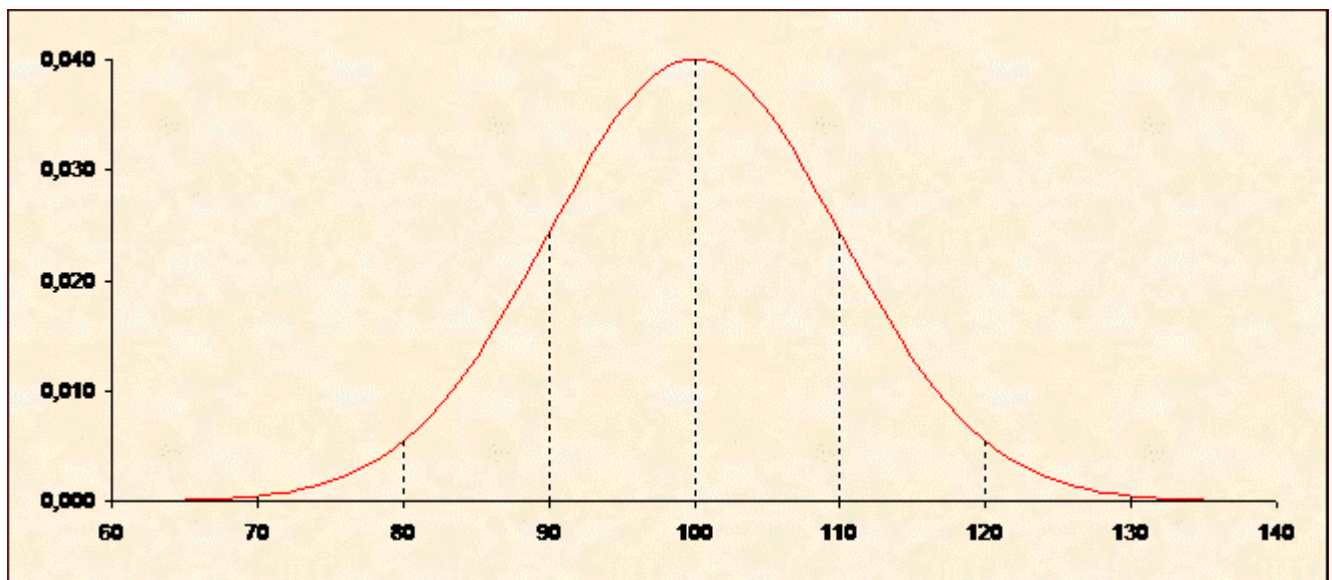


Figure 6. Coupe typique d'un panache de forme gaussienne. (Auteur Serge Garneau)

4.4 Débit massique

La rhodamine étant considérée comme un traceur conservatif, le débit massique obtenu à chaque section mesurée devant être identique au débit massique injecté en situation stationnaire.

Un calcul du bilan massique pour le deuxième essai a été effectué en utilisant les simulations hydrodynamiques effectuées par l'INRS pour obtenir des données hydrodynamiques nécessaires (distribution latérale des écoulements ou débit spécifique). Le débit massique a été calculé en

intégrant sur les sections mesurées les concentrations mesurées multipliées par le débit spécifique local lequel est obtenu par le produit de la profondeur simulée par la vitesse locale également simulée. Dans le cas de la profondeur, la précision obtenue est principalement reliée à celle des minutes hydrographiques du Service hydrographique du Canada telles que représentées dans le modèle numérique d'élévation (MNE) du simulateur et dans une très faible mesure au niveau d'eau simulé pour lequel l'erreur est généralement très faible. Pour ce qui est des vitesses, celles-ci découlent de la qualité du processus de validation (mesures au courantomètre à effet Doppler) mis au point par Environnement Canada pour s'assurer de la qualité de ses résultats. Enfin, pour obtenir les coordonnées géoréférencées des points mesurés, qui n'étaient pas disponibles directement dans le rapport Boulanger (1984b), celles-ci ont été numérisées (Johnston, 2004) à partir de cartes et des graphiques rapportés.

Le débit massique (Q_m) injecté lors du deuxième essai est obtenu par la multiplication du débit de l'émissaire par la concentration de l'émissaire (13.5 m³/s par 525 ppb). Il est donc de 7087.5 ppb m³/s. En ce qui concerne le débit massique transitant dans l'une ou l'autre des sections transversales en aval, il est nécessaire d'intégrer latéralement le profil de concentration. L'intégration est bien sûr réalisée numériquement .

$$Q_m = \int_{Section} V \times H \times C \times ds \equiv \sum V_i \times H_i \times C_i \times \Delta s_i$$

Où

V est la vitesse

H est la profondeur

C est la concentration

s une coordonnée transversale au panache

i l'indice du point de mesure

Δs_i l'incrément de distance entre deux points

Le calcul du bilan massique de l'essai #2 est présenté à la Figure 7. Il est évident que le débit massique n'est pas conservé d'une section à l'autre. Le débit massique varie énormément d'une section à la suivante, d'une façon beaucoup trop importante pour que ce ne soit dû qu'à l'incertitude sur les mesures. Par exemple, la section 15 ne présente que 9 % du débit massique théorique. La moyenne sur l'ensemble des sections est de 46 % ce qui est une sous-estimation par un facteur de deux et plus.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer en partie cela :

1. une certaine incertitude peut exister sur les vitesses simulées malgré le processus rigoureux de validation appliqué, et il est peu probable qu'elles soient entachées d'un biais systématique étant donné que le débit est bien conservé dans le modèle ;
2. les profondeurs simulées laissent peu d'espace à l'incertitude étant donné que le principal intrant dans cette variable provient de mesures directes ;

3. le positionnement des points mesurés peut jouer un rôle mais les informations disponibles ne permettent pas de vérifier ce point ; de plus, une telle déviation ne pourrait expliquer un biais systématique ;
4. le panache n'a peut-être pas été capté dans toute sa largeur dû aux limites de détection qui servent également de bornes de troncature ; par contre, la partie tronquée ne représente que les faibles concentrations du profil et il serait surprenant qu'une captation plus complète pourrait corriger un biais moyen de 50% du débit massique.

Il paraît donc que le fait que le panache n'ait pas été mesuré dans un état stationnaire demeure l'explication la plus plausible.

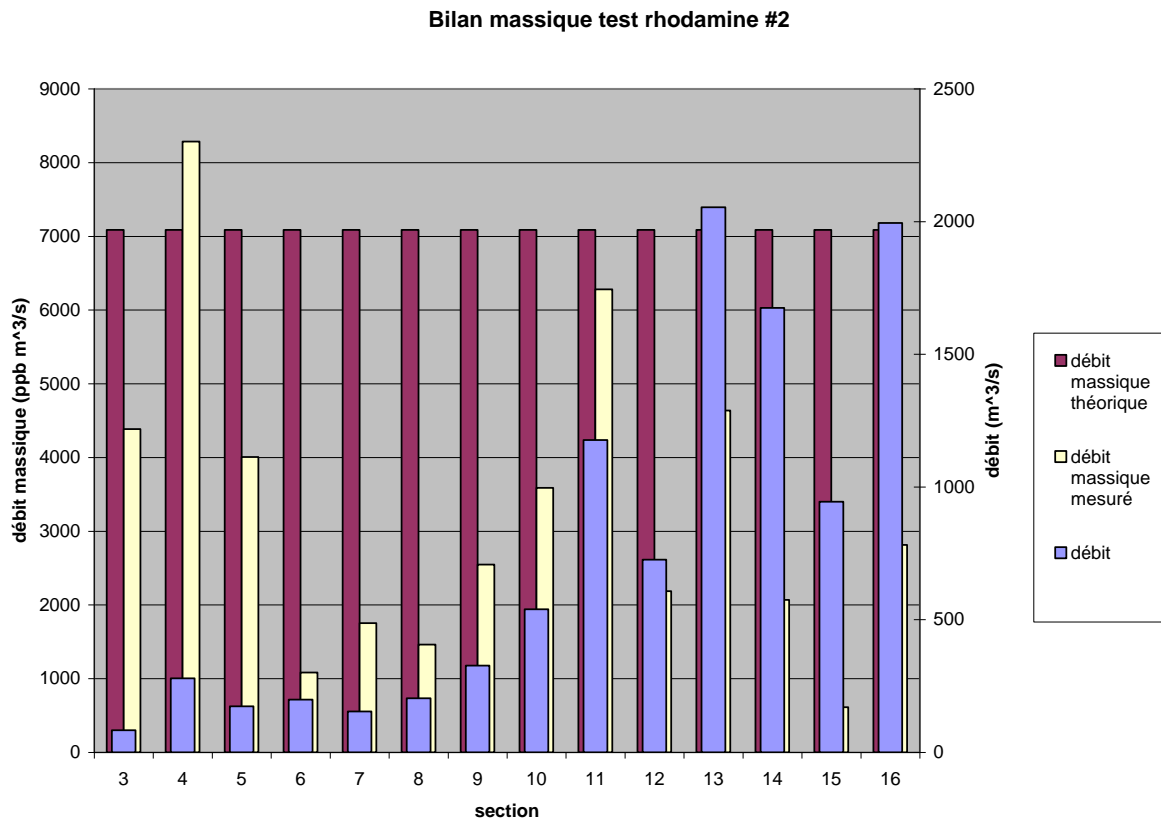


Figure 7 : Bilan massique de l'essai #2 du 2 novembre 1983.

5. Résultats de taux de dilution simulés

L'INRS-ETE a effectué une simulation en utilisant une méthodologie de calcul des coefficients de diffusion conforme à la bibliographie recensée dans Fischer et coll. (1979) et qui a déjà fait ses preuves dans le contexte du Plan d'Action Saint-Laurent Phase I (Leclerc *et al.* 1991a,b,c ; 1992 ; Montminy *et al.* 1992). Néanmoins, un processus de calibration et/ou de validation est normalement attendu d'un tel exercice ; il est même nécessaire afin que les résultats puissent être garantis à l'intérieur de marges raisonnables d'incertitude. Mais, comme il a été mentionné auparavant, les tests de 1983 sont inutilisables pour des fins de calibration. Cependant, il a été possible de confronter grossièrement les trajectoires des panaches simulés et observés ainsi que leur emprise et les résultats sont apparus satisfaisants en première approximation, compte tenu des biais identifiés sur les mesures. Les résultats de simulation présentés, bien qu'ils ne répondent pas parfaitement à la méthodologie stricte de modélisation, correspondent plus rigoureusement aux critères de stationnarité requis pour utiliser un test de traçage en situation de conception.

Les facteurs de dilution obtenus par l'INRS tout comme ceux obtenus par le Laboratoire d'hydraulique Lasalle et la CUM sont donnés au Tableau 5. On observe que les facteurs de dilution de l'INRS-ETE sont plus les plus vraisemblables car les valeurs sont systématiquement sous les celles obtenues lors des essais de 1993, ce qui satisfait mieux à la conservation du bilan massique de traceur. Il a été impossible de retrouver les facteurs de dilutions utilisés par la CUM. Ils sont, de façon étonnante, la moitié de ceux obtenus lors des essais de 1983. La conservation de la masse de la simulation de l'INRS a été contrôlée à différentes sections et elle s'est avérée très bonne (Tableau 6).

Tableau 5. Facteurs de dilution maximale et moyenne de l'effluent de la CUM pour l'essai de traçage de 1983 selon la CUM, la Laboratoire Hydraulique Lasalle et l'INRS-ETE

Distance (km)	Facteur de dilution					
	CUM		Rapport Lasalle		INRS-ETE	
	Minimal	Moyen	Minimal	Moyen	Minimal	Moyen
0,3	4,7	9,5	10	20	7,3	
1	9,5	18	20	38	15,6	
1,8	14,2	27,5	28	58	22,0	
3	23,7	42,7	51	88	31,5	
4,2	35,1	60,7	75	124	41,0	
5,5	52,2	84,5	110	178	51,3	
6	61,7	94,9	130	200	55,2	
7	82,6	189,8	178	-	63,2	
10	104,4	237,3	220	-	82,7	
13					91,7	
15					97,8	
20					112,9	
25					128,0	
30					143,1	
40					173,4	

Tableau 6. Conservation de la masse à différentes sections de la simulation DISPERSIM

Distance de l'injection (m)	% du débit massique théorique
Point d'injection (0)	100,14%
1	104,15%
7	105,03%
46	100,10%
675	99,68%
9125	114,47%
45000	104,24%

6. Extension du panache dans le lac Saint-Pierre

Afin d'illustrer le potentiel de la modélisation numérique pour représenter la propagation des panaches sur de très longues distances en aval du point d'injection, un exercice a été réalisé sur l'ensemble du domaine où l'on disposait de données hydrodynamiques. La Figure 8 illustre une simulation préliminaire de panache de l'émissaire de la ville de Montréal jusqu'à Trois-Rivières reprenant les paramètres de l'essai #2 de 1983 mais en conditions permanentes. Les concentrations simulées atteignent une valeur plancher voisine de 1.3 ppb comparé à une valeur à l'émissaire de 555 ce qui signifie un facteur de dilution de 427 typiquement ce qui correspond à un débit fluvial influencé par l'effluent de $5763 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 60% de la valeur à l'entrée du modèle. Compte tenu de l'arrivée de nouveaux affluents importants dans le domaine de simulation (ex : rivières Richelieu, Yamaska et Saint-François), le pourcentage du débit du fleuve concernée par le facteur de dilution mentionné serait plutôt de l'ordre de 55% à l'amont de la rivière Saint-Maurice.

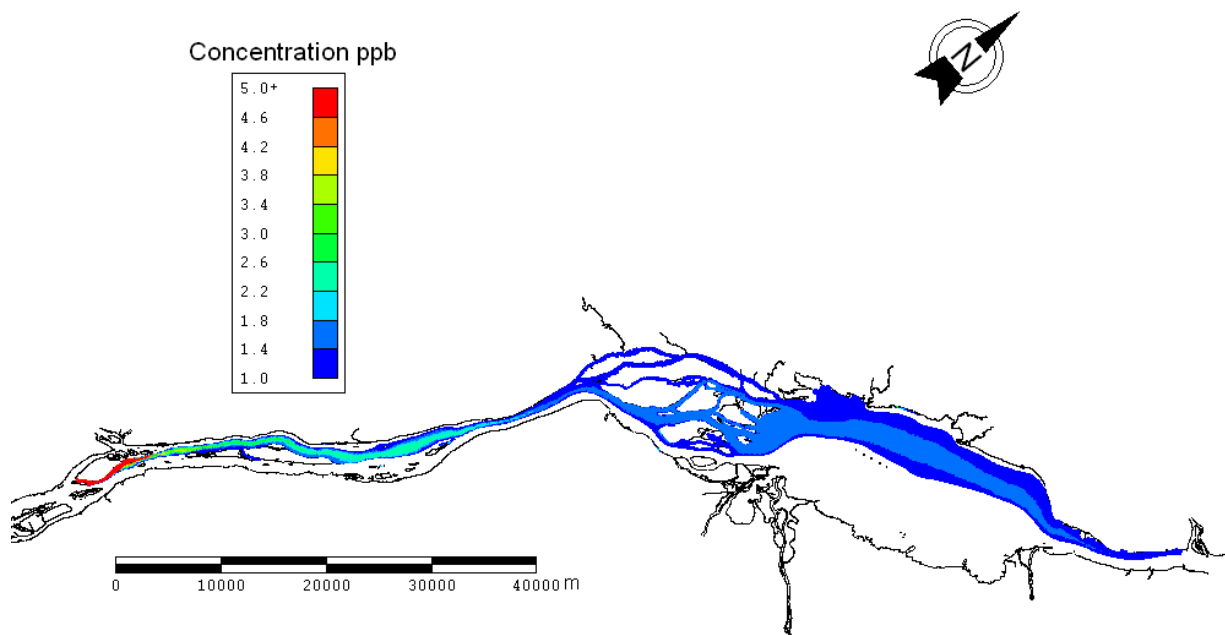


Figure 8. Panache simulé jusqu'à Trois-Rivières.

7. Conclusion et recommandations

Des essais de traçage *in situ* aux résultats trompeurs. L'analyse des conditions de réalisation d'essais de traçage à la rhodamine WT de l'effluent de la ville de Montréal en 1983 révèle que la courte durée d'injection du traceur (une heure) a compromis la validité des résultats obtenus en transgressant le critère de stationnarité des conditions de mélange transversal et longitudinal requis pour de tels essais. Il en résulte des mesures de concentration maximale par section la plupart du temps sous-évaluées, des facteurs de dilution systématiquement surévalués, typiquement par un facteur 2, une non conservation (estimée) de la masse de traceur d'une section à l'autre ainsi qu'une incertitude significative sur la trajectoire et la largeur de l'emprise du panache.

Un exercice de simulation numérique à valeur indicative. Un exercice de simulation à l'aide du modèle DISPERSIM de l'INRS-ETE a été réalisé en vue d'abord de reproduire les conditions des essais réalisés et ainsi valider le modèle. L'objectif ultime est de l'appliquer à des conditions hydrologiques de référence répondant mieux aux critères de conception d'un système d'épuration des eaux usées municipales comme celui de Montréal. Les données disponibles la calibration-validation s'étant avérées non utilisables à cette fin, la modélisation a donc été réalisée à titre indicatif en paramétrisant les diffusivités du modèle avec les meilleures connaissances du moment. Un événement déjà simulé par Environnement Canada a été retenu afin de reproduire au mieux les conditions des essais, et celui-ci a été reconvergé sur un maillage de calcul reconfiguré pour capter optimalement les conditions de mélange au point d'injection et dans le trajet anticipé du panache. Ce maillage a été étendu jusqu'à Trois-Rivières afin d'extrapoler les résultats dans toute la mesure du possible.

La dilution moyenne : un concept flou à redéfinir. Le concept de dilution moyenne utilisé dans les études classiques de traçage n'est pas suffisamment défini et rigoureux pour être applicable tel quel, et suggère de le reformuler pour tenir compte de conditions de troncature latérale de l'emprise du panache, dictées par la dynamique transitoire du phénomène, la limite de détection du traceur par les instruments disponibles, et la pondération requise par le débit spécifique passant la section du panache. Pour ces raisons, aucun résultat de dilution moyenne n'est présenté dans ce rapport.

De nouveaux résultats de dilution maximale proposés. Des résultats de dilution maximale à différents distances, jusqu'à 45 km en aval du point d'injection, sont proposés. Si les valeurs n'ont pas fait l'objet de validation pleines et entières, leur validité apparaît certainement supérieure à celles utilisées à ce jour pour la conception des ouvrages d'épuration de Montréal.

Il est recommandé de reprendre les essais présentés en ciblant un événement de référence mieux défini et plus représentatif de la problématique de contamination du milieu en aval, notamment à l'égard des autres usages.

Sur la propagation du panache sur de longues distances : un point de vue inédit offert par la modélisation. Enfin, une simulation est présentée montrant l'évolution potentielle du panache de la ville de Montréal sur l'ensemble de son trajet au moins jusqu'à Trois-Rivières. Les taux de dilution (minimum de la section transversale) augmentent rapidement à partir du point d'injection et ils tendent vers un plafond asymptotique voisin de 425 à partir de l'entrée du lac Saint-Pierre, ce qui signifie que plus de 55% du débit du fleuve, du côté nord de celui-ci, subit l'impact du panache à la hauteur de Trois-Rivières. Le maximum asymptotique de dilution qui serait obtenu avec un mélange complet de l'effluent dans l'ensemble du milieu récepteur n'est donc pas encore atteint à la sortie du lac Saint-Pierre. Le panache n'atteint donc pas encore les masses d'eau transitant du côté sud du fleuve à cet endroit. Par contre, il est vraisemblable que les effets de l'effluent puissent se faire sentir en rive gauche dès l'entrée du delta du lac Saint-Pierre et, fort probablement aussi sur plusieurs kilomètres à l'amont.

8. Remerciements

L'INRS-ETE tient à remercier plus particulièrement le Professeur Michel Fournier de l'INRS Santé humaine/IAF pour son implication importante dans le Réseau de Recherche en Écotoxicologie du Saint-Laurent sans qui cette recherche innovatrice n'aurait pu être entreprise.

Il est aussi nécessaire de reconnaître la contribution des nombreux partenaires qui de près ou de loin ont rendu cette recherche possible. Leur nom est mentionné au début de ce rapport dans la liste des collaborateurs

9. Bibliographie

- Boulanger, F.** 1984a. Station d'épuration de la CUM. Répercussions environnementales d'un déversement d'eaux usées prétraitées à l'émissaire de l'Île aux Vaches. Rapport d'étude LHL-901 pour la Communauté urbaine de Montréal, Service d'assainissement des eaux.
- Boulanger, F.** 1984b. Station d'épuration de la CUM. Répercussions environnementales d'un déversement d'eaux usées prétraitées à l'émissaire de l'Île aux Vaches. Rapport *in extenso* LHL-902 pour la Communauté urbaine de Montréal, Service d'assainissement des eaux.
- Communauté urbaine de Montréal, Service d'assainissement des eaux.** 1976. Émissaire de l'usine de l'est, embranchement ouest, tronçon 6.1. Plan no. 27-1012-306A / C-01, révision 3.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y Koh, J. Imberger and N.H. Brooks (1979).** Mixing in Inland and coastal waters. Academic Press. Montreal. 483 p.
- Leclerc, M., P. Dupont, P. Boudreault (Biol.), J. P. Fortin et L. Cleary (1991a).** Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau de tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 1. Volume 2: Caractérisation de la diffusivité des écoulements du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre par tests de rhodamine et télédétection aéroportée. Rapport scientifique INRS-Eau No. RS#318, 66 p.
- Leclerc, M. et P. Boudreault (1991b).** Méthodologie du bilan toxique global et d'analyse de la contamination par tronçon du fleuve Saint-Laurent. Dans le cadre des Entretiens Jacques-Cartier. Lyon, 4-5 décembre 1991. Comptes-rendus dans les *Cahiers de géographie de Lyon*.
- Leclerc, M., M. Montminy, G. Martin, J. Benoit, P. Boudreault et L. Cleary (1991c).** Développement et validation analytique d'un modèle de simulation lagrangien de panaches d'effluents. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 2. Rapport scientifique, INRS-Eau No. RS#321, 170 p.
- Leclerc, M., P. Boudreault, M. Montminy, G. Martin, J. Benoit et L. Cleary (1992).** Le logiciel PANACHE: manuel de l'utilisateur. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada

- Montminy, M., Leclerc, M. et G. Martin (1992).** PANACHE: An Interactive Software to simulate Steady-State Two-Dimensional Transport of Solutes in Rivers. Proceedings of the 4th Int. Conf. on *Hydraulic Engineering Software, HYDROSOFT 92`* , Universidad Politecnica, Valence, Spain, Jul. 21-23, 1992.
- Johnston, P.** 2004. Étude de l'émissaire de l'Île aux Vaches. Pour le cours « Travail dirigé 1 »EAU801 Dans le cadre du programme de Doctorat en sciences de l'eau, INRS-ETE, 25 p.
- Morin J. et Bouchard A.** 2000. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal/ Trois-Rivières. Rapport scientifique SMC-Hydrométrie RS-100. Environnement Canada, Sainte-Foy, 56 p.