

**GUIDE TECHNIQUE RÉVISÉ POUR LA RÉALISATION D'ÉTUDES
DE DÉLIMITATION DU PANACHE DES EFFLUENTS**

**Bureau national du suivi des effets sur l'environnement
Institut national de recherche sur les eaux
Environnement Canada**

MARS 2003

**RAPPORT FINAL PRÉSENTÉ À
ENVIRONNEMENT CANADA**

**GUIDE TECHNIQUE RÉVISÉ
POUR LA RÉALISATION D'ÉTUDES DE DÉLIMITATION DU PANACHE DES EFFLUENTS
(CONTRAT N^o K1130-2-2033)**

**JACQUES WHITFORD ENVIRONMENT LIMITED
711 WOODSTOCK ROAD
FREDERICTON (N.-B.) E3B 5N8
Tél. : (506) 366-1080
Télec. : (506) 452-7652
<http://www.jacqueswhitford.com>**

ET

**NATECH ENVIRONMENTAL SERVICES INC.
109 PATTERSON ROAD
HARVEY STATION (N.-B.) E6K 1L9
Tél. : (506) 366-1080
Télec. : (506) 366-1090
<http://www.natech.nb.ca>**

Mars 2003

Remerciements

Le présent rapport a été rédigé par Mary Murdoch (Jacques Whitford Environment Limited (JWEL)), Jochen Schroer (NATECH Environmental Services Inc. (NATECH)) et John Allen (NATECH). Nous remercions l'équipe JWEL–NATECH, qui a mis à profit ses connaissances techniques et scientifiques pour rédiger le présent guide. En outre, nous remercions particulièrement M. Roy Parker (Environnement Canada, Région de l'Atlantique), qui était l'autorité scientifique pour ce projet, et les personnes suivantes qui étaient membres de l'équipe de révision : Janice Boyd (Environnement Canada, Région du Pacifique), Kay Kim (Environnement Canada, Région de l'Atlantique), Georgine Pastershank (Bureau national du SEE, Environnement Canada), Bonna Jordan (Bureau national du SEE, Environnement Canada), Nardia Ali (Environnement Canada, Région de l'Ontario) et Debbie Audet (Environnement Canada, Région de l'Ontario).

TABLE DES MATIÈRES

1.0	INTRODUCTION	2
1.1	But de la délimitation du panache.....	3
2.0	DISPERSION DE L'EFFLUENT	5
2.1	Concept initial de la dispersion de l'effluent	5
2.2	Caractéristiques de l'effluent	9
2.3	Conception du point de rejet de l'effluent	9
2.4	Éléments du milieu récepteur qui influent sur la dispersion du panache.....	9
2.4.1	Écoulements d'eau douce	9
2.4.2	Niveaux d'eau	9
2.4.3	Qualité de l'eau	10
2.4.4	Variation de la température et de la salinité.....	10
2.4.5	Marées et seiches	10
2.4.6	Conditions climatiques	10
2.4.7	Facteurs confusionnels.....	10
3.0	ÉTUDE PAR TRACEURS SUR LE TERRAIN.....	12
3.1	Membres du groupe d'étude	12
3.2	Communications	12
3.3	Embarcations	13
3.4	Localisation (GPS).....	13
3.5	Choix du traceur.....	13
3.6	Injection du traceur (traceur ajouté).....	14
3.6.1	Durée de l'injection du colorant	16
3.7	Appareils de mesure de la qualité de l'eau	16
3.7.1	Fluorimètre.....	16
3.8	Matériel utilisé pour suivre les courants et le mouvement de l'effluent.....	17
3.8.1	Drogues	17
3.8.2	Courantomètres	19
3.9	Suivi de la dispersion de l'effluent	19
3.9.1	Prélèvement d'échantillons dans la zone de dilution initiale.....	20
3.9.2	Dispersion subséquente.....	20
3.10	Qualité des données	22
3.11	Modélisation numérique	23
4.0	RAPPORT.....	25
5.0	MILIEU RÉCEPTEUR – FACTEURS À PRENDRE EN COMPTE.....	26
5.1	Cours d'eau	26
5.2	Petits lacs et réservoirs de retenue	27
5.3	Grands lacs.....	29
5.4	Estuaires et fjords.....	30
5.4.1	Caractéristiques hydrographiques.....	30

5.4.2	Travail sur le terrain.....	35
5.5	Eaux marines.....	36
5.6	Conditions climatiques	37
5.6.1	La glace.....	37
5.6.2	Le vent	38
6.0	RÉFÉRENCES (MODIFICATIONS APPORTÉES CONFORMÉMENT AU GUIDE DU RÉDACTEUR, P. 264).....	40

LISTE DES TABLEAUX

		N° de page
Tableau 3.1	Rôles et responsabilités du groupe d'étude	12
Tableau 3.2	Modèles numériques décrivant la dispersion de l'effluent.....	24
Tableau 5.1	Résumé des facteurs à prendre en compte pour chaque type de milieu récepteur.....	26

LISTE DES FIGURES

		N° de page
Figure 2.1	Exemples de comportement du panache dans les milieux récepteurs (Jirka <i>et al.</i> , 1996, modifié) (lien non établi)	
Figure 3.1	Courbe d'étalonnage type reliant la fluorescence à la concentration du traceur colorant	17
Figure 3.2	Divers types de drogues utilisées pour la délimitation du panache (adapté du Manuel canadien des marées).....	18
Figure 5.1	Profil généralisé d'un estuaire indiquant la circulation pendant la marée descendante (a) et la marée montante (b)	31
Figure 5.2	Profils de masses d'eau estuariennes typiques montrant un estuaire fortement stratifié (a), un estuaire partiellement mélangé (b) et un estuaire entièrement mélangé (c).....	32

N° de page

1.0 INTRODUCTION

À la demande d'Environnement Canada (contrat n° K1130-2-2033), Jacques Whitford Environment Limited (JWEL) et NATECH Environmental Services Inc. (NATECH) ont préparé un Guide technique révisé concernant la délimitation du panache des effluents des fabriques de pâtes et papiers pour le suivi

des effets sur l'environnement aquatique (SEE) exigé en vertu du *Règlement sur les effluents des fabriques de pâtes et papiers (REFPP)*. Ce guide remplace le guide actuel pour la délimitation du panache des effluents qui figure à la section 2.2 (Description de la zone d'étude) du Guide technique pour l'étude de suivi des effets sur l'environnement aquatique par les fabriques de pâtes et papiers, publié en avril 1998 (Environnement Canada, 1998).

1.1 But de la délimitation du panache

La délimitation du panache de l'effluent est obligatoire à l'étape de la conception du programme de SEE pour chaque fabrique de pâtes et papiers. Elle a pour but de savoir comment l'effluent se comporte dans le milieu récepteur et de connaître les limites de l'effluent indiquant les zones d'exposition et les zones de référence où il est possible d'établir des points d'échantillonnage.

La zone d'exposition pour les études de SEE est celle où la concentration de l'effluent est égale ou supérieure à 1 %, c'est-à-dire où la dilution ne dépasse pas 1:100. Il est important de connaître la distribution spatiale de l'effluent dans la colonne d'eau afin de délimiter les zones de prise de poissons ainsi que de savoir où l'effluent entre en contact avec le substrat du fond pour déterminer les zones d'échantillonnage de la communauté d'invertébrés benthiques, ce qui est particulièrement important dans le cas d'un effluent dont le mélange vertical ou horizontal dans le milieu récepteur n'est pas complet.

Afin de choisir les points d'échantillonnage dans les zones de référence pour les études de SEE, il faut connaître l'accroissement de la dilution de l'effluent (1:1 000) correspondant à une limite de concentration inférieure à 0,1 %. Ce renseignement est particulièrement important dans le cas des fabriques qui rejettent leur effluent dans des plans d'eau où l'écoulement n'est pas unidirectionnel.

La délimitation du panache des effluents comporte généralement des travaux sur le terrain visant à suivre le mouvement du panache pendant une seule période de temps ainsi que le recours à la modélisation numérique pour déterminer les zones cibles de dilution dans des conditions ambiantes plus variées. Il est recommandé que la zone d'exposition à l'effluent soit prédite :

- pour l'étendue maximale et indique la zone où l'effluent est régulièrement décelable à une concentration égale ou supérieure à 1 %;
- pour des conditions moyennes à long terme et indique les zones où les concentrations de l'effluent égales ou supérieures à 1 % et égales ou supérieures à 0,1 % seraient régulièrement décelables.

Il est probable que les zones à l'extérieur de l'étendue maximale dans les pires conditions seraient peu touchées par l'effluent et pourraient servir de zones « éloignées » ou de « référence » selon la conception de l'échantillonnage (p. ex., plan axé sur le contrôle et l'impact, ou plan par gradient). Les conditions moyennes à long terme définissent ce qui pourrait être considéré comme l'enveloppe « normale » de l'étendue du panache et peuvent servir à concevoir un programme de SEE pour l'échantillonnage qui évaluera l'effet à long terme du rejet de l'effluent. Il peut aussi être utile de déterminer les conditions moyennes à long terme d'une concentration de l'effluent égale ou supérieure à 10 % afin de relever les zones qui peuvent être le plus touchées par l'exposition à l'effluent. Il est important de savoir quelles sont les conditions ambiantes « normales » auxquelles l'effluent sera soumis et de connaître les extrêmes qui, à l'occasion, peuvent l'emporter sur les « normales ».

Dans le cas des milieux d'évacuation dont le débit des eaux réceptrices est élevé et où il est probable que l'effluent se mélangera rapidement, il est important de savoir si l'effluent est dilué à moins de 1 % dans

un rayon de 250 m de la zone d'évacuation, ce qui éliminerait la nécessité de faire une ESEE pour les poissons.

Le programme de SEE exige que la délimitation du panache de l'effluent soit effectuée une fois seulement, à condition qu'il n'y ait pas de changements appréciables dans les caractéristiques de l'effluent, la quantité évacuée, la méthode ou le lieu d'évacuation, ou dans les caractéristiques hydrauliques ou hydrographiques du milieu récepteur. La délimitation du panache doit être examinée à l'étape de la conception de chaque cycle subséquent du SEE afin de déterminer s'il est nécessaire d'effectuer une nouvelle délimitation. Il incombe à la fabrique de voir à ce qu'elle connaisse l'hydrographie des eaux réceptrices et à ce qu'elle possède les données suffisantes et la modélisation numérique nécessaire afin d'atteindre les objectifs de la délimitation du panache pour le SEE.

2.0 DISPERSION DE L'EFFLUENT

La délimitation du panache est déterminée par des renseignements sur les caractéristiques de l'effluent, les conditions d'évacuation et la nature du milieu récepteur.

2.1 Concept initial de la dispersion de l'effluent

Un concept initial de la dispersion de l'effluent devrait être formulé afin d'aider à planifier les études sur le terrain. Cette « première tentative » pour connaître le comportement de l'effluent dans les eaux réceptrices nécessite certains renseignements de base, dont les suivants :

- les caractéristiques de l'effluent, dont la densité et la vitesse;
- le nombre d'effluents, l'endroit, l'orientation, la profondeur et le type (p. ex., diffuseur, fossé);
- les caractéristiques des eaux réceptrices, y compris la densité, les particularités de l'écoulement et les facteurs saisonniers ou lunaires (p. ex., le niveau d'eau et le cycle des marées);
- le calcul de la dilution initiale de l'effluent lorsque le panache arrive à la surface, ce qui peut se faire à l'aide d'un modèle numérique simple, comme Visual Plumes, de l'EPA des États-Unis, ou le modèle Cormix.

On devrait faire un croquis du comportement prévu du panache montrant la dilution initiale et la dilution subséquente auxquelles on s'attend compte tenu des particularités de l'emplacement au voisinage du lieu de rejet et plus loin. Il est important à cette étape de déterminer le type de modélisation numérique (unidimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle) qui sera nécessaire pour analyser les données de terrain et les extrapoler pour décrire l'étendue maximale et les concentrations moyennes à long terme dans les eaux réceptrices. Le type de modélisation numérique nécessaire peut dicter les données qui devront être recueillies pour l'étude sur le terrain.

La dispersion de l'effluent dans le milieu récepteur est un processus en deux étapes comprenant la dilution initiale au voisinage du point d'entrée de l'effluent, suivie d'une deuxième dilution à une plus grande distance du lieu de rejet. La dilution initiale de l'effluent dépend de la méthode et de la dynamique de l'entrée de l'effluent ainsi que de la différence de densité entre l'effluent et les eaux réceptrices. L'entrée de l'effluent est ordinairement visualisée comme un jet montant (pas nécessairement vertical) vers la surface de l'eau où il rencontre une interface ascendante pour former un panache qui se déplace en aval et emporte l'effluent. La figure 2.1 montre des exemples de dilution initiale de l'effluent, ce qui est utile pour formuler un concept initial de dispersion de l'effluent.

La dilution initiale au voisinage du lieu de rejet peut être déterminée approximativement au moyen de modèles numériques (p. ex., Cormix) ou de nomogrammes (représentations graphiques d'équations à plusieurs variables, comme celles qu'on peut trouver dans Wood *et al.*, 1993). Une seconde dilution du panache se produit par mélange horizontal et vertical. Dans la plupart des cas, la dispersion horizontale de l'effluent se fait au moins dix fois plus rapidement que le mélange vertical de sorte que le panache peut se disperser horizontalement sur une certaine distance avant d'être entièrement mélangé dans la colonne d'eau. Il est donc important de tenir compte de la profondeur de la dispersion au cours des études sur le terrain et d'incorporer cette donnée dans la modélisation numérique afin de savoir où se trouve le panache dans la colonne d'eau et où il entre en contact avec le substrat du fond.

En général, la vitesse de l'effluent évacué est plus grande que celle des eaux réceptrices, ce qui produit une contrainte de cisaillement avec ces dernières. Cette contrainte donne lieu à un mélange turbulent. La dilution initiale continue jusqu'à ce que l'énergie de l'évacuation se dissipe et que la vitesse du panache

soit égale à celle des eaux réceptrices. À ce moment, la turbulence « naturelle » des eaux réceptrices a pour effet de diluer davantage ou de mélanger l'effluent avec ces dernières.

En plus de présenter des différences de vitesse, la plupart des eaux réceptrices et des effluents n'ont pas la même densité. L'effluent est généralement moins dense que les eaux réceptrices (souvent parce que sa température est plus élevée, ou lorsqu'un effluent d'eau douce est rejeté dans des eaux marines) et a donc tendance à monter dans la colonne d'eau, ce qui produit une autre contrainte de cisaillement semblable à celle qui résulte d'une différence de vitesse.

Le plus souvent, le cisaillement résultant à la fois de la vitesse et de la densité produit une impulsion ascendante suffisante pour que le panache de l'effluent arrive à la surface de l'eau. Si la densité du mélange du panache est encore inférieure à celle des eaux réceptrices, ce dernier demeurera à la surface. S'il est légèrement supérieur, il descendra au niveau où il existe une masse d'eau de même densité et sera ensuite transporté par cette masse d'eau à laquelle il se mélangera.

Après la dilution initiale, le panache de l'effluent se déplace en général horizontalement avec les eaux réceptrices. La dilution et la dispersion ultérieures dépendent du milieu récepteur et des conditions climatiques (voir la section 2.4).

Voici d'autres sources de conseils sur la conceptualisation de la dispersion des effluents : Bishop (1984), Day (1975), Jirka *et al.* (1996), Neshyba (1987), Roberts (1989), Roberts et Ferrier (1996), Sorensen (1978), Thomann et Mueller (1987), Tsanis et Valeo (1994), Williams (1985) et Wood (1993).

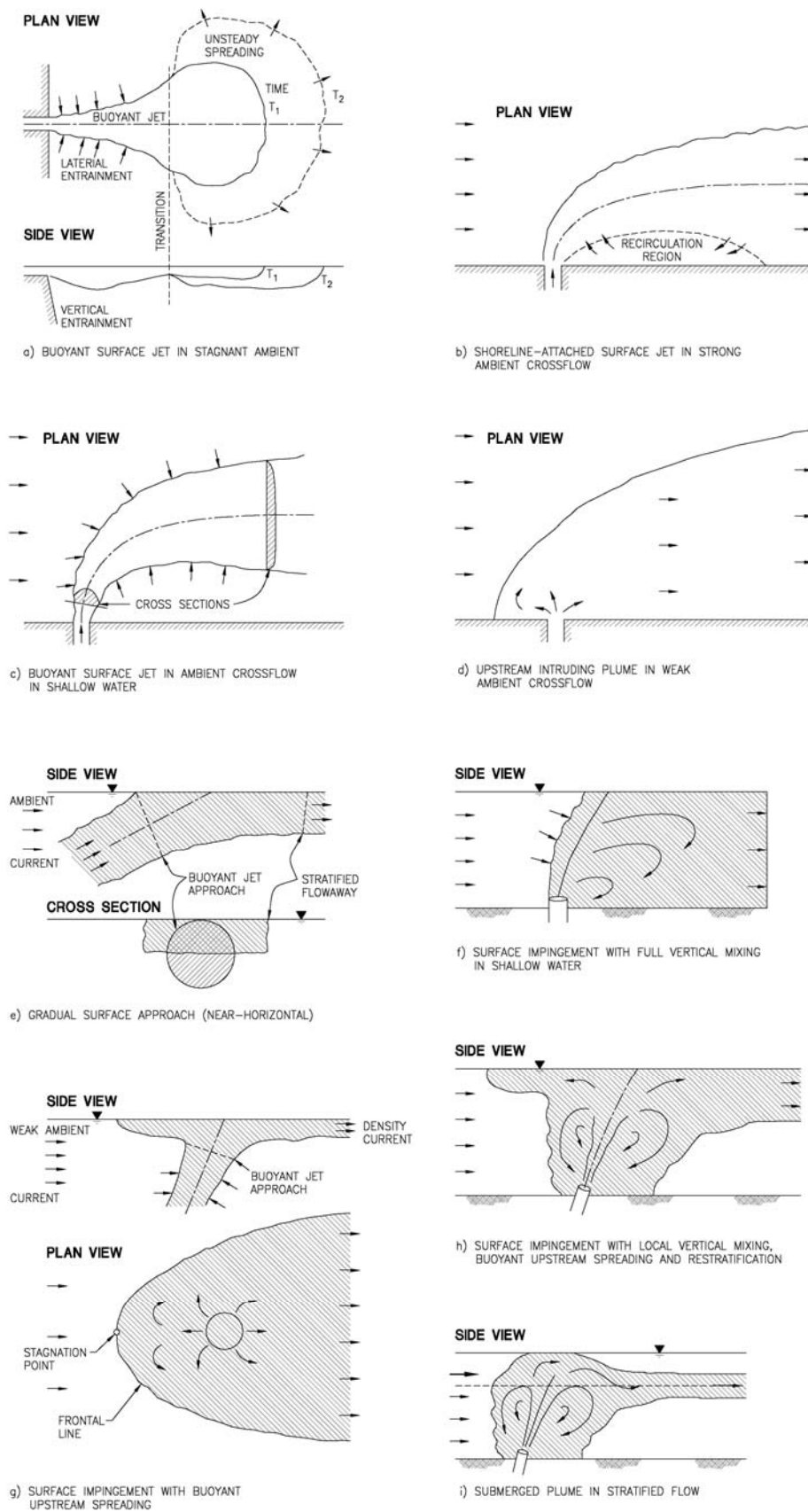


Figure 2.1 Exemples de comportement du panache dans les milieux récepteurs (Jirka *et al.*, 1996, modifié)

a) Jet de surface flottant dans un milieu stagnant

PLAN VIEW = VUE DE DESSUS

BUOYANT JET = JET FLOTTANT

LATERAL ENTRAINMENT = ENTRAÎNEMENT LATÉRAL

UNSTEADY SPREADING = ÉTALEMENT INSTABLE

TIME = TEMPS

TRANSITION = TRANSITION

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

VERTICAL ENTRAINMENT = ENTRAÎNEMENT VERTICAL

b) Jet de surface littoral dans un milieu à fort écoulement transversal

PLAN VIEW = VUE DE DESSUS

RECIRCULATION REGION = ZONE DE RECIRCULATION

c) Jet de surface flottant dans un milieu à écoulement transversal en eau peu profonde

PLAN VIEW = VUE DE DESSUS

CROSS SECTIONS = COUPES TRANSVERSALES

d) Panache arrivant en amont dans un milieu à faible écoulement transversal

PLAN VIEW = VUE DE DESSUS

e) Approche graduelle en surface (quasihorizontale)

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

AMBIENT CURRENT = COURANT AMBIANT

CROSS SECTION = COUPE TRANSVERSALE

BUOYANT JET APPROACH = APPROCHE DU JET FLOTTANT

STRATIFIED FLOWAWAY = CONTRE-COURANT STRATIFIÉ

f) Incidence en surface et mélange vertical complet en eau peu profonde

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

g) Incidence en surface et étalement flottant en amont

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

WEAK AMBIENT CURRENT = FAIBLE COURANT AMBIANT

BUOYANT JET APPROACH = APPROCHE DU JET FLOTTANT

DENSITY CURRENT = DENSITÉ, COURANT

PLAN VIEW = VUE DE DESSUS

STAGNATION POINT = POINT D'ARRÊT

FRONTAL LINE = LIGNE FRONTALE

h) Incidence en surface, mélange vertical local, étalement flottant en amont et restratification

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

i) Panache submergé dans un écoulement stratifié

SIDE VIEW = VUE LATÉRALE

2.2 Caractéristiques de l'effluent

Les principales caractéristiques de l'effluent qui influent sur la dispersion initiale sont sa densité et sa vitesse comparativement aux eaux réceptrices (voir la section 2.1). La vitesse influe sur le degré de cisaillement et donc sur le mélange qui se produit lorsque l'effluent est évacué. La densité de l'effluent influe sur la vitesse ascensionnelle et la position du panache dans la colonne d'eau. La vitesse peut être mesurée comme le débit (quotidien moyen) de l'effluent, et il faut indiquer si l'évacuation est continue ou discontinue (p. ex., par intermittence). La vitesse de l'écoulement par chaque tuyau d'évacuation devrait être prise en compte et comparée à celle des eaux réceptrices. La densité de l'effluent devrait être déterminée. Les renseignements supplémentaires sur l'effluent en vue de la délimitation du panache peuvent comprendre la présence de traceurs, qui sont des substances se retrouvant naturellement dans l'effluent, comme les acides résiniques, le sodium et le magnésium. Ces traceurs peuvent servir à suivre la dispersion. Les valeurs de l'effluent pour les deux dernières années devraient être prises en compte.

2.3 Conception du point de rejet de l'effluent

La configuration et la performance du point de rejet devraient être décrites. À l'aide des données existantes, comme les derniers rapports d'inspection sous-marine du point de rejet, la performance devrait être comparée aux croquis théoriques ou d'après exécution. Pour déterminer la largeur du panache, l'emplacement, la longueur et l'orientation du point de rejet devraient être connus. Il est aussi important de tenir compte de la profondeur à laquelle se retrouve l'effluent dans la colonne d'eau par rapport aux gradients d'écoulement et de densité qui peuvent exister.

2.4 Éléments du milieu récepteur qui influent sur la dispersion du panache

On devrait indiquer le débit et les courants, les caractéristiques chimiques et physiques de l'eau du milieu récepteur ainsi que les variations temporelles et spatiales de ces facteurs. Ces renseignements sont nécessaires pour formuler un concept initial de la dispersion de l'effluent, ainsi que pour planifier l'étude sur le terrain. Les conditions climatiques devraient être résumées parce qu'elles peuvent influencer sur le comportement du panache.

Les paramètres de terrain et leur importance générale pour la délimitation des panaches sont décrits ci-dessous. Des conseils plus détaillés au sujet de certains milieux récepteurs sont présentés à la section 5.

2.4.1 Écoulements d'eau douce

Les écoulements minimaux, maximaux et moyens d'eau douce dans le milieu récepteur devraient être décrits. Ces données sont importantes pour tous les milieux récepteurs, à l'exception de ceux qui sont strictement marins, sans apport local d'eau douce. Les écoulements d'eau douce influent sur la dilution initiale du panache de même que sur son mélange ultérieur horizontal et vertical. La direction de l'écoulement, qui peut varier en fonction de la profondeur et de l'emplacement, influe sur l'orientation du panache. En général, les études sur le terrain sont réalisées quand l'écoulement annuel est près du minimum, lorsque l'effluent est peu dilué et si le panache est important comparativement à d'autres périodes de l'année. Les résultats de terrain peuvent être extrapolés afin de calculer les écoulements moyens et maximaux pour la dispersion de l'effluent.

2.4.2 Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau minimal, maximal et moyen devraient être indiqués pour tous les milieux récepteurs. Le niveau d'eau influe sur la dilution initiale et le volume d'eau disponible pour la seconde dispersion. Le niveau d'eau peut fluctuer quotidiennement (dans les zones intertidales) ou selon la saison.

2.4.3 Qualité de l'eau

Les mesures de la qualité des eaux réceptrices qui peuvent être utiles pour les études de délimitation du panache comprennent la température, la densité, la salinité (dans le cas des études estuariennes et marines), la couleur, les solides en suspension et les substances qui peuvent servir de traceurs de l'effluent. Toutes ces mesures peuvent permettre de suivre le mouvement de l'effluent dans le milieu récepteur, tel qu'indiqué dans les sections 3 et 5.

2.4.4 Variation de la température et de la salinité

Comme la température et la salinité influent toutes deux sur la densité des eaux réceptrices, leur structure et leur variation spatio-temporelle dans la masse d'eau sont importantes pour tous les aspects de la réalisation d'une étude de délimitation du panache. Lors de l'évacuation, les panaches dont la température est plus élevée ou la salinité moins grande que celles des eaux réceptrices subiront une poussée thermique qui les fera monter à la surface, créant ainsi un cisaillement qui occasionnera un mélange et une dilution initiaux. La dilution et la dispersion ultérieures seront aussi influencées par la température et la salinité des eaux réceptrices. La température et la salinité peuvent varier horizontalement et verticalement sur de courtes périodes (p. ex., dans les zones intertidales) ou de longues périodes (p. ex., selon la saison).

2.4.5 Marées et seiches

Il est important de connaître le moment opportun et l'ampleur des marées lorsqu'on planifie l'étude sur le terrain pour les eaux estuariennes et marines. En plus des eaux réceptrices marines et estuariennes, les grands lacs peuvent aussi avoir un cycle des marées, même s'il est relativement moins important. Les grands plans d'eau, comme les lacs, les estuaires et les fjords, peuvent aussi laisser paraître les effets des ondes de tempête et des seiches à la fois dans l'élévation de la surface et les ondes internes. Tous ces facteurs influent sur la direction et le type du mélange de l'effluent.

2.4.6 Conditions climatiques

Le vent et la glace peuvent influencer considérablement sur la dispersion de l'effluent, mais la température de l'air, l'état des glaces et l'action des vagues peuvent tous influencer sur le comportement du panache. Le vent qui agit sur d'importants plans d'eau peut créer des courants et des vagues. La glace peut influencer sur la dispersion de deux façons : en réduisant les courants dus aux vents et en accroissant la turbulence par la création d'un obstacle solide à l'écoulement. Les conditions climatiques sont discutées plus en détail à la section 5.

2.4.7 Facteurs confusionnels

Même si la délimitation du panache a pour but de déterminer les conditions normales de l'évacuation et du milieu récepteur, certains facteurs potentiellement confusionnels peuvent influencer sur l'interprétation des résultats des études sur le terrain. Ces facteurs sont dus à des événements qui débordent les normes opérationnelles ou environnementales ou sont transitoires, et ils peuvent donner lieu à un changement temporaire de la position plus « normale » des limites du panache. Comme ces facteurs peuvent influencer

sur la dispersion de l'effluent, leur possibilité devrait être envisagée lorsqu'on réalise une étude de délimitation du panache. Voici des exemples de ces facteurs :

- des bouleversements dans le traitement de l'effluent et le procédé d'évacuation des fabriques de pâtes qui peuvent donner lieu à un changement temporaire dans la qualité ou la quantité de l'effluent;
- des intempéries, en particulier le régime des vents, qui créent des courants inhabituels pour le milieu récepteur;
- des événements saisonniers, comme l'état des glaces ou la stratification thermique, qui peuvent occasionner une représentation trompeuse du comportement du panache;
- la régularisation du débit en vue de la production d'énergie hydroélectrique.

3.0 ÉTUDE PAR TRACEURS SUR LE TERRAIN

Le travail sur le terrain comprend le suivi de la dispersion de l'effluent au moyen d'un traceur qui s'y retrouve naturellement ou est ajouté. Cette étude a pour but d'obtenir suffisamment de données de terrain sur un « instantané » de la dispersion de l'effluent afin qu'une modélisation numérique puisse ensuite servir à calculer l'étendue maximale du panache de l'effluent à une dilution $\geq 1\%$ ainsi que l'étendue moyenne à long terme des panaches de l'effluent à une dilution $\geq 1\%$ et $\geq 0,1\%$.

3.1 Membres du groupe d'étude

Le tableau 3.1 décrit les rôles et les responsabilités des membres du groupe d'étude qui réalise une étude de délimitation du panache, y compris une étude par traceurs sur le terrain.

Tableau 3.1 Rôles et responsabilités du groupe d'étude

Rôle	Responsabilité
Chef du groupe d'étude	Scientifique ou ingénieur qui dirige et représente le groupe d'étude et sert d'agent de liaison avec les autorités locales et la fabrique de pâtes et papiers.
Surveillant sur le terrain	Scientifique, ingénieur ou technicien possédant une bonne expérience pratique sur le terrain, qui dirige et effectue le travail sur le terrain.
Surveillant de l'injection du traceur	Scientifique, ingénieur ou technicien qui surveille l'injection du traceur dans l'effluent. Il peut être accompagné d'un assistant technique.
Équipage des embarcations (un ou deux)	Il faut au moins un équipage pour effectuer le travail sur le terrain. Une deuxième embarcation est utile pour aider à faire le suivi de la drogue, s'il est fait en même temps que l'étude par traceurs, ainsi que pour venir en aide à l'embarcation principale pendant cette étude. Le surveillant sur le terrain peut être un membre de l'équipage.
Modélisateur numérique	Scientifique ou ingénieur possédant de l'expérience en modélisation numérique du comportement des panaches.

3.2 Communications

Il est important de contacter les autorités locales pour les aviser des activités prévues et de la présence potentiellement visible d'un colorant dans l'eau. Les autorités à contacter dépendent de l'endroit, mais peuvent comprendre une ou plusieurs des suivantes : l'autorité portuaire ou le capitaine de port local, les plus proches bureaux d'Environnement Canada et de Pêches et Océans, le plus proche bureau du ministère provincial de l'Environnement ou des Ressources naturelles, l'hôtel de ville, les groupes de pêcheurs locaux, les organisations environnementales non gouvernementales et, peut-être, la station radiophonique locale. Au cours du travail sur le terrain, il est important que le chef du groupe, l'équipage chargé de l'injection du traceur et l'équipage des embarcations communiquent continuellement entre eux.

3.3 Embarcations

Le type de coque et l'unité de propulsion devraient réduire au minimum la perturbation et le mélange du panache lorsque l'embarcation le traverse. Bien que la vitesse soit généralement très souhaitable, il faut faire preuve de jugement pour savoir dans quelle mesure elle peut mettre en danger certaines des autres exigences. Un sonar d'immersion enregistreur installé sur la coque, conjugué à un appareil GPS, est très utile. Un radar est aussi recommandé dans les zones côtières et marines.

Lorsqu'on utilise un traceur colorant, l'embarcation devrait être munie d'un tangon fermement attaché à l'étrave (au moyen d'un câble de retenue) afin de placer le tube ou la tête de prélèvement du fluorimètre à une profondeur préétablie dans les eaux réceptrices. Le tube ou la tête devrait être placé de façon à éviter les vagues d'étrave, à être facile à détacher et à monter à bord ou à replacer à une profondeur différente. Il faut utiliser un dépresseur si le tube est tracté à plus de 2 m de profondeur. En général, un appareil tracté à l'arrière n'est pas recommandé parce que l'échantillonnage est perturbé par le sillage de l'embarcation et aussi parce que la profondeur à laquelle il est placé est très sensible à la vitesse de l'embarcation et à la longueur de la touée.

Si des batteries de 12/24 V à haute efficacité sont nécessaires pour le fonctionnement des appareils, il est recommandé qu'elles soient indépendantes de celles de l'embarcation, mais le même chargeur peut être utilisé. Il peut être utile qu'une deuxième embarcation s'occupe des drogues et ramasse (au besoin) les bouteilles d'échantillons instantanés.

3.4 Localisation (GPS)

La localisation des stations d'échantillonnage, des drogues et du trajet qu'empruntent les embarcations par rapport au lieu de rejet est importante. L'utilisation d'un appareil GPS (système mondial de localisation) peut être la méthode la plus convenable et précise d'obtenir et d'enregistrer des renseignements sur la localisation. La précision de l'appareil devrait être supérieure à $\pm 2,5$ m, mais elle dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la présence de satellites de navigation (entretenus par le U.S. Department of Defense), les conditions ambiantes qui peuvent occasionner un « brouillage » des signaux transmis par satellite et la correction différentielle des signaux. Le GPS différentiel (DGPS) est fourni par des récepteurs fixes situés à des endroits connus et entretenus par la Garde côtière du Canada pour les eaux côtières canadiennes de l'Atlantique et du Pacifique, ainsi que pour la voie maritime du Saint-Laurent. Sur les Grands Lacs, le DGPS est fourni par des récepteurs canadiens et américains. On peut obtenir une plus grande précision en prenant la moyenne d'au moins deux résultats fournis par les récepteurs. À certains endroits, des méthodes de relevé plus classiques, comme la triangulation, peuvent être également efficaces pourvu que la précision visée soit obtenue.

3.5 Choix du traceur

Les traceurs idéaux pour les panaches possèdent les caractéristiques suivantes :

- ils ne sont pas nuisibles pour l'environnement (traceurs colorants);
- leur concentration de fond est presque nulle;
- leur vitesse de dégradation pendant le travail sur le terrain est très faible (substances persistantes);
- ils se mélangent librement à l'effluent et aux eaux réceptrices;
- ils se mesurent facilement sur le terrain à de faibles concentrations;
- ils sont libérés à une vitesse proportionnelle au taux de rejet de l'effluent.

On peut utiliser deux types de traceurs : 1) les traceurs qui se retrouvent naturellement dans l'effluent à des concentrations connues et relativement constantes et 2) ceux qui sont ajoutés à l'effluent pour la durée de l'essai.

Le traceur ajouté actuellement privilégié est la rhodamine WT, un colorant fluorescent qui est le plus souvent utilisé pour les études de SEE. Cette substance possède les caractéristiques du traceur parfait. On a démontré qu'elle n'était pas cancérogène et qu'elle était peu susceptible d'être toxique et d'avoir des effets nocifs dans l'environnement aquatique (Parker, 1973). Elle ne présente pas de danger lorsqu'elle est manipulée avec soin, il est généralement possible de l'obtenir, et elle peut être facilement mesurée sur le terrain à des concentrations inférieures à 1 µg/L. Pour des raisons pratiques, elle devrait être obtenue sous forme liquide. La rhodamine WT est considérée comme une substance persistante la plupart du temps et sa concentration de fond est généralement presque nulle. Comme les traceurs fluorescents, cette substance peut être altérée par certains types de solides et d'agents chimiques (p. ex., les agents de blanchiment, les sulfures, la lumière solaire et les microorganismes). Le chlore élémentaire détruit rapidement la fluorescence de la rhodamine WT. Cet effet est particulièrement remarquable dans l'eau de mer parce que le brome exacerbe l'action du chlore. Heureusement, le chlore élémentaire n'existe que de façon transitoire en solution. Le chlore présent sous forme de NaCl dans l'eau de mer n'a pas d'effet sur la fluorescence. Il est recommandé d'effectuer des essais préliminaires portant sur l'interaction entre le colorant et l'effluent afin de déterminer la stabilité du traceur et le coefficient de perte à utiliser avec le traceur.

L'utilisation de traceurs déjà présents dans l'effluent est avantageuse parce qu'ils ont atteint l'équilibre dans le milieu récepteur. Les effluents de la plupart des fabriques contiennent divers constituants qui pourraient servir de traceurs pour délimiter la zone de mélange, comme la couleur, le sodium, le chlore, le magnésium, le tanin et les lignines, la conductivité et le chloroforme. Une évaluation des constituants de l'effluent pouvant servir de traceurs devrait tenir compte des facteurs suivants : la détectabilité, la possibilité d'être mesurés en temps réel, la vitesse de dégradation, la variabilité de la concentration dans l'effluent ainsi que la variabilité des concentrations de fond dans les eaux réceptrices.

Voici d'autres sources de conseils sur le choix et l'utilisation d'un traceur : Feunstein (1963), Ferrier *et al.* (1993), Kilpatrick et Cobb (1985) et Wright et Collings (1964).

3.6 Injection du traceur (traceur ajouté)

Le système d'évacuation de l'effluent devrait être inspecté et le point d'injection du colorant choisi. Les principaux facteurs à prendre en compte dans le choix du point d'injection devraient être les suivants :

- la longueur de mélange avant le point de rejet final devrait être convenable (au moins 40 fois le diamètre de la conduite d'évacuation);
- il ne devrait pas y avoir d'autres rejets après le point d'injection;
- un orifice d'accès doit permettre de prélever les échantillons du traceur entièrement mélangé avant le point de rejet final.

La pompe d'injection du colorant devrait être réglée au laboratoire pour confirmer que la dose volumétrique souhaitée est obtenue. Il est aussi important de déterminer le temps total qui s'écoule entre l'introduction du traceur dans le tube d'aspiration de la pompe et le moment où il atteint l'effluent, ce qui comprend le temps qu'il faut pour amorcer le système d'injection et pour que le colorant atteigne le point de rejet final à partir du point de dosage.

Un système d'injection à débit continu est préférable pour simuler le fonctionnement d'un système d'évacuation dont le chargement est proportionnel au débit et continu. Ce type de système d'injection rend les mesures sur le terrain plus fiables. On devrait surveiller le taux de rejet de la pompe en fonction de la charge de la batterie ainsi que l'effet de la température froide sur le voltage de cette dernière (si c'est utile).

Dans le cas des fabriques de pâtes qui évacuent leur effluent en discontinu, il faut mélanger le colorant avant l'évacuation et accorder suffisamment de temps pour que le mélange soit complet. Des échantillons doivent être prélevés régulièrement dans la conduite d'évacuation pendant la période de rejet.

Dans le cas d'un traceur ajouté dont les concentrations de fond sont nulles, la quantité nécessaire peut être calculée comme suit :

$$M = C_x \% q_{\text{eff}} \% T \% \%_{\text{eff}} \% 3\ 600 \text{ secondes/heure}$$

où :

- M = quantité de traceur nécessaire pour l'essai (en kg)
- C_x = concentration de la limite de détection du traceur (p. ex., 1 % 10^{-9} kg/L ou 1 ppb)
- q_{eff} = débit de l'effluent (p. ex., 1 000 L/sec)
- T = durée de l'essai (p. ex., 12 heures)
- $\%_{\text{eff}}$ = limite de dilution du panache en % de la concentration de l'effluent (p. ex., pour une dilution de 1:100, utilisez 100)

Le taux d'injection (en kg/h) est calculé en divisant la quantité de traceur nécessaire par la durée de l'essai. Il n'est pas nécessaire de tenir compte de la concentration du traceur dans le mélange d'injection (généralement 20 % en poids) parce que la limite de détection est fondée sur le mélange initial dilué. Les étalons de dilution sont généralement préparés en fonction du poids. Pour les préparer en fonction du volume, la densité exacte du traceur doit être utilisée. Dans le cas de la rhodamine WT, elle varie entre 1,15 et 1,2 et est généralement de 1,19.

3.6.1 Durée de l'injection du colorant

Le colorant doit être injecté suffisamment longtemps pour établir une concentration à l'équilibre dans les eaux réceptrices et permettre à l'équipe sur le terrain d'effectuer l'échantillonnage. La durée de l'injection dépend de l'endroit. Lorsque le débit est unidirectionnel, l'injection devrait continuer au moins jusqu'à ce que le panache ait été délimité. Dans le cas des milieux récepteurs plus dynamiques, le temps d'injection doit être accru, notamment lorsque le panache est instable. Dans les lacs et les cours d'eau, il se peut que l'injection doive continuer pendant plusieurs heures. Dans les estuaires, l'injection devrait continuer pendant au moins un cycle des marées, c'est-à-dire commencer à marée basse, se poursuivre à marée haute et se terminer à marée basse (normalement, 13 heures). Dans les environnements marins côtiers et les fjords où l'eau déjà polluée peut être recirculée de nouveau dans le panache, il se peut que le colorant doive être injecté pendant plusieurs cycles des marées. Il faut alors décider s'il vaut la peine de consacrer du temps et des efforts pour continuer d'injecter le colorant ou s'il est préférable d'avoir recours à la force prédictive de la modélisation numérique.

Le terme « bouchon » est utilisé lorsqu'un volume connu et généralement faible de colorant, possiblement dilué avec les eaux réceptrices, est introduit dans la colonne d'eau au niveau du panache prévu et en produisant le moins possible de perturbation. Il faut prendre bien soin de s'assurer que le liquide contenant le colorant a la même densité que les eaux réceptrices où il est déversé. Le mouvement et les dispersions ultérieures de cette flaque de colorant sont surveillés de la même façon qu'un panache, et des coefficients de dispersion peuvent être calculés. Dans ce cas, un objectif secondaire consiste à déterminer l'étendue de la flaque de colorant et les concentrations de ce dernier à intervalles régulièrement fixés. La quantité de colorant dont on calcule qu'elle est présente à chaque intervalle de temps devrait se rapprocher de celle qui a été rejetée, ce qui permet de vérifier la qualité de la délimitation de la flaque de colorant. L'analyse du bouchon ne décrit pas de façon satisfaisante la dispersion de l'effluent, mais elle peut fournir au sujet des caractéristiques de la dispersion localisée des renseignements utiles pouvant servir à la modélisation numérique du comportement de l'effluent.

3.7 Appareils de mesure de la qualité de l'eau

Les paramètres de la qualité de l'eau et les concentrations du traceur devraient être mesurés sur place au moyen d'une sonde immergée dans l'eau. Les paramètres à mesurer comprennent la fluorescence (traceurs colorants), la température et la salinité (eaux estuariennes et marines). Le point d'échantillonnage, la date et la profondeur de l'immersion de la sonde de prélèvement doivent être enregistrés; il en est de même pour les observations visuelles, s'il y a lieu de le faire. Il est recommandé de mesurer simultanément le plus grand nombre possible de paramètres désirés.

3.7.1 Fluorimètre

Le fluorimètre mesure la fluorescence des colorants injectés; il doit donc être propre et fiable. Puisque les lectures du fluorimètre doivent être converties en concentrations dans l'effluent, une courbe d'étalonnage propre au site est nécessaire et sera produite en laboratoire. La figure 3.1 montre une courbe d'étalonnage type.

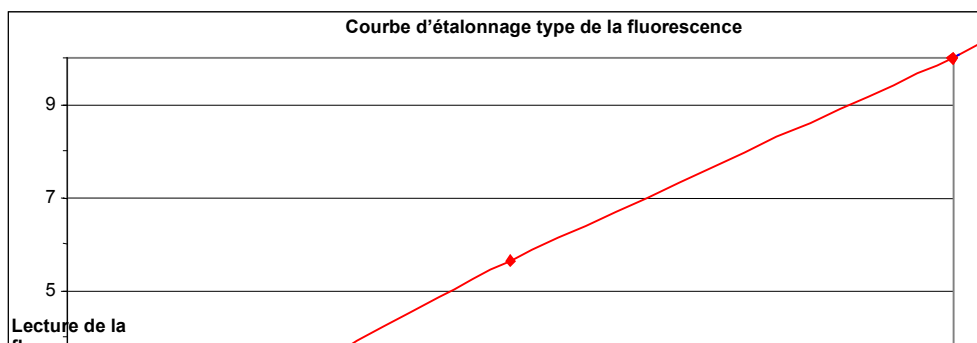


Figure 3.1 Courbe d'étalonnage type reliant la fluorescence à la concentration du traceur colorant

La relation entre la concentration de colorant et la concentration correspondante dans l'effluent doit être établie avant le début des mesures sur le terrain, afin qu'il soit possible de déterminer sur place à quelles lectures de la fluorescence les concentrations dans l'effluent ont été trouvées. En outre, la limite de détection du colorant par le fluorimètre dans les eaux réceptrices doit être déterminée. Cette concentration est nécessaire pour le calcul du taux d'injection du colorant (voir l'équation de la section 3.6).

Pour tracer la courbe d'étalonnage, une série de dilutions du colorant devrait être préparée pour les intervalles de concentrations prévus. Des séries de dilutions distinctes doivent être préparées pour les mélanges de colorant avec les eaux réceptrices, l'effluent de la fabrique de pâtes et l'eau propre. Lorsque les eaux réceptrices sont salées, il faut utiliser au moins une salinité maximale et minimale. Toutes les variations entre les types d'eau utilisés devraient être enregistrées et prises en compte dans l'interprétation des résultats de terrain.

Les dilutions varient généralement entre $0,1 \text{ } 10^{-9} \text{ kg/L}$ (0,1 ppb) et 10^{-6} kg/L (1 ppm). Les lectures de la fluorescence devraient indiquer une corrélation linéaire avec la concentration du colorant dans l'intervalle d'intérêt. Une analyse de régression donne l'équation mathématique nécessaire pour convertir les lectures de la fluorescence en concentrations dans l'effluent.

3.8 Matériel utilisé pour suivre les courants et le mouvement de l'effluent

Les drogues et les courantomètres sont les principaux types de matériel pouvant servir à suivre le mouvement des courants et donc celui d'un effluent. Chaque type de matériel est décrit ci-dessous.

3.8.1 Drogues

Les drogues servent à déterminer le mouvement de l'eau dans le panache de l'effluent ainsi que la vitesse et la direction d'autres courants sur le terrain. Les drogues peuvent aussi aider à savoir où prélever des échantillons des traceurs, notamment lorsque les panaches se trouvent sous la surface de l'eau. Les drogues mises à l'eau au voisinage du point de rejet dérivent avec le courant et indiquent où le panache est transporté pourvu qu'il demeure dans la même masse d'eau. Si le panache se trouve sous la surface de la masse d'eau, la drogue doit être conçue (munie d'une pesée) pour lui permettre de demeurer dans la masse d'eau qui convient. La figure 3.2 montre des exemples de drogues.

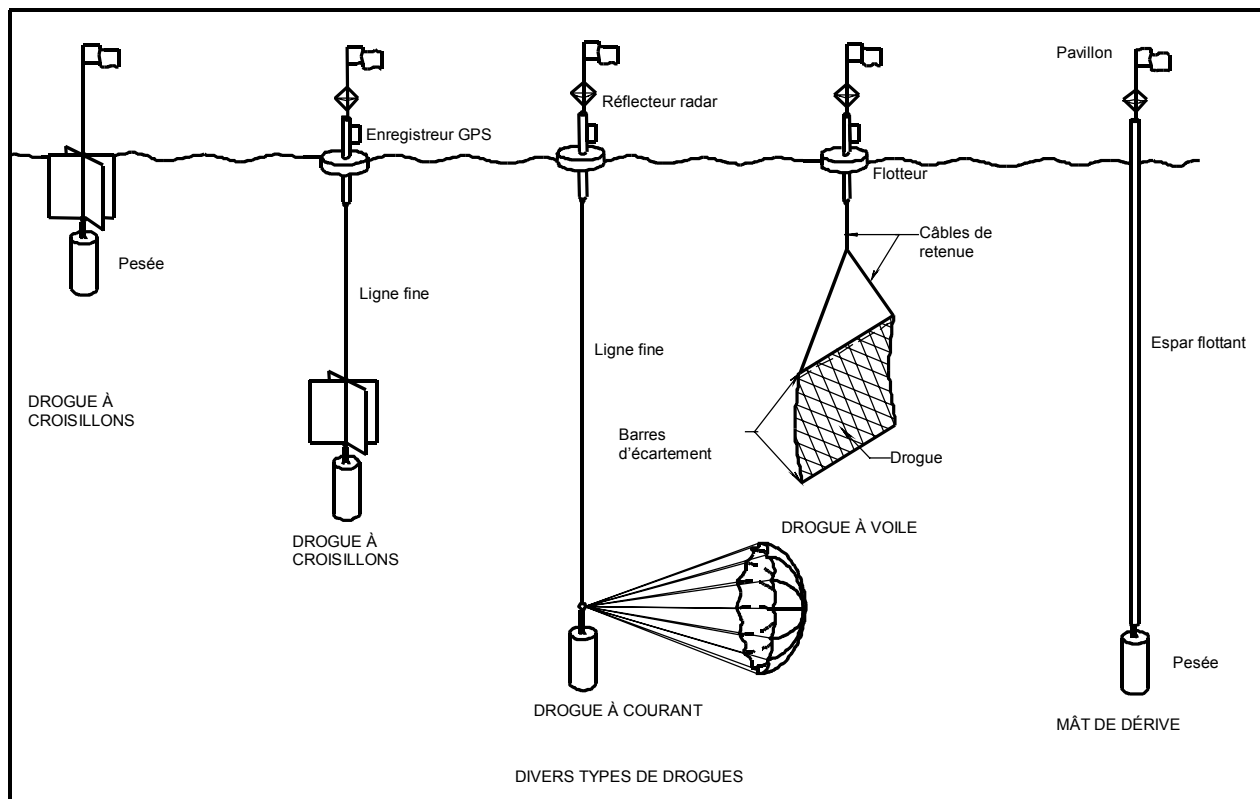


Figure 3.2 Divers types de drogues utilisées pour la délimitation du panache (adapté du Manuel canadien des marées)

Les drogues qui servent à suivre les eaux de surface devraient avoir une structure relativement simple; par exemple, la « drogue à croisillons » (figure 3.2) comprend deux feuilles de contreplaqué dont la partie supérieure demeure juste au-dessous de la surface des eaux (à 50 cm ou moins) à l'aide d'une pesée. Les dimensions de chaque palette ne devraient pas être inférieures à environ 30 cm, mais la drogue peut être construite à une échelle assortie aux conditions. L'emplacement visuel de la drogue est généralement indiqué par une tige à pavillon qui sort de l'eau ou par un flotteur de surface, bien que des indicateurs acoustiques puissent aussi être utilisés (voir plus loin). L'utilisation d'un flotteur de surface avec une réserve de flottabilité permet d'assurer que la drogue reste toujours à la profondeur convenable dans la colonne d'eau. Il est important que la résistance au vent des indicateurs ou la traînée du flotteur de surface soit le plus faible possible comparativement à la drogue elle-même. Lorsque l'action des vagues ou la turbulence sont considérables, la distance entre le flotteur de surface et la drogue doit être augmentée (voir la « drogue à croisillons » avec une hampe plus longue, figure 3.2) afin que la partie supérieure de la drogue ne sorte pas de l'eau et soit influencée par les forces du vent. Pour vérifier si la drogue demeure dans la même masse d'eau que le panache, on peut mesurer un paramètre simple (p. ex., la température ou la salinité) au voisinage de la drogue.

Certaines drogues devraient être placées dans l'eau pour déterminer le mouvement de l'eau de surface et quelques-unes devraient être installées à une plus grande profondeur, notamment si le panache peut plonger ou être emprisonné dans une couche inférieure. Le trajet des drogues donnera une confirmation visuelle de la trajectoire possible du panache. Dans les eaux estuariennes et marines, les drogues doivent être larguées dans la zone d'évacuation à marée haute, à marée basse et aux deux marées moyennes. Puisqu'il est souhaitable qu'un certain nombre des premières drogues puissent demeurer dans l'eau

jusqu'à la fin, un nombre important de drogues peut être nécessaire. Des points tracés sur des graphiques à bord des embarcations peuvent servir à suivre le mouvement des drogues, ce qui devrait grandement aider à récupérer ces dernières.

Il arrive que le panache demeure sous la surface de l'eau ou plonge par la suite. Dans les deux cas, il se déplace en dessous d'une masse d'eau moins dense à la surface. Il est encore possible d'obtenir des renseignements utiles au moyen du même type de drogue si l'on prend soin de la munir d'une pesée afin que la densité soit la même que celle de l'eau déplacée du panache. Une ligne longue et lâche allant jusqu'au flotteur de surface de la drogue permettra de localiser approximativement cette dernière. Sinon, un localisateur acoustique peut être attaché à la drogue. Ces « drogues acoustiques » servent à suivre le mouvement des panaches submergés en haute mer et peuvent aussi être utilisées en eau moins profonde pour calculer la dérive des couches inférieures dans un fjord ou un grand lac (cette dérive ne peut être mesurée par la plupart des courantomètres). Compte tenu du mélange dans le panache, le localisateur acoustique suffira pour quelques kilomètres seulement parce que la densité dans le panache changera constamment à mesure qu'il se mélangera à sa limite supérieure avec l'eau de surface moins dense et à sa limite inférieure à l'eau profonde plus dense. Ces types de comportement du panache sont discutés plus en détail à la section 5.

3.8.2 Courantomètres

Les courantomètres peuvent servir à décrire l'hydrodynamique des eaux réceptrices et, en particulier, la variabilité spatiale des courants pour utilisation dans un modèle numérique. La plupart des courantomètres peuvent enregistrer la température aussi bien que la salinité, ce qui fournit des renseignements supplémentaires sur les types de masses d'eau qui se déplacent. Toutefois, les courantomètres entraînent généralement des coûts d'utilisation plus élevés que ceux des drogues dans les études de délimitation du panache. Les courantomètres sont particulièrement utiles dans le cas des grands lacs et des eaux marines où les courants sont giratoires, ou lorsque l'action du vent et des vagues peut être le principal déclencheur des courants. Dans ces milieux, les courantomètres peuvent être installés près de la surface de l'eau et à une profondeur moyenne pendant certaines saisons de l'année (au moins pendant 30 jours) pour décrire les courants. L'IEEE donne une bonne description des courantomètres modernes (2003).

Le courantomètre acoustique à effet Doppler est un appareil plus sophistiqué qui est polyvalent et a été utilisé dans des études de SEE. L'utilisation de ce type de courantomètre pour la délimitation du panache comporte des restrictions : il coûte cher, l'interprétation des résultats nécessite un hydrographe qualifié et la résolution des données obtenues à proximité des interfaces eau-air et eau-substrat du fond est faible lorsqu'on l'utilise à une grande profondeur (ce qui pose un problème lorsqu'on suit les panaches flottants qui ont tendance à se retrouver tout d'abord dans le premier mètre d'eau sous la surface).

3.9 Suivi de la dispersion de l'effluent

La présente section indique comment s'y prendre normalement pour suivre l'effluent dans un milieu récepteur à écoulement unidirectionnel simple, lorsque la rhodamine WT est utilisée comme traceur. D'autres conseils sont fournis à la section 5 pour certains types de milieux récepteurs : les cours d'eau, les petits lacs et les réservoirs de retenue, les grands lacs, les estuaires, les fjords et les eaux marines côtières. Si l'on utilise un autre type de traceur, il faudra apporter les modifications qui s'imposent à la

procédure recommandée. Les fabricants de fluorimètres et le U.S. Geological Survey (1996) donnent des renseignements détaillés sur l'utilisation de la rhodamine WT.

Lorsqu'une fabrique rejette plusieurs effluents, chacun d'entre eux doit être suivi séparément à différents moments afin de déterminer la configuration de chaque panache. La plupart du temps, le panache cumulatif peut être évalué au moyen de modèles numériques. Toutefois, comme la majorité des fabriques canadiennes ont réuni leurs effluents, un seul point de rejet est généralement important.

3.9.1 Prélèvement d'échantillons dans la zone de dilution initiale

Le prélèvement d'échantillons dans le panache ascendant est difficile et inutile aux fins de sa délimitation. Il devrait plutôt être concentré dans la zone où le panache arrive à la surface ou est freiné dans son ascension verticale. Ce point peut se trouver à plusieurs dizaines de mètres en aval du lieu de rejet. La variation de la concentration ou de la dilution peut atteindre 50 % au voisinage du point d'émergence. L'échantillonnage devrait être effectué pour confirmer la variabilité de la concentration de l'effluent à angle droit avec l'écoulement des eaux réceptrices de même que parallèlement à cet écoulement.

D'autres prélèvements devraient être effectués à angle droit avec l'écoulement à une distance d'environ 50 à 100 m de l'endroit en aval où le panache arrive à la surface afin de déterminer sa largeur, son épaisseur et sa profondeur. À partir de ce point, s'il y a un autre mélange, on croit qu'il se produit à l'extérieur de la zone de dilution initiale, et les prélèvements devraient se faire tel que recommandé ci-dessous.

3.9.2 Dispersion subséquente

À l'extérieur de la zone de dilution initiale, le panache de l'effluent se déplace généralement à l'horizontale et est entraîné par la vitesse des eaux réceptrices. Les drogues larguées dans le panache de surface indiqueront où ce dernier se trouve. La description suivante de la dispersion subséquente se rapporte aux panaches de surface; pour ce qui est des panaches plongeants ou emprisonnés, voir la section 5.4.

Des prélèvements transversaux devraient être effectués à angle droit avec l'écoulement du panache et à intervalles d'environ cinq fois la largeur du dernier panache. Le fluorimètre ou le tube de prélèvement devrait être maintenu à une profondeur constante lorsque l'embarcation traverse le panache. Il est recommandé de prélever les échantillons à 1 m de profondeur lorsque l'eau est homogène, peut-être en eau moins profonde lorsque l'écoulement est stratifié, et à une plus grande profondeur si l'eau est homogène lorsqu'on sait que le panache est bien mélangé en profondeur. La profondeur à laquelle la concentration du traceur est maximale sert à en établir le profil.

Il est particulièrement important de localiser les deux côtés du panache et de savoir si un côté touche au rivage. Au cours des premières traversées, l'embarcation devrait retourner au centre du panache, et le fluorimètre ou le tube de prélèvement devrait être abaissé pour déterminer l'étendue verticale du panache; cette valeur doit être comparée avec ce qui a été prévu par la conceptualisation de la dispersion. Au besoin, l'embarcation devrait ensuite retourner sur la ligne transversale en faisant descendre le fluorimètre ou le tube de prélèvement plus profondément (p. ex., entre 2 et 3 m) afin de mieux mesurer les concentrations dans la surface inférieure.

L'échantillonnage devrait continuer jusqu'à ce qu'une dilution de 1:1 000 soit atteinte (c.-à-d. jusqu'à ce que la concentration de l'effluent soit de 0,1 %). Il faut savoir que, aux extrémités du panache les plus éloignées, des parties de ce dernier peuvent s'en détacher et former des parcelles indépendantes d'effluent qui flottent avec le courant.

Il ne faut jamais placer un fluorimètre avec cuve à circulation à moins de 2 m du substrat du fond, car le matériel pourrait être endommagé ou faire défaut. Si l'on croit que le panache de l'effluent entre ou est près d'entrer en contact avec le substrat du fond, des échantillons devraient être prélevés et embouteillés en vue de leur analyse ultérieure (voir ci-dessous le paragraphe qui porte sur les échantillons « instantanés »). Pour confirmer que tel est le cas, au moins cinq échantillons par section transversale devraient être prélevés.

L'emplacement du panache ou la concentration devraient être notés s'ils sont inhabituels, par exemple, lorsque de fortes concentrations sont enregistrées à des endroits où la concentration de l'effluent avait atteint une valeur inférieure à la concentration spécifiée (p. ex., en raison de l'accumulation dans un bras de mer ou une baie), ou lorsqu'un courant sous-marin déplace l'effluent en aval ou vers le large pour le faire remonter à la surface ailleurs.

Les profondeurs marines devraient être mesurées et enregistrées là où on établit le profil des traceurs. Les techniques sonar sont généralement convenables. Lorsqu'il existe déjà une carte hydrographique détaillée, il n'est pas nécessaire de faire des relevés bathymétriques. Il est recommandé que les données bathymétriques concernant les eaux réceptrices soient présentées sur une carte de la zone d'exposition.

Les mesures de l'écoulement d'eau douce et les changements de niveau des marées devraient être enregistrés pendant au moins 24 heures avant et durant l'injection du traceur. Ces mesures devraient être prises au moins à toutes les heures, mais leur enregistrement continu est recommandé.

Le prélèvement d'échantillons instantanés est recommandé seulement s'il est impossible de faire pénétrer directement le fluorimètre ou le tube dans le panache. Cette méthode est plus lente, sa résolution spatiale est faible, et elle ne permet pas d'obtenir un profil continu des concentrations du traceur. Il est donc difficile de faire le bilan massique du traceur. Néanmoins, il est parfois nécessaire de prélever des échantillons instantanés. Ces échantillons devraient être prélevés en utilisant une pompe à eau ou en immergeant des bouteilles d'échantillonnage sous vide. Il n'est pas recommandé d'utiliser une

bouteille de Niskin ou une bouteille polyvalente du même genre parce qu'elle peut être contaminée par les échantillons précédents. Les échantillons instantanés devraient être stockés au froid à l'abri de la lumière et analysés dans un délai de 24 à 48 heures. Si cette méthode de prélèvement est la seule à être employée, il est recommandé de prélever au moins 12 échantillons à chaque transect afin de bien définir la configuration du panache. Au moins dix sections transversales de chacun des panaches résultant d'un déversement devraient être échantillonnées.

3.10 Qualité des données

La courbe d'étalonnage propre au site (figure 3.1) permet de convertir les lectures de la fluorescence, sans unité, en concentrations de colorant exprimées en $\mu\text{g/L}$ (ppb), puis en pourcentage de l'effluent. Une conversion du même genre est nécessaire pour les traceurs qui se retrouvent dans la nature. Au cours de l'essai sur le terrain, une correction pour les changements de température et les diverses quantités d'effluent évacuées peut être nécessaire. Les résultats devraient être inscrits dans un tableau indiquant l'heure (pour les eaux marines, l'heure devrait être indiquée relativement à la marée haute ou basse), le niveau d'eau, la position, la salinité (au besoin), la profondeur d'immersion de la sonde ou du tube de prélèvement, la profondeur de l'eau locale (facultatif), la concentration du colorant et la concentration calculée de l'effluent.

La discussion des limites de confiance des résultats devrait tenir compte des effets de facteurs comme les conditions ambiantes pendant l'essai, la méthode d'analyse employée pour mesurer la fluorescence (le prélèvement d'échantillons instantanés, le pompage continu et l'immersion d'un fluorimètre), la précision des données de localisation, la variation de l'évacuation de l'effluent et la confiance dans la courbe d'étalonnage.

3.11 Modélisation numérique

La modélisation numérique permet d'extrapoler, à partir des mesures du panache effectuées sur le terrain, pour simuler la dispersion de l'effluent dans des conditions ambiantes beaucoup plus variées. On a mis au point des modèles numériques qui superposent les calculs de la qualité de l'eau aux processus hydrodynamiques. Ces modèles fournissent une représentation qualitative et graphique du transport et de la dispersion de l'effluent (du traceur) dans le temps et l'espace.

Selon la nature des eaux réceptrices, des modèles bidimensionnels ou tridimensionnels peuvent être utilisés. Les principaux processus de la modélisation numérique comprennent l'installation du modèle, l'étalonnage et la vérification du modèle (qui utilisent tous deux les résultats de l'étude par traceurs sur le terrain) et une analyse de sensibilité pour déterminer les limites à imposer aux paramètres d'entrée. L'étalonnage du modèle devrait être effectué en regard des dernières mesures du traceur, mais la vérification peut se faire en appliquant le modèle à un événement historique dont les conditions ambiantes et d'évacuation sont différentes. Si l'étalonnage, la vérification et l'analyse de sensibilité sont réussis, le modèle peut ensuite être appliqué à un certain nombre de conditions ambiantes qui peuvent donner lieu à des dispersions du panache de l'effluent autres que celle observée pendant les mesures sur le terrain. Une discussion sur la fréquence des diverses conditions ambiantes examinées devrait être présentée.

À tout le moins, les modèles utilisés devraient pouvoir reproduire exactement le processus hydrodynamique de la zone d'étude et le comportement d'une substance persistante introduite près du point de rejet. La dilution initiale en zone rapprochée peut être calculée au moyen de modèles descriptifs, comme Cormix ou Visual Plumes. Les concentrations du traceur calculées pour le contour de la zone rapprochée peuvent ensuite servir de conditions limitrophes pour le modèle de la zone éloignée. Il existe d'autres conditions limitrophes pour les modèles de la zone éloignée : l'apport d'eau douce en amont et le niveau d'eau en aval. Dans les réseaux hydrographiques où les courants sont rapides, les modèles doivent pouvoir simuler des conditions d'écoulement sous-critiques et supercritiques. Dans les eaux soumises à l'action des marées, où le rivage au voisinage du point de rejet change selon que la marée est haute ou basse, le modèle devrait pouvoir reproduire l'humidification et l'assèchement des zones intertidales marécageuses.

Des modèles de zone rapprochée et des modèles bidimensionnels de zone éloignée sont facilement disponibles et ont été couramment utilisés pour délimiter le panache des effluents des fabriques de pâtes. Les modèles tridimensionnels coûtent très cher et beaucoup d'efforts doivent être déployés pour la collecte des données, l'installation et l'étalonnage. Certains instituts de recherche en hydrographie ont tout ce qu'il faut pour appliquer des modèles tridimensionnels.

Le tableau 3.2 énumère des modèles potentiellement applicables à divers scénarios d'évacuation des effluents et incluent des modèles offerts sur le marché et couramment utilisés. Ce tableau se veut un guide préliminaire seulement parce que des modèles sont constamment créés et modifiés et qu'un grand

nombre de modèles non listés sont mis au point pour utilisation à l'interne seulement et ne sont donc pas offerts sur le marché.

Tableau 3.2 Modèles numériques décrivant la dispersion de l'effluent

Scénario typique	Renseignements nécessaires pour le SEE	Exemples de modèles numériques offerts sur le marché ¹
Le panache est fortement transitoire ou, dans la zone de dilution initiale, il se dilue rapidement pour atteindre le niveau visé (1 % de la concentration de l'effluent).	Délimitation spatiale conceptuelle des limites de 1 % et de 0,1 % de la concentration de l'effluent. Il faut savoir si la limite de 1 % de la concentration est atteinte à moins de 250 m du point de rejet.	Modèles numériques comme Cormix et Visual Plumes pour l'évaluation de la dilution initiale seulement.
L'effluent est évacué dans un cours d'eau étroit et turbulent; un mélange complet est obtenu rapidement sur une courte distance.	La distance linéaire nécessaire pour que le panache se dissipe afin d'atteindre les niveaux visés (0,1 % et 1 % de la concentration de l'effluent).	Modèles numériques 1D, comme HEC-5Q, Qual 1E et WASP5/Dynhyd5.
L'effluent est évacué dans un large plan d'eau uniforme. Aucune stratification n'est observée.	La longueur et la largeur nécessaires pour que le panache se dissipe afin d'atteindre les niveaux visés (0,1 % et 1 % de la concentration de l'effluent).	Modèles numériques comme Cormix, pour la dilution initiale du panache, modèles numériques 2D, comme RMA 2/RMA 4, Qual 2E, MIKE 21, pour les simulations de la dilution ultérieure.
L'effluent est évacué dans un large plan d'eau non uniforme. Une stratification est observée en raison des différences de température ou de salinité des eaux réceptrices, ou entre l'effluent et les eaux réceptrices. La stratification peut être non uniforme et dynamique.	La longueur, la largeur et les dilutions en profondeur nécessaires pour que le panache se dissipe afin d'atteindre les niveaux visés (0,1 % et 1 % de la concentration de l'effluent).	Modèles numériques comme Cormix et Visual Plumes pour l'évaluation de la dilution initiale seulement. Modèles numériques 3D, comme RMA 10/RMA11, WASP5/Dynhyd5, MIKE 3, TELEMAC, DELFT 3D pour les simulations en zone éloignée.

¹ Ces modèles proviennent de sources différentes; certains peuvent être obtenus directement des concepteurs de modèles et d'autres, d'un ou de plusieurs distributeurs commerciaux.

Le modèle numérique choisi devrait servir à calculer les zones d'étendue maximale souhaitées, les conditions moyennes et la dilution minimale. Une discussion sur les limites de confiance des résultats devrait être présentée (voir la section 3.10).

Lorsque des courantomètres sont utilisés pour mesurer les courants ambiants (voir la section 3.8.2), la configuration modélisée du panache peut être modifiée par une analyse statistique des données de ces appareils. Lorsque le temps de vidange est long, les concentrations mesurées de colorant peuvent servir à étalonner un modèle numérique de transport et de diffusion. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour simuler la délimitation de l'effluent et les caractéristiques résultant d'une évacuation continue. Il peut être appliqué à diverses conditions (p. ex., les variations saisonnières des mouvements de l'eau et du régime des vents), ce qui élimine les limitations des conditions particulières enregistrées dans une seule étude sur le terrain.

Voici d'autres sources de conseils sur la modélisation numérique : Baumgartner *et al.* (1994), Chung et Roberts (1998), Ettema *et al.* (2000), Frick *et al.* (2000) et Sharp (1989).

4.0 RAPPORT

Le rapport sur les résultats de l'étude devrait comprendre ce qui suit :

1. Un résumé des renseignements recueillis pour aider à mettre au point le modèle conceptuel du comportement du panache de l'effluent, y compris :
 - une description de l'effluent : débit, température, densité et MTS (s'il y a lieu);
 - une description de la configuration et de la performance du rejet de l'effluent;
 - une description du milieu récepteur : écoulements et courants, caractéristiques physiques et chimiques de l'eau (p. ex., variation de la température et de la salinité horizontalement et verticalement), conditions climatiques et autres paramètres utiles propres au site utilisés pour mettre au point le modèle conceptuel du comportement du panache;
 - les facteurs confusionnels, comme les changements soudains dans les fabriques de pâtes et papiers, et les conditions climatiques atypiques.
2. Un modèle conceptualisé du comportement du panache.
3. De la documentation concernant l'étude par traceurs qui a été réalisée, y compris :
 - les épreuves de laboratoire précédant l'injection du traceur et la courbe d'étalonnage du fluorimètre;
 - les essais préparatoires sur le terrain;
 - les mesures du traceur sur le terrain pendant les essais.
4. Le modèle numérique utilisé et les cartes décrivant les enveloppes du panache prédites :
 - pour l'étendue maximale (concentrations de l'effluent égales à 1 % et 0,1 %;
 - pour les conditions moyennes à long terme (concentrations de l'effluent égales à 1 % et 0,1 %).

Une animation informatique est utile pour décrire le comportement du panache de l'effluent dans des milieux récepteurs plus complexes, comme les estuaires et les zones côtières.

Les concentrations mesurées du traceur devraient être indiquées dans l'annexe du rapport.

5.0 MILIEU RÉCEPTEUR – FACTEURS À PRENDRE EN COMPTE

Cinq types généraux de milieux récepteurs sont examinés aux fins du présent guide :

- Les cours d'eau – l'écoulement se fait surtout par gravité.
- Les petits lacs ou les réservoirs de retenue – l'écoulement est directionnel.
- Les grands lacs – les courants sont moins prévisibles et souvent dus aux vents; il peut y avoir des ondes internes, ou des « seiches ».
- Les estuaires et les fjords – ce sont des zones intertidales sous l'influence de l'eau douce et marine; les fjords sont des types spéciaux d'estuaires étroits et profonds où l'eau de surface est douce et peu profonde et qui contient en profondeur une couche d'eau salée.
- Les eaux marines – ce sont des zones intertidales où l'on trouve surtout de l'eau salée.

Les facteurs à prendre en compte pour chaque type de milieu récepteur sont indiqués dans le tableau 5.1 et décrits dans la présente section. Les effets des conditions climatiques comme la glace et le vent sur le comportement du panache sont décrits à la fin de la section, où l'on trouve aussi des conseils sur la délimitation du panache qui s'ajoutent à ceux fournis à la section 3.

Tableau 5.1 Résumé des facteurs à prendre en compte pour chaque type de milieu récepteur

Paramètre de terrain	Cours d'eau	Petits lacs ou réservoirs de retenue	Grands lacs	Estuaires	Eaux marines
Écoulements d'eau douce (minimal, maximal et moyen)	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI, S'IL Y A DES COURS D'EAU
Niveaux d'eau	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Qualité de l'eau	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Variation de la température horizontalement et verticalement	NON, SI LE MÉLANGE EST COMPLET	OUI	OUI	OUI	OUI
Heure et ampleur des marées	NON	NON	NON	OUI	OUI
Variation de la salinité horizontalement et verticalement	NON	NON	NON	OUI	OUI
Régime des vents	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
État des glaces	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

5.1 Cours d'eau

Dans les cours d'eau, les courants sont généralement unidirectionnels et le débit ainsi que les niveaux d'eau varient selon la saison. Les facteurs à prendre en compte pour déterminer le comportement du panache comprennent les caractéristiques du point de rejet, de la fixation au rivage et au fond ainsi que la montée ou la plongée du panache causée par des effets de densité dus à des facteurs thermiques ou

chimiques. Le cours d'eau peut comprendre différentes zones qui devraient être délimitées, y compris celles où l'écoulement est rapide et lent, ainsi que diverses zones de dépôt et d'érosion qui influent sur le transport des solides en suspension provenant de l'effluent. Une discussion sur les changements temporels (saisonniers et à long terme) dans le régime d'écoulement des tronçons touchés par le panache devrait être présentée.

Les études de délimitation du panache devraient être réalisées aux environs de la période où le débit du cours d'eau atteint son minimum annuel, ce qui se produit généralement vers la fin de l'été. Il restera à prédire le débit élevé extrême et moyen à l'aide de modèles numériques. Les débits minimaux correspondent généralement à une faible dilution potentielle globale et à une vitesse réduite de mélange turbulent dans le cours d'eau. L'étendue spatiale du panache a donc tendance à être plus considérable pendant les périodes de débit minimal.

Lorsqu'un traceur colorant est utilisé, il devrait être ajouté au moyen d'un système d'injection à débit continu. Le nombre de mesures du traceur sur le terrain dépend de l'endroit. Il est recommandé que les concentrations soient mesurées à diverses distances en aval et que l'étendue spatiale du panache soit déterminée. L'analyse des bouchons (le colorant est introduit en discontinu au lieu d'être injecté par un appareil à débit continu) peut aussi être une méthode convenable pour surveiller le mélange dans certains cours d'eau, mais elle nécessite généralement une très bonne connaissance du comportement du panache et peut exiger plusieurs bouchons.

5.2 Petits lacs et réservoirs de retenue

Les conseils donnés plus haut pour les cours d'eau sont valables si le volume de l'effluent évacué est considérable parce qu'il y aura généralement un écoulement facilement discernable et mesurable dans le réseau, mais ils ne s'appliquent pas à certains petits lacs et réservoirs de retenue où il existe des courants résiduels ou dont le courant de dérive à long terme est masqué ou même inversé par des effets à court terme causés par des facteurs, individuels ou conjugués, comme le cisaillement du vent, le brassage convectif de l'eau des lacs, la création d'une thermocline ou des crues rapides. Il est important de déterminer l'ampleur et l'importance de chacun de ces phénomènes relativement courts. Il est très facile de le faire par modélisation numérique pourvu qu'il y ait suffisamment de données de terrain pour étalonner le modèle.

L'écoulement résiduel, ou même les courants transitoires peuvent être inférieurs à la limite de détection des courantomètres enregistreurs ordinaires. Dans ce cas, un bilan massique des écoulements qui entrent dans le plan d'eau et en sortent permettra de calculer le temps de séjour dans le réseau. Ce temps de séjour peut être encore réduit en tenant compte des circonstances spéciales ou de la géométrie. Toutefois, lorsque les courants sont très faibles (p. ex. quelques cm/min), seules des études par traceurs sur le terrain peuvent assurer que l'effluent sera transporté et qu'il n'y aura pas de recirculation. Une recirculation se produit lorsque des tourbillons provenant du panache retournent dans le système de mélange et sont utilisés à la place de nouvelles eaux réceptrices propres. Après un certain temps, cette

remise en circulation peut réduire considérablement la dilution de l'effluent et accroître de beaucoup la concentration limite de 1 %.

On devrait calculer l'écoulement résiduel dans toute la zone ainsi que les courants dus aux vents de forces variées et provenant de diverses directions. Le vent du large aura généralement pour effet de retenir l'eau près de la rive et d'augmenter la couche d'eau de surface. Par contre, une brise de terre aura pour effet d'amener l'eau profonde vers la rive et de la faire remonter pour remplacer l'eau transportée au large par le vent.

Il peut être important de déterminer la densité relative de l'effluent et des eaux réceptrices parce que, s'il y a une thermocline, la plus grande partie du mouvement de l'eau dans le lac se fera au-dessus de cette dernière. Si le panache reste au-dessus de la thermocline, le mélange vertical sera restreint, et la dilution résultera davantage du mélange horizontal. Lorsque la dilution initiale a pour effet d'emprisonner le panache sous la thermocline, le mélange se fera probablement plus lentement, et le mouvement pourrait presque approcher le volume déplacé par l'évacuation de l'effluent.

Les études par traceurs devraient avoir pour but de satisfaire aux exigences générales et d'examiner les variations saisonnières. Les courants dominants influent sur la durée et le calendrier de chaque étude. La méthode recommandée pour la délimitation du panache d'un effluent rejeté dans un lac est le système d'injection à débit continu d'un traceur colorant, ce qui est particulièrement vrai s'il est possible qu'il y ait des tourbillons, une recirculation ou un emprisonnement dans le panache original. L'analyse du bouchon peut servir à déterminer les caractéristiques de la dispersion, mais elle ne donne pas une aussi bonne image visuelle, ni les mêmes indications concernant la recirculation.

Pour mesurer les courants d'eau, les drogues devraient être larguées et suivies en même temps que l'injection du colorant. Dans le cas des panaches de surface qui flottent, la partie supérieure des palettes des drogues devrait être à la surface ou juste au-dessous (dans les 50 premiers cm). Pour ce qui est des panaches submergés, les drogues devraient être munies d'une pesée et les voiles disposées de façon que les drogues se déplacent à la même profondeur initiale que le panache, ce qui peut être déterminé sur place à l'aide de la surveillance initiale du traceur. Si des grappes de drogues sont larguées, la dispersion pour une évacuation en discontinu peut être obtenue grâce à la trajectoire de chacune des drogues en déterminant leur variance par rapport au centroïde.

Dans les cours d'eau, la configuration du panache peut être prédite à l'aide de modèles numériques simples, mais dans les lacs, le comportement du panache n'est pas aussi facile à prédire. S'il n'existe pas de données sur les courants d'eau au voisinage du point de rejet, des courantomètres (voir la section 3.8.2) peuvent être nécessaires pour obtenir des renseignements à utiliser dans le modèle numérique. Les données climatiques peuvent être obtenues de l'aéroport local ou d'une autre source locale de données météorologiques. La relation statistique entre la dilution et le temps de déplacement de l'effluent devrait être combinée avec les caractéristiques statistiques des courants d'eau pour établir

des zones de dilution spatiale au voisinage du point de rejet, ce qui peut être décrit comme un graphique indiquant la fréquence du facteur de dilution en fonction de la dilution et du temps de déplacement.

Les zones de dilution devraient indiquer la probabilité de la présence du panache de l'effluent à n'importe quel endroit dans les eaux réceptrices ainsi que l'écart type et moyen de la concentration de l'effluent quel que soit l'endroit. Les zones de dilution ne montrent pas la configuration du panache de l'effluent à une certaine vitesse et direction du courant.

5.3 Grands lacs

Dans les grands lacs, les courants d'eau sont souvent dus au vent; ils varient selon la saison et sont généralement moins prévisibles que ceux des zones fluviales et intertidales. Il est important de comprendre la stratification thermique et de densité parce que l'effluent peut être plus dense que l'eau du lac en raison de facteurs chimiques, ou moins dense en raison de facteurs thermiques. L'advection due au vent et aux vagues, les seiches et la fixation au rivage et au fond sont toutes très importantes. Bon nombre de facteurs examinés pour les petits lacs et les réservoirs de retenue doivent aussi l'être pour les grands lacs.

Pour les grands lacs, il est utile de posséder des renseignements sur la variabilité du mouvement de l'eau à long terme et le mouvement résiduel qui en résulte. Ces renseignements peuvent être fournis par des courantomètres amarrés permettant de déceler des courants faibles. Les thermomètres enregistreurs des courantomètres peuvent servir à déterminer si des ondes internes ou des seiches se produisent. Des anémomètres installés sur la rive peuvent permettre d'obtenir en même temps des données sur le vent qu'il serait impossible d'acquérir autrement.

La dispersion initiale du panache de surface dans un lac à régime hydrodynamique relativement faible sera grandement influencée par le volume du panache remontant. C'est la modélisation numérique qui permet le mieux de délimiter le panache à cette étape. La dispersion subséquente, déterminée également par modélisation numérique, nécessitera le calcul des coefficients de dispersion horizontale et verticale, ainsi que des renseignements sur les courants fournis par des courantomètres. La meilleure façon de calculer les coefficients de dispersion consiste à introduire un bouchon de colorant ou à injecter en continu un traceur qui sera ensuite mesuré dans le panache de l'effluent. Si le vent souffle, le courant dû au vent peut être calculé au moyen de courbes de prévision du courant de dérive (voir la section 5.6.2). Les vents peuvent aussi provoquer une inclinaison de la surface de l'eau et de la thermocline, ce qui peut occasionner des seiches qui créent des mouvements oscillatoires dans le bassin. Une discussion plus détaillée des seiches provoquées par le vent est présentée à la section 5.6.2.

Des modèles numériques bidimensionnels peuvent être satisfaisants, mais s'il y a stratification, un modèle tridimensionnel peut être nécessaire.

5.4 Estuaires et fjords

Les estuaires et les fjords sont des milieux qui rendent difficile la réalisation d'études sur les panaches. Pour planifier l'étude sur le terrain, il est très important de connaître la nature des eaux réceptrices. La présente section décrit d'abord les caractéristiques hydrographiques des estuaires et des fjords, puis fournit des conseils sur la réalisation d'études sur le terrain.

5.4.1 Caractéristiques hydrographiques

Les facteurs qui influent le plus sur la dispersion de l'effluent dans les estuaires et les fjords sont le mouvement des marées et les différences de densité entre l'eau douce et l'eau salée. À la marée montante, l'eau entre dans un estuaire et elle en ressort à la marée descendante, ce qui donne lieu à un mélange. Comme la densité des effluents est généralement la même que celle de l'eau douce, ils auront donc tendance à se mélanger avec cette dernière. La densité de l'eau douce est d'environ 1,00. En général, l'effluent et l'eau douce montent et s'écoulent au-dessus de la couche d'eau salée, dont la densité est d'environ 1,026.

La figure 5.1 montre un « estuaire à coin salé » où un important cours d'eau pénètre avec de faibles marées et crée une interface marquée entre l'eau douce et l'eau salée. La figure 5.1a montre la couche d'eau douce qui diminue à mesure que l'estuaire s'élargit vers la mer. Si la vitesse de l'eau douce est élevée, un cisaillement se produira à l'interface, et l'eau salée sera aspirée dans la couche supérieure. La figure 5.1b montre comment la turbulence de la marée montante produit un cisaillement à l'interface, ce qui crée des vagues et occasionne un mélange.

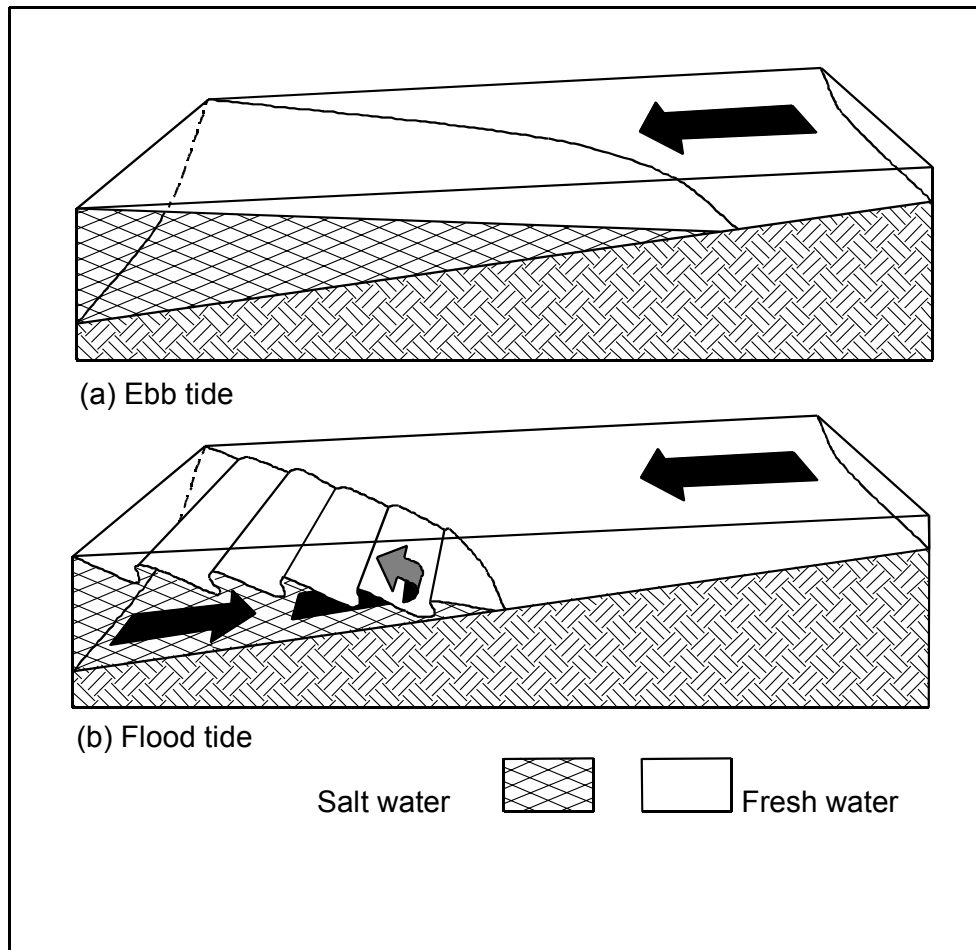


Figure 5.1 Profil généralisé d'un estuaire indiquant la circulation pendant la marée descendante (a) et la marée montante (b)

Ebb tide = marée descendante
 Flood tide = marée montante
 Salt water = eau salée
 Fresh water = eau douce

L'importance du cisaillement et du mélange qui se produit entre l'eau douce et l'eau salée dépend du volume et de la vitesse de l'eau douce (confinée par les côtés de l'estuaire) comparativement à ceux de l'eau salée (confinée davantage par la profondeur). La figure 5.2 décrit la stratification d'un estuaire à coin salé à différents niveaux d'énergie marémotrice. Un estuaire peut être fortement stratifié (a) lorsque l'énergie marémotrice est relativement faible et que la montée graduelle de la marée occasionne un certain mélange. À mesure que l'énergie marémotrice (« prisme de marée ») augmente comparativement à l'arrivée d'eau douce, le mélange s'accélère et produit un estuaire partiellement (b) et entièrement (c) mélangé.

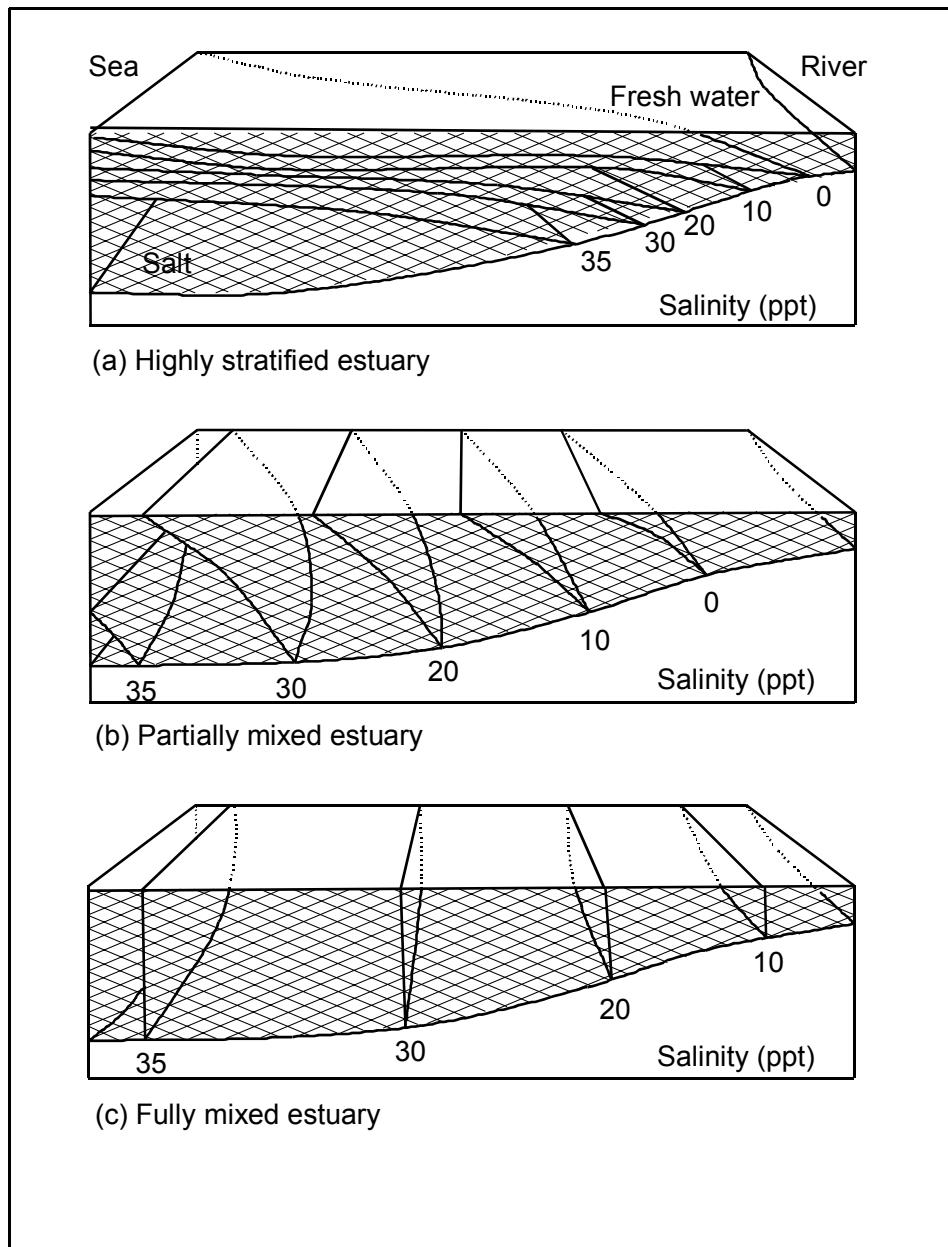


Figure 5.2 Profils de masses d'eau estuariennes typiques montrant un estuaire fortement stratifié (a), un estuaire partiellement mélangé (b) et un estuaire entièrement mélangé (c)

Sea = mer

River = cours d'eau

Fresh water = eau douce

Salt Water = eau salée

Salinity (ppt) = salinité (en partie par mille)

a) Highly stratified estuary = estuaire fortement stratifié

b) Partially mixed estuary = estuaire partiellement mélangé

c) Fully mixed estuary = estuaire entièrement mélangé

La fréquence et l'ampleur des marées sont prises en compte dans la planification de l'étude de délimitation du panache et dans la modélisation numérique subséquente. En général, dans les estuaires canadiens, les marées montent et descendent à un intervalle d'environ 12,42 heures entre les crues. La différence de hauteur entre la marée haute et la marée basse, même dans un seul système côtier, peut varier entre quelques centimètres et plusieurs mètres. En outre, tous les 7, 14 et 29 jours, il y a des marées de morte-eau et de vive-eau où les forces du soleil et de la lune se conjuguent d'abord et s'opposent ensuite. Dans certaines régions du Canada, chaque deuxième marée haute ou basse diffère considérablement de la précédente. Ces différences sont généralement appelées les réactions semi-diurnes et diurnes de la masse d'eau en question aux différentes attractions du soleil et de la lune.

D'autres facteurs, dont les suivants, doivent être pris en compte lorsqu'on effectue des études de délimitation du panache dans les estuaires :

- la durée du cycle des marées : il n'est pas rare que la durée de la marée descendante dépasse sept heures et que celle de la marée montante soit bien inférieure à six heures;
- l'étalement de la marée : dans certains estuaires, il peut y avoir une étalement dans le mouvement vertical et horizontal à marée haute et à marée basse; cette étalement peut durer quelques minutes ou, exceptionnellement, près d'une heure (dans ce cas, c'est généralement à marée basse seulement); l'absence d'un important mouvement horizontal pendant quelque temps peut donner lieu à la formation d'un grand mélange d'effluents au voisinage du point de rejet, ce qui peut occasionner l'expansion de la limite de la zone où la concentration de l'effluent est supérieure à 10 %.

Les fjords où la profondeur de l'estuaire est de beaucoup supérieure à dix fois l'épaisseur du prisme de marée constituent un cas spécial. Le profil longitudinal ressemble à un estuaire à coin salé ou à un estuaire fortement stratifié où l'eau douce se trouve dans une couche à la surface et à une très grande profondeur en dessous. La marée peut monter et descendre en causant un mélange négligeable, sauf peut-être à l'entrée où il existe généralement un seuil élevé. Dans certains fjords, il peut y avoir une couche d'eau douce dont l'épaisseur varie entre 2 et 10 m et qui s'étend sur toute la longueur de l'estuaire avec une interface de moins d'un mètre d'épaisseur. Dans les fjords dont la longueur dépasse plusieurs dizaines de kilomètres, la diffusion et d'autres facteurs comme le vent et les ondes internes auront pour effet d'accroître l'épaisseur de cette couche interfaciale et de rendre saumâtre la couche supérieure.

Les estuaires peuvent être de deux ou plusieurs types sur leur longueur, durant la variation saisonnière de l'écoulement fluvial ou pendant le cycle des marées de morte-eau et de vive-eau. Dans les estuaires partiellement mélangés ou fortement stratifiés, il y a souvent peu de mouvement vers la mer le long du lit pendant la marée descendante, ce qui accroît la stratification durant cette période. À la marée montante, les courants plus forts sont profonds et des conditions plus propices à un bon mélange se présenteront probablement. Au Canada, en raison de la force de Coriolis et de la différence de densité entre l'eau salée et l'eau douce, les courants de jusant ont tendance à être plus forts et la salinité est

généralement plus faible du côté droit de la rive de l'estuaire lorsqu'on regarde vers la mer. De même, les courants de marée sont plus forts et la salinité est plus élevée à la gauche lorsqu'on regarde vers la mer, ce qui peut être très marqué dans les larges estuaires. Lorsqu'il existe, dans un estuaire, un fort écoulement d'eau douce ou une étroite sortie vers les eaux libres du littoral, un panache d'eau douce ou saumâtre peut s'avancer à une bonne distance dans la mer, notamment lorsque la marée descend. Selon la dynamique de cette entrée, une partie du panache peut rentrer dans l'estuaire avec la marée montante.

Dans un estuaire, le type de stratification peut changer en fonction de la distance ou du temps. Pendant le ruissellement printanier, l'eau douce peut être le principal constituant des tronçons supérieurs de l'estuaire et accroître la stratification en aval. Pendant les périodes d'étiage, les tronçons supérieurs de l'estuaire redeviendront partiellement mélangés et l'eau de faible salinité pénétrera beaucoup plus en amont. Des ondes internes (ou des seiches) peuvent se former le long de l'interface entre l'eau douce ou saumâtre et l'eau salée dans les fjords et les estuaires en raison de l'action du vent, ce qui peut avoir un effet temporaire sur la dispersion du panache. La section 5.6.2 présente une discussion plus détaillée de ces seiches.

À l'étalement, il peut se former au voisinage de la conduite d'évacuation un important mélange d'effluents dont la concentration se rapproche de celle qui existe au sommet du panache montant. Lorsque les courants de marée horizontaux commencent à circuler de nouveau, ce grand mélange d'effluents devient la tête du panache et peut prendre un certain temps à se dissiper. À mesure que les courants de marée deviennent plus forts, l'effluent qui s'éloigne de la zone d'évacuation se comportera davantage comme un écoulement fluvial régulier. Si le mélange d'effluents s'est formé pendant l'étalement, la marée montante arrivera généralement sous le panache et cette eau plus dense transportera le mélange d'effluents en amont. L'effluent quelque peu dilué dans le mélange peut passer dans la zone d'évacuation à la marée descendante et apporter de l'eau déjà polluée à l'effluent qui est évacué. Si le mélange d'effluents s'est formé à l'étalement de marée haute, il aura tendance à s'écouler en aval en une couche très mince à cause des différences de densité. Lorsque les courants de marée deviennent plus forts, ce bassin d'effluents de marée haute aura tendance à se disperser plus rapidement que celui de marée basse, mais il pourra agrandir considérablement la limite du panache à la surface, notamment s'il est fixé à la rive.

Il peut y avoir des panaches plongeants dans les estuaires et les fjords. Les effluents dont la dilution initiale est assez élevée dans le jet montant peuvent absorber du sel en provenance des couches inférieures et la densité du panache devient ainsi supérieure à celle de la couche de surface. Si l'impulsion ascendante est suffisante, le panache peut atteindre la surface, puis plonger ou couler lentement dans une couche d'eau de même densité et se déplacer et se mélanger avec cette couche inférieure. Voir à ce sujet la figure 2.1(i).

Dans d'autres cas, notamment lorsque la couche de surface est épaisse ou très différente, le jet montera, mais sera emprisonné à l'interface séparant la couche supérieure de la couche inférieure. C'est probablement le cas des fjords où l'effluent initial se trouve dans la couche profonde d'eau salée. Le mélange de l'effluent dans la couche supérieure est plus susceptible de se produire lorsque la marée

descend. Lorsque la marée monte, la force du courant dans un estuaire peu profond est près du fond de la mer et peut causer un important mélange avec les couches inférieures qui entraînent le mélange avec elles.

Les panaches submergés peuvent retourner à la surface lorsqu'ils rencontrent un afflux d'eau de densité différente dans les eaux réceptrices. Dans ce cas, l'eau de surface plongera d'abord, mais retournera à la surface en aval. Ce scénario peut se produire lorsqu'il y a un afflux d'eau moins dense en aval de la zone d'évacuation, comme un tributaire ou un autre effluent important.

5.4.2 Travail sur le terrain

Pour réaliser des études par traceurs dans les estuaires, il est recommandé d'utiliser deux embarcations. La technique préconisée pour mesurer les traceurs colorants consiste à suspendre un fluorimètre ou un tube de prélèvement à l'étrave de l'embarcation, tel qu'indiqué à la section 3.3.3. La salinité et la température devraient être mesurées à la verticale le long de la ligne médiane de l'estuaire et au voisinage du point de rejet. L'heure du prélèvement devrait être indiquée relativement à l'heure de la marée haute ou basse et le prélèvement devrait toujours se faire dans la direction opposée au mouvement des eaux réceptrices.

Il est important de tenir compte des différences entre les marées hautes successives de même qu'entre les marées de vive-eau et de morte-eau ainsi que de les faire concorder pour établir le régime de densité représentatif dans l'estuaire et aussi les objectifs de l'étude de délimitation du panache. L'intervalle vertical relatif à la profondeur de l'eau à marée basse donne une idée de la turbulence potentielle. Une méthode différente, mais qui nécessite plus de travail, consiste à calculer le volume d'eau passant par diverses sections à marée haute et basse, ce qui permet de connaître les vitesses moyennes. Cette méthode est particulièrement utile lorsqu'il existe d'importants volumes intertidaux ou d'autres écoulements fluviaux à des endroits précis dans l'estuaire.

Lorsqu'un traceur colorant est utilisé, l'injection devrait commencer environ une demi-heure avant la renverse afin que l'étude puisse débuter à marée basse. Dans le cas de la plupart des études effectuées dans un estuaire, les panaches peuvent être délimités comme dans un cours d'eau. Pendant l'échantillonnage, l'embarcation devrait toujours manœuvrer contre les courants de marée pour éviter de dériver avec les eaux réceptrices et de prélever possiblement des échantillons dans la même masse d'eau. Lorsqu'une autre embarcation s'occupe des drogues ou lorsque ce travail se fait un autre jour, il est important de vérifier la salinité et la température à la profondeur de la drogue chaque fois que la position est confirmée. À la renverse de la marée, lorsque l'effluent partiellement dilué retourne au-dessus du point de rejet, il peut y avoir un nouveau panache mince faiblement dilué au-dessus du panache plus épais bien mélangé. Lorsque la différence entre les excursions de surface à marée haute et basse est faible (p. ex. < 20 % de l'excursion), il peut y avoir une accumulation d'effluent due à plusieurs marées. En général, le modèle numérique peut fournir les meilleures prédictions de ce phénomène.

Dans le cas des panaches plongeants, les drogues peuvent être réglées de façon à suivre le panache en profondeur. Il faut toutefois s'assurer que la dimension verticale des palettes n'est pas trop grande parce que les bords supérieurs et inférieurs peuvent rester pris dans deux différents écoulements d'eau. Si l'échantillonnage initial a permis de connaître la profondeur du panache, sa trajectoire peut être suivie tel qu'indiqué à la section 3.9, sauf que, au-dessus du panache, l'air est remplacé par une couche d'eau. Dans ce cas, un fluorimètre ou un tube de prélèvement peut être tracté à l'arrière parce qu'il est probable qu'il échappera complètement à l'influence du mélange produit par la coque du bateau et l'unité de propulsion. Il faudra alors que le conducteur de l'embarcation soit plus habile afin d'assurer une vitesse constante au moyen d'un indicateur de vitesse dans l'eau ou d'un compte-tours. Un dépresseur permettra de garder la tête ou le tuyau de prélèvement du fluorimètre sous l'eau, mais un bathymètre (un sonar barométrique ou orienté vers le haut) est essentiel pour enregistrer la profondeur.

Il est beaucoup plus difficile de suivre un panache qui monte à la surface, puis plonge, et aussi lorsqu'il n'y a pas d'interface bien marquée. Les premières mesures de la salinité sur le terrain effectuées pour caractériser l'environnement montreront comment la couche de surface qui se forme naturellement se comporte relativement à l'impulsion descendante de la couche inférieure.

Il peut être nécessaire d'utiliser un modèle numérique pendant un certain nombre de cycles de marée pour montrer les zones de dilution à court et à long terme de l'effluent. Un modèle tridimensionnel peut être nécessaire si les eaux réceptrices sont stratifiées.

5.5 Eaux marines

Il est important de savoir si la température et la salinité sont stratifiées dans les eaux marines côtières parce que l'effluent est ordinairement moins dense que l'eau de mer en raison de facteurs chimiques et thermiques. Lorsque le temps est très calme, le panache peut se trouver à quelques centimètres de l'eau de surface. Dans ce milieu, l'advection due aux vents et aux vagues, la fixation au littoral et au fond et l'activité marémotrice (souvent accompagnée de courants giratoires) sont des facteurs importants. Les eaux réceptrices océaniques diffèrent de celles des estuaires parce que la circulation principale au voisinage du point de rejet n'est pas majoritairement due à l'eau douce. Le panache de l'effluent est dilué et transporté par les courants. L'activité marémotrice, lorsqu'il y en a, n'est pas toujours le principal facteur qui contribue au mouvement net de l'effluent, mais elle influe sur la dispersion de ce dernier. L'injection continue du colorant pendant un cycle des marées est généralement suffisante, mais il se peut que le programme de modélisation numérique s'étende sur plusieurs cycles.

Les courants résiduels peuvent être principalement dus à un mode de circulation littorale ou à l'action locale du vent et des vagues. Il est en outre utile de posséder des données sur les courants d'eau locaux, comme celles qui peuvent être fournies par les courantomètres côtiers installés au voisinage du point de rejet. De même, des enregistrements de la salinité, de la température de l'eau et de la vitesse du vent sont aussi utiles.

Avant d'injecter un colorant, on devrait corrélérer la hauteur et l'heure des marées avec les résultats du marégraphe le plus proche exploité par le Service hydrographique du Canada, ce qui est utile pour l'étude par traceurs et aussi pour l'utilisation des registres actuels et d'autres registres à long terme. Le profil spatial de la salinité et de la température devrait aussi être établi en même temps.

Le concept initial de la dispersion de l'effluent devrait être utile pour la planification de l'injection du colorant. La délimitation d'un panache de surface peut se faire conformément à la méthode courante décrite à la section 3.9, mais il faut faire preuve de jugement pour espacer les transects, notamment si le courant giratoire est marqué et lorsque le panache commence à retourner au-dessus de la zone d'évacuation. Le suivi des panaches submergés devrait se faire tel qu'indiqué à la section 5.4. Il est ordinairement avantageux d'utiliser de plus grandes drogues munies d'un réflecteur radar et d'un récepteur GPS dans les zones côtières, notamment en présence de vagues.

Le profil des traceurs colorants permet de construire des enveloppes du panache de l'effluent et de les relier aux courants, aux vents et aux vagues mesurés ce jour-là. La probabilité de la présence de ces enveloppes peut être déterminée à l'aide des données statistiques provenant de celles sur les courants d'eau et des modèles numériques utilisés pour que ces enveloppes valent pour une plus grande période de temps afin de représenter les conditions « moyennes ».

5.6 Conditions climatiques

La glace et le vent peuvent influencer considérablement sur la dispersion de l'effluent. Les sections suivantes indiquent comment incorporer l'état des glaces et le régime des vents à l'interprétation du comportement des panaches. Pour l'instant, l'applicabilité des modèles numériques à l'état des glaces est très limitée.

5.6.1 La glace

En hiver, la glace recouvre un grand nombre de plans d'eau canadiens. Son effet général sur l'évacuation des effluents est double. La couche de glace protège les eaux réceptrices contre les effets de la force d'entraînement du vent et peut aussi changer ou causer la stratification de la colonne d'eau et, donc, modifier la circulation de l'eau. Toutefois, dans le cas de la glace fixée, le dessous de la glace constitue une interface solide et rugueuse qui fait obstacle à l'écoulement et crée une turbulence semblable à celle qui se produit au-dessus du fond de l'eau.

La plupart des effluents sont tièdes, ce qui a pour effet de faire fondre quelque peu et d'affaiblir la surface de glace. Le panache flottant s'accroche à cette surface tout comme un panache dense s'accroche au substrat du fond. Pour autant qu'on le sache, aucune étude détaillée de délimitation du panache des effluents n'a été réalisée alors qu'il y avait de la glace, mais il est raisonnable de présumer qu'il y aura

probablement moins de mélange, ce qui peut être dû à la mesure dans laquelle on a sous-estimé les concentrations dans le panache parce qu'on s'est fondé sur des données pour les eaux libres seulement.

La couverture de glace fixée empêche le mélange par les eaux de surface causé par la force d'entraînement du vent. Lorsqu'il y a des écoulements d'eau douce (p. ex., des écoulements fluviaux), le mélange de l'effluent avec l'eau fluviale est réduit. Des ondins peuvent apparaître pendant la formation de la glace de surface. Certains d'entre eux peuvent être le résultat de la collision de blocs de glace et d'autres peuvent se former en raison de l'expansion thermique de la glace. Les ondins peuvent se former au même endroit chaque année et leur quille peut être jusqu'à sept fois plus profonde que leur hauteur. Ces ondins peuvent avoir un effet sur le panache et lui faire prendre une direction très différente de celle qu'il suivrait normalement en eaux libres.

La glace qui se déplace protège généralement l'eau de surface contre les effets directs du vent. Toutefois, ces derniers peuvent être plus importants qu'on ne l'avait d'abord prévu parce que le mouvement du vent est transmis des blocs de glace sous l'eau aux eaux réceptrices ou au panache. Lorsque la glace en mouvement entre en contact avec de la glace fixée ou une île, un important ondin glacial peut se former.

Les modèles numériques réguliers utilisés pour la délimitation des panaches ne conviennent généralement pas pour prendre en compte l'état des glaces parce qu'ils présupposent une surface d'eau libre (c.-à-d. un écoulement dans un chenal libre).

5.6.2 Le vent

Le vent qui souffle sur d'importants plans d'eau provoque des courants et des vagues en proportion directe avec sa force, sa durée et la longueur de son trajet. Heureusement, il existe des nomogrammes qui fournissent des chiffres sur la vitesse des courants, la hauteur et la période des vagues qui peuvent contribuer à comprendre les effets du vent sur la dispersion des effluents. Les publications portant sur la modélisation de la trajectoire des déversements d'hydrocarbures ou sur la recherche et le sauvetage en mer comptent parmi les sources d'information les plus utiles. Pour ce qui est des courants dus au vent, les courbes de prévision de James (James, 1966) sont probablement les plus faciles à utiliser pour connaître leur force. Lorsqu'on utilise ces courbes, la direction est ordinairement de 20 degrés à droite du sens du vent en raison des forces de Coriolis.

Lorsque le travail est plus fouillé, des modifications peuvent être apportées afin de tenir compte des variations de la durée, de la longueur du trajet, de la vitesse du vent, de la profondeur de l'eau, etc. Dans bon nombre de zones côtières, c'est la direction prédominante du vent conjuguée à la topographie sous-marine locale qui est la force d'entraînement des courants le long du littoral. La vitesse acquise peut rendre ces courants très persistants. Les vagues dues au vent transportent aussi l'eau, notamment lorsqu'elle est peu profonde. Ces vagues peuvent aussi sortir du champ de vent et continuer de se déplacer sur des centaines de milles.

Les nomogrammes les plus couramment utilisés pour la prédiction des vagues sont ceux de l'U.S. Army Corps of Engineers (1984). L'énergie des vagues de vent est transmise de deux façons : premièrement, à

la surface par les particules d'eau qui sont sur orbite dans un mouvement circulaire et dont le rayon est la moitié de la hauteur de la vague à la surface et, deuxièmement, en profondeur, avec un rayon qui devient presque nul à une profondeur égale à la moitié de la longueur d'onde. Habituellement, les vagues côtières ont des périodes de 4, 6 et 8 secondes et des longueurs d'onde correspondantes de 25, 56 et 100 m. Lorsque ce mouvement à une profondeur égale à la moitié d'une longueur d'onde vient en contact avec le substrat du fond, la friction ralentit la vague, et le mouvement circulaire des particules devient elliptique. Lorsque la plage est longue, les crêtes des vagues tenteront de s'aligner parallèlement aux contours et, éventuellement, au littoral, ce qui produit deux effets sur le panache : une augmentation du mélange à l'intérieur de ce dernier et des courants littoraux créés par les vagues.

Des ondes internes, ou des seiches, se déplaçant à l'interface de deux masses d'eau peuvent aussi influencer sur la dispersion du panache. La formation de ces ondes n'est pas bien comprise, mais il peut s'agir de tourbillons créés par les forces de cisaillement agissant entre les deux couches d'eau opposées et qui peuvent se déplacer le long de la thermocline dans les lacs, la ligne de démarcation entre l'eau douce et l'eau salée dans les fjords, ou entre les eaux estuariennes et marines dans les grands estuaires ou les eaux côtières. L'ampleur de ces ondes internes peut être considérable (p. ex., de plusieurs dizaines de mètres) et des vagues de 80 m ont été enregistrées dans le Saint-Laurent au confluent du Saguenay. Leur effet sur le panache est transitoire et il en est fait mention seulement au cas où une anomalie se produirait pendant un essai au colorant. Leur présence serait enregistrée par les thermographes ou les salinomètres.

6.0 RÉFÉRENCES (MODIFICATIONS APPORTÉES CONFORMÉMENT AU GUIDE DU RÉDACTEUR, P. 264)

- BAUMGARTNER, D.J., W.E. FRICK et P.J.W. ROBERTS. *Dilution Models for Effluent Discharges*, 3^e édition, EPA/600/R-94/086, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, 1994.
- BISHOP, J.M. *Applied Oceanography*, John Wiley & Sons, Inc., Toronto (Ont.), 1984.
- CHUNG, Y. et P.J.W. ROBERTS. *Mathematical Models for Ocean Outfalls*, GIT/CEE-Hydro-98-1, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- DAY, T.J. *Longitudinal Dispersion in Natural Channels*, Water Resources Research 11: 909-918, 1975.
- DOHLER, G. *Les marées dans les eaux du Canada*, Service hydrographique du Canada, ministère des Pêches et des Océans, 1986.
- EL-SABH, M.I. *Physical Oceanography of the St Lawrence Estuary*, In : Hydrodynamics of Estuaries, Volume II, Estuarine Case Studies, Éditeur : Bjorn Kjerfve, CRC Press, Boca Raton, Floride, 1988.
- ETTEMA, R., R. ARNDT, P.J.W. ROBERTS et T. WAHL. *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, n° 97, ASCE, Reston, Virginie, 2000.
- FERRIER, A., D. FUNK et P.J.W. ROBERTS. *Application of Optical Techniques to the Study of Plumes in Stratified Fluids*, Dynamics of Atmospheres and Oceans 20: 155-183, 1993.
- FEUNSTEIN, D.L. et R.E. SELICK. *Fluorescent Tracers for Dispersion Measurements*, J. San. End. Div., ASCE: 90: SA3, 1-2, 1963.
- FRICK, W.E. et coll. *Dilution Models for Effluent Discharges*, 4^e édition (Visual Plumes), U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Division, NERL, Standards and Applied Science Division, Office of Science and Technology, Athens, Georgie, 2000.
- IEEE. *Current and Wave Monitoring and Emerging Technologies*, Septième réunion de travail sur la mesure des courants, du 13 au 15 mars 2003, San Diego, Californie, 2003.
- JAMES R W. *Ocean Thermal Structure Forecasting*, SP 105 U S Naval Oceanographic Office NSTL Station, Mississippi, 1966.

- JIRKA G., R. DONEKER et S. HINTON. *User's Manual for Cormix: A Mixing Zone Expert System for Pollutant Discharges into Surface Waters*, U.S. EPA Office of Science and Technology, Washington, DC, 1996.
- KILPATRICK, F.A. et E.D. COBB. *Measurement of Discharge Using Tracers*, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, tome 3, chapitre A16, 1985.
- NESHYBA, S. *Oceanography – Perspectives on Fluid Earth*, John Wiley & Sons, Inc., Toronto (Ont.), 1987.
- PARKER, G.G. *Tests for rhodamine dye for toxicity to oysters and fish*, J. Res. U.S. Geol. Surv. 1:499, 1973.
- ROBERTS, P.J.W. *Dilution and Transport Predictions for Ocean Outfalls*, Water Science and Technology 21: 969-979, 1989.
- ROBERTS, P.J.W. et A. FERRIER. *Understanding Mixing Zones*, Water Environment and Technology 8: 39-43, 1996.
- SHARP, J.J. *Computer Programs for the Design of Marine Outfalls*, Memorial University of Newfoundland, Faculty of Engineering and Applied Science, St. John's (T.-N.), 1989.
- SORENSEN, R.M. *Basic Coastal Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Toronto (Ont.), 1978.
- THOMANN, R.V. et J.A. MUELLER. *Principles of Surface Water Modeling and Control*, Harper and Row Publishers, New York (New York), 1987.
- TSANIS, I.K. et C. VALEO. *Environmental Hydraulics Volume 1 – Mixing Zone Models for Submerged Discharges*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, Massachusetts, 1994.
- U.S. Army Corps of Engineers. *Shore Protection Manual*, Volume 1, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1984.
- U.S. Geological Survey. *Fluorometric procedures for dye tracing*, Chapter A12 in Book 3: Applications for Hydraulics, U.S. Geological Survey, Federal Center, Denver, Colorado, 1986.
- WILLIAMS, B.L. *Ocean Outfall Handbook – A manual for the planning, investigation, design and monitoring of ocean outfalls to comply with water quality management objectives*, National Water and Soil Conservation, Nouvelle-Zélande, 1985.

WOOD, I., R. BELL et D. WILKINSON. *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific Publishing Company, New Jersey, 1993.