

ÉQUIPE DE RÉALISATION

CENTRE SAINT-LAURENT (Environnement Canada, Conservation et Protection)

Déléguée scientifique : Lynn Cleary, M.Sc., bio.
Spécialiste : Marcelle Grenier, M.Sc., géogr.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - Eau

Directeur de projet : Michel Leclerc, M.Sc., D.Ing., ing.
Professeur-chercheur
Chargé de projet : Jean-Pierre Fortin, Ph.D., phys.,
Professeur
Traitement d'images : Patrick Dupont, M.Sc., géogr. phys.
Système d'information géographique : Marc Crispin, M.Sc., Géogr.
: Julie Bouchard, Stag., géogr. phys.
Révision des textes : Guy Fortin, M.Sc., géophys.

ASSEAU Inc. (Consultants)

Conseiller scientifique (tests) : Paul Boudreault, M.Sc.-Eau, biol.

ROCHE Groupe-Conseil (consultants)

Directeur de projet : Jean-Pierre Fau, ing.
Réalisation des tests in situ : Marc Morin, ing.
Positionnement : Normand Juneau, B.Sc., géodésie

Innotech Aviation Ltd (consultant) et Centre canadien de télédétection

Chargé de projet : W.D. McColl

PRÉAMBULE

Ce rapport rend compte en partie du projet:

FLEUVE SAINT-LAURENT -Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre

La liste suivante donne les titres et numéros d'archivage des documents constituant la série complète de rapports sur ce projet:

- RAPPORT No 1: MEME TITRE QUE CELUI DU PROJET

Volume 1,

Tome 1: *Modélisation hydrodynamique des écoulements en eau libre du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre*

INRS-Eau - No RS-317a

Volume 1,

Tome 2: **Annexe infographique:**

Atlas numérique des courants et autres caractéristiques des écoulements en eau libre du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre

INRS-Eau - No RS-317b ; format 28cm x 43cm (en couleur).

Volume 2: **(LE PRÉSENT VOLUME)**

Caractérisation de la diffusivité des écoulements du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre par tests de rhodamine et télédétection aéroportée

INRS-Eau - No RS-318

Volume 3: *Analyse numérique de la contamination du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre par les effluents industriels et les tributaires.*

INRS-Eau - No RS-319

- RAPPORT No 2: DÉVELOPPEMENT ET VALIDATION ANALYTIQUE D'UN MODELE LAGRANGIEN DE SIMULATION DES PANACHES D'EFFLUENTS ET DE TRIBUTAIRES

INRS-Eau - No RS-320

- RAPPORT No 3: LOGICIEL PANACHE: MANUEL DE L'UTILISATEUR

INRS-Eau - No RS-321



Table des matières

RESUME	1
1 INTRODUCTION	2
1.1 Cadre de l'étude	2
1.2 Objectifs	3
2 TESTS DE DIFFUSION	5
2.1 Stratégie de réalisation	6
2.2 Méthodologie et instrumentation	6
2.2.1 Système de positionnement	7
2.2.2 Essais de traçage	7
2.2.3 Bathymétrie	7
2.2.4 Mesures de courants	8
2.2.5 Mesures complémentaires	8
2.3 Résultats	8
2.3.1 Essai de traçage dans le secteur du lac Saint-Pierre	8
2.3.2 Essai de traçage dans le secteur de Tracy-Sorel	9
2.4 Analyse et validation des résultats	9
2.4.1 Bilans massiques	9
3 IMAGES AEROPORTEES	12
3.1 Acquisition des données de télédétection	13
3.1.1 Survols	13
3.1.2 Capteurs et bandes spectrales	13
3.2 Pré-traitement	15
3.2.1 Correction géométrique	16
3.2.2 Correction radiométrique	16
3.3 Traitement	17
3.3.1 Choix des bandes spectrales	17
3.3.2 Traitement de rehaussement des images	18
3.3.3 Etalonnage des images	18



3.4	Intégration des images au système d'information géographique SPANS™	19
3.4.1	Création d'une zone de travail	20
3.4.2	Transfert des images	20
3.4.3	Raccordement des images	21
4	RESULTATS DE L'ETALONNAGE DES IMAGES	22
4.1	Données statistiques	22
4.1.1	Choix des échantillons	22
4.1.2	Analyse des résultats de régression	22
4.2	Concentration de rhodamine	26
4.2.1	Analyse des résultats du panache Sorel-Tracy	26
	Survol de 15h00.	26
	Survol de 17h00.	27
4.2.2	Analyse des résultats du panache du lac Saint-Pierre	31
	Survol de 15h00.	31
	Survol de 17h00.	31
	Raccordement des images de 15h00 et 17h00.	32
5	DISCUSSION	37
6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	39
6.1	Concernant les tests <i>in situ</i>	39
6.2	Concernant la télédétection et le traitement d'image	39
6.3	Concernant le système d'information géographique SPANS™	40
6.4	Globalement	40
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41
	ANNEXE I - DETAIL DU TRAITEMENT DES IMAGES	42
A1-1	Découpage des lignes de vol	42
A1-2	Etapes pour la correction radiométrique des images MEIS-II	42
A1-2.1	Valeurs minimales et maximales des niveaux de gris des images	42
A1-2.2	Calcul des luminances apparentes	43
A1-2.3	Calcul du facteur d'étalement <i>FE</i>	45
A1-2.4	Équation de correction radiométrique pour chaque bande	45



A1-2.5 Correction radiométrique des images	46
A1-3 Correction géométrique des images	46
A1-4 Rehaussements	46
A1-5 Etapes pour l'étalonnage des données MEIS-II	47
A1-5.1 Localisation des échantillons sur les images	47
A1-5.2 Calcul des régressions	47
A1-5.3 Choix des régressions	47
A1-5.4 Création d'un masque	47
A1-5.5 Calcul du facteur d'étalement de chaque régression	48
A1-5.6 Application des régressions aux images	48
A1-6 Application des classes aux images	49
ANNEXE II - DETAIL DES TACHES SPANS™	50
A2-1 Création d'une zone de travail	50
A2-2 Intégration des images numériques à SPANS™	50
A2-3 Transfert du système ARIES III au VAX	50
A2-4 Transfert du VAX au micro-ordinateur	51
A2-5 Transfert d'une image sur SPANS	51
A2-6 Raccordement spatial des images	53
ANNEXE III- RESULTATS DES TESTS DE DIFFUSION	54
ANNEXE IV- RESULTATS DES REHAUSSEMENTS	61



Liste des figures

3.1	Méthodologie de télédétection et de traitement d'images	12
3.2	Zones d'acquisition de données aéroportées dans la région d'étude.....	14
3.3	Spectre d'émission de la rhodamine WT	18
4.1	Expérience du lac Saint-Pierre - 15h00 - Modèle de régression linéaire entre la bande ME04 et la rhodamine WT	24
4.2	Expérience du lac Saint-Pierre - 17h00 - Modèle de régression linéaire entre la bande ME04 et la rhodamine WT	24
4.3	Expérience du tronçon Sorel-Tracy - 15h00 - Modèle de régression linéaire entre la bande ME04 et la rhodamine WT	25
4.4	Expérience du tronçon Sorel-Tracy - 17h00 - Modèle de régression linéaire entre la bande ME04 et la rhodamine WT	25
4.5	Image complète des concentrations en rhodamine WT montrant le panache original de Sorel-Tracy lors du survol de 15h00	28
4.6	Image tronquée des concentrations de rhodamine WT définissant la partie intacte de panache de Sorel-Tracy observé lors du survol de 15h00	29
4.7	Image des concentrations de rhodamine WT du panache de Sorel-Tracy observé lors du survol de 17h00	30
4.8	Image des concentrations de rhodamine WT du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 15h00	33
4.9	Image détaillée des concentrations en rhodamine WT de la partie amont du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 15h00	34
4.10	Image des concentrations de rhodamine WT du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 17h00	35
4.11	Image des concentrations en rhodamine WT du panache combiné observé au lac Saint-Pierre lors des survols de 15h00 et 17h00	36



A4-1	Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du lac Saint-Pierre - Survol de 15h00	62
A4-2	Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du lac Saint-Pierre - Survol de 17h00	63
A4-3	Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du tronçon Sorel-Tracy - Survol de 15h00	64
A4-4	Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Détail sur la partie valide de l'image du tronçon Sorel-Tracy - Survol de 15h00	65
A4-5	Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du tronçon Sorel-Tracy - Survol de 17h00	66



Liste des tableaux

3.1	Paramètres d'acquisition des images aéroportées	15
3.2	Caractéristiques spectrales des données MEIS-II	15
4.1	Coefficients de corrélation et de détermination pour les sites de Sorel-Tracy et du lac Saint-Pierre	23
4.2	Classification des concentrations en rhodamine du panache original Sorel-Tracy (survol de 15h00)	27
4.3	Classification des concentrations en rhodamine du panache tronqué Sorel-Tracy - (survol de 15h00)	27
4.4	Classification des concentrations en rhodamine du panache de Sorel-Tracy (survol de 17h00)	27
4.5	Classification des concentrations en rhodamine du panache du lac Saint-Pierre (survol de 15h00)	31
4.6	Classification des concentrations en rhodamine du panache du lac Saint-Pierre (survol de 17h00)	32
4.7	Classification des concentrations en rhodamine du panache complet du lac Saint-Pierre (survol de 13h00 et 17h00 réunis)	32
A1-1	Valeurs minimales et maximales des niveaux de gris des images	43
A1-2	Valeur des paramètres pour le calcul des luminances apparentes	44
A1-3	Coefficients des niveaux de gris pour le calcul des luminances apparentes étalées	44
A1-4	Equations de corrections radiométriques étalées	45
A3-1	Résultats du test de diffusion au site Tracy-Sorel	54
A3-2	Résultats de la caractérisation complémentaire au site Sorel-Tracy - Panache de Tioxyde	56



A3-3	Résultats de la caractérisation complémentaire au site Sorel-Tracy - Panache de Q.I.T.	58
A3-4	Résultats du test de diffusion au site du lac Saint-Pierre	59



RESUME

La présente étude rend compte de l'utilisation de la télédétection aéroportée (MEIS-II) combinée à un essai de traçage, afin de fournir un outil de validation pour la modélisation numérique des panaches d'effluents industriels dans le tronçon Tracy-lac Saint-Pierre. Deux secteurs spécifiques ont retenu l'attention: la partie fluvio-lacustre du lac et la partie purement fluviale au confluent du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Richelieu.

Une méthodologie a été développée de façon à cartographier l'extension spatiale et temporelle d'essais de diffusion d'un colorant traceur (Rhodamine WT) dans ces deux milieux. Les événements témoins obtenus ont été intégrés au système d'information géographique (S.I.G) SPANS™. Ceux-ci étaient destinés dans une phase ultérieure à servir à la validation d'un nouveau modèle de simulation lagrangien de panaches d'effluents (analyse des concentrations à l'aide de particules en mouvement). Cette méthodologie préconise une approche empirique de mise en relation entre des données spectrales de télédétection, transformées en luminance apparente ($W.cm^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$) avec les données *in situ*.

La meilleure corrélation (0,96) a été obtenue avec la bande rouge centrée à 596 nm. La méthode employée démontre qu'à partir d'une image corrigée radiométriquement, on peut créer une image de concentration de rhodamine WT d'après l'équation de régression et ainsi fournir une représentation spatio-temporelle de certaines caractéristiques hydrodynamiques du milieu aquatique. Toutefois, comme toute méthode de caractérisation de la concentration d'un soluté, un seuil de détection de 4 ppb a été constaté.

Des difficultés incontrôlables sur le terrain n'ont pas permis d'exploiter en totalité les résultats des tests réalisés. Le test du lac Saint-Pierre a produit tous les résultats désirés tandis que le test de Sorel-Tracy a été handicapé par l'interférence de sources de contamination industrielles dans la région de l'expérience. Ces sources étrangères à l'expérience y ont introduit des facteurs d'incertitude soit, sur les mesures *in situ* de rhodamine soit, sur la réponse du capteur aéroporté.



1 INTRODUCTION

1.1 Cadre de l'étude

Ce deuxième volume du rapport #1 portant sur la *Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre*, rend compte de l'utilisation de la télédétection comme outil permettant de valider le modèle de panache (voir le volume 3). Cette technique, lorsque combinée à un essai de traçage et à un système d'information géographique (SIG), permet de valider un modèle de simulation numérique du panache causé par le déversement ponctuel de contaminants industriels dans un milieu récepteur.

La validation d'un tel modèle peut être réalisée en comparant, dans le temps et dans l'espace, l'évolution du déplacement et de la concentration de particules (particle tracking) obtenues par simulation, au comportement du traceur mesuré sur le terrain et observé sur de grandes superficies au moyen de la télédétection. Une validation de cette nature est intéressante dans la mesure où elle s'applique à l'ensemble du tronçon modélisé, et non pas seulement aux endroits où des informations locales (limitées au transect) et pseudo-instantanées (durée du transect) sont disponibles (procédure classique).

La télédétection aéroportée, suite à un étalonnage des données à l'aide de mesures *in situ*, constitue un excellent moyen pour documenter de façon synoptique la dispersion et la concentration d'un traceur ainsi que la trajectoire de l'écoulement. Les données de terrain sont celles obtenues au cours de tests de diffusion. Ces essais ont été réalisés au moyen d'un colorant traceur (rhodamine WT) injecté en continu dans le milieu pour simuler le panache résultant d'un rejet d'effluent. Les essais de diffusion, lorsque combinés à la télédétection, permettent de déterminer l'étendue du panache, dans la dimension horizontale, et d'établir les variations de concentration du traceur à l'intérieur du panache ainsi défini.

L'ampleur de l'opération de télédétection menée dans le cadre du projet de modélisation intégrée, qui vise le suivi de la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent, se justifie par le caractère expérimental

de l'outil de simulation (le logiciel *PANACHE*¹). Cet outil a été développé pour prédire le comportement des contaminants une fois déversés dans le milieu récepteur. Suite à la validation analytique du modèle de panache, sur une base rigoureusement scientifique, son habileté à reproduire un panache réel devait obligatoirement être mise à l'épreuve. C'est pourquoi cette vaste opération de validation, qui fait l'objet de ce tome, a été menée dans le tronçon Tracy-lac Saint-Pierre. Soulignons que la comparaison entre les résultats prédits du modèle et ceux de la télédétection sera présentée dans un rapport distinct².

1.2 Objectifs

Dans le contexte global du projet de modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent, l'objectif visé par la présente étude consiste à créer des images numériques synoptiques de la propagation d'un traceur, images devant servir comme outil de validation pour la modélisation numérique de panaches d'effluents. Plus spécifiquement, cette étude vise:

- 1) *à obtenir sur le terrain un ensemble de données représentatives de la propagation en milieux fluvial et fluvio-lacustre d'un colorant traceur (la rhodamine WT) dans le tronçon Tracy - lac Saint-Pierre; la trajectoire, l'emprise et la concentration étaient les principales caractéristiques visées;*
- 2) *à établir une méthodologie de traitement numérique d'images aéroportées à des fins de représentation de la dispersion du colorant traceur. Cette méthodologie favorise une approche empirique qui met en relation des données spectrales de télédétection, transformées en luminance apparente ($W.cm^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$), et les données *in situ*;*
- 3) *à intégrer les résultats de la télédétection à un système d'information géographique afin de générer et documenter un événement de référence pouvant servir à l'étalonnage de la démarche mathématique retenue et, dans un second volet, à la validation du modèle.*

¹ Voir le rapport #2: *Développement et validation analytique d'un modèle lagrangien de simulation de panache d'effluents et de tributaires*. Ce rapport fait partie de la présente série.

² Voir le Rapport #1 , Volume 3 de la présente série: *Analyse numérique de la contamination du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre par les effluents industriels et les tributaires*.



Dans un premier temps, ce rapport sera consacré à la méthodologie de notre étude, soit celle des tests de diffusion et de la télédétection même, et considérera ensuite les données recueillies et de leur traitement. Dans un deuxième temps, les résultats expérimentaux seront présentés.

Et finalement, une conclusion portant sur la valeur de l'étude et les limites d'application de la télédétection ainsi que des recommandations pour optimiser l'utilisation des résultats obtenus, seront présentées.



2 TESTS DE DIFFUSION

Une caractérisation de la diffusivité de l'écoulement a été réalisée pour les secteurs de Tracy et du lac Saint-Pierre dans le but de recueillir des données de terrain devant permettre:

- 1) d'étalonner des images aéroportées (télédétection) en vue d'extrapoler dans l'espace et le temps les résultats de terrain;
- 2) d'étalonner les paramètres du modèle de simulation numérique des panaches et d'en valider les résultats.

A cette fin, une série de mesures de la concentration d'un traceur ont été prises dans le but de suivre, dans le temps et l'espace, l'évolution de panaches produits par l'injection d'un traceur dans les deux zones à l'étude. En ce sens, les essais de diffusion visaient un double objectif:

- 1) caractériser les conditions naturelles de mélange existant dans le corridor **fluvial** du tronçon, où sont localisés plusieurs effluents industriels, et
- 2) caractériser la diffusivité dans la portion **fluvio-lacustre** du tronçon formée par le lac Saint-Pierre, où se pratiquent la plupart des usages du milieu aquatique.

En plus, un effort de caractérisation des panaches résultant des effluents des compagnies TIOXIDE et Q.I.T. a été entrepris toujours à des fins de validation du modèle de panache. Finalement, des mesures de courants ont été prises sur un certain nombre de sections transversales aux panaches afin d'établir des bilans de masse du traceur injecté et vérifier les résultats hydrodynamiques du modèle de simulation des courants.

Pour répondre à des impératifs reliés à la validation du modèle de panache, les travaux de caractérisation devaient être effectués entre le 13 août et le 28 août 1990. Les mesures de courants devaient être prises pendant ou peu de temps après celles de diffusion afin d'obtenir un ensemble de données homogènes en regard du débit du fleuve et de ses principaux tributaires.

Les opérations de terrain ont été menées par la firme Roche Ltée, Groupe-Conseil (Roche, 1991) de la mi-juillet à la mi-septembre. Les tests de diffusion ont été réalisés le 21 août 1990 au lac Saint-Pierre, puis à Tracy dès le lendemain. Cependant, les mesures de courants ont été prises



plusieurs jours après les tests de diffusion, soit le 30 août et le 10 septembre au lac Saint-Pierre et à Tracy respectivement. Les conditions hydrodynamiques n'ont cependant pas varié significativement entre ces deux périodes.

2.1 Stratégie de réalisation

Les activités de terrain ont été divisées en deux phases pour chaque site: la pré-campagne et la campagne proprement dite. Cette dernière phase comprenait les tests de diffusion et les mesures de courants. La pré-campagne visait à familiariser l'équipe de terrain aux opérations afin d'assurer la réussite des essais. Le coût élevé de telles opérations et la rigidité des contraintes temporelles inhérentes aux survols de télédétection (météorologie, disponibilité des heures de survol, coordination des différentes équipes) nécessitaient ces pré-campagnes.

La pré-campagne permettait aussi une caractérisation sommaire du milieu en vue de préciser certains paramètres jugés importants à la réalisation efficace des essais, dont: la quantité de traceur et le débit d'injection nécessaires au repérage visuel des panaches, la vitesse approximative de déplacement du front des panaches, ainsi que les superficies couvertes par les panaches (emprises). Cette démarche a permis également de localiser sommairement les panaches de contamination produits par les rejets industriels de TIOXIDE et Q.I.T. dans le fleuve Saint-Laurent.

Suite aux résultats obtenus lors des premiers essais, l'équipe de terrain a procédé à la réalisation des tests de diffusion dans les deux zones ciblées et à une deuxième caractérisation des panaches d'effluents de TIOXIDE et Q.I.T., tandis que les secteurs faisaient l'objet de levés aéroportés.

Finalement, la campagne de mesures de courants a été réalisée plusieurs jours après les essais de diffusion en raison de difficultés reliées au mal-fonctionnement des appareils et à la disponibilité d'instruments de remplacement. Les débits du fleuve différaient d'à peine 3% entre les deux périodes. Il est à noter que les tests de diffusion et les mesures de courants ont tous été réalisés par temps calme.

2.2 Méthodologie et instrumentation

Les activités de terrain ont été réalisées à l'aide d'un certain nombre d'appareils de mesure. Cette section présente les principales caractéristiques techniques de ces équipements, de même qu'une brève description de leur utilisation.

2.2.1 Système de positionnement

Un appareil de positionnement de marque Del Norte a été utilisé pour localiser les points d'échantillonnage. En raison des grandes superficies à couvrir (environ 10 km²) et pour assurer une couverture complète des deux zones d'étude, trois balises ont été installées à proximité de repères géodésiques implantés en bordure du fleuve et sur certains phares. L'émetteur principal, qui était placé à bord de l'embarcation, permettait l'affichage des distances séparant l'antenne mobile du bateau des balises au sol (antennes fixes). L'erreur théorique maximale sur les distances affichées est de un mètre (Roche, 1991). Les coordonnées des points de mesure ont ensuite été calculées par triangulation et sont fournies dans le quadrillage MTM (Modified Transverse Mercator). La précision sur les coordonnées peut être supérieure à quatre mètres selon la configuration géométrique entre le bateau et les balises au sol.

2.2.2 Essais de traçage

La rhodamine WT a été utilisée comme colorant traceur dans les essais de diffusion. Une pompe péristaltique à vitesse variable a servi à l'injection d'une concentration pré-déterminée de rhodamine à un débit constant. Le temps d'injection devait être suffisamment long de manière à simuler au mieux des conditions stationnaires de rejet industriel.

Les échantillons d'eau recueillis en surface ont été prélevés au moyen d'une perche métallique extensible munie à une de ses extrémités d'une bouteille d'échantillonnage. Pour les mesures en profondeur, une bouteille de type Kemmere 1220TT de 2,2 litres et une corde graduée ont permis d'échantillonner l'eau à la profondeur désirée.

Les échantillons ont été par la suite analysés en laboratoire à l'aide d'un fluorimètre de marque Turner et de modèle 10-005 avec une erreur maximale de $\pm 0,5\%$.

2.2.3 Bathymétrie

La profondeur d'eau a été mesurée à tous les points de prélèvement à l'aide d'un écho-sondeur de marque Raytheon et de type DE-719C. L'appareil a été calibré quotidiennement permettant ainsi d'obtenir des profondeurs d'eau avec une erreur maximale de 0,1 mètre selon la nature du fond et la qualité de l'eau.



2.2.4 Mesures de courants

La vitesse et la direction des courants ont été mesurées à des profondeurs équivalentes à 20%, 60% et 80% de la profondeur d'eau à la station de mesure. Les lectures ont été obtenues au moyen d'un courantomètre de marque NBA et de modèle DMC-3. L'erreur maximale sur les valeurs mesurées est de l'ordre de 2,5% sur la vitesse et de 10° sur la direction des courants.

2.2.5 Mesures complémentaires

Un des volets des activités de terrain visait à caractériser les panaches de contamination résultant des effluents des compagnies TIOXIDE et de Q.I.T. A cette fin, la température et la conductivité de l'eau ont été mesurées à l'aide d'un appareil de marque YSI et de modèle 33M S-C-T avec une précision de $\pm 0,1$ °C et de $\pm 2,5\%$ micromhos/cm. Par ailleurs, les analyses de la turbidité, de la couleur et du pH⁺ des échantillons d'eau ont été effectuées en laboratoire.

2.3 Résultats

Les résultats de la caractérisation de l'écoulement dans les secteurs du lac Saint-Pierre et de Tracy-Sorel sont présentés sommairement dans cette section. Les résultats détaillés (coordonnées des stations de mesures, profondeur de l'eau et concentrations en rhodamine) des essais de traçage sont disponibles sous forme de tableaux synoptiques à l'Annexe III. Il en est de même pour les caractérisations des panaches industriels de la TIOXIDE et de la Q.I.T.

2.3.1 Essai de traçage dans le secteur du lac Saint-Pierre

Le test de diffusion au lac Saint-Pierre a nécessité l'injection de 240 litres de rhodamine à un débit de 2 L/min, ce qui correspond à une concentration initiale de 102 500 ppm qui a été injectée à un mètre du fond. Ces conditions ont résulté en un panache, dont l'emprise présentait une ouverture d'environ 6°. Ce panache a été échantillonné jusqu'à une distance d'environ 7 km à partir du point d'injection. Les concentrations de rhodamine mesurées en surface et à un mètre du fond présentent peu de variations en aval d'un point situé à environ 1 500 m de l'injection. La profondeur de l'eau ne dépasse pas 6 m dans cette partie du lac Saint-Pierre.



2.3.2 Essai de traçage dans le secteur de Tracy-Sorel

A l'exception de la concentration initiale du traceur qui s'élevait à 103 000 ppm, les conditions d'injection sont demeurées sensiblement les mêmes que celles au lac Saint-Pierre. L'emprise du panache présentait une ouverture d'environ 10° dans sa zone initiale; celui-ci a été échantillonné sur une distance de 7 km. Les valeurs de la concentration en rhodamine mesurées en surface et à 6 m de profondeur sont à peu près les mêmes à partir d'une distance d'environ 3 000 m du point d'injection.

Notons qu'en cours d'essai, le panache de rhodamine et celui produit par l'émissaire de la Q.I.T. se sont superposés rendant difficile le repérage visuel du traceur entre le quai de la Q.I.T. et l'embouchure de la rivière Richelieu. Soulignons également la présence dans une zone adjacente à l'expérience (près du quai de la Q.I.T.) de masses d'eau présentant des caractéristiques optiques pouvant être confondues avec de l'eau colorée à la rhodamine. Ce facteur peut être dû au transbordement de minerai ou encore, aux rejets de l'usine d'Acier Atlas en amont lesquels contiennent une forte proportion de fluorures (fluorescence?). Ces énoncés doivent cependant être considérés comme des hypothèses.

2.4 Analyse et validation des résultats

Afin d'évaluer la représentativité des résultats obtenus sur le terrain en vue de leur intégration au processus de validation du modèle de panache, il est essentiel de vérifier si les mesures de concentration de rhodamine et de courants respectent un bilan de conservation de la masse injectée de traceur.

2.4.1 Bilans massiques

Etant donné le caractère stationnaire d'une injection ponctuelle dans le milieu récepteur d'une quantité connue d'un traceur sur une période de plusieurs heures, il est donc possible de réaliser un bilan massique pour une section donnée du panache avec la relation suivante:

$$M = \sum_{i=1}^n (v L H C)_i \quad [2.1]$$

où,

C: la concentration mesurée en un point;



- H*: la profondeur d'eau au point de mesure;
L: la largeur d'influence du point de mesure;
M: la masse de traceur injectée par unité de temps;
n: le nombre de points de mesures dans la section du panache;
v: la vitesse moyenne de l'écoulement dans la cellule considérée (LxH).

Dans ce calcul, nous supposons que la profondeur d'eau est constante sur la largeur de la cellule, que la concentration du traceur est homogène sur toute la colonne d'eau, et que la vitesse moyenne est égale à celle mesurée à 60% de la profondeur d'eau au point de mesure.

Dans le secteur du lac Saint-Pierre, les résultats obtenus sont généralement concluants puisque, pour toutes les sections considérées, les bilans massiques sont conformes à la quantité de rhodamine effectivement injectée. Les bilans présentaient en moyenne une erreur relative de -6,2% par rapport à la valeur injectée qui était de 3,417 g/s, soit une concentration de 102 500 ppm injectée à un débit de 2 L/min. Le test de diffusion mené au lac Saint-Pierre semble être représentatif du milieu fluvio-lacustre que représente l'entrée du bras sud où a été effectué le test, et peut donc être utilisé pour la validation du modèle de panache.

Par contre, dans le secteur de Sorel-Tracy, les bilans massiques réalisés pour plusieurs sections du panache de rhodamine ne donnent pas les résultats escomptés (erreurs de l'ordre de 50% et plus et comportement bi-modal). La présence de masses d'eau d'origine différente au confluent de la rivière Richelieu et du fleuve, le mélange du panache de rhodamine avec celui de la Q.I.T., et la présence de masses d'eau présentant des caractéristiques optiques similaires à de l'eau colorée à la rhodamine compliquèrent le repérage visuel et le suivi du traceur. Pour ces raisons, seulement une partie des résultats de l'essai de diffusion peut servir à la validation du panache simulé dans ce secteur.

En plus de ces difficultés, diverses sources d'erreurs peuvent expliquer en partie les variations observées sur les bilans massiques. En ce sens, soulignons les possibilités suivantes :

- la précision des appareils de mesure (courantomètre, pompe);
- le délai de plusieurs jours entre les mesures de diffusion et de courants;
- la collecte des données de concentrations et de courants effectuée sur des sections différentes;
- un repérage inadéquat des limites du panache;
- et des données partielles pour certains points d'échantillonnage.



En résumé, le test de diffusion du lac Saint-Pierre a produit des résultats qui peuvent être exploités pour le couplage avec les images de télédétection et par la suite pour valider le modèle numérique de panaches. Le test de Sorel-Tracy n'a pas livré tous les résultats escomptés et seule une partie peut faire l'objet de la démarche subséquente.



3 IMAGES AEROPORTEES

La figure 3.1 illustre les principales étapes requises pour l'utilisation des images aéroportées avec les données *in situ*. Chacune des étapes sera décrite en détail par la suite.

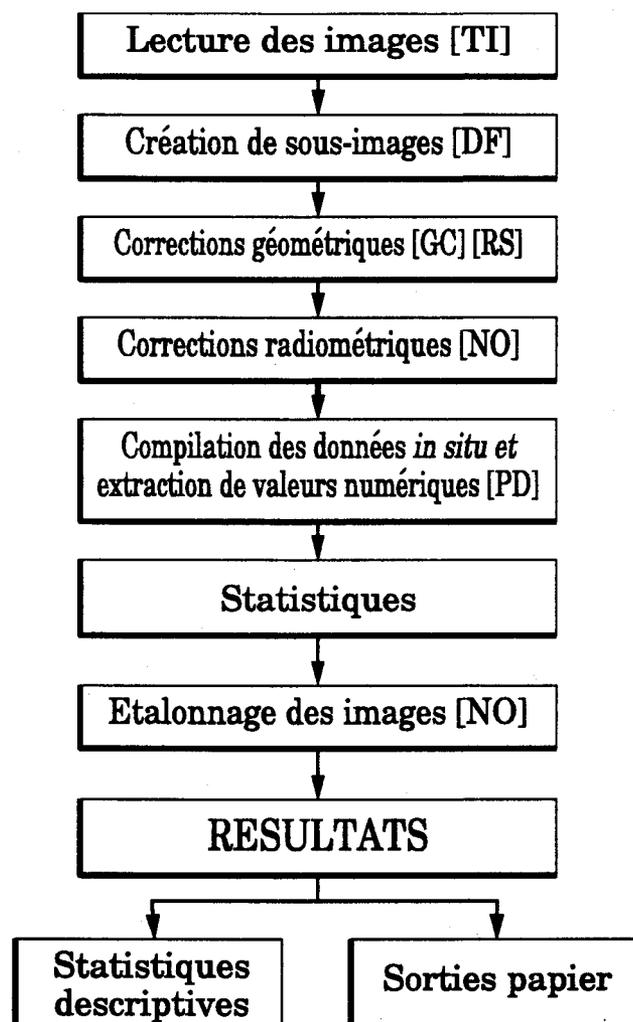


Figure 3.1 Méthodologie de la télédétection et du traitement des images



3.1 Acquisition des données de télédétection

Cette étape comprend toutes les opérations nécessaires à l'acquisition des images, incluant la coordination des survols avec les équipes de terrain et les modalités de contrôle des opérations reliées aux conditions météorologiques. Nous n'allons pas élaborer ici sur les deux derniers aspects assumant le lecteur familier avec ces contingences.

3.1.1 *Survols*

Deux ensembles de données multispectrales ont été obtenues dans le cadre de ce projet. Le premier ensemble a été recueilli le 20 août 1990 à 15h00 et 17h00, heure locale, au-dessus de la zone du lac Saint-Pierre (figure 3.2). L'acquisition du deuxième ensemble a été effectuée le lendemain, soit le 21 août 1990, également à 15h00 et 17h00, mais cette fois-ci dans la région de Sorel-Tracy (figure 3.2). Le délai de 2 heures entre chacun des survols avait pour but de suivre la dispersion de la rhodamine WT sur une plus longue période et de générer ainsi un événement continu sur une période de 4 heures. La résolution est de 3 mètres pour la zone du lac Saint-Pierre et de 2 mètres pour la zone de Tracy. Ces tailles de pixel nous semblent adéquates, compte tenu de la largeur du fleuve à ces endroits, de la précision recherchée et de la direction des survols. Les paramètres d'acquisition sont résumés au tableau 3.1.

3.1.2 *Capteurs et bandes spectrales*

Les images ont été acquises au moyen du capteur MEIS-II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) muni d'un filtre «*Water*» développé pour l'étude des plans d'eau, et dont les bandes spectrales sont données au tableau 3.2.

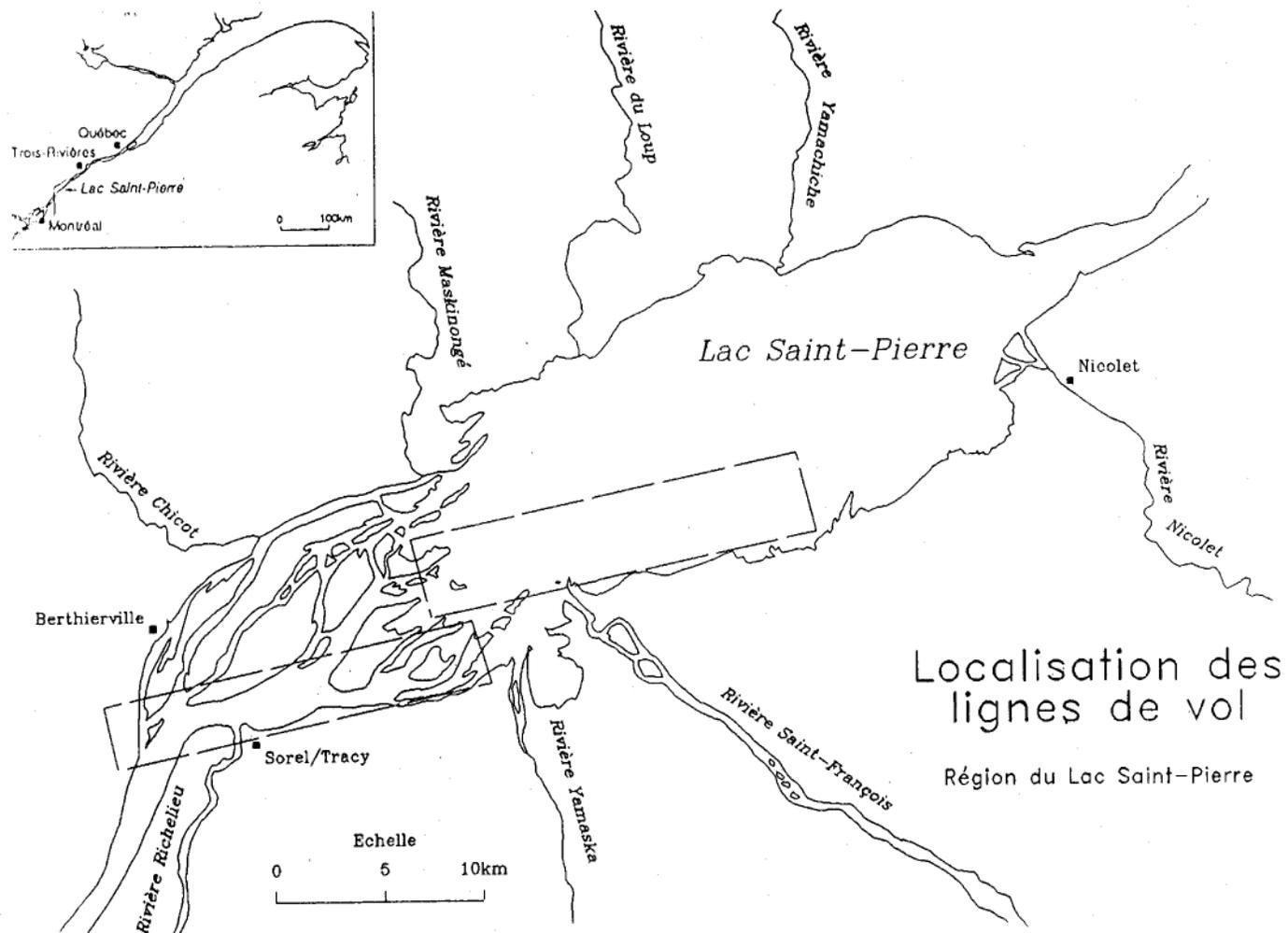


Figure 3.2 ZONES d'acquisition de données aéroportées dans la région d'étude



Tableau 3.1 Paramètres d'acquisition des images aéroportées

PARAMETRES	Sorel-Tracy		Lac Saint-Pierre	
	Survol 1	Survol 2	Survol 1	Survol 2
Date	21/08/90	21/08/90	21/08/90	21/08/90
Heure locale	15h00	17h00	15h00	17h00
Altitude (km)	2,80	2,83	4,18	4,21
Résolution (m)	2	2	3	3
Angle azimutal(°)	70	250	55	234

Tableau 3.2 Caractéristiques spectrales des données MEIS II (filtre Water)

Bande spectrale	Zone du spectre	Centre des bandes spectrales [nm]
ME06	Bleu	448
ME05	vert	517
ME07	Vert	548
ME04	Vert	596
ME03	rouge	640
ME01	rouge	675
ME00	Proche infrarouge (1)	750
ME02	Proche infrarouge (2)	874

3.2 Pré-traitement

Cette étape consiste à préparer les données aéroportées en vue du traitement numérique des images qui sera effectué en deux phases de pré-traitement: la correction géométrique et la correction radiométrique.



3.2.1 Correction géométrique

L'aspect géométrique d'une image est primordial en traitement numérique ne serait-ce que pour assurer un calage précis de l'information obtenue en télédétection sur des données au sol. En effet, les vols en avions n'ont pas la stabilité d'une plate-forme satellitaire. Des facteurs humains (pilote), mécaniques (avion), et météorologiques (stabilité de la masse d'air) sont autant d'éléments qui contribuent à dégrader la géométrie réelle des images.

La correction en temps réel de ces nombreux effets n'est pas toujours suffisante et efficace, de sorte que certaines caractéristiques de l'image ne correspondent pas toujours à la réalité sur le terrain (Villeneuve et coll., [sans date]). Par conséquent, une correction géométrique supplémentaire doit être appliquée aux images.

Dans ce sens, des points de contrôle sont identifiés sur l'image afin de faciliter son calage dans un système de coordonnées, de préférence à partir d'un système de projection MTM, plus précis, afin que les éléments du paysage puissent prendre une position par rapport à une référence cartographique. L'erreur résiduelle est alors inférieure à 5 mètres en colonne et 3 mètres en ligne lorsque les corrections géométriques sont effectuées en utilisant 12 points de contrôle au sol. Par la suite, on doit définir une fonction de ré-échantillonnage. En effet, comme la position géométrique du pixel a été changée par le calage de l'image, il convient donc de lui affecter une nouvelle valeur de gris qui correspond à sa nouvelle position sur l'image.

La qualité de l'image résultante dépend de la méthode de ré-échantillonnage choisie. La méthode du "plus proche voisin" permet de conserver intacte l'information de nature statistique contenue dans l'image ré-échantillonnée (Campbell, 1986). On peut alors assumer que l'image reconstruite constitue habituellement une reproduction radiométrique acceptable de l'image originale.

3.2.2 Correction radiométrique

Une correction radiométrique, qui transforme les valeurs de niveaux de gris relatifs (DN) en valeurs de luminance apparente ($W.cm^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$) au capteur, a aussi été appliquée aux images (équation A1-1 de l'annexe 1). Ceci a pour effet de normaliser les valeurs de luminance par rapport au bruit induit par le capteur qui est différent pour chacune des images. Pour les données aéroportées MEIS, cette transformation tient compte du gain et de la sensibilité spectrale de chaque bande, de la fréquence de balayage et du temps d'exposition.



3.3 Traitement

Dans cette étude, on fait appel à deux étapes d'analyse: le rehaussement radiométrique et l'étalonnage des données.

Dans la première étape du traitement, un algorithme de rehaussement des contrastes qui tient compte de la variabilité des niveaux de gris est appliquée à l'événement à représenter, c'est-à-dire, le panache de rhodamine. *Cette étape d'analyse n'est réalisée qu'à des fins d'interprétation visuelle et non d'étalonnage.* Une étude sur les caractéristiques spectrales de la rhodamine WT a été effectuée avant de tester les différentes techniques de rehaussement d'image. De cette façon, il est possible de ne retenir que les bandes qui offrent le maximum d'information sur le colorant traceur.

L'étalonnage des images avec les valeurs de concentration en rhodamine est effectué dans une seconde étape ce qui permet de créer les classes quantitatives correspondant à l'intensité du paramètre étudié. Ces résultats d'analyses sont par la suite intégrés à un système d'information géographique (SPANS) afin de documenter et de générer les événements de référence pour les fins de validation-terrain du modèle *PANACHE*; on vise également à faciliter la diffusion des résultats. La séquence des traitements effectués sur les images et les différentes étapes conduisant à son intégration sont présentées en détail aux annexes I et II.

3.3.1 Choix des bandes spectrales

La figure 3.3 présente les caractéristiques spectrales de la rhodamine WT; notons que ce traceur peut être détecté de deux façons: soit par absorption, soit par fluorescence. En effet, la rhodamine WT est très absorbante dans la partie verte du spectre centrée autour de 554 nm (ME05/07). Elle est également fluorescente puisqu'elle retransmet à 582 nm (ME04) de l'énergie qu'elle a absorbée à une longueur d'onde plus courte; ce phénomène se manifeste par un pic sur la courbe de réflectance.

En ce qui concerne la présente étude, cinq des huit bandes du capteur MEIS-II comportent une qualité d'information suffisamment bonne pour permettre de discriminer la rhodamine WT. Il s'agit des données enregistrées dans les bandes verte et rouge (ME07/05/04/03/01). L'image enregistrée dans la bande infra-rouge (ME00/02) a servi à masquer la terre. L'absorption de l'infra-rouge par l'eau empêche la détection de la rhodamine tandis que, dans la bande bleue (ME06), aucune information claire n'a été obtenue à cause de la diffusion atmosphérique.

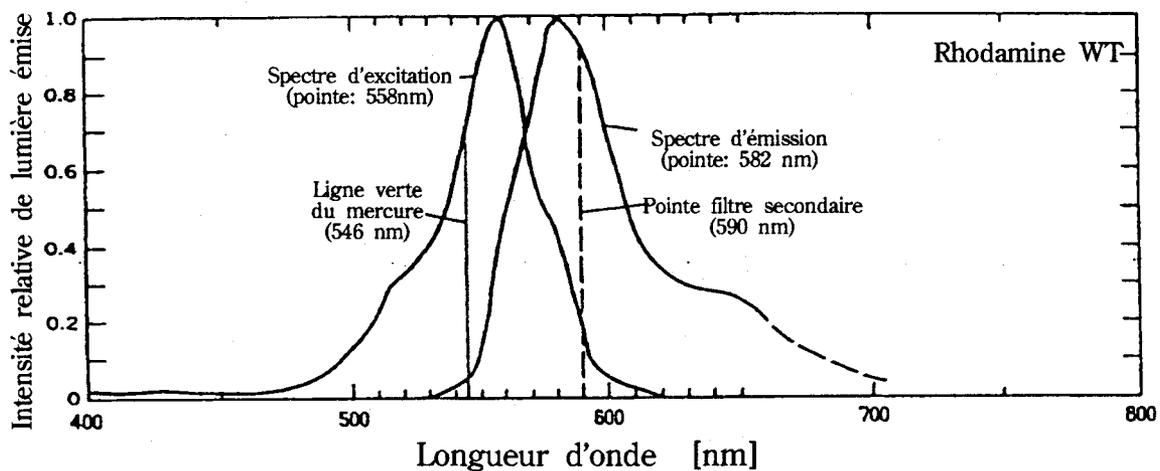


Figure 3.3 Spectre d'émission de la rhodamine WT

3.3.2 Traitement de rehaussement des images

Le traitement des données a débuté par l'application d'un masque sur tous les pixels de l'image qui ne correspondent pas à l'eau. Cette opération a pour but de permettre une analyse qui sera limitée à la partie de l'image couvrant le fleuve et ses tributaires.

Ensuite, le rehaussement des images a été effectué en deux étapes. D'abord un filtre médian, avec une fenêtre de 9x9 pixels a permis de mieux définir les contours et de réduire le bruit périodique produit par le capteur (réseau de lignes sur les images). Ensuite, on a testé une méthode dite "de décorrélation" permettant d'éliminer la corrélation entre les bandes spectrales. Cette approche préconise, en plus d'une transformation des bandes spectrales en composantes principales (CPs), un étalement des composantes suivi d'une transformation inverse, c'est-à-dire, un retour dans le système original des axes (Grenon, 1989). Le test de décorrélation a permis de préciser les panaches ce qui a facilité leur détection.

Les résultats de ce traitement sont présentés à l'annexe IV sous forme de documents photographiques à différentes échelles.

3.3.3 Etalonnage des images

On procède à l'étalonnage des images à l'aide des données recueillies au sol. Cependant, l'erreur de positionnement entre les sites d'échantillonnage sur le terrain et leur position sur les images peut



atteindre 10 mètres, introduisant ainsi une incertitude sur la valeur spectrale du site ciblé. Une correction est donc requise afin de tenir compte de cette imprécision de positionnement ainsi que de l'hétérogénéité de la rhodamine associée à la turbulence en certains endroits du panache.

Pour ce faire, le pixel correspondant à chacun des points d'échantillonnage *in situ* est d'abord repéré, puis on note sa valeur numérique (luminance apparente) et celle des 25 pixels environnants [5x5]. La valeur moyenne est ensuite attribuée au pixel central.

La valeur numérique moyenne ainsi obtenue permet d'établir l'équation de régression entre l'image et les données *in situ*. Pour chaque bande spectrale ou rapport de bande, on détermine la régression qui fournit le meilleur coefficient de corrélation; puis, on applique l'équation de régression à l'image pour produire une image de concentrations de rhodamine. De plus, afin de mener à bien l'étalonnage, il est nécessaire de masquer tous les pixels de l'image qui ne correspondent pas au panache de rhodamine de façon à considérer certains facteurs qui affectaient la distribution des données. Ce point sera abordé plus en détail au chapitre 5 (DISCUSSION).

Un aspect important de la méthodologie réside dans la représentativité des sites d'échantillonnage dont les valeurs spectrales servent à établir la droite de régression. L'indice utilisé pour évaluer la validité des sites d'échantillonnage est le résidu standardisé. Tout résidu standardisé excédant 2,0 en valeur absolue a été considéré comme douteux et exclu de l'analyse.

3.4 Intégration des images au système d'information géographique SPANS™

Les systèmes d'information géographiques (SIG) sont des systèmes intégrés qui permettent la saisie, le stockage, la manipulation, l'analyse et la représentation de l'information à caractère spatial. Cette technologie permet de représenter les éléments à la surface de la terre en utilisant des données de toutes sortes pour ainsi interpréter différents phénomènes étudiés. Ces données peuvent être introduites dans les SIG de plusieurs façons : entrée manuelle, balayage optique, numérisation, utilisation d'images satellites et aéroportées.



Les images aéroportées de la diffusivité des écoulements du tronçon Tracy - Lac Saint - Pierre ont été intégrées dans SPANS™ dans le but de faciliter la comparaison éventuelle¹ du comportement de panaches simulés à celui observé sur le terrain. De cette façon, il sera possible de valider, à partir de ces images, la concentration, l'emprise et l'écart sur la trajectoire de modèles de simulation lagrangien de panaches d'effluents.

3.4.1 Création d'une zone de travail

Il est important de définir, à l'intérieur du système d'information géographique SPANS™, une zone de travail (répertoire) qui permet de stocker tous les fichiers relatifs à l'intégration des éléments témoins. En plus de contenir tous les fichiers, cette zone comprend les informations relatives à la localisation du site et le type de projection utilisé.

Ainsi deux zones ont été établies : une pour le site de Sorel - Tracy et une l'autre pour le site du lac Saint-Pierre. Ces deux zones ont été délimitées par deux points opposés, suffisamment éloignés, formant ainsi une fenêtre, pour englober les deux images de chacune des deux localisations.

C'est également à ce stade que l'on définit la résolution des régions à l'étude qui, dans le logiciel SPANS™, est représentée par le niveau de QUAD-TREE²

3.4.2 Transfert des images

Suite à la création de la zone d'étude, il est possible de passer à l'injection des images dans le système d'information géographique. Ainsi, pour les deux sites retenus, les images ont été intégrées dans un format compatible à SPANS™.

Pour assurer l'intégration des données dans le logiciel, les images doivent remplir les deux conditions suivantes : elles doivent être dans un format binaire et elles doivent être accompagnées d'un fichier d'en-tête sous un format ASCII. Comme les images en provenance de DIPIX sont directement en

¹ Comparaison réalisée dans le Volume 3 de la représentée série : *Simulation des panaches d'effluents industriels et des tributaires du tronçon de Tracy - les Saint-Pierre et analyse de la contamination des usages.*

² La base de donnée de ce programme est structurée selon un mode de classification et de hiérarchisation spatiale de l'information selon la résolution recherchée. Chaque accroissement de niveau de résolution double la précision locale et accroît potentiellement la base de données par un facteur quatre, d'où l'expression "QUAD-TREE".



format binaire, il n'y a pas vraiment de transformation à faire à ce niveau. Cependant, il est important de posséder un fichier d'en-tête. Ce dernier doit contenir les informations suivantes : la projection pour permettre de localiser géographiquement l'image ainsi que les points de référence au sol, la valeur du pixel en x et en y et finalement la dimension de l'image, c'est-à-dire le nombre de lignes qui incorpore les images dans la librairie de SPANSTM permettant ainsi d'effectuer diverses manipulations.

Pour permettre des analyses ultérieures sur les données fournies par les images, il est nécessaire de transformer les images nouvellement intégrées dans le système d'information géographique en une carte. Ceci permet également de produire une classification qui, dans notre cas, est réalisée à l'aide de l'image des concentrations en rhodamine. En effet, il est possible d'évaluer la correspondance en valeurs de gris et, par la suite, d'établir les limites d'une classification qui est appliquée aux images de 15h00 et 17h00. Il est à noter cependant que les classes retenues sont subjectives et favorisent une bonne interprétation visuelle du panache.

3.4.3 Raccordement des images

Puisque la méthode employée pour réaliser les tests de diffusion comportait deux étapes consécutives d'une durée de deux heures (approche lagrangienne), il était requis de raccorder *a posteriori* les deux images des panaches obtenus pour 15h00 et 17h00 pour assembler les résultats de l'expérience. Ce traitement a été réalisé au site du lac Saint-Pierre produisant ainsi un événement-témoin d'une durée de 4 heures. Le raccordement s'est fait en additionnant simplement les concentrations du panache amont et du panache aval chacun dans son propre repère. Les deux panaches se chevauchent partiellement au milieu de l'expérience. En effet, la tête du panache de 15h00 (partie aval de l'image) la dispersion longitudinale de colorant forme une frange diffusive laquelle est complétée dans le processus d'addition par la frange amont (queue du panache) de l'image de 17h00. Cette procédure n'a pas causé de difficulté particulière au lac Saint-Pierre.



4 RESULTATS DE L'ETALONNAGE DES IMAGES

4.1 Données statistiques

Sur la base de considérations théoriques (James et coll., 1968), un modèle linéaire a été élaboré systématiquement pour chacune des relations entre la concentration de rhodamine [ppb] et les bandes spectrales ($W.cm^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$).

4.1.1 Choix des échantillons

Une première étape importante de cette procédure consiste à vérifier la validité des sites d'échantillonnage dont les valeurs spectrales d'une fenêtre de 5x5 pixels sont intégrées comme variable indépendante dans l'équation de régression. L'indice utilisé pour valider individuellement chaque site d'échantillonnage est le résidu standardisé. Cette vérification démontre qu'une certaine stratification est nécessaire pour bien étalonner les images. D'autre part, les faibles valeurs de concentration de rhodamine WT (moins de 4 ppb) sont souvent associées à de forts résidus. Cette observation suggère que les modèles retenus ne permettent pas d'estimer avec une précision acceptable les très faibles valeurs de rhodamine.

4.1.2 Analyse des résultats de régression

Le tableau 4.1 présente les meilleurs résultats obtenus pour les sites de Sorel-Tracy et du lac Saint-Pierre. Le coefficient de corrélation linéaire simple (r de Pearson) indique que les variations de luminance apparente peuvent être corrélées significativement avec la concentration de rhodamine avec un seuil de probabilité à 95% (r varie entre 0,881 et 0,974). Les coefficients de corrélation sont validés à partir d'une table de r basée sur le nombre de degrés de liberté et le nombre de variables indépendantes dans le modèle (Kennedy et Neville, 1974). La meilleure configuration pour détecter la rhodamine est donc obtenue avec ME04 centrée à 596 nm.

Pour évaluer la qualité de l'ajustement, nous avons eu recours au coefficient de détermination, noté r^2 . Celui-ci permet d'évaluer la proportion de la variation de la luminance qui est expliquée par la droite de régression. La régression linéaire est basée sur la méthode des moindres carrés pour



laquelle la somme des carrés des écarts verticaux entre chaque point du nuage et la droite de régression est minimale. Ainsi, il nous est possible d'affirmer que les luminances apparentes expliquent entre 78 et 95% de la variation de la rhodamine dans ce tronçon du fleuve Saint-Laurent.

Tableau 4.1 Coefficient de corrélation et de détermination pour les sites de Sorel-Tracy et du lac Saint-Pierre.

SURVOL	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de détermination (r^2)	F	Prob.→ F
Lac Saint-Pierre 15h00	0,974*	0,95	226	0,0001
Lac Saint-Pierre 17h00	0,954*	0,91	182	0,0001
Sorel-Tracy 15h00	0,883*	0,78	36	0,0001
Sorel-Tracy 17h00	0,881*	0,78	63	0,0001

*(r) est significatif au seuil de probabilité de 0,05

Par ailleurs, le test F a également été utilisé pour évaluer la qualité de l'ajustement. La valeur de F doit être plus grande que celle marquée dans les tables de distribution F . Les résultats montrent que les valeurs de F obtenues sont effectivement plus élevées que celles des tables confirmant ainsi l'exactitude des modèles. Une dernière statistique permettant d'évaluer la précision des modèles est la probabilité que la valeur F excède la valeur critique. Pour des modèles développés selon une optique de prédiction, il faut que cette probabilité soit la plus faible possible. Pour tous nos modèles (tableau 4.1), cette probabilité est extrêmement faible.

Les figures 4.2 à 4.5 illustrent les relations obtenues pour chacune des couvertures aéroportées. De façon générale, les ajustements obtenus pour le site du lac Saint-Pierre sont plus précis que ceux du site de Sorel-Tracy. La présence de masses d'eau d'origine différente (et présentant des qualités optique interférant avec la rhodamine) en face du quai de transbordement de Tracy, les structures turbulentes de grande échelle associées à des eaux de qualité distincte au confluent de la rivière Richelieu et du fleuve, ainsi que le mélange du panache de rhodamine avec celui de Q.I.T. peuvent expliquer ces différences de résultats.



Figure 4.1
 Expérience du lac Saint-Pierre - 15h00
 Modèle de régression linéaire entre
 la bande ME04 et la rhodamine WT

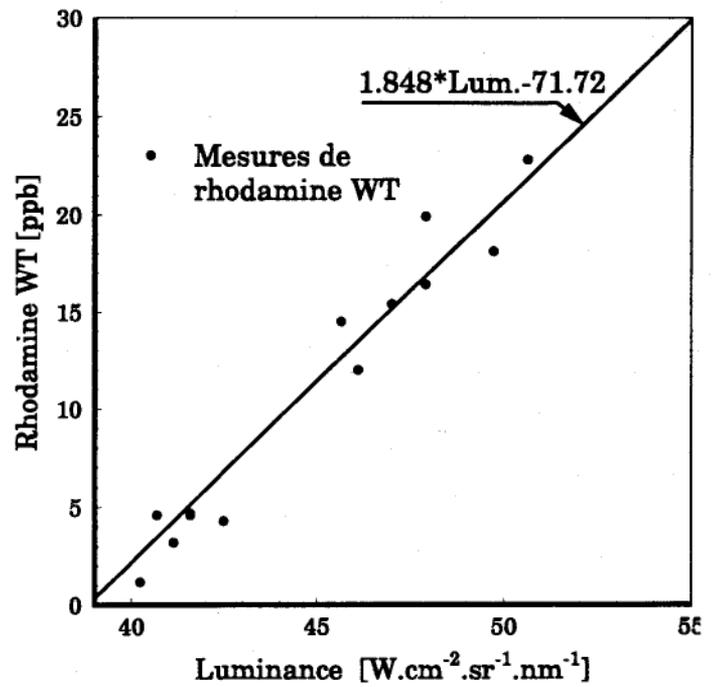


Figure 4.2
 Expérience du lac Saint-Pierre - 17h00
 Modèle de régression linéaire entre
 la bande ME04 et la rhodamine WT

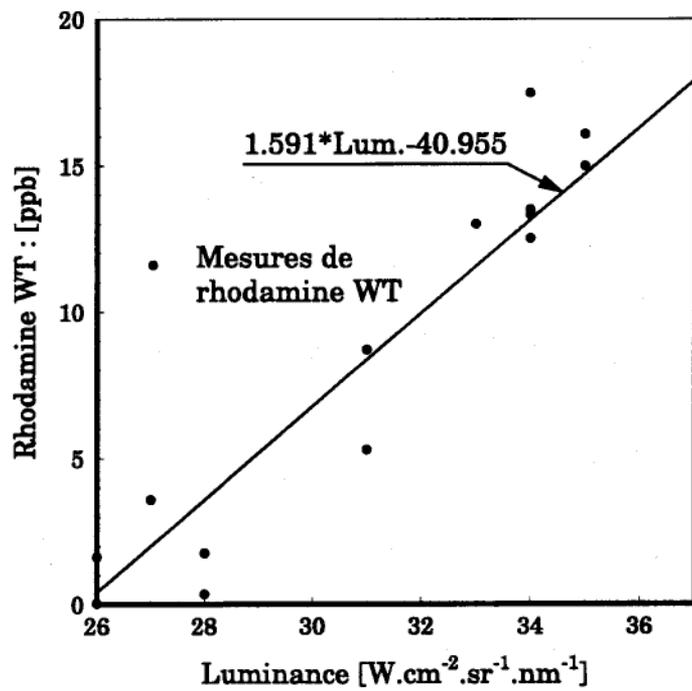


Figure 4.3
Expérience de Sorel-Tracy - 15h00
Modèle de régression linéaire entre
la bande ME04 et la rhodamine WT

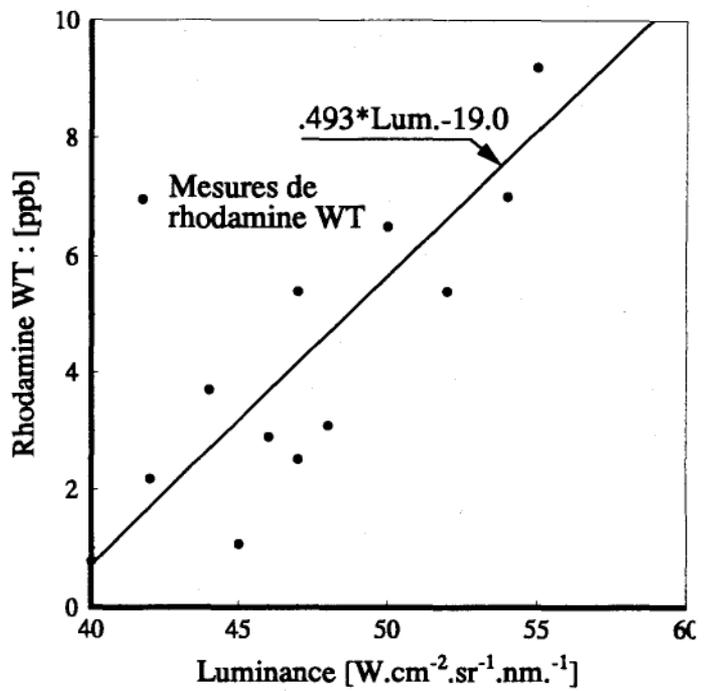
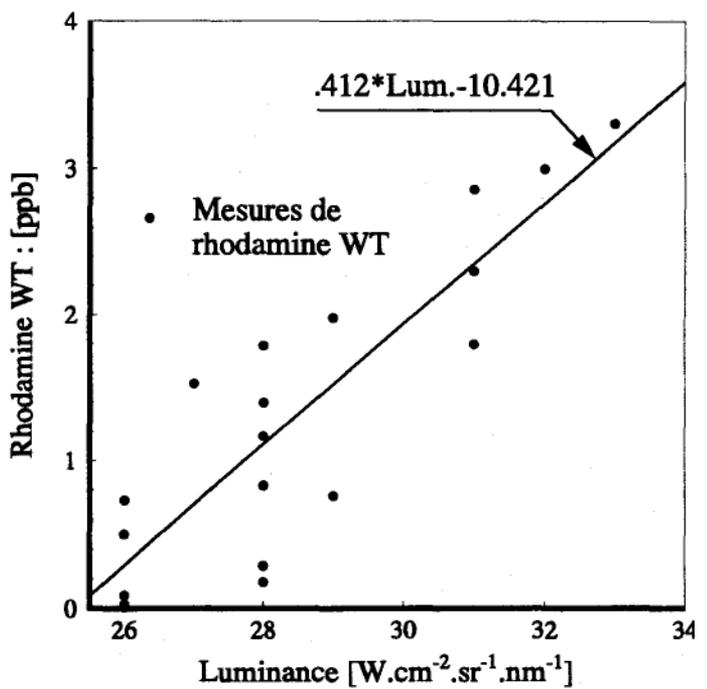


Figure 4.4
Expérience de Sorel-Tracy - 17h00
Modèle de régression linéaire entre
la bande ME04 et la rhodamine WT





4.2 Concentration de rhodamine

Cette partie fournit une description sommaire du contenu en information des images thématiques montrant la distribution spatio-temporelle de la rhodamine pour chacune des classes de concentration.

4.2.1 Analyse des résultats du panache Sorel-Tracy

Tel qu'il a été mentionné au chapitre 2 (TESTS DE DIFFUSION), des difficultés expérimentales n'ont pas permis de réaliser un panache continu qui aurait été obtenu par le raccordement des données de 15h00 et de 17h00. Les sections qui suivent en témoignent puisque l'image de 15h00 a dû être amputée de sa partie aval introduisant ainsi une discontinuité spatiale.

Survol de 15h00. L'image originale de rhodamine de 15h00 comptait au départ 143 différents niveaux de gris. Ces niveaux ont été regroupés en 4 classes qui correspondent à des valeurs concentration de rhodamine se situant entre 0.0 et 22.98 ppb (figure 4.5).

Lors du survol, le panache s'étendait sur une longueur d'environ 3400 mètres avec une emprise apparente maximale de 125 mètres. A une distance d'environ 400 mètres du point d'injection, on remarque la présence d'une seconde trace de coloration similaire à la rhodamine prenant son origine au quai de Saint-Joseph-de-Sorel et longeant celui-ci vers l'aval. Cette trace persiste sur plusieurs kilomètres. De plus, le panache de rhodamine intersecte exactement celui de l'effluent principal de Q.I.T. lequel, en raison de ses qualités optiques d'absorption de la lumière (rejets noirâtres,) empêche la détection de la rhodamine. Étant donné qu'à partir de ce point, la diffusion de la rhodamine a été passablement perturbée, nous avons dû nous résoudre à ne retenir que les 400 premiers mètres visibles¹ de l'image.

Dans le tableau 4.2, on remarque la nette prédominance de la première classe de concentration qui couvre, après seulement deux heures, plus de la moitié de la surface du panache. Au tableau 4.3 (panache tronquée à 400 m), on remarque que la première classe est toujours bien représentée mais que la distribution entre les trois dernières classes est beaucoup plus similaire (figure. 4.6).

¹ Comptés à partir du point où le panache revient à la surface de l'écoulement



Survol de 17h00. L'image obtenue à 17h00 contenait au départ 53 niveaux de gris qui étaient associés à de faibles valeurs de concentration. Une seule classe suffisait donc à couvrir l'ensemble des concentrations selon la classification retenue pour l'image de 15h00 (Tableau 4.4). Ce panache mesurait un peu moins de 4000 mètres de longueur et son emprise variait entre 150 et 480 mètres (figure 4.7). Le raccordement de ces deux panaches n'a pas été effectué pour les raisons mentionnées précédemment.

Tableau 4.2 Classification des concentrations en rhodamine du panache original de Sorel-Tracy (survol de 15h00)

CLASSES [ppb]	%	% Cumulatif	km ²
1 (0,00 - 10,02)	54,07	54,07	0,149859
2 (10,03 - 12,58)	35,77	89,95	0,099151
3 (12,59 - 15,62)	9,25	99,09	0,025634
4 (15,63 - 22,98)	0,91	100	0,002511
Total des 4 classes	100		0.277155

Tableau 4.3 Classification des concentrations en rhodamine du panache tronqué de Sorel-Tracy (survol de 15h00)

CLASSES [ppb]	%	% Cumulatif	km ²
1 (0,0 - 10,0)	49,5	49,5	0,011
2 (10,0 - 12,6)	17,7	67,2	0,004
3 (12,6 - 15,6)	22,2	89,3	0,005
4 (15,6 - 23,0)	10,7	100,0	0,002
Total des 4 classes	100,0		0,022

Tableau 4.4 Classification des concentrations en rhodamine du panache de Sorel-Tracy (survol de 17h00)

CLASSES [ppb]	%	% Cumulatif	km ²
1 (0.00 - 10.02)	100.00	100.00	0.726

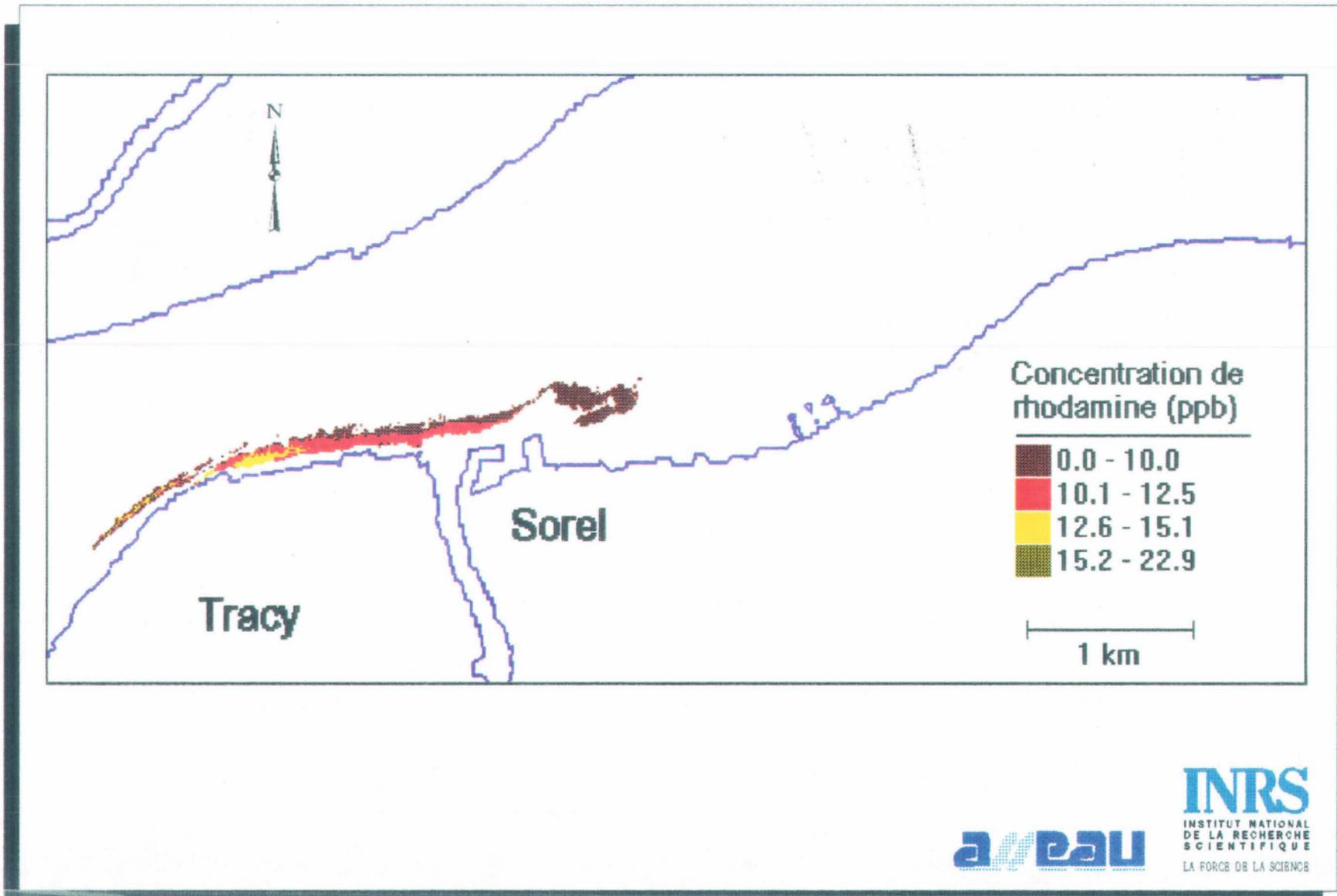
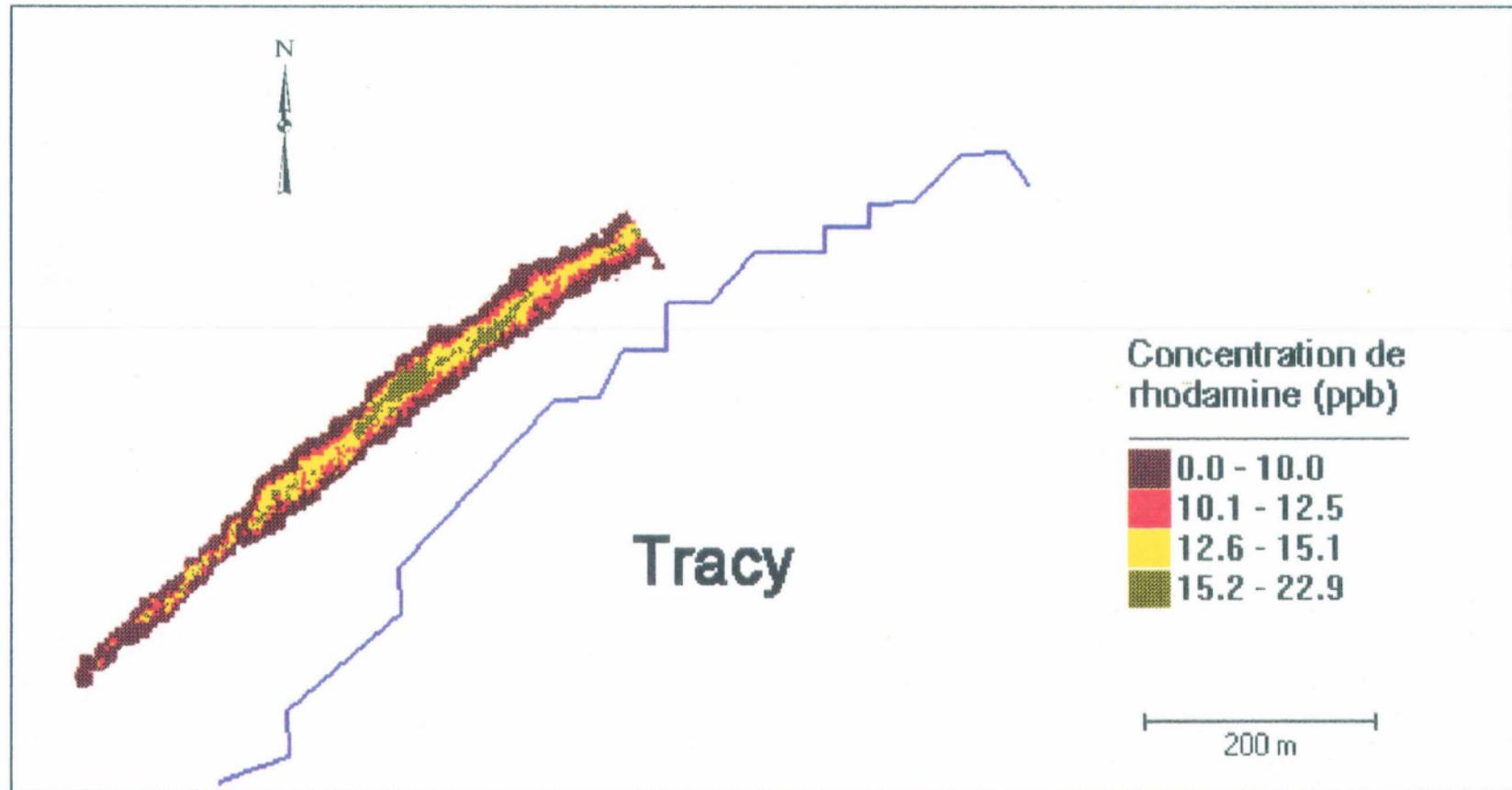
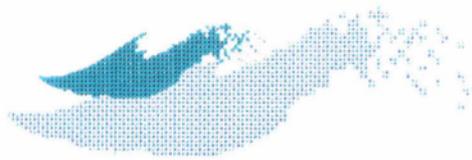


Figure 4.5 Image complète des concentrations en rhodamine WT montrant l'ensemble du panache de Sorel-Tracy lors du survol de 15h00



aveau

INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Figure 4.6 Image tronquée des concentrations de rhodamine WT définissant la partie intacte de panache de Sorel-Tracy observé lors du survol de 15h00

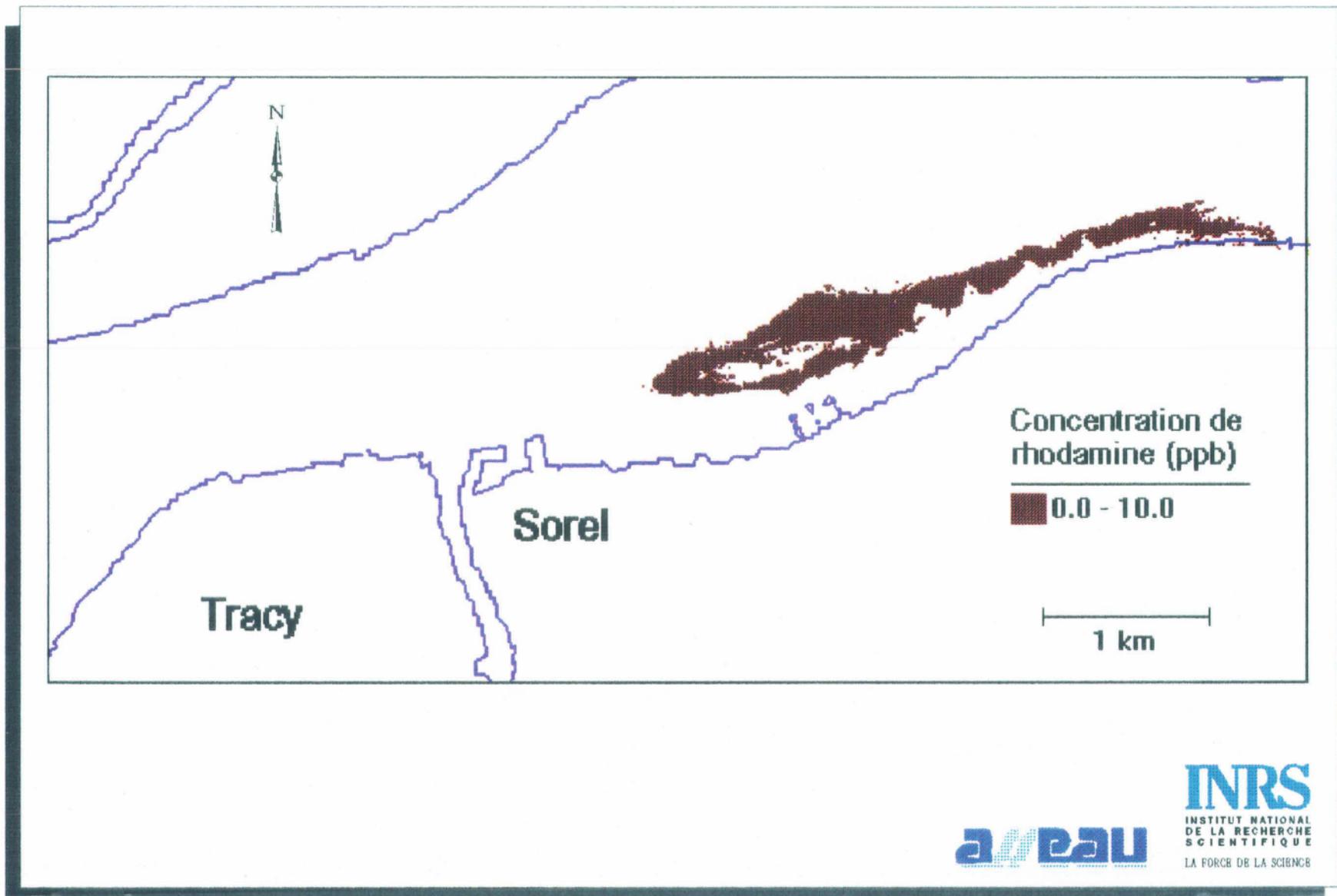


Figure 4.7 Image des concentrations en rhodamine WT du panache de Sorel-Tracy observé lors du survol de 17h00



4.2.2 Analyse des résultats du panache du lac Saint-Pierre

Contrairement à l'expérience précédente, le test du lac Saint-Pierre a permis le raccordement des images obtenues lors des deux survols.

Survol de 15h00. L'image de 15h00 comptait 99 niveaux de gris qui ont été répartis en quatre classes de concentration en rhodamine. Le panache s'étend sur une distance d'environ 3200 mètres et son emprise atteint 120 mètres à certains endroits (figures 4.8 et 4.9). Le tableau 4.5 montre qu'une très forte proportion de faibles valeurs de concentration (4,00 à 24,37 ppb) a été obtenue au lac Saint-Pierre.

Tableau 4.5 Classification des concentrations en rhodamine du panache obtenu du lac Saint-Pierre (survol de 15h00)

CLASSES [ppb]	%	% Cumulatif	km ²
1 (4,0 - 7,0)	25,4	25,4	0,060
2 (7,0 - 10,0)	19,7	45,2	0,047
3 (10,0 - 13,0)	19,9	65,1	0,047
4 (13,0 - 16,0)	19,4	84,5	0,046
5 (16,0 - 20,0)	9,1	93,6	0,022
6 (20,0 - 30,0)	4,3	97,8	0,010
7 (30 et +)	2,2	100,0	0,005
Total des 7 classes	100,00		0,238

Survol de 17h00. L'image de rhodamine de 17h00 compte 52 niveaux de gris regroupés en cinq classes de concentration. On note au tableau 4.6 que le panache a doublé en superficie ce qui traduit l'effet diffusif de l'écoulement. Comme dans le cas précédent, le panache s'étend sur près de 3200 m mais son emprise s'est accrue de 80 m à 250 m approximativement (figure 4.10).



Tableau 4.6 Classification des concentrations en rhodamine définissant du panache du lac Saint-Pierre (survol de 17h00)

CLASSES [ppb]	%	% cumulatif	km ²
1 (4,0 - 7,0)	13,5	13,5	0,072
2 (7,0 - 10,0)	11,5	25,0	0,061
3 (10,0 - 13,0)	38,3	63,3	0,205
4 (13,0 - 16,0)	32,9	96,2	0,176
5 (16,0 et +)	3,8	100,0	0,020
Total des 5 classes	100,00		0,535

Raccordement des images de 15h00 et 17h00. La figure 4.11 illustre le résultat du raccordement des panaches de 15h00 et de 17h00 pour l'expérience de diffusion du lac Saint-Pierre et le tableau 4.7 montre l'importance relative des différentes classes de concentration sur cette image synthèse.

Tableau 4.7 Classification des concentrations en rhodamine du panache complet du lac Saint-Pierre (survol de 13h00 et 17h00 réunis)

CLASSES [ppb]	%	% Cumulatif	km ²
1 (4,0 - 7,0)	16,4	16,4	0,126
2 (7,0 - 10,0)	14,0	30,4	0,107
3 (10,0 - 13,0)	33,1	63,5	0,254
4 (13,0 - 16,0)	29,1	92,6	0,223
5 (16,0 - 20,0)	5,4	98,0	0,042
6 (20,0 - 30,0)	1,3	99,3	0,010
7 (30,0 et +)	0,7	100,0	0,005
Total des 7 classes	100,00		0,767

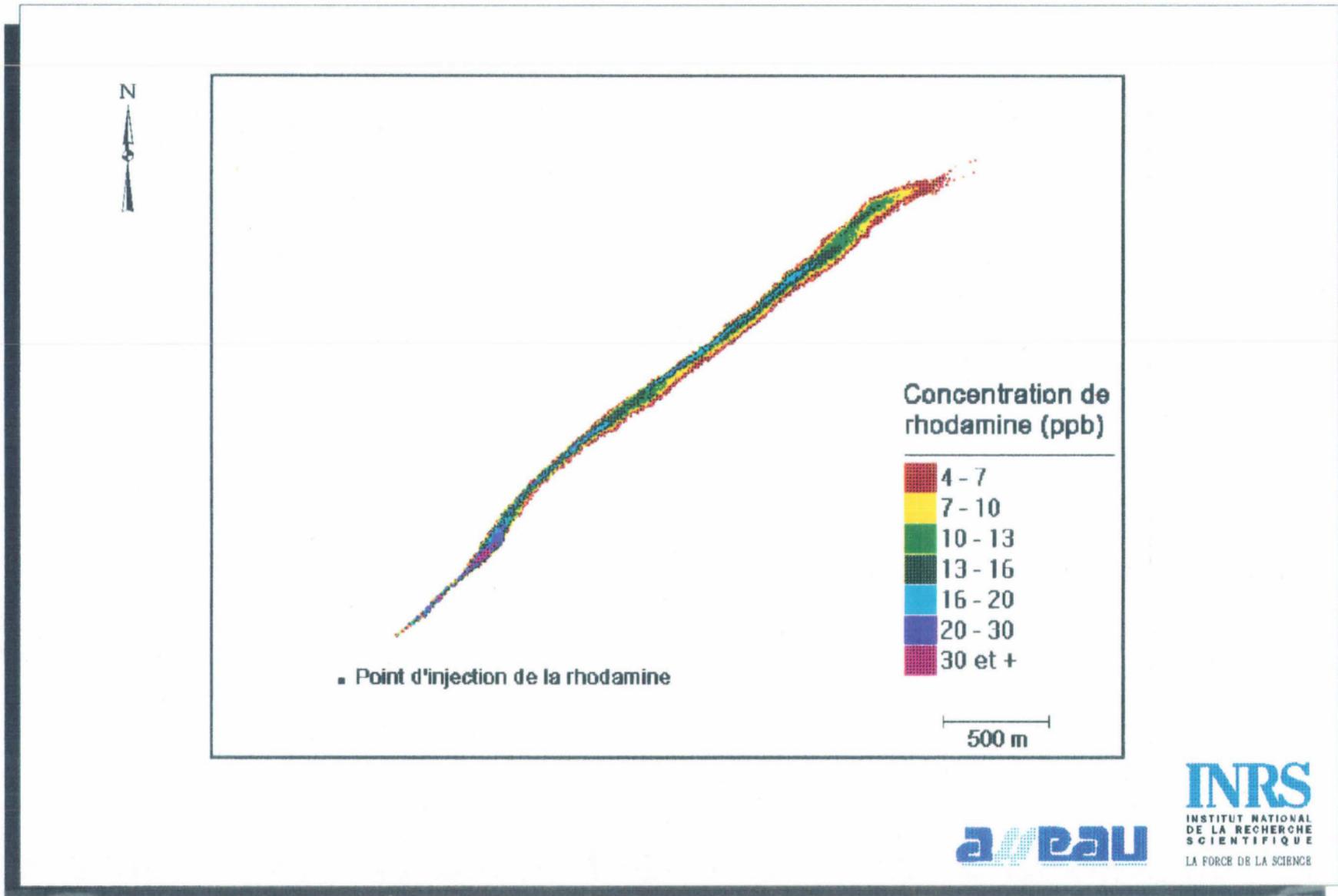


Figure 4.8 Image des concentrations en rhodamine WT du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 15h00

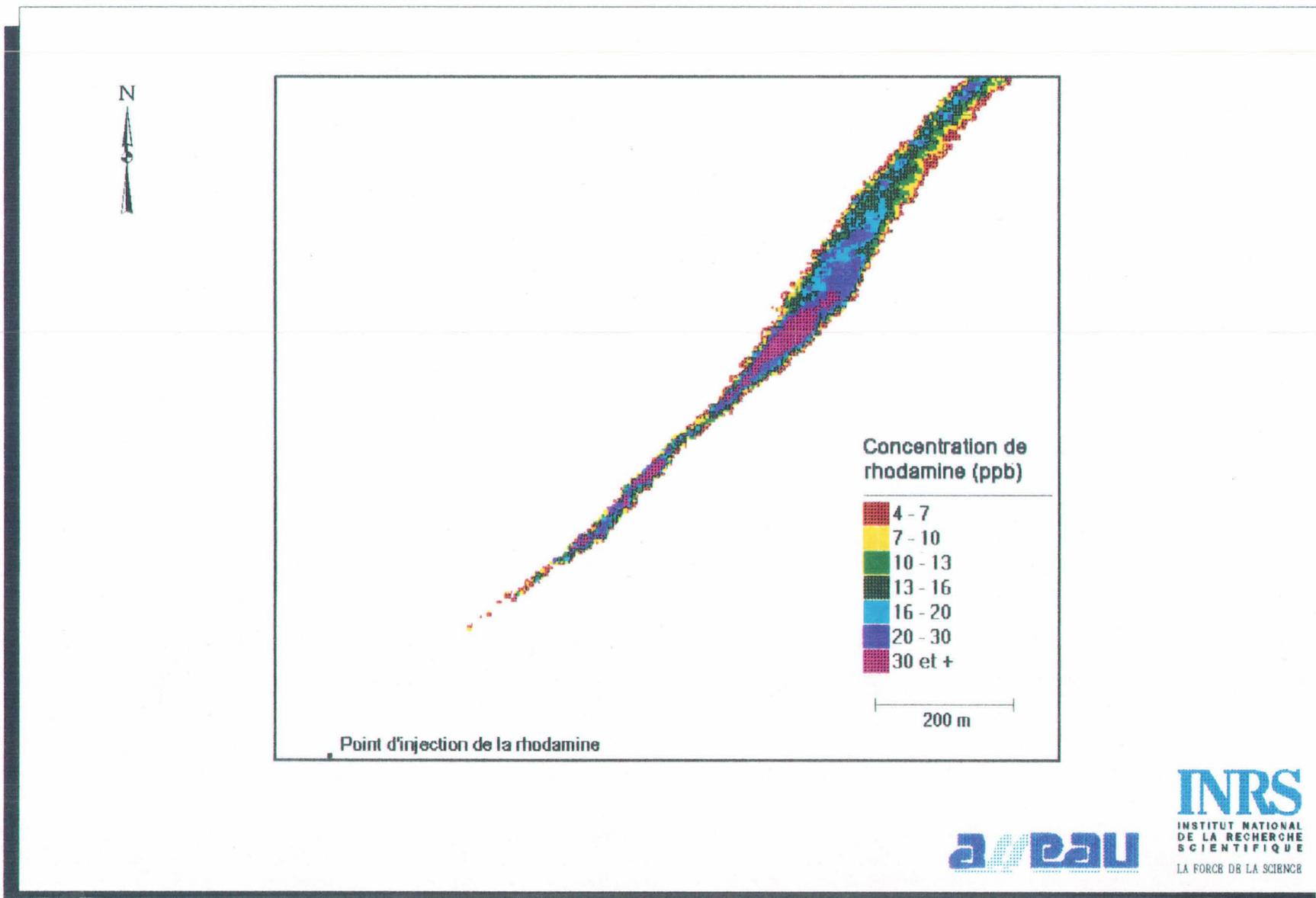


Figure 4.9 Image détaillée des concentrations en rhodamine WT de la partie amont du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 15h00

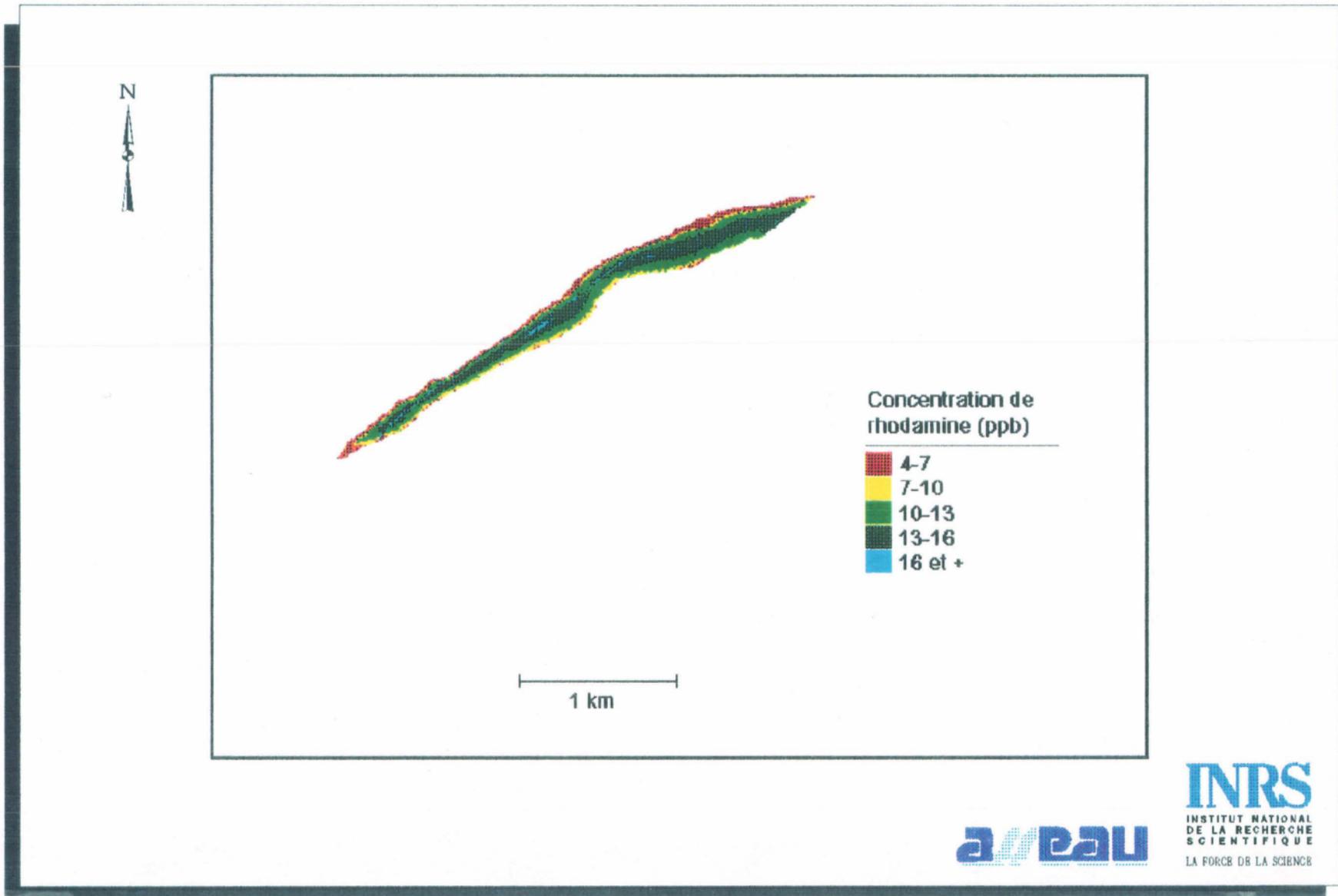


Figure 4.10 Image des concentrations en rhodamine WT du panache observé au lac Saint-Pierre lors du survol de 17h00.

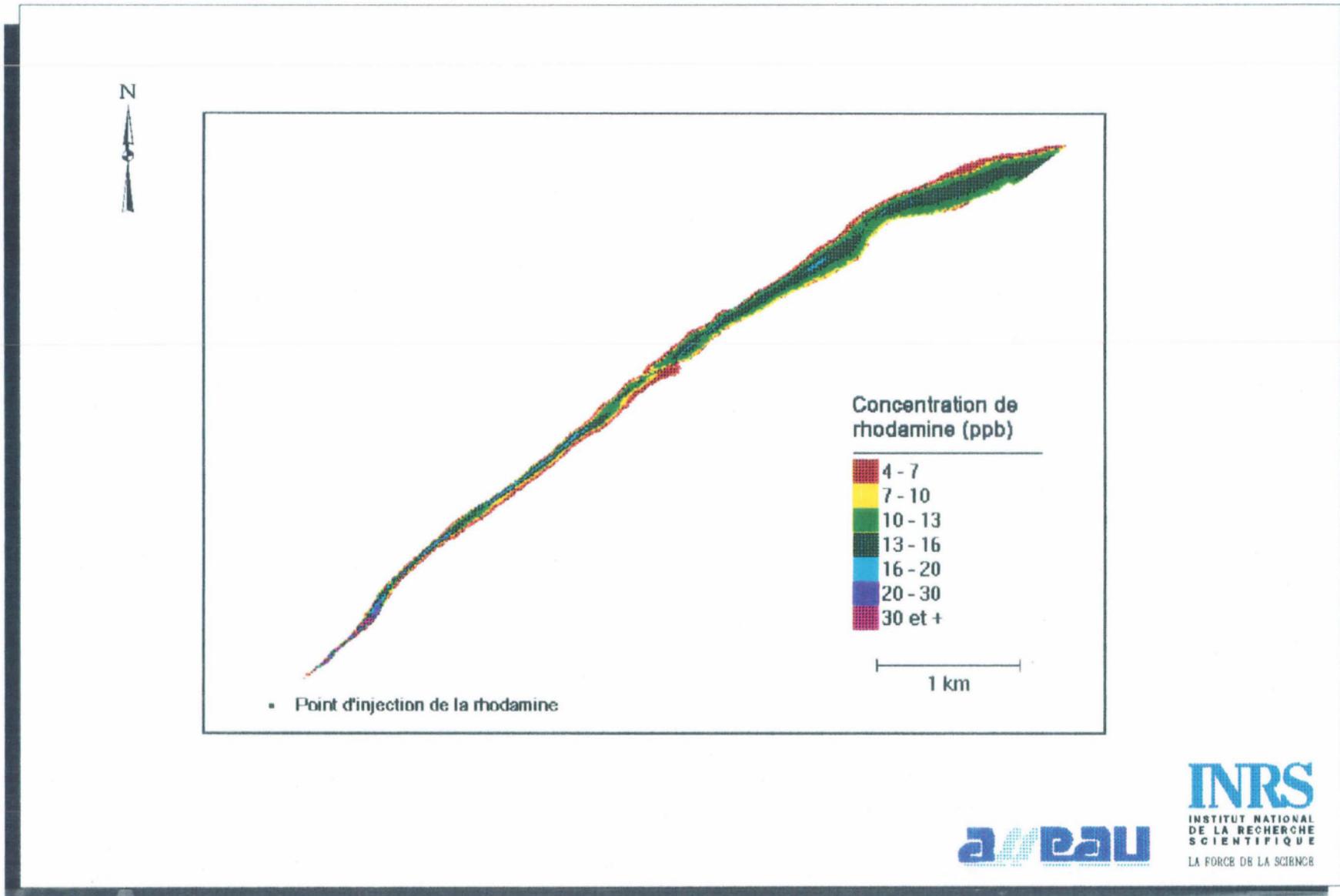


Figure 4.11 Image des concentrations en rhodamine WT du panache combiné observé au lac Saint-Pierre lors des survols de 15h00 et 17h00



5 DISCUSSION

Les résultats des ajustements linéaires ont démontré l'efficacité du capteur MEIS-II, centré à 596 nm, pour détecter des concentrations de rhodamine WT dans le milieu récepteur. Les techniques de régression ont aussi été exploitées à titre expérimental. De fait, il a été constaté que les faibles valeurs de concentrations (moins de 4 ppb) sont souvent associées à de forts résidus. Cette observation suggère que les modèles retenus ne permettent pas d'estimer avec une précision acceptable les faibles valeurs de rhodamine. Il est possible que la prise en compte d'un ou plusieurs facteurs supplémentaires puisse améliorer les résultats des modèles d'ajustement. Parmi ces facteurs, on compte principalement la bathymétrie et la présence d'algues ou de plantes aquatiques (chlorophylle).

Une bonne connaissance de la bathymétrie est essentielle dans les analyses de la qualité de l'eau. En effet, le signal réfléchi par un substrat composé de sédiments fins peut entraîner une surestimation de la rhodamine, notamment dans les secteurs où l'eau est peu profonde et où les faibles concentrations du colorant permettent à la lumière incidente de pénétrer et d'atteindre le fond plus facilement.

Certains facteurs biologiques, chimiques et physiques peuvent également expliquer certaines difficultés lors de l'étalonnage des faibles valeurs de rhodamine. En effet, certains paramètres comme la présence de matières en suspension et de substances dissoutes telles que les algues, les minéraux, les polluants domestiques et certains rejets industriels peuvent modifier, ou encore se confondre aux propriétés spectrales du traceur.

La contrainte de temps en fonction des passages aéroportés est également un aspect important à considérer. Il n'est pas exclu qu'une certaine dégradation photo-chimique de la rhodamine puisse se produire lorsque cette dernière demeure assez longtemps exposée aux rayons solaires. De plus, dans la région proximale de l'injection, le phénomène de dispersion hydrodynamique du colorant fait apparaître des fortes variations locales de concentration due à la présence et à la propagation de structures turbulentes dont la dimension caractéristique est comparable à l'emprise transversale du panache. Comme le survol produit une image instantanée du phénomène, il en résulte une certaine imprécision des données obtenues due au décalage temporel entre le moment de captage



de l'image et les mesures *in situ*. Cette imprécision s'atténue avec le temps au fur et à mesure que l'emprise du panache progresse et que les structures turbulentes disparaissent avec le phénomène de diffusion.

L'utilisation d'une fenêtre 5×5 pour déterminer la valeur du signal du capteur aux points de contrôle est typique des filtres utilisés dans les études expérimentales de la turbulence. Cela revient à minimiser (lisser) les instabilités turbulentes; de même, l'imprécision due aux incertitudes de positionnement des sites d'échantillonnage sur le terrain et leur correspondance sur les images est atténuée par l'application de cette procédure de filtrage.

Compte tenu des éléments qui viennent d'être mentionnés, les résultats de télédétection comportent des limites d'imprécision et des caractéristiques inhérentes aux méthodes employées qui doivent être prises en compte soigneusement lors de leur utilisation dans les étapes subséquentes, en l'occurrence ici, la validation-terrain du logiciel *PANACHE*.



6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Concernant les tests *in situ*

L'objectif fixé au départ a été partiellement atteint puisque les résultats de la caractérisation de l'écoulement dans le tronçon à l'étude n'a fourni que pour un seul secteur, celui du lac Saint-Pierre, un ensemble complet de données de référence qui pourra servir à la validation ponctuelle des concentrations prédites par le logiciel *PANACHE*.

Dans l'avenir, les chances de succès de tests de diffusion semblables pourront être augmentées par un choix plus éclairé des zones cibles. Celles-ci devraient idéalement se situer dans des secteurs du fleuve où les conditions de mélange sont caractéristiques d'un nombre limité de causes et où, les interférences visuelles ou qualitatives en provenance d'autres masses d'eau ou sources de contamination seront absentes ou négligeables.

6.2 Concernant la télédétection et le traitement d'image

Des analyses utilisant la régression statistique ont servi à l'étalonnage d'images aéroportées servant à définir le panache produit par un colorant-traceur lors de tests fluviaux de diffusion. Dans l'élaboration des modèles de régression, nous assumons que la luminance apparente est directement proportionnelle à la concentration de rhodamine WT. Le haut degré de corrélation obtenu entre la réponse spectrale et les données *in situ* est une indication du potentiel de la télédétection aéroportée comme outil de définition synoptique de panaches de colorant-traceur et, éventuellement, de validation de modèles de simulation de ces événements.

L'amélioration des résultats dépend grandement de la précision de la localisation des échantillons sur le terrain et sur les images ainsi que de l'intervalle de temps qui sépare l'acquisition des données *in situ* des survols. Enfin, nous sommes d'avis que l'utilisation d'une image bathymétrique nous procurerait une modélisation plus efficace pour étalonner les valeurs de concentration de rhodamine WT (régression multiple).



6.3 Concernant le système d'information géographique SPANS™

Quoique le système ARIES III se prête également à certaines de ces fonctions, le système d'information géographique SPANS™ s'est révélé un outil précieux pour des fins de représentation, de classification, d'analyse et d'intégration des données. De plus, la compatibilité entre ce système et les micro-ordinateurs est un avantage intéressant en vue d'exploiter les résultats à des fins de validation du modèle numérique de panaches d'effluent.

6.4 Globalement

En vue de valider un nouveau modèle de simulation de panaches d'effluents industriels, l'obtention de données synoptiques s'avérait importante pour fournir une représentation spatiale complète de certaines caractéristiques hydrodynamiques du milieu fluvial. La télédétection aéroportée combinée à un test de diffusion et à un système d'information géographique fournit les conditions de propagation d'un traceur sur une grande étendue tout en permettant d'en contrôler l'aspect temporel.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Campbell, J.B. (1987).** Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, New York, 551 p.
- Dubé, C., A. Lamare et T. Alfoidi (1988).** "Résultats préliminaires d'une méthode d'évaluation de la dispersion des rejets des eaux usées dans le fleuve Saint-Laurent par télédétection". Actes du 11e symp. can. de télédétection, Waterloo, Ontario, 22-25 juin, pp. 2820-2824.
- Grenon, A. (1983).** "La décorrélation: maximiser les composés colorés". Actes du 12e symp. can. de télédétection, Vancouver, Colombie-Britannique, 10-14 juillet, pp. 1617-1620.
- James, B. et F. Wilson (1968).** "Fluorometric procedures for dye tracing". Techniques of water-resource investigations of the United States Geological Survey. Chap. A12, 32 p.
- Kennedy, J.B. et A.M. Neville (1976).** Basic statistical methods for engineers and scientists. Harper & Row Publishers Inc., New York.
- McColl, W.D., R.A. Neville et S.M. Till (1983).** "Multidetector Electro-optical Imaging Scanner MEIS-II". Actes de 8e symp. can. de télédétection, Montréal, Québec, 3-5 mai, pp. 71-79.
- ROCHE Ltée, Groupe Conseil (1990).** Compte-Rendu de tests de diffusion à la rhodamine dans le secteur Tracy-lac Saint-Pierre. Pour le compte de l'INRS-Eau et du Centre Saint-Laurent. Décembre.
- Villeneuve, J.P., J.P. Fortin, K. Guertin, J. Ouellet, C. Dubé, C. Blanchette, S. Deschênes, S. Houle et J. Lacroix (sans date).** "Modélisation de la structure temporelle et spatiale d'images infrarouges". Tome III: Modélisation des paramètres statistiques d'arrière-plans dans l'infra-rouge. Rapport interne 16SD.97701-4-23571. 137 p.



ANNEXE I - DETAIL DU TRAITEMENT DES IMAGES

Les données de la télédétection à l'INRS-Eau ont été traitées au moyen du système de traitement numérique ARIES III de DIPIX relié à un ordinateur VAX 780. Toutes les opérations numériques, dont les principales phases sont illustrées à la figure 3.2, ont pour but la production d'images étalonnées du panache produit par l'injection ponctuelle de rhodamine WT.

A1-1 Découpage des lignes de vol

La réalisation de cette étape n'a présenté que peu de difficultés hormis certaines instabilités dans le transfert de l'information stockée sur un ruban à disque. Cette étape a nécessité l'utilisation d'une carte topographique à l'échelle de 1:20 000 afin de bien repérer la zone survolée. Les tâches suivantes ont été complétées:

- le transfert des canaux ME00-07 de la zone entière par le programme [Tib] du ruban au disque ARIES;
- la génération des histogrammes des 8 canaux par [SH];
- l'affichage et la vérification des 8 canaux [ID]. La visualisation de la zone entière sur le canal ME04 a été utilisée pour obtenir les coordonnées de la zone couvrant l'étendue du panache de rhodamine;
- l'extraction des 8 canaux ME00-07 de la zone ciblée par [DFb];
- la préparation d'une copie de sécurité sur bande magnétique des 8 canaux de la zone ciblée [BUb].

A1-2 Etapes pour la correction radiométrique des images MEIS-II

A1-2.1 Valeurs minimales et maximales des niveaux de gris des images

Afin d'illustrer la dynamique des images entre 0 et 255 (valeur de niveau de gris) nous avons extrait, pour chacune des bandes, les valeurs minimales et maximales de niveau de gris. Le tableau A1-1 montre ces valeurs.



Tableau A1-1 Valeurs minimales et maximales des niveaux de gris des images

BANDE	Sorel - Tracy		Lac Saint-Pierre	
	minimum	maximum	minimum	maximum
0	5	150	1	97
1	18	255	15	204
2	0	255	1	129
3	23	255	24	128
4	30	255	35	194
5	30	255	37	237
6	46	255	58	119
7	0	255	38	200

A1-2.2 Calcul des luminances apparentes

Le calcul des luminances apparentes des minimums et des maximums de chaque bande spectrale est effectué à partir de l'équation suivante :

$$L^* = DN \cdot \frac{1}{R G} \cdot \frac{f}{e} \quad [A1 - 1]$$

où:

- DN*: le niveau de gris;
- G*: le gain correspondant à 2^G sur les feuilles d'information de vol;
- R*: la sensibilité spectrale;
- f*: la fréquence de balayage;
- e*: le temps d'exposition.

Les valeurs des paramètres de l'équation sont résumées au tableau A1-2. En faisant abstraction des niveaux de gris, on obtient une équation simplifiée pour chaque bande spectrale (tableau A1-3).



Tableau A1-2 Valeur des paramètres pour le calcul des luminances apparentes

BANDE	Longueur d'onde [nm]	Gain []	f [Hz]	e [%]	R
0	0,750	8	50	0,25	2,12E-7
1	0,675	4	50	0,25	1,82E-7
2	0,874	32	50	0,25	2,78E-7
3	0,640	8	50	0,25	1,70E-7
4	0,596	8	50	0,25	1,57E-7
5	0,517	4	50	0,25	1,42E-7
6	0,448	8	50	0,25	1,32E-7
7	0,548	8	50	0,25	1,32E-7

Tableau A1-3 Coefficient des niveaux de gris pour le calcul des luminances apparentes étalées

BANDE	Coefficient de niveau de gris
Bande 0	$L^* = DN \cdot 1,179E-6$
Bande 1	$L^* = DN \cdot 2,747E-6$
Bande 2	$L^* = DN \cdot 2,248E-7$
Bande 3	$L^* = DN \cdot 1,471E-6$
Bande 4	$L^* = DN \cdot 1,592E-6$
Bande 5	$L^* = DN \cdot 3,521E-6$
Bande 6	$L^* = DN \cdot 1,894E-6$
Bande 7	$L^* = DN \cdot 1,894E-6$



A1-2.3 Calcul du facteur d'étalement FE

Le facteur d'étalement est calculé à partir de l'équation suivante:

$$FE = \frac{255}{L_{\max}^*} \quad [A1 - 2]$$

où:

L_{\max}^* la luminance apparente maximale obtenue pour les quatre images.

Le facteur d'étalement avec $L_{\max}^* = 8,97E-4$ est de 283996.

A1-2.4 Équation de correction radiométrique pour chaque bande

Cette étape consiste à obtenir une équation du type présenté au tableau A1-2 mais pour laquelle les niveaux de gris seront répartis entre 0 et 255.

Les équations appliquées pour chaque bande apparaissent au tableau A1-4 et la valeur du scalaire vaut:

$$\text{Scalaire} = \frac{1}{R G} \cdot \frac{f}{e} \cdot FE \quad [A1 - 3]$$

Tableau A1-4 Equations de corrections radiométriques étalées

BANDE	Luminance apparente étalée (L^*)
Bande 0	$L^* = DN \cdot 0,335$
Bande 1	$L^* = DN \cdot 0,780$
Bande 2	$L^* = DN \cdot 0,064$
Bande 3	$L^* = DN \cdot 0,418$
Bande 4	$L^* = DN \cdot 0,452$
Bande 5	$L^* = DN \cdot 1,000$
Bande 6	$L^* = DN \cdot 0,538$
Bande 7	$L^* = DN \cdot 0,538$



A1-2.5 Correction radiométrique des images

Cette correction consiste à appliquer les équations du tableau A1.4 aux images en remplaçant le paramètre *DN* par la bande spectrale en question.

A1-3 Correction géométrique des images

Une correction géométrique a été effectuée sur les images. Cette opération a posé certains problèmes compte tenu de la difficulté à repérer sur le terrain les points de calage visibles sur les images. Les étapes suivantes ont été franchies:

- la délimitation de 12 amers par [GCG]. L'opérateur repère sur le canal ME04 de la zone ciblée un point précis (intersection de routes, phare, bouée, etc...) et fournit au programme les coordonnées MTM correspondant à ce point, examine sa valeur résiduelle et le rejette au besoin;
- le ré-échantillonnage [ARb] par le plus proche voisin a été appliqué aux 8 canaux ME00-07;
- la vérification des canaux rectifiés en les visualisant [ID] et en établissant les histogrammes [SH].

A1-4 Rehaussements

L'image de base, un composé coloré ME04-07-05, a été étalée à partir des histogrammes, de manière à utiliser toute la dynamique de la courbe de réflectance. A partir de cette image, on a testé une autre méthode dite "de décorrélation" permettant de réduire la corrélation entre les bandes spectrales. Les opérations suivantes ont été effectuées:

- l'établissement des histogrammes cumulatifs [SH] et l'étalement des canaux [SC];
- l'établissement des statistiques [TS];
- la définition des zones d'entraînement [IT];
- le calcul des valeurs et des vecteurs propres [IE];
- le calcul sur APL des paramètres de la décorrélation;



- la génération des axes décorrélés [NO];
- l'étalement des axes décorrélés par [SC];
- la préparation d'une copie de sécurité sur bande magnétique des axes décorrélés [BUb].

A1-5 Etapes pour l'étalonnage des données MEIS-II

A1-5.1 Localisation des échantillons sur les images

Cette étape consiste à localiser des échantillons sur les sites d'étude et à prélever les valeurs de niveau de gris sur une fenêtre de 5x5 pixels. On calcule ensuite la valeur moyenne des 25 valeurs prélevées [PD].

A1-5.2 Calcul des régressions

On calcule les droites de régression et les facteurs de corrélation entre les bandes spectrales (X) et les mesures de qualité de l'eau *in situ* (Y). La notion de bandes comprend également les rapports de bandes.

A1-5.3 Choix des régressions

Parmi toutes les régressions obtenues nous conservons celles qui ont, dans un premier temps, un facteur de corrélation acceptable (ou le plus pertinent que l'on peut trouver). Dans un deuxième temps, nous regardons la valeur de la pente de la droite, gardant à l'esprit qu'une valeur de pente élevée permet d'avoir un bon étalement des valeurs sur l'axe des ordonnées.

A1-5.4 Création d'un masque

Compte tenu que certains éléments rendent la détection de la rhodamine plus difficile (présence de sédiments en suspension et de substances dissoutes, chlorophylle, bathymétrie), il est pratique d'éliminer les niveaux de gris qui ne sont pas associés aux panaches de rhodamine. Les pixels ainsi exclus se voient attribuer la valeur 0. Ceci permet un meilleur étalonnage des niveaux de gris associés aux panaches. Les principales étapes à suivre pour créer un masque sont:



- la création d'un fichier de zone d'entraînement sur la zone du panache [IT];
- la création d'un fichier thème en réalisant une classification supervisée [ML];
- le passage du fichier thème en fichier image [XFX];
- la création du masque [NO].

A1-5.5 Calcul du facteur d'étalement de chaque régression

Le facteur d'étalement tient compte de la valeur de niveau de gris maximale obtenue pour une bande ou un rapport de bande, ainsi que de la valeur de la pente de la droite de régression. Donc, le facteur d'étalement peut être obtenu par l'équation suivante:

$$FE = \frac{255}{DN_{\max}} \cdot \text{pente} \quad [A1 - 4]$$

A1-5.6 Application des régressions aux images

Les résultats des régressions statistiques sont appliqués aux images dans cette étape. Afin de vérifier si le facteur d'étalement est adéquat, on examine sur un histogramme [SH] si les pixels sont bien étalés entre 0 et 255. On applique à nouveau les étapes A1-5.6 et A1-5.7 dans le cas où l'étalement est inadéquat. Les étapes sont les suivantes :

- l'application du facteur multiplicatif à l'image [NO];
- le calcul, à l'aide d'un chiffrier électronique, des valeurs résultantes des régressions pour toutes les valeurs de niveau de gris; la formule utilisée est la suivante :

$$y = \frac{DN}{FE} + \text{ordonnée à l'origine de la régression} \quad [A1 - 5]$$

- le choix des intervalles de classes qui regroupent un nombre significatif de pixels, à l'aide des histogrammes des images résultantes et des valeurs résultantes ;
- la validation des classes ainsi définies avec les intervalles généralement utilisés dans la littérature, ou encore que les intervalles significatifs dans le contexte de l'étude.



A1-6 Application des classes aux images

Une fois les intervalles de niveau de gris déterminés pour les intervalles d'unité des mesures de concentration, on choisit les couleurs de chaque classe et on crée une classification simple pour chaque régression [CA] ou [LT].



ANNEXE II - DETAIL DES TACHES SPANS™

A2-1 Création d'une zone de travail

Étant donné que deux images devaient être raccordées à l'aide du SIG et ce, pour chacune des zones de travail (Sorel-Tracy et lac Saint-Pierre), nous avons délimité ces dernières à l'aide de deux points de référence diagonaux. En connaissant les coordonnées des coins des images à raccorder, soit le coin supérieur gauche de la première image et le coin inférieur droit de la seconde image (fournis directement par DIPIX), on peut établir les limites de la zone par les commandes suivantes:

FILE/NEW STUDY AREA/SET EXTENTS/FROM TWO POINTS

Ainsi, nous avons construit les deux *univers* en faisant en sorte qu'ils englobent totalement les deux images. La résolution des univers a été établie de manière à correspondre le plus près possible à la résolution des images à importer soit 2 mètres pour la zone amont Sorel-Tracy et 3 mètres pour la zone aval, le lac Saint-Pierre.

A2-2 Intégration des images numériques à SPANS™

SPANS peut importer des images brutes ou classifiées (thèmes). Les images doivent être en format binaire.

A2-3 Transfert du système ARIES III au VAX

Le transfert des images du système ARIES III au VAX s'effectue de la façon suivante:

- (DA) : Data Acquisition;
- (1) : transfert ARIES III vers file 11;
- (***) : nom de votre image DIPIX;
- (FF) : type de fichier DIPIX;
- (****) : nom de la première bande, fichier DIPIX;
- (3) : option #3; no header, no tailer.



Remarque: afin de géoréférencier l'image dans sa position exacte sur le territoire d'étude, il est essentiel de connaître les coordonnées d'un ou deux points de référence.

A2-4 Transfert du VAX au micro-ordinateur

A l'aide d'un micro-ordinateur relié au VAX 11/780 par une ligne directe de 19200 bauds, il est possible de récupérer des images par l'intermédiaire des logiciels PROCOMM et KERMIT. Les étapes de transfert sont les suivantes:

C>(PCPLUS) : entrer dans Procomm;
 Retour de chariot jusqu'à l'obtention de la ligne VAX;
 \$ (USERNAME) : mot de passe, etc...;
 \$ (SET DEF USAGER:[AOS.FI0] : définition du répertoire dans lequel se trouvent les fichiers
 *.IMG;
 \$ (DIR *.IMG) : vérification de leur présence;
 \$ (KERMIT) : logiciel de transfert de données;
 \$ (SERVER)
 (ALT K)
 (1) : Get (récupérer un fichier);
 *.IMG) : nom du fichier à transférer.

Recommencer l'opération avec ALT K au besoin;

(3) : Fin;
 \$ (LO) : sortie VAX;
 \$ (Alt X) : retour au DOS.

A2-5 Transfert d'une image sur SPANS

Il existe deux possibilités de transfert:

- 1- en sélectionnant l'utilitaire Rastmenu qui offre déjà plusieurs formats de conversion tels que ERDAS, PCI, CLDS,...



2- l'utilitaire Rastmenu ne permet pas d'importer une image directement dans SPANS. Afin de convertir l'image en une couche d'information utilisable par SPANS, on passera par les étapes suivantes:

a) Création d'un fichier d'en-tête

A l'aide d'un éditeur de texte, on crée un fichier d'en-tête (header) contenant notamment les paramètres relatifs à la structure, à la taille de l'image, à la géoréférence, au type de projection, aux caractéristiques des bandes, etc... (se référer au manuel SPANS, Appendice D "File structures"). Quelques-uns de ces paramètres peuvent être modifiés avec:

EDIT/LIBRARY/RASTER HEADERS

Remarque: Le fichier d'en-tête porte l'extension *.RNH.

b) Importation du fichier "RASTER".

TRANSFORM/IMPORT/LIBRARY/RASTER

Remarque: Cette opération transformera le fichier de l'image en format "raster" propre à SPANS (extension *.RNL) si le format de l'image ne correspond pas exactement au format interne. Autrement, il sera laissé tel quel. Si l'image contient plusieurs bandes, un fichier *.RNL sera généré pour chacune d'elles. On doit à ce moment fournir au moins un point géoréférencé (ex: coin inférieur gauche) pour effectuer l'importation.

c) Visualisation de l'image importée

VISUALIZE/ENTITIES/RASTER

d) Analyse de l'image importée

ANALYSE/RASTER

Avec cette option, on peut réaliser:

- une matrice de covariance (entre les bandes);
- un tableau de fréquence (pour chacune des classes);
- un histogramme de fréquence (pour chacune des bandes).



e) Classification de l'image

Afin de procéder à une classification, on s'inspire des résultats obtenus dans une des trois options du point précédent et on crée une classification avec:

EDIT/LIBRARY/CLASSIFICATION

f) Transformation du fichier raster en carte ou couche d'information

TRANSFORM/DATA TYPES/RASTER TO MAP

Remarque: On peut ensuite se servir de cette nouvelle carte pour une analyse ultérieure au même titre que toute autre information.

A2-6 Raccordement spatial des images

Le raccordement des images dans SPANS est relativement simple si la taille de l'*univers* peut englober les images à importer et que la correction géométrique des images est appropriée. A partir du moment où les images ont été importées tour à tour, il suffit de procéder avec les commandes suivantes:

MODEL/OVERLAY/JOIN

et spécifier le nom des deux cartes contenant les panaches à raccorder.



ANNEXE III- RESULTATS DES TESTS DE DIFFUSION

Tableau A3-1 Résultats du test de diffusion au site Tracy-Sorel

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Heure (H.A.E.)	Profondeur locale(m)	Concentration (ppb)	
	X	Y			en surface	à 1 m du fond
1006	332304.24	5100539.48	14:03	9.4	9.20	
1007	332306.62	5100552.33	14:04		16.10	44.00
1008	332311.35	5100563.21	14:06	8.5	36.00	14.70
1009	332322.90	5100598.93			4.70	0.10
1010	332321.01	5100596.12	14:08	9.0	2.07	
1011	332320.36	5100606.08	14:10	10.4	0.01	
1012	332526.06	5100656.84	14:13		0.01	
1013	332542.22	5100678.10	14:14	11.6	3.70	
1014	332538.13	5100689.88	14:15		22.90	
1015	332544.38	5100717.09	14:16		6.50	
1016	332896.80	5100801.86	14:22		0.94	
1017	332896.34	5100825.47			1.64	
1018	332893.57	5100833.13			3.20	
1019	332899.17	5100853.09			5.40	
1020	332923.69	5100891.71	14:23	14.2	1.20	
1021	332927.63	5100903.29	14:23		0.02	
1022	332932.97	5100932.02			0.01	
1023	333226.58	5100832.20		3.1	0.70	
1024	333225.12	5100856.02	14:29		5.40	
1025	333224.58	5100863.64	14:30	9.5	3.30	
1026	333223.94	5100866.18	14:30		4.00	
1027	333230.13	5100911.80	14:31	12.0	3.30	8.90
1029	333277.83	5101000.20	14:34	14.0	2.94	
1030	333294.55	5101029.13	14:35		1.53	
1032	333763.94	5100915.14	14:42	1.0	1.07	
1033	333757.31	5100955.11	14:43	9.5	2.94	
1034	333763.52	5100969.57		10.0	7.00	
1035	333770.60	5101015.53		11.5	5.40	
1036	333776.51	5101071.29	14:46	12.0	3.00	
1037		5000000.00	14:47	12.1	2.72	0.21
1038	333790.38	5101146.39	14:49	11.5	2.18	
1039	333809.30	5101190.60	14:50	11.8	0.01	
1040	334994.50	5100746.71	15:15	2.8	0.01	
1041	334972.53	5100777.71	15:19		0.01	
1042	334974.55	5101124.91	15:20	10.0	2.18	
1043	334961.80	5101181.86	15:20	10.5	3.10	
1044	334957.05	5101192.07	15:21	10.7	2.52	
1046	334923.46	5101338.46	15:25	10.7	0.78	
1052	335534.74	5100875.40	15:41	2.0	0.03	


Tableau A3-1 (suite) Résultats du test de diffusion au site Tracy-Sorel

Date de l'injection : 22/08/90

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Heure (H.A.E.)	Profondeur locale(m)	Concentration (ppb) en surface	Concentration (ppb) à 1 m du fond
	X	Y				
1053	335518.31	5100907.24	15:42	4.0	0.07	
1054	335497.17	5100955.12	15:42	2.5	0.01	
1055	335473.62	5101010.17	15:43	Algues	0.01	
1056	335453.96	5101061.57	15:44	Algues	0.09	
1057	335442.08	5101104.03	15:45	Algues	0.73	
1058	335420.65	5101151.06	15:46	Algues	3.30	
1059	335408.57	5101219.09	15:48	4.5	2.86	3.70
1060	335422.98	5101281.99	15:49	6.1	2.40	
1061	335384.00	5101309.69	15:50	8.4	1.30	
1062	335396.35	5101400.69	15:41	10.2	3.20	
1063	335402.90	5101415.20	15:52	11.0	2.30	
1064	335428.82	5101510.67	15:53	11.0	0.50	
1065	335427.55	5101559.30	15:54	10.5	0.01	
1068	336602.78	5101217.36	16:07	2.8	0.01	
1069	336567.05	5101243.45	16:08	10.5	0.01	
1070	336548.55	5101300.68	16:09	6.0	1.18	
1071	336546.66	5101375.32	16:10	5.5	0.73	
1072	336530.19	5101443.68	16:11	2.5	0.01	
1073	336533.91	5101514.44	16:12	4.1	1.40	
1074	336532.19	5101585.13	16:14	5.6	2.50	
1075	336483.35	5101678.91	16:15	6.3	1.98	
1076	336480.88	5101770.05	16:16	8.7	0.83	
1077	336455.02	5101925.62	16:19	15.3	0.01	
1078	337508.62	5101671.59	16:27	2.1	0.01	
1079	337488.41	5101724.55	16:27	3.4	0.01	
1080	337469.84	5101833.62	16:29		0.31	
1081	337459.60	5101922.76	16:31	9.5	0.14	
1082	337452.85	5102013.76	16:31	10.0	1.89	
1083	337455.34	5102113.88	16:33	13.8	0.18	0.22
1084	337471.74	5102158.35	16:35	13.7	0.01	
1085	337396.18	5102261.85	16:45	13.4	0.01	
1086	337406.09	5102409.52	16:42	10.0	0.01	
1087	338348.14	5102563.49	16:52		0.01	
1088	338398.75	5102543.33	16:52		0.01	
1090	338544.97	5102390.92	16:56		0.01	
1091	338619.92	5102321.68	16:56	10.0	0.02	
1092	338730.82	5102200.18	16:58	9.5	1.53	
1095	338796.23	5102124.52	17:01	4.5	0.29	


Tableau A3-2 Résultats de la caractérisation complémentaire au site Tracy-Sorel (Tioxide)

Date du relevé : 22/08/90

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Profondeur local (m)	Profondeur de mesure (m)	Heure (H.A.E.)	Conductivité (µmhos/cm)	Température (°C)	Couleur (U.C.V.)	pH	Turbidité (U.T.N.)
	X	Y								
6000	331986.457	5100125.079	4.1	0	13:05	290	22.5	20	7.5	4.5
				0.5	13:10	305	22.0	30	7.5	4.3
				1.0		290	22.0			
				1.5		290	22.0			
				2.0		295	22.0			
				2.5		295	22.0			
				3.0		295	22.0			
				3.5		295	22.0			
6001	331983.668	5100134.374	4.5	0	13:22	290	23.0	50	7	8.9
				0.5	13:25	295	22.5	40	7	7.4
				1.0		295	22.5			
				1.5		300	22.5			
				2.0		300	22.0			
				2.5		300	22.0			
				3.0		310	22.0			
				3.5		310	22.0			
6002	331983.452	5100141.237	5.0	0.0	13:36	295	22.5	30	7.1	5.4
				0.5	13:38	295	22.0	55	6.6	10.2
				1.0		295	22.0			
				1.5		305	22.0			
				2.0		315	22.0			
				2.5		315	22.0			
				3.0		320	22.0			
				3.5		320	22.0			
6003	331975.954	5100151.088	5.2	0	13:57	290	22.5	40	6.8	6.7
				0.5	13:58	290	22.5	30	7.2	5.7
				1.0		300	22.5			
				1.5		300	22.5			
				2.0		310	22.0			
				2.5		315	22.0			
				3.0		320	22.0			
				3.5		315	22.0			
6004	332086.141	5100188.805	1.3	0	14:18	290	23.0	25	8.1	3.4
				0.5		290	23.0	20	8.2	4.3
				1.0		290	23.0			
				0	14:28	290	23.0	20	7.8	2
				0.5		290	23.0	20	7.6	2.6
				1.0		290	23.0			
				1.5		290	23.0			
				2.0		290	23.0			
6006	332056.644	5100205.656	4.0	0	14:36	295	23.0	45	7.1 survol	7.6
				0.5		295	22.5	40	7.1	5.5
				1.0		295	22.5			
				1.5		295	22.5			
				2.0		300	22.5			
				2.5		300	22.5			
				3.0		300	22.5			
				3.5		305	22.5			
6007	332028.3	5100269.205	7.2	0	15:04	285	23.0	15	8.1	2.4
				7.2		285	23.0	10	8	1.5



Tableau A3-2 (suite) Résultats de la caractérisation complémentaire au site Tracy-Sorel (Tioxide)

Date du relevé : 22/08/90

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Profondeur local (m)	Profondeur de mesure (m)	Heure	Conductivité (µmhos/cm)	Température (° C)	Couleur (U.C.V.)	pH	Turbidité (U.T.N.)
	X	Y								
6008	332391.756	5100521.683	6.5	0	15:12	305	23.0	30	7.5	4.8
				6.5		295	23.0	20	7.5	3
6009	332370.28	5100558.815	10.0	0	15:23	285	23.0	20	7.5	3.3
				10.0		285	22.5	20	7.5	3
6010	332387.237	5100535.979		0	15:31	300	23.0	40	6.9	7.3
6011	332496.665	5100715.38	9.1	0	15:37	285	23.0	90	8.2	30
				2.0		285	23.0	150	8.2	45
				9.1		285	22.5			


Tableau A3-3 Résultats de la caractérisation complémentaire au site Tracy-Sorel (QIT)

Date du relevé : 22/08/90

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Profondeur local (m)	Profondeur de mesure (m)	Heure (H.A.E.)	Conductivité (µmhos/cm)	Température (°C)	Couleur (U.C.V.)	pH	Turbidité (U.T.N.)
	X	Y								
7001	332631.126	5100762.062			16:09			250	8.2	83
7002	332639.753	5100775.775			16:10			45	8.2	14.5
7003	332798.772	5100815.814			16:16			30	7.8	7.9
7004	332797.488	5100847.081			16:17			70	8.2	26
7005	332792.374	5100840.472	14	0	16:24	260	23	60	8	18.4
7006	332969.355	5100907.656			16:29	285	22.5	35	8.2	7.7
7007	332995.819	5100961.436			16:32	290	23	45	7.8	12.7
7008	332981.877	5100971.174	14		16:34			40	8	9.7
7009	333408.516	5100932.754	11					20	7.8	4.7
7011	333477.536	5101033.925	14					20	7.6	5.2
7012	333514.605	5101076.563	12					20	7.5	4.5
7013	333542.452	5101096.298	12		16:42			30	7.5	7.3
7014	333588.18	5101138.769						10	8.2	2.5
7015	332406.581	5100038.822	4		17:15			30	7.5	6.7
7016	333931.327	5100992.297	9					20	7.8	5.2
7017	333916.755	5101036.803	10		17:17			25	7.8	7.4
7019	333856.218	5101137.505	11.5		17:18			25	7.4	5.5
7020	333835.938	5101195.098	11.5		19:00			20	7.7	6.4



Tableau A3-4 Résultats du test de diffusion au site Lac Saint-Pierre

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Heure (H.A.E.)	Profondeur locale(m)	Concentration (ppb)	
	X	Y			en surface	à 1 m du fond
2004	348431.37	5110200.45	14:06		0.01	
2005	348377.93	5110216.51	14:07		0.01	
2006	348378.43	5110235.52	14:08		0.01	
2008	348413.46	5110267.30	14:13		0.20	
2009	348412.50	5110268.32	14:13		18.10	
2010	348407.61	5110271.45	14:14		12.60	
2011	348414.79	5110276.26	14:15	4.5	20.50	0.47
2012	348429.24	5110287.69	14:16	4.5	48.50	
2013	348424.41	5110291.91	14:17	4.5	4.30	
2015	348419.96	5110327.11	14:19		0.01	
2016	348909.21	5110796.16	14:25	5.0	0.01	
2018	348930.35	5110837.23	14:27	5.5	4.60	
2019	348936.17	5110858.61	14:28	5.7	16.40	
2020	348943.41	5110881.57	14:29	5.5	22.80	0.47
2021	348985.48	5110910.71	14:30	5.5	15.40	
2022	348965.51	5110933.04	14:31	5.5	4.60	
2000	384972.83	5110980.70	14:33	4.2	0.01	
2023	349238.75	5111065.65	14:37	4.2	0.01	
2024	349216.83	5111085.30	14:39	5.2	3.20	
2025	349213.15	5111107.49	14:40	5.5	14.50	
2026	349210.58	5111133.50	14:41	5.6	19.90	18.70
2027	349226.24	5111153.59	14:42	5.1	26.50	
2028	349227.35	5111165.36	14:42	5.0	27.10	
2029	349225.72	5111211.97	14:44	3.5	0.01	
2031	349666.31	5111358.39	14:51	5.5	0.01	
2032	349674.29	5111368.68	14:53	4.7	0.17	
2033	349669.19	5111386.73	14:54	5.0	1.18	
2034	349657.19	5111403.27	14:54	5.2	4.30	
2035	349659.75	5111432.79	14:55	5.0	12.00	15.20
2036	349668.59	5111464.06	14:56	5.0	18.10	
2037	349679.77	5111484.24	14:57	5.0	4.70	
2042	350597.03	5111981.39	15:34	3.5	0.01	
2043	350605.11	5111978.25	15:35	3.5	0.06	
2044	350598.73	5111985.67	15:35	3.6	0.06	
2045	350591.22	5111997.37	15:36	3.9	0.10	
2046	350581.81	5112012.07	15:36	3.9	0.34	
2047	350571.70	5112036.38	15:37	4.0	0.96	1.18
2048	350568.54	5112081.69	15:38	4.2	5.80	
2049	350559.70	5112098.71	15:38	4.2	9.60	
2050	350549.39	5112116.33	15:39	4.2	12.50	
2051	350537.02	5112133.35	15:39	4.2	13.90	
2052	350520.43	5112182.29	15:40	4.2	4.20	
2053	350500.81	5112234.79	15:41	4.1	0.21	
2054	350487.38	5112278.51	15:44	3.3	0.01	



Tableau A3-4 (suite) Résultats du test de diffusion au site Lac Saint-Pierre

Date de l'injection : 21/08/90

Numéro du point	COORDONNÉES M.T.M. (m)		Heure (H.A.E.)	Profondeur locale(m)	Concentration (ppb)	Concentration (ppb)
	X	Y			en surface	à 1 m du fond
2056	351586.50	5112531.22		1.7	0.01	
2057	351554.38	5112560.46	16:01	1.8	0.04	
2058	351508.79	5112605.72	16:02	2.5	0.45	
2059	351458.51	5112667.62	16:02	3.2	5.30	
2060	351434.99	5112701.23	16:03	3.5	12.50	
2061	351411.50	5112733.38	16:04	3.8	13.00	14.80
2062	351410.80	5112770.38	16:05	3.6	3.60	
2063	351388.90	5112800.11	16:06	3	1.64	
2064	351364.73	5112832.98	16:06	2	0.04	
2065	351346.11	5112858.99	16:07		0.03	
2066	351326.15	5112878.05	16:07	1.5	0.01	
2072	352495.52	5112787.54	17:08		0.01	
2073	352452.18	5112835.59	17:09	Environ 2	0.25	
2074	352375.13	5112887.11	17:10	Environ 2	0.34	
2075	352313.44	5112940.20	17:11	Environ 2	0.17	
2076	352266.69	5113002.09	17:11	Environ 2	0.35	
2077	352226.85	5113097.37	17:13	Environ 2	2.29	2.04
2078	352226.64	5113195.23	17:14	Environ 2	13.30	
2079	352202.32	5113250.96	17:15	Environ 2	15.00	
2080	352178.66	5113311.18	17:16	Environ 2	0.60	
2081	352139.40	5113374.98	17:16	3	0.04	
2084	353260.43	5113204.30	17:27	Environ 2	0.02	
2085	353232.25	5113239.40	17:28	Environ 2	0.17	
2086	353152.47	5113288.86	17:29	Environ 2	0.58	
2087	353108.89	5113349.09	17:30	Environ 2	6.20	
2088	353058.27	5113406.67	17:31	Environ 2	13.50	13.50
2089	353056.65	5113433.56	17:32	2.2	16.10	
2090	353023.98	5113480.89	17:33	2.5	17.50	
2091	353000.67	5113528.37	17:33	2.5	8.70	
2092	352990.96	5113583.53	17:33	2.5	1.77	
2093	352960.58	5113656.29	17:34	2.5	0.06	
2094	354222.12	5113405.82	17:45		0.03	
2095	354183.32	5113443.44	17:46		1.09	
2096	354156.43	5113488.02	17:47	2.8	3.30	
2097	354146.09	5113509.07	17:48	2.8	9.40	9.40
2098	354113.29	5113606.96	17:49	2.8	16.10	15.80
2099	354093.57	5113644.50	17:50	2.9	13.80	
2100	354072.74	5113686.76	17:51	2.9	6.50	
2101	354046.45	5113727.30	17:51	2.9	1.27	
2102	354011.12	5113763.03	17:52	2.9	0.34	
2103	353964.61	5113821.89	17:53	2.9	0.02	
2104	353945.54	5113872.63	17:54	2.8	0.01	



ANNEXE IV- RESULTATS DES REHAUSSEMENTS



Figure A4-1 Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du lac Saint-Pierre - Survol de 15h00

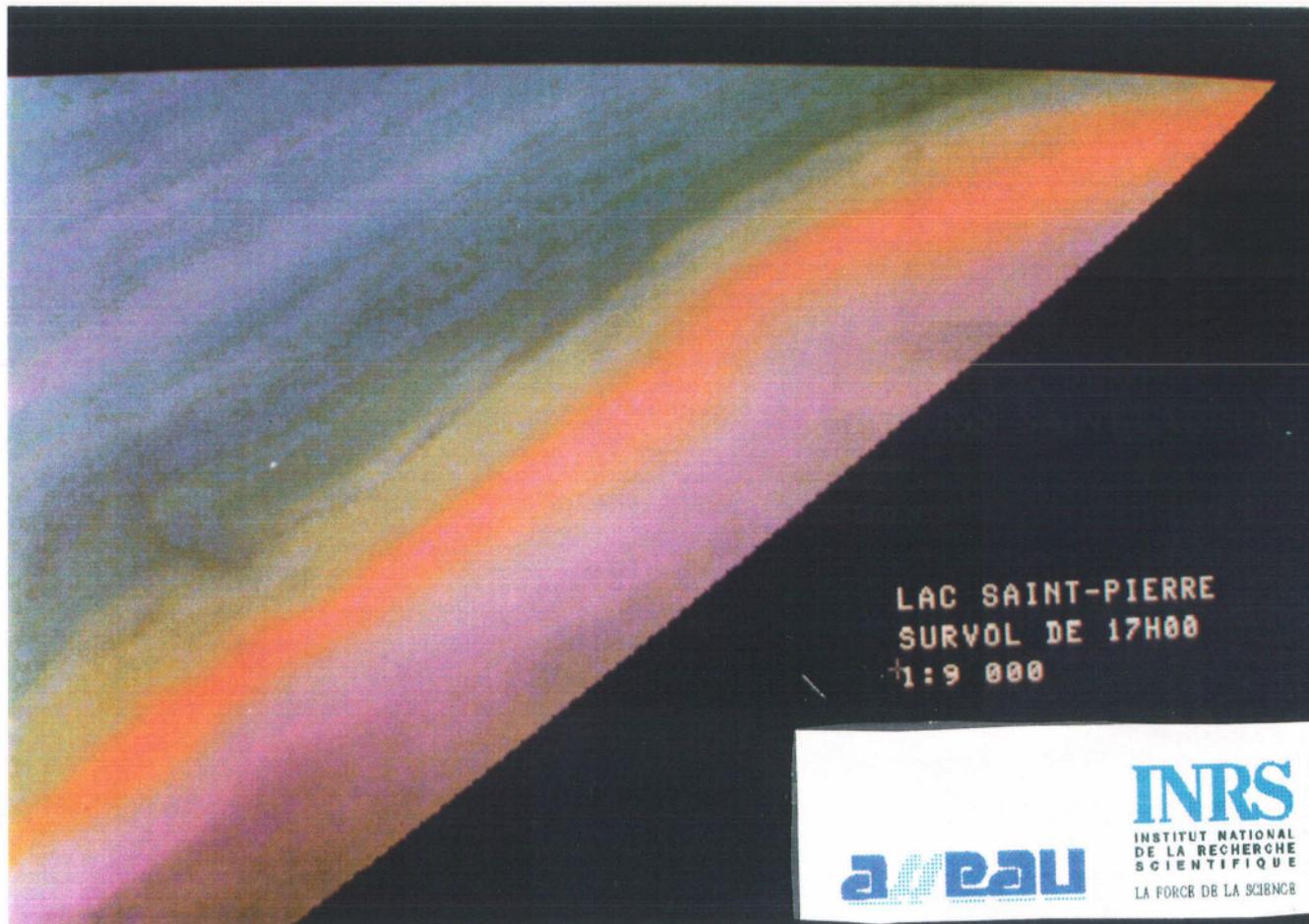


Figure A4-2 Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du lac Saint-Pierre - Survol de 17h00

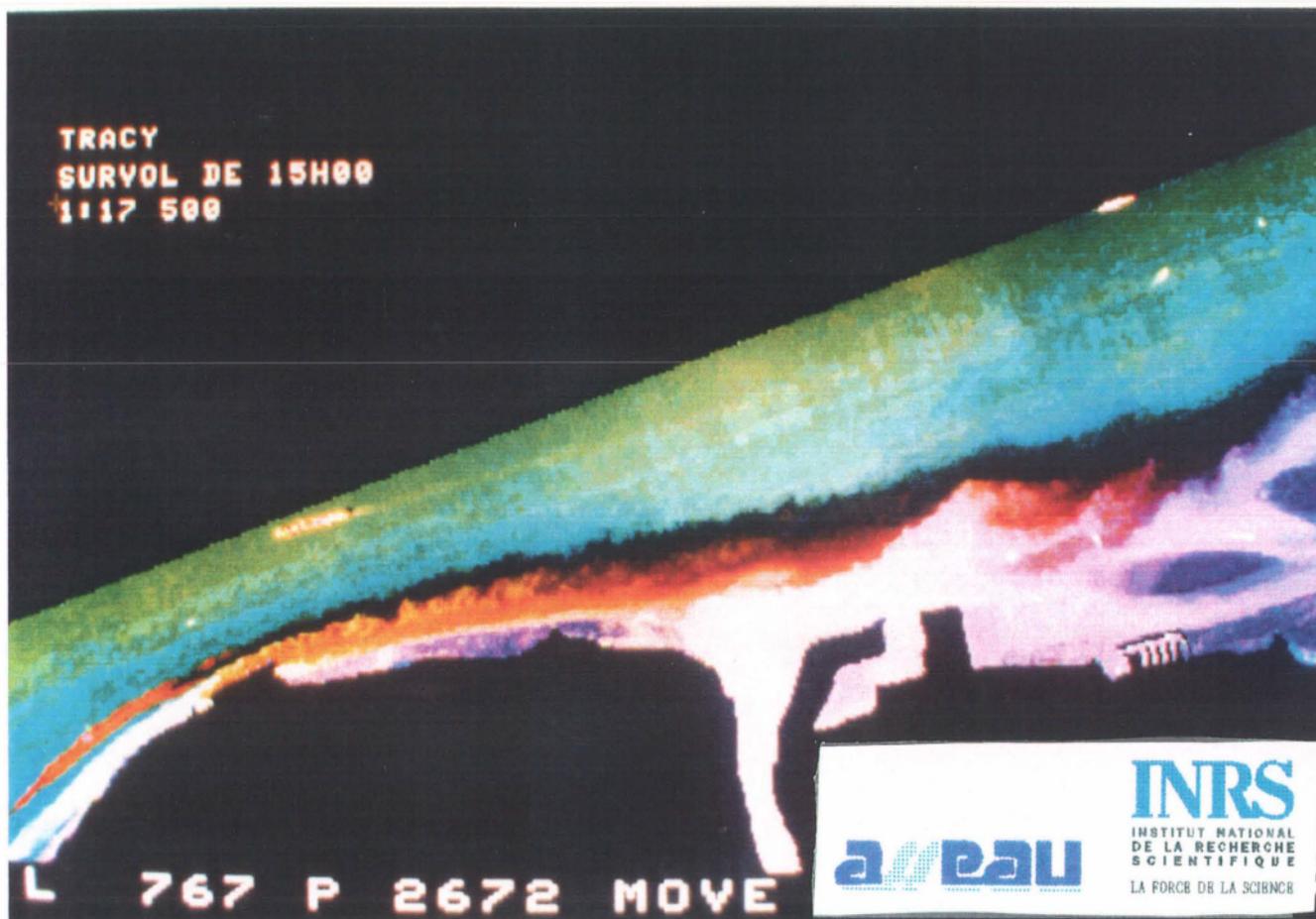


Figure A4-3 Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du tronçon Tracy - Survol de 15h00



Figure A4-4 Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Détail sur la partie valide de l'image du tronçon Sorel-Tracy - Survol de 15h00

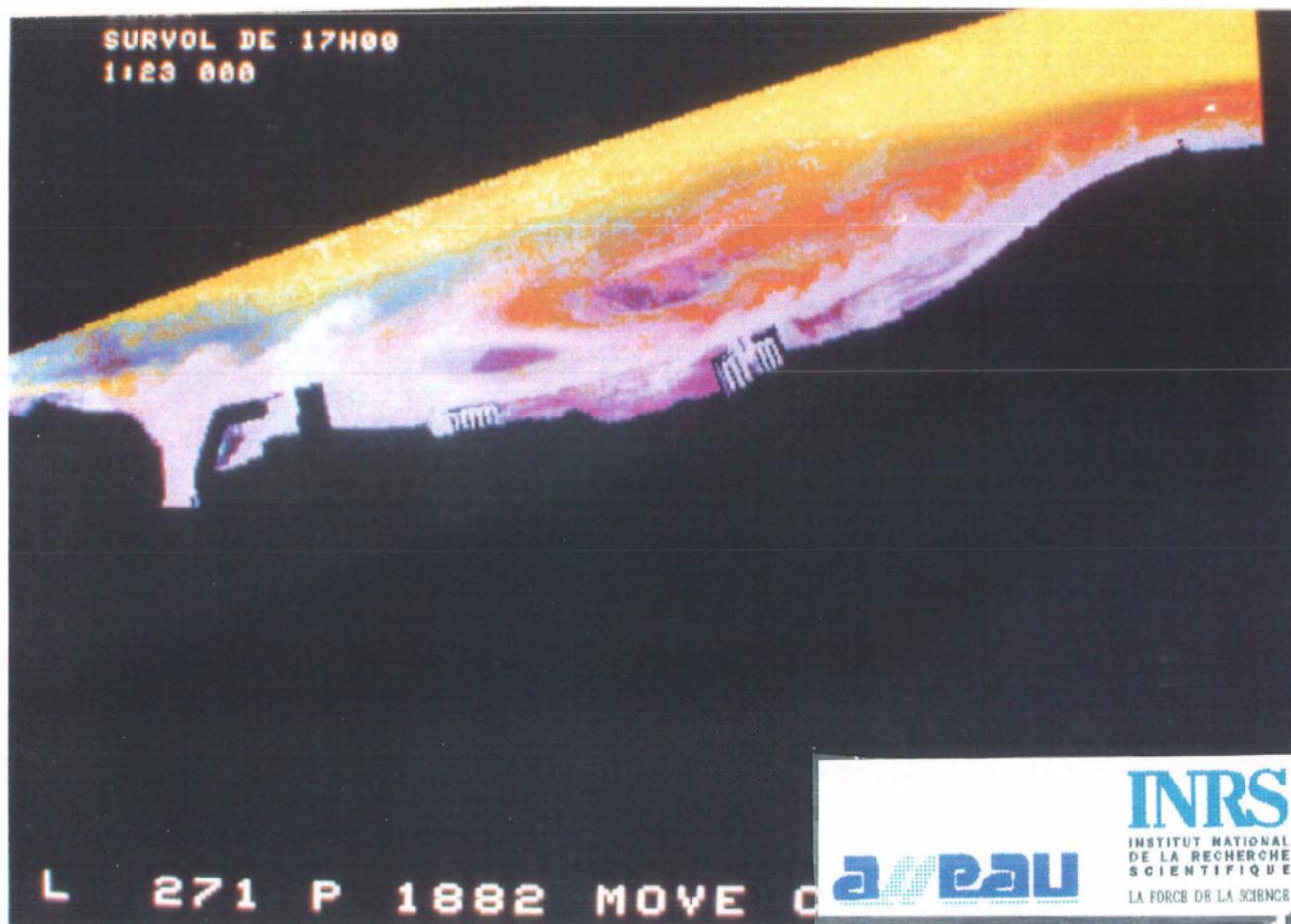


Figure A4-5 Rehaussement par décorrélation des bandes MEIS-4/7/5 - Image du tronçon Sorel-Tracy - Survol de 17h00