

ÉQUIPE DE RÉALISATION

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

Déléguée scientifique : Lynn Cleary, M.Sc., bio.

Spécialiste : Isabelle Goulet, B.Sc., géogr.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - Eau

Directeur de projet : Michel Leclerc, M.Sc., D.Ing., ing.,
Professeur-chercheur

Chargé de projet : Paul Boudreau, M.Sc.-Eau, ing.

Événements de référence : Bernard Bobée, M.Sc., D.Ing., professeur
: Luc Perreault, M.Sc., stat.

Numérisation, SIG et : Marc Crispin, M.Sc.A., géogr.

Atlas des courants : Julie Bouchard, Stag., géogr. phys.

Collecte des données de base : Guy Fortin, M.Sc., géophys.

et mesures sur le terrain : Wanda Sochanska, B.Sc., phys.

: Jean-François Cantin, B.Sc., gén. civ.

Révision des textes : Khalil Mamouny, ing.

ASSEAU Inc. (Consultant, analyse de la contamination)

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

ARGUS Inc. (Consultant en sédimentologie)

Chargé de projet : Pierre Bertrand, M.Sc., géol.

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: (LE PRÉSENT VOLUME)

*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: *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

RÉSUMÉ	1
1 INTRODUCTION	2
1.1 Cadre de l'étude	2
1.2 Objectifs spécifiques	2
1.3 Milieu à l'étude	3
2 MÉTHODOLOGIE	4
2.1 Pertinence de la modélisation numérique	4
2.2 Cheminement d'ensemble	7
2.3 Modèle numérique hydrodynamique <i>HYDREAU</i>	9
2.3.1 Expériences antérieures	10
2.3.2 Modèle mathématique tridimensionnel	11
2.3.3 Forme bidimensionnelle de Saint-Venant (2D)	12
2.3.4 Découvrement-recouvrement (frontière mobile)	16
2.3.5 Formulation variationnelle	17
2.3.6 Discrétisation du modèle variationnel	19
2.3.7 Conditions aux limites	21
2.3.8 Conditions initiales	22
2.3.9 Méthode de résolution algébrique	23
2.3.10 Le modèle <i>HYDREAU</i> en bref	24
2.4 Élaboration du modèle de terrain	24
2.5 Estimation des paramètres	25
2.5.1 Résistance du fond: n_f	26
2.5.2 Résistance des macrophytes: n_m	27
2.5.3 Viscosité turbulente (ν_T) et longueur de mélange (l_m)	29
2.5.4 Coefficient de traînée du vent: τ_w	29
2.6 Post-traitement des résultats	30
2.6.1 Besoins des applications	30
2.6.2 Fonction-courant	33
2.6.3 Diffusivités	34
Estimation de la diffusivité de type Manning : D_{fm}	35



Diffusivité transversale: D_N	36
Diffusivité totale: D	37
Anisotropie, diffusivité longitudinale: D_L	37
2.7 Infographie - Atlas des courants	38
3 DONNÉES UTILISÉES	40
3.1 Bathymétrie	40
3.2 Substrat	41
3.2.1 Méthodologie	41
3.2.2 Résultats	42
3.2.3 Discussion	43
3.3 Macrophytes	43
3.3.1 Méthodologie	44
3.3.2 Analyse des échogrammes	45
3.3.3 Principales espèces de macrophytes au lac Saint-Pierre	50
3.3.4 Aires de distribution des classes de macrophytes	51
3.3.5 Aspects dynamiques	52
3.4 Reversoirs du delta de Sorel	54
3.4.1 Données disponibles	54
3.4.2 Relations niveau-débit sur les reversoirs	54
Méthode	54
Résultats	57
Validation	58
Recommandation	59
3.5 Chenal du Nord	59
3.6 Données de niveaux d'eau	61
3.6.1 Source de données	61
3.6.2 Influence du débit et ligne d'énergie	61
3.6.3 Influence de la marée	63
3.6.4 Influence du vent	68
3.6.5 Influence des macrophytes	68
3.6.6 Relations niveau-débit aux extrémités du modèle	69
3.7 Hydrologie du tronçon	71



3.8 Vents	73
3.9 Courantométrie	75
3.9.1 Campagnes de l'INRS-Eau	75
Méthodologie et instrumentation	75
Description de la campagne d'été (INRS) 1990	76
Description de la campagne d'automne (INRS) 1990	76
3.9.2 Campagnes du Groupe-conseil Roche Ltée	77
Méthodologie et instrumentation	77
Description de la première campagne	77
Description de la deuxième campagne	77
4 CALIBRATION ET VALIDATION	78
4.1 Objectifs et approche générale	78
4.2 Modèle de terrain	79
4.2.1 Maillage	79
4.2.2 Bathymétrie discrétisée	79
4.2.3 Substrat discrétisé	80
4.2.4 Macrophytes discrétisés	81
4.2.5 Reversoirs et delta de Sorel	83
4.3 Événements de calibration et de validation	84
4.3.1 Données disponibles	85
4.3.2 Conditions aux limites	85
4.4 Valeur des paramètres retenue	86
4.4.1 Coefficient de Manning du substrat (n_p)	86
4.4.2 Coefficient de Manning des macrophytes (n_m)	87
4.4.3 Viscosité turbulente	88
4.4.4 Coefficient de traînée du vent	89
4.4.5 Diffusivités	89
4.5 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures	91
4.5.1 Campagnes courantométriques de l'INRS-eau	91
Événement de calibration du 24 au 29 juillet 1990	91
Événement de calibration du 2 au 7 novembre 1990	92



4.5.2 Campagnes courantométriques du Groupe Roche	100
Événement de validation du 30 août 1990:	100
Événement de validation du 11 septembre 1990:	101
4.6 Conclusion	106
5 SIMULATIONS REPRÉSENTATIVES	107
5.1 Objectifs et approche	107
5.2 Événements simulés	108
5.2.1 Données utilisées	108
5.2.2 Définition de la gamme d'événements possibles	109
Variables catégoriques	110
Gamme d'événements possibles	112
5.2.3 Estimation des probabilités d'occurrence des événements	112
5.2.4 Choix des événements	121
Critères	121
Paramètres de simulation	121
Codification des événements	123
Exemple	125
Représentativité globale des événements retenus	125
5.3 Résultats hydrodynamiques	129
5.3.1 Profondeurs et niveaux d'eau	129
5.3.2 Courants - Vecteurs	130
5.3.3 Courants - Module de la vitesse	130
5.3.4 Fonction-courant - Couloirs de débit - Masses d'eau	131
5.3.5 Diffusivité	132
5.4 Analyse des résultats	132
5.4.1 Structures courantométriques	132
5.4.2 Influence des macrophytes	133
5.4.3 Influence des tributaires	135
5.4.4 Influence des reversoirs	135
5.4.5 Influence du substrat	135
5.4.6 Influence du vent	136
6 CONCLUSIONS	137



7 BIBLIOGRAPHIE	139
ANNEXE I - PLANCHES	144



Liste des figures

2.1	Méthodologie générale de l'étude	8
2.2	Conventions du modèle mathématique bidimensionnel de Saint-Venant	14
2.3	Élément de base utilisé par le modèle HYDREAU	20
2.4	Conventions des conditions aux limites	22
2.5	Relation entre le n_f de Manning et le diamètre caractéristique du substrat	28
2.6	Modèles d'estimation du coefficient de traînée du vent	31
3.1	Image bioacoustique (a), courantométrique (b) et structure végétale (c) des herbiers de classe 1, densité 4 ⁺	46
3.2	Image bioacoustique (a), courantométrique (b) et structure végétale (c) des herbiers de classe 2, densité 3	47
3.3	Image bioacoustique des herbiers de classe 3 formant un tapis au fond du lac ...	48
3.4	Image courantométrique (a) et structure végétale (b) d'un peuplement	49
3.5	Dynamique unitaire du cycle végétatif des principales espèces de macrophytes du lac Saint-Pierre	53
3.6	Localisation des reervoirs du delta de Sorel	55
3.7	Conventions pour la formule du débit critique	56
3.8	Relation niveau-débit estimées sur les différents reervoirs du delta de Sorel	58
3.9	Relation niveau-débit estimée à l'entrée du Chenal du Nord	60
3.10	Observations simultanées du niveau d'eau et du débit, à Sorel et à Trois-Rivières, et relations niveau-débit	62
3.11	Dénivellation totale entre Sorel et Port-Saint-François pour les niveaux d'eau moyens (années 1981 à 1987)	63
3.12	Évolution typique de la marée semi-diurne dans la région de Portneuf - Trois-rivières dues à l'effet des eaux peu profondes	65
3.13	Niveau horaire de la marée semi-diurne à diverses stations limnimétriques dans la région à l'étude (du 27 juillet 1990)	65
3.14	Niveau journalier moyen de l'eau à diverses stations limnimétriques dans la région à l'étude (du 22 juil. au 30 sept. 1984)	66
3.15	Niveau moyen de l'eau à diverses stations limnimétriques (du 22 juil. au 30 sept. 1984)	67
3.16	Dénivellation totale entre Sorel et Port Saint-François pour la période printanière (pour les années 1981 à 1987)	70
4.1	Discrétisation du cycle de croissance des macrophytes en vue de la modélisation	88



4.2	Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau (campagne d'été 1990)	94
4.3	Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau (campagne d'été 1990)	95
4.4	Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau (campagne d'automne 1990)	96
4.5	Localisation des stations courantométriques de Roche - 30 août 1990	102
4.6	Localisation des stations courantométriques de Roche - 11 sept. 1990	103
5.1	Niveaux d'eau à Sorel obtenus pour les différentes simulations	134
5.2	Influence des macrophytes sur les débits des revoirs et du fleuve Saint-Laurent à Sorel (Richelieu inclus)	134
Planche No 1	Distribution des macrophytes de densité 4+ et 4- principalement <i>Potamogeton</i>	145
Planche No 2	Distribution des macrophytes de densité 1, 2 et 3 principalement <i>Vallisneria</i>	146
Planche No 3	Distribution des macrophytes de fond (<i>Nitella</i>), zones non-peuplées et touffes d'herbes	147
Planche No 4	Maillage du lac Saint-Pierre	148
Planche No 5	Maillage du tronçon Tracy - Delta de Sorel	149
Planche No 6	Bathymétrie discrétisée du lac Saint-Pierre (RIGL)	150
Planche No 7	Bathymétrie discrétisée du tronçon Tracy - Delta de Sorel	151
Planche No 8	Substrat discrétisé du lac Saint-Pierre selon les groupes	152
Planche No 9	Substrat discrétisé du tronçon Tracy - Delta Sorel selon	153
Planche No 10	Macrophytes discrétisés du lac Saint-Pierre selon les un	154
Planche No 11	Profondeur du lac Saint-Pierre (107MP5VN)	155
Planche No 12	Profondeur du tronçon Tracy - Delta de Sorel (107MP5VN)	156
Planche No 13	Niveau d'eau (RIGL) du tronçon Tracy - Port Saint-Franço	157
Planche No 14	Vecteur vitesse à l'embouchure du Richelieu (107MP5VN)	158
Planche No 15	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (092PP9VN)	159
Planche No 16	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (092PP1VN)	160
Planche No 17	Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (120GG1SO)	161
Planche No 18	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG1SO)	162
Planche No 19	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG9VN)	163
Planche No 20	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (125GG0VN)	164



Planche No 21	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (152GG0VN)	165
Planche No 22	Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (152GG0V)	166
Planche No 23	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5NO)	167
Planche No 24	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5NE)	168
Planche No 25	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5SO)	169
Planche No 26	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5VN)	170
Planche No 27	Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (120GG5VN)	171
Planche No 28	Module de la vitesse lac Saint-Pierre (107MP5VN)	172
Planche No 29	Module de la vitesse Tracy -Delta de Sorel (107MP5VN)	173
Planche No 30	Fonction courant de la rivière Richelieu à la riviGG5VN)	174
Planche No 31	Diffusivité lac Saint-Pierre (107MP5VN)	175
Planche No 32	Diffusivité Tracy - Delta de Sorel (107MP5VN)	176



Liste des tableaux

2.1	Modèles d'estimation du coefficient de traînée du vent	32
3.1	Diamètres caractéristiques des classes de particules (ARGUS, 1990)	42
3.2	Classification de la densité de la végétation mise en relation avec les échogrammes	50
3.3	Caractéristiques géométriques des reervoirs du delta de Sorel	57
3.4	Comparaison entre le débit estimé à partir de la campagne de novembre et le débit calculé à partir de la formule du débit critique	59
3.5	Caractéristiques des stations hydrométriques	72
3.6	Statistiques descriptives pour les débits (m ³ /s) du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires dans le tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre pour la période printannière	73
3.7	Statistiques descriptives pour les débits (m ³ /s) du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires dans le tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre pour la période estivale	73
3.8	Données disponibles sur le vent dans la région de Tracy -lac Saint-Pierre	74
3.9	Vitesse du vent (km/h) à Trois-Rivières et au Cap de la Madelaine	74
3.10	Directions dominantes du vent à Trois-Rivières et au Cap de la Madelaine	74
4.1	Valeurs du coefficient de Manning associées à chaque classe de substrat utilisée dans le modèle de terrain	81
4.2	Caractéristiques et coefficients de Manning correspondant aux unités végétales que forment la flore aquatique du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre à l'apogée du cycle végétatif	82
4.3	Définition des classes de macrophytes utilisées en vue de la modélisation	82
4.4	Caractéristiques générales des quatre événements utilisés pour la calibration et la validation du modèle hydrodynamique.....	84
4.5	Vitesse et direction du vent lors des campagnes de l'INRS-Eau	90
4.6	Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne d'été de l'INRS-Eau	97



4.7	Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne d'automne de l'INRS-Eau	99
4.8	Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche (du 30 août 1990)	104
4.9	Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche (du 30 sept 1990)	105
5.1	Définition des saisons de référence pour la détermination des événements	109
5.2	Définition globale de la variable taux de croissance des macrophytes	109
5.3	Définition des bornes des variables catégoriques de débit	111
5.4	Définition des bornes des variables catégoriques de vent	111
5.5	Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 0 à 20%	113
5.6	Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 21 à 80%	115
5.7	Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 81 à 100%	117
5.8	Occurrence observée des événements printaniers	119
5.9	Valeurs des variables catégoriques pour définir les événements de référence	123
5.10	Codification utilisée dans l'attribution des noms des événements de référence	124
5.11	Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (printemps et été combinés, 214 jours)	126
5.12	Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité (avec facteur de croissance (été) $c(t) = 0,1$)	127
5.13	Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité (été, avec facteur de croissance $c(t) = 0,5$)	127
5.14	Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité (été, avec facteur de croissance $c(t) = 0,9$)	128
5.15	Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (été)	128



RÉSUMÉ

Le but de la modélisation est d'apporter une meilleure connaissance de l'hydrodynamique du domaine de l'étude, soit le tronçon Tracy - lac Saint-Pierre. Elle vise également à fournir les données de base nécessaires pour le fonctionnement du logiciel PANACHE pour étudier la contamination du lac Saint-Pierre.

Le modèle HYDREAU utilisé est un modèle numérique bidimensionnel intégré sur la verticale. Il utilise la méthode des éléments finis.

Le domaine modélisé est complexe. Les cinq réservoirs qui s'y trouvent ainsi que les rivières Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet ont été pris en considération. L'influence des macrophytes sur l'écoulement a été aussi considérée dans le modèle en tenant compte de leur cycle de croissance.

Quatre événements observés sur le terrain et documentés ont servi à la calibration et à la validation du modèle.

Une procédure basée sur les tableaux de fréquence a été utilisée pour choisir les événements de référence simulés représentant environ 50% des situations pouvant se produire au printemps et en été sur le tronçon étudié. Ces simulations constituent une bonne banque de résultats hydrodynamiques caractérisant le tronçon Tracy - lac Saint-Pierre en considérant l'influence de certains facteurs sur l'écoulement tels la présence ou non du vent, les différents débits du fleuve et des tributaires, et les macrophytes selon leur stade de croissance.

Les simulations ont confirmé l'influence considérable des macrophytes, qui peuplent des vastes étendues du lac Saint-Pierre, sur l'écoulement.



1 INTRODUCTION

1.1 Cadre de l'étude

Ce premier volume du rapport No 1 portant sur *la modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre* rend compte de toute l'activité de modélisation hydrodynamique du tronçon. Réalisé dans le cadre du Plan d'Action Saint-Laurent, le projet dans son ensemble vise à fournir un éclairage physique élaboré sur la problématique de la qualité de l'eau du tronçon. D'autres activités importantes ont été réalisées dans la poursuite du même objectif, entre autres, le développement du logiciel *PANACHE*, lequel permet, à l'aide d'une démarche lagrangienne (suivi numérique de particules), de prédire les concentrations de contaminants rejetés dans le milieu. Pour réaliser ces simulations avec *PANACHE*, l'étape ultime de l'ensemble du projet, la connaissance des courants est primordiale. De là l'importance de l'activité présentée dans ce rapport.

Le but de la modélisation hydrodynamique est donc de fournir les données de base courantométriques du tronçon. Plusieurs simulations ont été effectuées avec le modèle *HYDREAU* en vue de représenter les états les plus fréquents et/ou les plus problématiques rencontrés sur le tronçon. Les données hydrodynamiques produites sont l'orientation et l'intensité des vitesses du courant, la profondeur d'eau, la fonction courant, l'indice de diffusivité ainsi que certaines dérivées de ces variables.

1.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de *la modélisation hydrodynamique du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre* sont:

- d'acquérir une connaissance détaillée de l'hydrodynamique du tronçon en tenant compte des facteurs physiques dominants;

-
- de déterminer, à partir des valeurs observées, la variabilité spécifique et/ou simultanée des facteurs qui déterminent les écoulements au printemps et en été, et proposer, à l'aide d'une méthode probabilistique appropriée, les *événements de référence* les plus représentatifs et les plus significatifs pour l'analyse de la contamination;
 - d'implanter, de calibrer et de valider un modèle numérique des courants;
 - de simuler les événements proposés et de produire les données de base du tronçon sous la forme de vitesses de courants, de couloirs de débit et de diffusivités;
 - de produire un Atlas numérique des courants compatible au Système d'Information Géographique (SIG) *SPANSTTM*.

1.3 Milieu à l'étude

Le site à l'étude est un tronçon du fleuve Saint-Laurent qui s'étend de Tracy à l'amont du delta de Sorel jusqu'à Port Saint-François à la sortie du lac Saint-Pierre. C'est un milieu très complexe. Dans le delta de Sorel, l'écoulement chemine autour d'une trentaine d'îles, formant des bras d'importance variable. La navigation commerciale nécessitant de forts tirants d'eau, la plupart des bras secondaires du delta ont été partiellement obstrués au profit du chenal maritime par des ouvrages de contrôle du niveau d'eau. Cinq reversoires ont ainsi été aménagés au travers des chenaux provoquant ainsi un rehaussement du niveau d'eau dans la voie navigable.

Plusieurs affluents alimentent le débit du fleuve à l'intérieur de ce tronçon. Les plus importants débouchent sur la rive sud. Il s'agit des rivières Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet. Quelques tributaires proviennent de la rive nord, mais sont de faible importance. Le tronçon du lac Saint-Pierre présente également des particularités. C'est un milieu très peu profond à l'exception du chenal maritime, qui est entretenu de façon à assurer une profondeur minimale de 10,7 m par rapport au zéro des cartes de navigation. Les zones peu profondes sont favorables à la croissance des macrophytes (plantes aquatiques) qui peuvent devenir très abondants par endroit et exercer une influence déterminante sur l'hydrodynamique estivale du milieu.



2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Pertinence de la modélisation numérique

La méthodologie retenue pour cette étude est centrée sur la modélisation numérique par éléments finis. Ce choix s'appuie sur divers aspects du problème ayant trait surtout à la nature du domaine à l'étude, à son ampleur, aux qualités inhérentes à la méthode des éléments finis et, en particulier, aux fonctionnalités spécifiques au programme de calcul *HYDREAU*.

Tel qu'il a été démontré par Leclerc et coll. (1990b), la caractérisation courantométrique du fleuve Saint-Laurent par des moyens exclusivement de type "terrain" est une opération majeure en termes de mobilisation technique qui, malheureusement, n'a de valeur que pour quelques épisodes seulement. De plus, ces opérations de terrain nécessitent des investissements considérables. Cette situation reflète le dynamisme et la variabilité des phénomènes hydrodynamiques ainsi que l'étendue géographique du système. En modélisation numérique, les mesures de courants sur le terrain servent uniquement à déterminer et à vérifier les paramètres du modèle.

La caractérisation à l'aide de modèles physiques (appelés aussi modèles réduits) a représenté traditionnellement la première alternative valable pour procéder à ce genre d'étude. Cependant, les coûts de mise en oeuvre et d'opération de tels modèles sont très considérables. Les modèles réduits sont jugés plus appropriés pour étudier le comportement hydraulique des ouvrages de génie, surtout lorsque les phénomènes tridimensionnels dominent. De plus, en raison des distorsions d'échelle qui sont nécessaires pour implanter de tels modèles, la représentation de grandes étendues d'écoulements fluviaux n'est pas bien servie par cette approche.

Depuis que des modèles numériques fiables sont apparus dans la pratique de l'ingénieur, la caractérisation courantométrique des cours d'eau, des fleuves et des estuaires s'effectue de plus en plus de cette manière. Sydor (1978) a été parmi les premiers à étudier numériquement la courantométrie du fleuve Saint-Laurent et nous tenons à souligner ici son travail de pionnier.

La pratique de la modélisation numérique devient de plus en plus précise à mesure que s'accumulent les expériences pratiques de simulation dans divers milieux. Chaque domaine d'écoulement pose des difficultés particulières qui sont inhérentes à la morphologie du site ainsi qu'aux sollicitations et aux résistances particulières qui en déterminent la dynamique. Les ouvrages de génie contribuent



aussi très souvent à modifier le comportement physique d'un cours d'eau. Parmi ces ouvrages on distingue les ouvrages de navigation (ports, digues, versoirs, dragages et remblais) et les voies de transport (ponts, routes en empiètement). Ainsi, dans l'étude d'un cours d'eau, les modèles numériques doivent être assez versatiles pour prendre en considération efficacement, non seulement la dynamique naturelle du milieu, mais également les modifications qui y ont été apportées par les humains.

L'objet de cette étude comprend un tronçon fluvio-lacustre (lac Saint-Pierre) dont la variation du niveau d'eau a pour effet de déplacer la frontière de l'écoulement sur des distances appréciables. L'utilisation d'un modèle couvrant-découvrant s'impose afin de pouvoir déterminer en cours de résolution la limite, inconnue *a priori*, du domaine d'écoulement. *HYDREAU* comporte cette fonctionnalité essentielle qui sera traitée à la section 2.3.4 (Découvrement-recouvrement).

Le fleuve Saint-Laurent est un milieu qui peut être considéré comme homogène (non-stratifié) du point de vue numérique ce qui justifie l'utilisation d'un modèle bidimensionnel intégré verticalement comme *HYDREAU*. Il s'agit en effet d'un milieu de prédilection pour l'application d'un modèle dit "d'ondes longues". Par ailleurs, l'effort d'une caractérisation numérique en trois dimensions serait investi au détriment de la précision recherchée dans le plan horizontal. De plus, lorsqu'on se réfère au rapport entre les dimensions caractéristiques d'un tel milieu (profondeur moyenne/largeur moyenne) qui est de l'ordre de 1/1000 à 1/10 000, l'utilisation d'un modèle bidimensionnel est tout à fait justifiée.

Du point de vue géométrique, la méthode des éléments finis utilisée ici permet de tenir compte avec plus de rigueur, et plus naturellement, des formes du milieu mieux que toute autre méthode de discrétisation (ex: différences finies). De plus, elle permet aisément d'ajuster la densité des informations à la variabilité des phénomènes ainsi qu'à la précision recherchée en fonction du problème à résoudre. Le tronçon du delta de Sorel est un milieu tout désigné pour une discrétisation par éléments finis. Ce milieu comporte de nombreux méandres, chenaux, îles, bifurcations, confluences, divergences, convergences et ouvrages de génie. Il se devait d'être décrit par une méthode de discrétisation très souple et ajustable.



Le besoin accru de précision dans les résultats hydrodynamiques dans certaines régions du tronçon Tracy-Sorel où la contamination des eaux fait l'objet d'une analyse distincte¹ nécessite l'emploi d'un modèle permettant de raffiner localement au besoin la grille des éléments finis. Enfin, la prise en considération des herbiers submergés pour la simulation des écoulements requiert une méthode de discrétisation souple pour introduire précisément les contours de cette donnée.

L'accessibilité au code-source et la cohabitation des utilisateurs et des informaticiens permettent de reconfigurer les modèles numériques en fonction de nouveaux besoins ou de nouvelles données relatives au milieu étudié. Ainsi, une prise en compte appropriée des macrophytes dans le lac Saint-Pierre, la définition des masses d'eau et l'estimation des coefficients de diffusion ont nécessité la modification de certains modules de calcul et l'ajout d'autres dans le programme informatique *HYDREAU*.

De manière plus générale, la modélisation numérique est un outil privilégié pour valoriser des données provenant de différentes sources. Depuis les premières études hydrographiques de l'Amirauté britannique sur la navigabilité du secteur (XIX^{ème} siècle), des quantités considérables de données ont été recueillies sur ce milieu (débits, niveaux d'eau, vents, sédiments, etc...). Actuellement, il est particulièrement opportun de valoriser la plupart de ces données dans une perspective environnementale.

La grande capacité des modèles à intégrer l'information permet d'obtenir une vision globalisante du milieu étudié tout en conservant un certain degré de détails. Bien sûr, toute modélisation ne va pas sans une certaine réduction des processus qui apparaît sous la forme d'hypothèses simplificatrices. En effet, comme toute méthodologie d'analyse, la modélisation est une démarche bornée par ses propres hypothèses. Dans la mesure où celles-ci sont mentionnées explicitement et appliquées à l'interprétation, l'analyste peut progresser sécuritairement dans la compréhension globale du milieu.

¹Étude effectuée avec *PANACHE*, un logiciel de simulation lagrangienne développé dans le cadre de ce projet (voir le rapport No 2: *Développement et validation analytique d'un modèle lagrangien de simulation de panaches d'effluents*). L'étude de la contamination par les effluents et par les tributaires du tronçon fait l'objet du volume 3 du présent rapport.

2.2 Cheminement d'ensemble

La figure 2.1 donne une vue d'ensemble des diverses étapes constituant la démarche appliquée ici. Au départ, la phase d'*analyse préliminaire* du projet est essentielle pour énoncer clairement les objectifs et planifier les diverses activités dans le but d'assurer le rendement attendu de chacune d'entre elles. Elle permet de bien mesurer l'ampleur de la tâche, d'identifier les phases susceptibles de présenter des difficultés et de demander des développements numériques ou des caractérisations sur le terrain. La stratégie de résolution du problème est choisie en tenant compte de la précision recherchée, de la spécificité du problème et de la puissance des équipements informatiques disponibles.

La phase de *caractérisation sur le terrain* permet de compléter les ensembles de données requises par le modèle. L'information recherchée était surtout la courantométrie et certains ensembles de données de base comme la distribution des macrophytes et la granulométrie des sédiments.

Dans la présente étude, l'élaboration d'une carte bathymétrique détaillée et homogène est une tâche importante. Cette étape est un prérequis indispensable pour la conception du *modèle géométrique* de ce domaine. Le modèle géométrique est le support de l'information géo-référenciée utilisée par le modèle hydrodynamique (bathymétrie, substrat, macrophytes, présence d'ouvrages). Élaboré avec le maximum de soin, il permet de répondre efficacement aux besoins de l'étude. Il est omniprésent à toutes les étapes. Il est un des éléments qui conditionnent le plus la précision des résultats, la durée des calculs et la qualité des illustrations. Combiné aux données géo-référenciées, il forme le *modèle de terrain*.

L'implantation du *modèle hydrodynamique* est faite en fonction des épisodes courantométriques mesurés. Cette opération est le coeur de la démarche. Elle est réalisée en trois étapes: la mise au point d'une stratégie de résolution, l'étalonnage des paramètres et la validation. La *stratégie de résolution* comprend surtout les aspects informatiques du problème, incluant les développements spécifiques et le choix des équipements. L'*étalonnage* permet d'établir de manière optimale la valeur des paramètres d'ajustement du modèle. La *validation* est l'opération qui permet de vérifier si le modèle continue de fournir des résultats satisfaisants pour des événements autres que ceux qui ont servi de cible pour l'étalonnage.

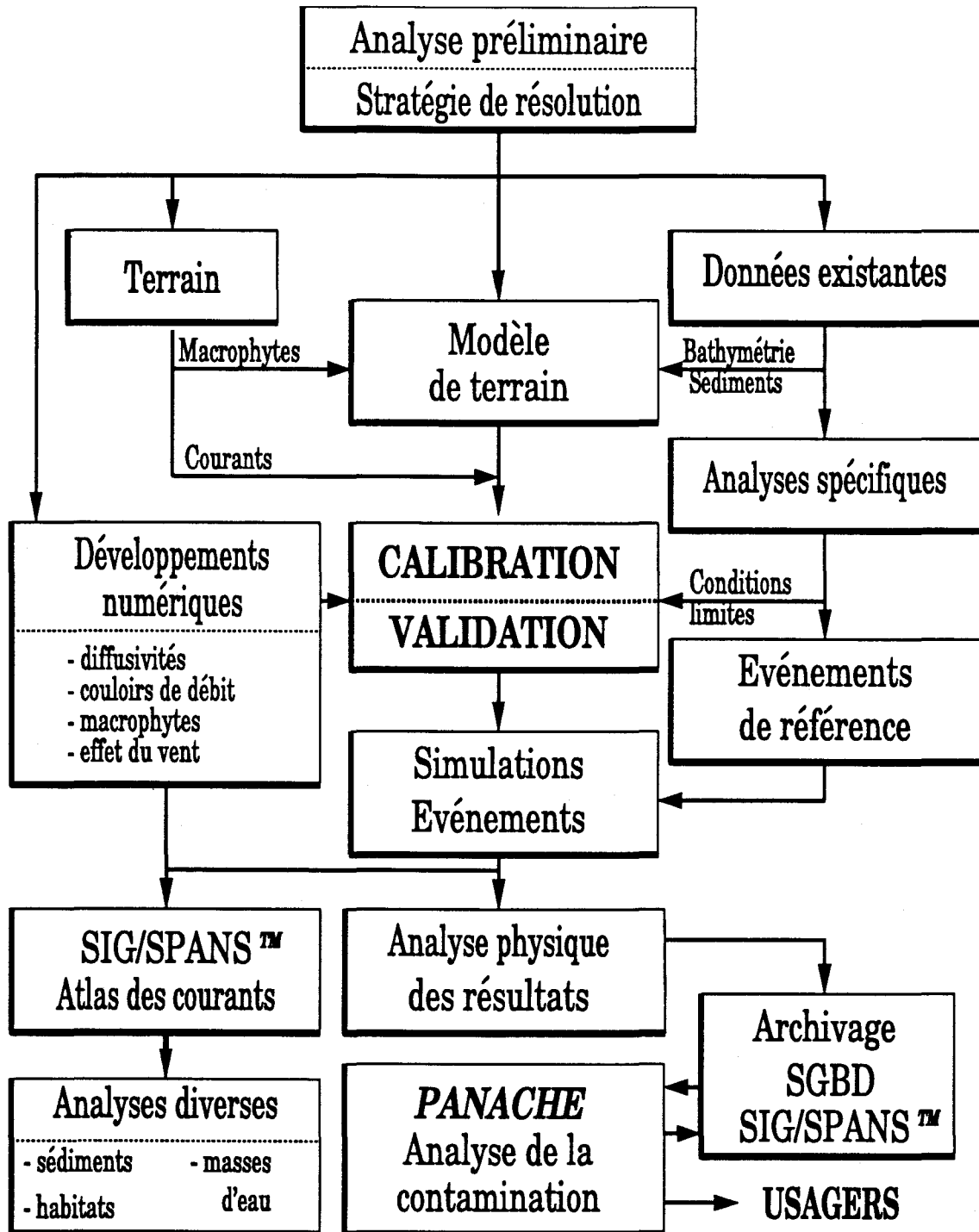


Figure 2.1 Méthodologie générale de l'étude.

La *simulation des conditions représentatives* de la variabilité des écoulements est la phase prédictive de l'étude. Elle fournit l'ensemble des résultats qui permettent de répondre à la question posée. Les sollicitations et les résistances à l'écoulement varient avec les *événements de référence* retenus pour l'étude. Dans le cas présent, les sollicitations comprennent le vent et le régime hydrologique du fleuve et des tributaires. Parmi les résistances à l'écoulement, les macrophytes jouent un rôle particulièrement important et, de surcroît, variable dans le temps. La définition des *événements de référence* doit donc en tenir compte. La marée est peu significative dans ce milieu bien que subsiste une composante lunaire de 14 jours.

L'*infographie* a toujours joué un rôle primordial dans les études d'éléments finis. L'énorme quantité de données produites par un modèle discrétisé nécessite l'utilisation de moyens puissants de visualisation qui permettent à l'analyste de dominer la masse de données et de procéder rapidement à l'analyse des résultats. L'infographie est absolument indispensable au modélisateur.

Les *systèmes d'information géographique* (SIG) font leur apparition dans l'univers de la modélisation. Dans le cadre de cette étude, les résultats sont produits sous une forme compatible à la *base de données à référence spatiale SPANS™* de *Intera TYDAC* d'Ottawa. Ainsi, les données de courants seront non seulement accessibles dans un format numérique à tous les participants à cette étude mais aussi à d'autres études qui requièrent des données hydrodynamiques telles la sédimentologie, les habitats, les masses d'eau, etc.

Enfin, une étude de qualité est toujours configurée pour s'ajuster à la nature de la problématique visée. Dans le cas présent, la *diffusivité des écoulements et la définition des masses d'eau* de diverses provenances représentent le noeud de la question étudiée. Il a fallu rechercher des moyens efficaces pour traduire les champs de vitesse en paramètres de transport et de diffusivité pour la simulation des panaches d'effluent et le suivi des tributaires. C'est pourquoi, les contraintes de Reynolds, la cause primordiale des phénomènes de dispersion dans le milieu fluvial, ont été prises en compte à l'aide du concept de "*longueur de mélange*".

2.3 Modèle numérique hydrodynamique *HYDREAU*

La section qui suit est constituée de larges extraits d'un de nos rapports (Leclerc et coll., 1989) produit pour la Société d'Énergie de la Baie James. Elle contient un exposé sur le modèle numérique hydrodynamique. Suite à un rappel des études antérieures de même nature, les bases théoriques



seront brièvement présentées en mentionnant les étapes majeures de l'élaboration algébrique et en explicitant les hypothèses inhérentes à sa formulation mathématique. Les fonctionnalités particulières propres à l'application au tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre seront également traitées.

AVERTISSEMENT. *Les sections 2.3.1 à 2.3.9 s'adressent aux lecteurs avertis des méthodes numériques de l'hydraulique et ne sont pas nécessairement requises pour la compréhension de la suite du rapport. Le lecteur pourra consulter immédiatement la section 2.3.10 pour en avoir un résumé.*

2.3.1 Expériences antérieures

La modélisation numérique bidimensionnelle est devenue au cours de la dernière décennie un outil scientifiquement reconnu pour la simulation des écoulements dans les rivières, fleuves et estuaires (Grotkop, 1973; Connor et Wang, 1974; Taylor et Davis, 1975; Brebbia et Partridge, 1976; Lynch et Gray, 1978; Cochet, 1979; Walters et Cheng, 1980; Herrling, 1982; Soulaïmani, 1983; Kawahara et Umetsu, 1986; Leclerc et coll., 1987, 1990b,c).

Dans la même veine, de nombreuses expériences antérieures supportent la valeur et l'utilité du modèle *HYDREAU* comme outil d'analyse dans un contexte environnemental. Mentionnons principalement:

- le *Projet Archipel* (Leclerc et coll., 1987): modélisation du lac Saint-Louis, des rapides de Lachine (amont) et du bassin La Prairie en conditions actuelles et futures à des fins d'analyse environnementale et récréologique (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement);
- le projet de *suréquipement du Complexe Manicouagan* (1989a): modèle couvrant-découvrant de l'hydrodynamique et du mouvement du front salin dans l'estuaire de la rivière Manicouagan à des fins environnementales et de stabilité du lit d'écoulement (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement et le Groupe ROCHE);
- le projet de la *traversée du fleuve Saint-Laurent à Grondines par la ligne Radisson/Nicolet/Des-Cantons* d'Hydro-Québec (Leclerc et coll.; 1986, 1989b): modèle couvrant-découvrant de l'hydrodynamique et du transport-diffusion de 20 kilomètres du fleuve en conditions actuelles et futures pour l'étude des conditions de migration du poulamon atlantique (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement);



- le projet *Sainte-Marguerite* (Boudreault, A. et coll., 1988, 1989, 1990; Leclerc et coll., 1991; Hayeur et coll., 1990): modèle couvrant-découvrant de six biefs représentatifs de la rivière *Moisie* et développement de l'approche d'analyse des microhabitats du saumon atlantique en vue de définir des débits minimums réservés (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement);
- le projet *Les Cèdres* (TAO Simulation Inc., 1988): modélisation de l'hydrodynamique du réservoir de la Pointe-du-Buisson en conditions actuelles et futures (trois scénarios d'aménagement) à des fins environnementales et sédimentologiques (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement);
- le projet de *suréquipement du complexe La Grande* (Leclerc et coll., 1989): modèle couvrant-découvrant de l'estuaire de la rivière Lagrande et du bief d'amont des ouvrages LG1 jusqu'au kilomètre 80 à des fins sédimentologiques (pour la Société d'Énergie de la Baie James);
- le projet *Ashuapmushuan* (Leclerc et coll., 1990, Belzile et coll. 1990): modèle couvrant-découvrant d'un tronçon sensible de la rivière Ashuapmushuan pour l'étude de la disponibilité et de la dynamique des habitats à ouananiche en conditions naturelles ou influencées (pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement).

2.3.2 *Modèle mathématique tridimensionnel*

Le lecteur trouvera dans Leclerc et coll. (1987, 1990a,b) des exposés scientifiques élaborés sur le modèle *HYDREAU*. Seules les étapes essentielles seront reprises ou mentionnées ici. La forme originale des équations de mouvement est par nature tridimensionnelle. Elle traduit des principes fondamentaux de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans le milieu continu, c'est-à-dire, à l'échelle infinitésimale. Pour un milieu homogène et incompressible, les équations aux dérivées partielles locales et instantanées résultant de l'application de ces principes sont:



Conservation de la quantité de mouvement¹ (3D):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\rho \partial x_j} + F_c + g \delta_{i3}$$

$$(u, v, w) \equiv (u_i) \equiv (u_i)^T; \quad i = 1,2,3; \quad j = 1,2,3 \quad [2.1]$$

Continuité ou conservation de la masse (3D):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [2.2]$$

où,

- F_c : la force de Coriolis;
- g : l'accélération gravitationnelle;
- P : la pression;
- (u,v,w) : les composantes du vecteur vitesse selon x, y et z respectivement;
- t : le temps;
- (x,y,z) : les coordonnées cartésiennes;
- δ_{ij} : le symbole de Kronecker; = 1 si $i = j$; = 0 autrement;
- ρ : la masse spécifique de l'eau;
- τ_{ij} : le tenseur de contraintes visqueuses.

2.3.3 Forme bidimensionnelle de Saint-Venant (2D)

Les équations tridimensionnelles ne sont jamais utilisées telles quelles dans la pratique. Quelques hypothèses additionnelles permettent de les simplifier et de les ramener à deux dimensions. Dans les milieux peu profonds comme les fleuves et les estuaires, les écoulements sont principalement de nature gravitationnelle et caractéristiques des ondes longues. La pression y est considérée comme *hydrostatique* et la hauteur d'eau tient lieu de pression dans le modèle.

¹La notation utilisée est celle d'Einstein. L'indice i permet de générer trois équations semblables où u_i est remplacé par u , v ou w respectivement. L'indice j permet d'étendre l'expression au sein de la même équation en remplaçant u_j par (u, v, w) .



L'hypothèse de Reynolds considère la vitesse de l'écoulement comme composée d'une valeur moyenne à laquelle s'ajoute une fluctuation temporelle de moyenne nulle sur une période T :

$$u = \bar{u} + u'$$

$$\int_T u' dt = 0$$

L'intégration temporelle de l'équation 2.1 sur T laisse subsister des termes turbulents issus de l'hypothèse de Reynolds. Ceux-ci entraînent un problème de fermeture empirique du modèle. Dans la pratique, les termes turbulents ont été considérés comme des contraintes analogues aux contraintes visqueuses et la forme algébrique de celles-ci a été reprise pour les décrire. Par conséquent, le coefficient de viscosité cinématique qui apparaît dans les équations de Saint-Venant (équations 2.3 à 2.9) est une propriété turbulente de l'écoulement, et non une propriété du fluide comme dans le cas des forces visqueuses. Ce n'est qu'à cause de l'analogie algébrique que l'expression "coefficient de viscosité" turbulente a été retenue.

Enfin, l'hypothèse de milieu homogène bien mélangé permet l'intégration des équations de mouvement et de continuité dans la verticale pour ainsi obtenir la version bidimensionnelle des équations de Navier-Stokes.

Les équations de conservation de la quantité de mouvement de Saint-Venant sont données par les relations 2.3 à 2.6 avec les conventions de la figure 2.2.

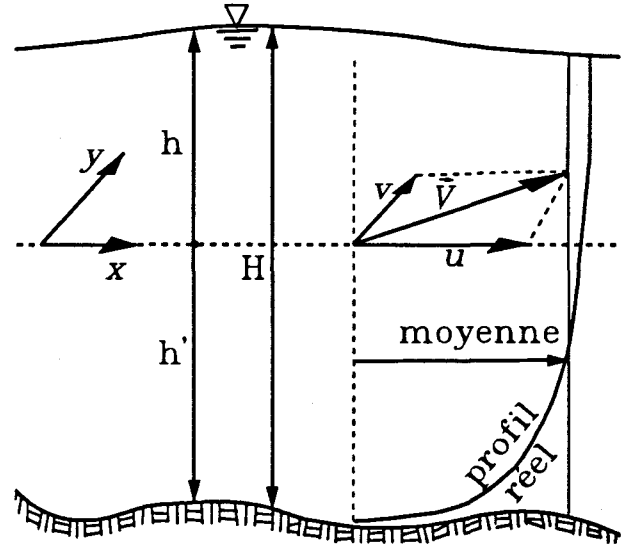


Figure 2.2
Conventions du modèle mathématique
bidimensionnel de Saint-Venant

Conservation de la quantité de mouvement (Saint-Venant):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = F_x \quad [2.3]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_y \quad [2.4]$$

$$F_x = -\frac{gn^2 |\vec{V}| u}{H^{4/3}} + f_c v + \left[\frac{\partial \tau_{xx}'}{\rho \partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}'}{\rho \partial y} \right] + \frac{C_w \rho_a}{\rho H} |\vec{W}| W_x \quad [2.5]$$

$$F_y = -\frac{gn^2 |\vec{V}| v}{H^{4/3}} - f_c u + \left[\frac{\partial \tau_{yx}'}{\rho \partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}'}{\rho \partial y} \right] + \frac{C_w \rho_a}{\rho H} |\vec{W}| W_y \quad [2.6]$$

C_w : le coefficient de traînée du vent;

f_c : le facteur de Coriolis;

F_x ou F_y : les résultantes des forces massiques exercées sur une particule d'eau selon x ou y;

h : le niveau de l'eau;

H : la profondeur totale



n :	le coefficient de Manning;
$ \vec{V} $:	le module du vecteur-courant;
$ \vec{W} $:	le module du vecteur-vent;
W_x, W_y :	les composantes de la vitesse du vent;
x, y :	les coordonnées cartésiennes (ex: UTM); lorsque les forces de Coriolis sont prises en compte, x est orienté à l'est et y au nord;
ρ :	la masse spécifique de l'eau;
ρ_a :	la masse spécifique de l'air;
τ_{ij}' :	les contraintes de Reynolds.

Les contraintes de Reynolds sont classiquement représentées à l'aide du tenseur de déformation angulaire des masses d'eau:

$$\frac{\tau_{ij}'}{\rho} = \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \begin{array}{l} i = 1,2 \\ j = 1,2 \end{array} \quad [2.7]$$

où,

ν_T : la viscosité turbulente cinématique.

La viscosité turbulente étant une propriété de l'écoulement, diverses formulations faisant intervenir les vitesses et leurs dérivées sont employées pour l'évaluer dans les problèmes pratiques. La plupart du temps, une valeur constante et isotrope est utilisée. Lorsqu'il est important d'améliorer la représentation locale des champs de vitesse en vue d'études de transport-diffusion comme c'est le cas dans la présente étude, il est préférable d'utiliser une loi dite de "longueur de mélange" qui prend la forme suivante (approche dite "à zéro équation": Rodi, 1980):

$$\nu_T = l_m^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} \quad [2.8]$$

l_m : une longueur dite "de mélange".

Cet aspect est également traité à la section 2.5.3 (Viscosité turbulente (ν_T) et longueur de mélange (l_m)).



Dans un modèle bidimensionnel de conservation de la masse, l'intégration verticale de la relation 2.2 fait apparaître des termes de nature géométrique comme la hauteur d'eau et la profondeur totale. La relation 2.9 représente ce modèle:

Continuité (Saint-Venant):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \quad [2.9]$$

2.3.4 Découvement-recouvrement (frontière mobile)

Dans le lac Saint-Pierre et sur les estrans de faibles pentes, les variations significatives du niveau d'eau associées à l'hydraulicité du fleuve ne permettent pas de considérer comme fixes, même approximativement, les frontières latérales de l'écoulement. La plupart du temps, il s'agit d'une inconnue du problème.

En éléments finis, très peu d'approches industrielles ont pu être mises au point pour traiter ce genre de problème efficacement. La bibliographie reste avare de propositions sur ce sujet et les rares contributions s'y retrouvant sont, soit de nature académique sans réelle possibilité d'industrialisation, soit trop simplificatrices. Une revue de ces modèles a été effectuée par Leclerc et coll. (1990a). Herrling (1982), Soulaïmani (1985), Lynch et Gray (1978), Holz et Nitsche (1980) ainsi que Kawahara et Umetsu (1986) sont parmi ceux qui ont fourni une contribution.

Cette carence dans les outils de modélisation est associée à la difficulté de trouver une formulation qui permet de respecter les principes de conservation dans le milieu discret, c'est-à-dire, à l'échelle des éléments de base de la discrétisation qu'il s'agisse de "molécules" numériques comme dans les modèles aux différences finies, ou encore d'éléments géométriques proprement dits, comme dans la méthode des éléments finis.

L'approche développée dans *HYDREAU* et présentée par Leclerc et al (1990a,b) s'appuie sur une analyse minutieuse du problème au cours du processus de résolution. Elle permet de diagnostiquer transitoirement l'état inondé, exondé ou mixte de chacun des éléments et de résoudre le problème en tenant compte de cet état.



Lorsqu'un élément est inondé, la formulation complète décrite plus tôt est appliquée. Si, au contraire, il s'exonde en totalité, une formulation "pénalisée" (accroissement de la rigidité des variables) permet l'annulation technique de la vitesse d'écoulement tout en gardant actifs numériquement (en hibernation) les noeuds concernés, ce qui préserve la topologie du système.

Sur l'élément partiellement découvert, la procédure ressemble plus à celle utilisée sur l'élément inondé mais en utilisant une formulation réduite de Saint-Venant. L'équation de continuité de masse est appliquée intégralement. C'est le principe de conservation de la quantité de mouvement qui est réduit à un principe de continuité numérique du champ de vitesse au voisinage de la frontière.

Pour ce faire, le mouvement d'ensemble du cours d'eau est répercuté au sein de l'élément à l'aide d'un opérateur du type laplacien. Son effet est du même type qu'une contrainte tangentielle qui serait produite par une couche limite latérale. La frontière de l'écoulement étant caractérisée par une condition d'adhérence (élément exondé), un paramètre d'ajustement du laplacien des vitesses sur l'élément partiellement découvert est utilisé pour minimiser l'effet retardateur qui résulte de cette procédure. Ce paramètre est du type d'une viscosité turbulente cinématique.

2.3.5 Formulation variationnelle

Le modèle variationnel est obtenu en construisant une forme intégrale du système d'Équations aux Dérivées Partielles (ÉDP) obtenu précédemment (équations 2.3 à 2.9).

Réécrivons les ÉDP utilisées jusqu'à maintenant à l'aide d'une notation qui fait appel à la notion d'opérateur différentiel global L et définissons le concept de résidu R :

$$\{R(\underline{u})\} = \{\dot{\underline{u}}\} + [L(\underline{u})] \{\underline{u}\} + \{f\} = 0 \quad [2.10]$$

où,

- { } : un vecteur-colonne;
- < > : un vecteur-ligne;
- [] : un système matriciel;
- f : les sollicitations sur l'écoulement (le vent, par exemple);
- L : l'ensemble des opérateurs différentiels appliqués (2.3 à 2.9);
- R : le résidu;
- \underline{u} : les inconnues du problème;
- $\langle \underline{u} \rangle \equiv \langle u, v, h \rangle$



La forme variationnelle de type Galerkin est obtenue par une formulation intégrale du résidu pondéré par la première variation des inconnues du problème. La fonctionnelle du mouvement est généralement pondérée par la première variation des vitesses alors que celle de continuité est pondérée par la première variation de la hauteur d'eau.

Le modèle variationnel s'exprime comme suit:

$$W = \int_A \langle \delta \underline{u} \rangle \{R(\underline{u})\} dA = 0 \quad \forall \delta \underline{u} \quad [2.11]$$

où,

- A : le domaine d'intégration;
 W : forme intégrale globale;
 $\delta \underline{u}$: les premières variations des inconnues du problème;
 $\langle \delta \underline{u} \rangle \equiv \langle \delta u, \delta v, \delta h, \rangle$

Ce modèle est ensuite converti dans sa forme dite "faible" par l'intégration par parties des termes de contraintes turbulentes de Reynolds. Le résultat, en tous points équivalent à la forme initiale, est cependant plus facile à résoudre, les dérivées, d'ordre deux au départ, étant devenues d'ordre un après l'opération. Exprimée en notation d'Einstein, cette forme s'écrit:

$$\int_A \delta u_i \frac{\partial \tau_{ij}'}{\partial x_j} dA = - \int_A \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} \tau_{ij}' dA + \oint_s \delta u_i \tau_{ij}' ds \quad [2.12]$$

$$i = \langle 1, 2 \rangle^T \equiv \langle N, T \rangle^T$$

$$j = \langle 1, 2 \rangle \equiv \langle N, T \rangle$$

où,

- (N, T) : les directions normales et tangentielles à la frontière;
 $\langle \rangle^T$: un vecteur-colonne;
 s : le contour du domaine d'intégration.

Les termes de contour qui apparaissent dans la relation 2.12 sont pris en compte par une condition de glissement (Section 2.3.7: Conditions aux limites) aux frontières latérales de l'écoulement ou, encore, par une condition d'uniformité aux limites ouvertes. En général, une uniformité approxi-



mative est suffisante pour les limites ouvertes. Il est cependant important de ne pas délimiter le domaine en un site susceptible de présenter des comportements de type fortement varié (ex: ressaut hydraulique, contraction).

Cette procédure dite "faible" est également mise à profit pour traiter la fonctionnelle de continuité. Le résultat obtenu est le suivant:

$$-\int_A \left((-\delta h \dot{h}) + Hu \frac{\partial \delta h}{\partial x} + Hv \frac{\partial \delta h}{\partial y} \right) dA + \int_S \delta h Hu_N ds = 0 \quad [2.13]$$

Le terme de contour a la forme d'un débit spécifique ($q = Hu_N$) ce qui permet d'imposer ce type de sollicitation aux frontières ouvertes. Lorsque le niveau d'eau est imposé ($\delta h = 0$), le terme de contour en débit peut être ignoré. Aux frontières fermées, c'est la condition d'imperméabilité (Section 2.3.7 : Conditions aux limites) qui permet d'ignorer ce terme, la vitesse normale u_N étant imposée nulle.

Par ailleurs, cette expression a l'avantage de permettre l'utilisation d'une bathymétrie discontinue lorsque la configuration du lit est particulièrement accidentée. Cette considération est liée à l'ordre des dérivées subsistant dans le modèle avec la forme faible et au degré d'approximation requis pour les considérer.

2.3.6 Discrétisation du modèle variationnel

La discrétisation du modèle variationnel permet d'obtenir un système algébrique matriciel qui peut être résolu à l'aide des méthodes numériques classiques.

Le modèle variationnel est discrétisé à l'aide d'un schéma d'approximation nodale quadratique s'appuyant sur un triangle à six noeuds pour les composantes de la vitesse et leur première variation (Figure 2.3). L'approximation nodale est une technique d'interpolation qui utilise des fonctions polynomiales pour obtenir la valeur des variables, de la géométrie ou des paramètres au sein de l'élément de même que leurs dérivées si nécessaire.

La hauteur d'eau est représentée linéairement dans le modèle. Seuls les noeuds aux sommets du triangle sont utilisés pour ce faire. Ce choix conditionne jusqu'à un certain point l'approximation nodale des autres termes de nature géométrique soit, la géométrie des éléments eux-mêmes dans le plan et la bathymétrie. Toutes les approximations liées à la géométrie sont donc isoparamétriques.

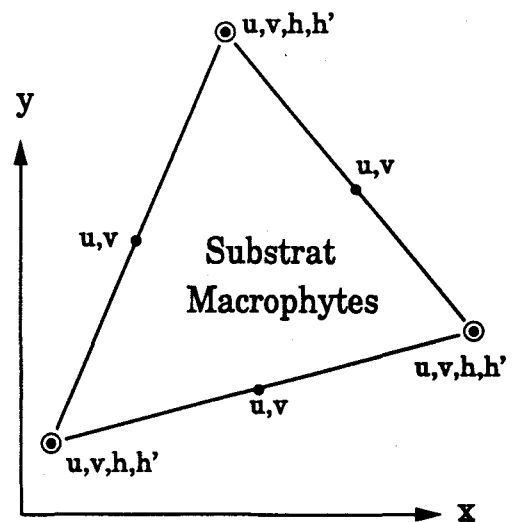


Figure 2.3

Élément de base utilisé par le modèle *HYDREAU*

u, v : vitesses selon x et y ;

h, h' : niveau d'eau et bathymétrie.

Les propriétés physiques du milieu et les paramètres sont représentés dans le modèle comme des valeurs constantes par élément. Il en est ainsi du substrat, du n de Manning, du type de macrophytes et de la viscosité turbulente cinématique. Lorsque cette dernière est donnée sous la forme d'une loi de longueur de mélange (Équation 2.8), les dérivées des vitesses interviennent et le degré polynomial de la viscosité s'ajuste en conséquence.

Toutes ces approximations, sauf les paramètres, présentent un type de continuité C_0 , ce qui signifie que la valeur des variables est continue à la frontière des éléments mais pas celle des dérivées dans la direction normale à la frontière élémentaire.

La forme variationnelle présentée plus tôt exprime le comportement du milieu continu, i.e., à une échelle infinitésimale. La discrétisation traduit le modèle à l'échelle de l'élément à l'aide des formes variationnelles élémentaires. Il en résulte autant de systèmes algébriques qu'il y a d'éléments constituant le modèle géométrique. Ceux-ci seront assemblés pour constituer de nouveau un seul système algébrique global. Cette opération est symbolisée comme suit; considérons d'abord le résidu élémentaire:

$$\{R^e(\underline{u}^e)\} = \{\underline{\dot{u}}^e\} + [L(\underline{u}^e)] \{\underline{u}^e\} + \{f^e\} \quad [2.14]$$

où,

- f^e : les sollicitations sur l'élément;
- L : l'ensemble des opérateurs différentiels appliqués;
- R^e : le résidu élémentaire;



\underline{u}^e : toutes les inconnues du problème au niveau de l'élément.

La forme intégrale globale discrétisée s'écrit ainsi:

$$W^e = \int_{A^e} \langle \delta \underline{u}^e \rangle \{R(\underline{u}^e)\} dA^e = 0$$

$$W = \sum_{e=1}^{N^e} = 0 \quad [2.15]$$

A^e : le domaine de l'élément;

N^e : le nombre total d'éléments du modèle géométrique;

W^e : la forme intégrale élémentaire.

2.3.7 Conditions aux limites

La question des *conditions aux limites* est la traduction algébrique du principe suivant:

Lors du découpage d'un système pour des fins de modélisation, ce qui n'est pas inclus dans le modèle doit être remplacé par son effet résiduel.

Par exemple, pour qu'une limite latérale du modèle puisse confiner l'écoulement comme dans la nature, une condition d'imperméabilité doit être définie. Algébriquement, cela revient à imposer que la vitesse dans la direction normale à la frontière soit nulle.

Le choix d'un scénario de conditions aux limites dépend aussi de la formulation mathématique retenue. Par exemple, comme il a été vu précédemment, *HYDREAU* utilise la forme faible pour les contraintes de Reynolds et pour la fonctionnelle de continuité. Cette approche produit des termes de contour ayant la forme de conditions aux limites. Dans *HYDREAU*, les conditions aux limites, symbolisées à la figure 2.4, peuvent être du type:

- *Débit ou niveau d'eau et orientation des courants à l'entrée des tributaires et à la limite amont du modèle;*

$$Q = \hat{Q} \quad \text{ou} \quad h(t) = \hat{h}(t) \quad \text{et} \quad u_n = 0 \quad \text{sur} \quad S_{\text{amont}}$$

- *Imperméabilité et, adhérence ou glissement aux limites latérales (rives):*



$$\begin{aligned}
 u_N &= 0 && \text{(impermeabilité)} \\
 u_T &= 0 && \text{(adhérence)} && \text{sur } S_{\text{rives}} \\
 u_T &= \text{libre} && \text{(glissement)}
 \end{aligned}$$

- Niveau d'eau et direction de l'écoulement à la limite ouverte.

$$h(t) = \hat{h}(t) \text{ et } u_T = 0 \text{ sur } S_{\text{aval}}$$

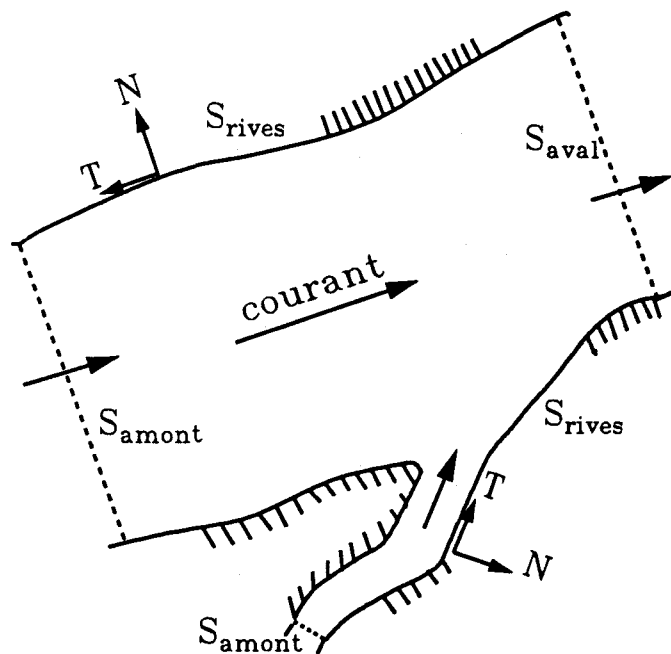


Figure 2.4

Conventions des conditions aux limites

Les choix particuliers de conditions aux limites effectués au cours de cette étude sont conformes à cette problématique et seront présentés au chapitre 4 sur la calibration et la validation du modèle.

2.3.8 Conditions initiales

Les *conditions initiales* jouent le même rôle que les conditions limites mais dans le temps cette fois. En effet, le découpage du modèle ne s'effectue pas que dans l'espace mais aussi dans le temps. En d'autres termes, la simulation commence à un moment donné dans le temps et elle doit tenir compte de l'évolution passée du système jusqu'au moment de sa prise en charge par le modèle. Les conditions initiales s'appliquent autant aux conditions aux limites qu'aux inconnues du problème et traduisent l'état du système au moment de commencer la simulation. Comme cet état n'est habituellement pas connu, du moins rarement avec la résolution exigée par le modèle, une procédure



de génération de conditions initiales doit être utilisée pour permettre à la simulation de démarrer adéquatement. Les conditions initiales sont nécessaires pour simuler les écoulements transitoires. Elles sont exprimées de la façon suivante:

$$\begin{aligned} u(x, y, t_0) &= u_0(x, y), & v(x, y, t_0) &= v_0(x, y), \\ h(x, y, t_0) &= h_0(x, y) & \text{et} & \quad Q(x, y, t_0) = Q_0(x, y) \end{aligned}$$

Toutefois, lorsque l'écoulement varie peu dans le temps (état de quasi-stationnarité), les conditions de régime permanent s'appliquent. Cette approche ne nécessite pas une considération spéciale des conditions initiales mais elle requiert des techniques particulières pour atteindre rapidement l'état d'équilibre recherché. Le régime d'écoulement du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre a été considéré comme permanent pour les simulations.

2.3.9 Méthode de résolution algébrique

Le modèle variationnel discrétisé est constitué d'une forme intégrale très élaborée compte tenu du nombre de termes qui interviennent dans le calcul. Mais cette forme ne traite en fin de compte qu'une longue suite de polynômes de degrés divers produits par la discrétisation. Pour opérer l'intégration du modèle variationnel, les méthodes numériques telles que décrites dans Dhatt et Touzot (1981) sont utilisées. Dans *HYDREAU*, la méthode utilisée, celle de Hammer, est une formule directe d'intégration sur un triangle. Le nombre de points d'intégration est de 7 ce qui permet de traiter des polynômes d'ordre 5.

La résolution du système algébrique global est assurée par un schéma d'Euler implicite pour l'aspect temporel tandis que les non-linéarités représentées par les termes de convection, de frottement et de continuité se calculent par un processus itératif de type Newton-Raphson qui a prouvé son efficacité et sa robustesse à maintes reprises dans des études antérieures. Cette procédure, recommandée par Dhatt et Touzot (1981), est également utilisée par de nombreux numériciens dont Walters et Cheng (1980).

Cette approche facilite l'obtention de résultats en régime permanent car il n'existe pas de limite sur le pas de temps utilisé et le modèle demeure inconditionnellement stable. Cependant, la taille du système à résoudre nécessite habituellement une grande capacité mémoire (vive ou virtuelle). Dans le cadre de la présente étude, les calculs ont été effectués sur un SUN SPARC/2 disposant de 64 MB de mémoire vive.



2.3.10 Le modèle HYDREAU en bref

Résumons en quelques phrases les caractéristiques de base de *HYDREAU*:

- le modèle mathématique est constitué d'équations de Saint-Venant à deux dimensions;
- les variables sont les composantes de la vitesse moyenne (intégrée verticalement) et le niveau d'eau;
- la pression est considérée comme hydrostatique (hypothèse des ondes longues);
- la méthode de discrétisation utilisée est du type "éléments finis"; les composantes de la vitesse sont interpolées quadratiquement et les dimensions verticales linéairement (continuité C_0);
- la méthode de résolution est celle d'Euler implicite pour l'aspect transitoire et de Newton-Raphson pour les non-linéarités;
- le modèle comporte une fonctionnalité couvrant-découvrant permettant de considérer la frontière de l'écoulement comme mobile et inconnue du problème;
- l'outil est particulièrement approprié pour traiter les problèmes d'estuaires à marée, les analyses de sensibilité au débit dans les rivières et fleuves à régime graduellement varié;
- le modèle prend en compte la présence, le type et l'état des macrophytes comme facteur de résistance à l'écoulement;
- le modèle dispose de fonctionnalités particulières comme le calcul de la fonction courant et des diffusivités.

2.4 Élaboration du modèle de terrain

Le modèle de terrain consiste en un maillage d'éléments finis triangulaires à six noeuds (éléments T6 de la figure 2.3) auxquels sont associées les données relatives à la bathymétrie, au substrat et aux macrophytes. Chacun des éléments couvre une partie du domaine et épouse les formes locales. Le substrat et les macrophytes sont pris en considération au niveau élémentaire par l'utilisation d'indices spécifiques à chacun des triangles formant le maillage. La bathymétrie du domaine est donnée aux noeuds-sommets de chacun des triangles. Le sous-ensemble "maillage-bathymétrie" forme le *modèle géométrique*.

Il importe d'obtenir une représentation de la bathymétrie identifiant les particularités telles les chenaux, les fosses, les haut-fonds et les confluent. Le modélisateur doit créer un modèle de terrain qui représente le plus fidèlement possible la morphologie ainsi que les caractéristiques du substrat



et des macrophytes du domaine. Cependant, le problème de la taille du modèle limite le nombre total d'éléments à utiliser. Cette autre contrainte impose au modélisateur de discriminer les structures morphologiques à représenter en détails. Ce choix est établi en fonction de l'importance de l'influence que ces structures peuvent avoir sur le champ d'écoulement. Les maillages automatiques existants ne permettent pas de tenir compte de tant de contraintes. La conception du maillage est donc du ressort des spécialistes en modélisation et devient jusqu'à un certain point un exercice artisanal. Pour le nombre d'éléments utilisés, un bon maillage permettra de tenir compte de la bathymétrie du domaine d'une façon optimale.

Dans ce contexte, il n'est pas souhaitable d'interpréter les résultats du modèle à une échelle locale plus fine que celle utilisée à cet endroit pour définir la géométrie du lieu. L'analyste doit donc garder à portée de la main les images du maillage qui lui serviront de guide pour éviter des interprétations qui dépasseraient la précision intrinsèque du modèle. À l'étape du calcul de la propagation d'un soluté (étape ultime de l'étude), ces structures dont la taille est inférieure à celle d'un élément sont prises en considération comme de la dispersion à l'aide d'un opérateur diffusif.

2.5 Estimation des paramètres

Les principaux paramètres du modèle concernent tous la résistance du milieu étudié à l'écoulement ou les sollicitations provenant de l'extérieur. La résistance du fond et celle des macrophytes sont prises en considération avec une expression faisant intervenir quadratiquement la vitesse et le coefficient de frottement de type "Manning". Ces résistances découlent de l'intégration verticale des équations de mouvement. Elles s'additionnent vectoriellement:

$$\begin{aligned}\tau_x &= \tau_{xf} + \tau_{xm} \\ \tau_y &= \tau_{yf} + \tau_{ym}\end{aligned}\quad [2.16]$$

où:

- τ_x, τ_y : la résistance totale de type Manning selon x et y;
- τ_{xf}, τ_{yf} : la résistance du fond (*f*) selon x et y;
- τ_{xm}, τ_{ym} : la résistance des macrophytes (*m*) selon x et y.

L'expression de type Manning utilisée est la suivante (voir aussi les équations 2.5 et 2.6):



$$\tau_i = -\frac{\rho g n^2 |V| u_i}{H^{\frac{1}{3}}}; \quad i = 1, 2 \quad [2.17]$$

Conformément aux équations 2.16 et 2.17, les coefficients de Manning respectifs des macrophytes n_m et du substrat n_f s'additionnent quadratiquement.

$$n^2 = n_f^2 + n_m^2 \quad [2.18]$$

Le "n résultant" est obtenu par:

$$n = \sqrt{n_f^2 + n_m^2} \quad [2.19]$$

Dans ce qui suit, nous expliquons les formes algébriques utilisées pour représenter le lien entre les coefficients de Manning et les résistances du milieu, i.e., la granulométrie et les caractéristiques des macrophytes. La calibration est l'étape qui permettra ultérieurement de fixer définitivement la valeur de ces paramètres pour la présente étude (voir la section 4.4 : Valeur des paramètres retenue).

2.5.1 Résistance du fond: n_f

Il est important de tenir compte de la distribution et de la taille des sédiments formant le lit d'écoulement pour ajuster n_f . Szesztay (Carlier, 1980) a proposé une formule de type logarithmique pour lier ce paramètre et le diamètre moyen des aspérités sur un fond plat et fixe:

$$\frac{1}{n_f} = 19,8 \log \left[\frac{9,15}{\bar{d}(m)} \right] \quad [2.20]$$

où

\bar{d} : est le diamètre moyen des sédiments ou aspérités en mètres.

S'inspirant des différentes expériences réalisées en rivière pour ajuster ce paramètre, Leclerc et coll. (1990a) ont proposé une équation similaire à celle de l'équation 2.20:

$$\frac{1}{n_f} = 14,5 \log \left[\frac{22,8}{\bar{d}'(m)} \right] \quad [2.21]$$

où,



\bar{d} : est le diamètre caractéristique du granulat ou des aspérités calculé en tenant compte de leur taille et de leur distribution granulométrique.

Les relations 2.20 et 2.21 sont représentées graphiquement à la figure 2.5. Les raisons qui expliquent la différence entre ces deux équations sont l'hypothèse de fond plat et fixe de la relation 2.20, le protocole de caractérisation du substrat et la méthode utilisée pour déterminer le diamètre caractéristique des sédiments et des rugosités.

L'utilisation de ces deux équations fournit une bonne estimation de base du coefficient n_f , ce qui permet d'entreprendre rapidement la calibration du modèle hydrodynamique sur un site. Toutefois, des ajustements supplémentaires peuvent être requis pour assurer une meilleure représentativité locale du modèle.

2.5.2 Résistance des macrophytes: n_m

Puisque chacune des espèces de macrophytes induit un frottement différent selon sa morphologie et que plusieurs espèces peuvent être présentes à un même endroit, le coefficient de résistance n_m doit en tenir compte. Un coefficient est aussi utilisé pour représenter la densité spatiale et le degré de croissance des macrophytes.

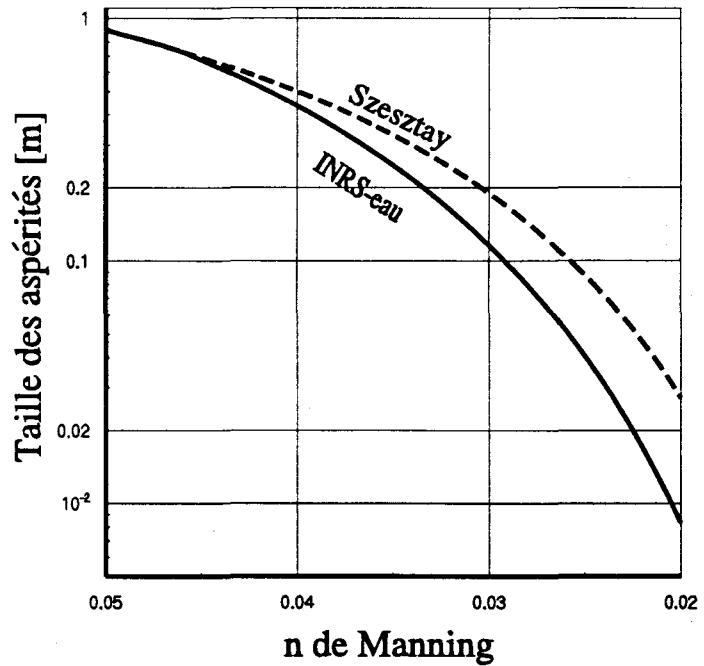


Figure 2.5
Relation entre le n_f de Manning et le diamètre caractéristique du substrat

La relation suivante exprime ces énoncés:

$$n_m = \sqrt{\sum_{i=1}^M n_{mi}^2} \quad [2.22]$$

avec:

$$n_{mi}^2 = c_i(t) d_i \times n_{mi \max}^2 \quad [2.23]$$

où,

$c_i(t)$: coefficient exprimant l'état de croissance de la classe i des macrophytes ou la présence d'un résidu (après la sénescence de ceux-ci);

$$0,0 \leq c_i(t) \leq 1,0$$

d_i : coefficient exprimant la densité spatiale de la classe de macrophyte i à son apogée (pleine croissance);

$$0,0 \leq d_i \leq 1,0$$

M : le nombre d'espèces dominantes présentes;



$n_{mi \max}$: le n de Manning de la classe de macrophyte i au maximum de croissance ($c_i = 1,0$) et de densité ($d_i = 1,0$).

Les coefficients utilisés en pratique pour cette étude sont présentés au tableau 4.2.

2.5.3 Viscosité turbulente (ν_T) et longueur de mélange (l_m)

Isotrope et variable dans l'espace, la viscosité turbulente cinématique nécessite pour son calcul le choix d'une longueur caractéristique l_m . Appliquant cette approche, Ouellet et coll. (1986) proposent d'utiliser $l_m = \lambda H$ comme longueur de mélange. λ est une constante numérique de l'ordre du rapport de la taille du maillage sur la plus petite profondeur d'eau de l'élément. La valeur finale de ce coefficient est obtenue par optimisation numérique du modèle, le procédé consistant en pratique à trouver le plus petit rapport possible permettant la convergence du système.

C'est une approche similaire qui a été retenue pour cette étude. Deux distinctions sont cependant introduites. La première consiste à utiliser un coefficient λ constant pour l'ensemble du domaine pour rendre l'évaluation du coefficient plus indépendante de la taille du maillage. La deuxième distinction permet toutefois de borner la valeur du coefficient de viscosité entre des valeurs minimales et maximales. Le but est d'assurer la stabilité du modèle dans les régions de basse viscosité turbulente et de préserver la représentation des forts gradients de vitesse dans les régions plus profondes.

$$v_{T \min} \leq v_T \leq v_{T \max} \quad [2.24]$$

Pour le calcul des diffusivités (Section 2.6.3 : Diffusivités), ces bornes ne sont pas retenues, et la valeur de la viscosité turbulente obtenue à l'aide de l'équation 2.32 est appliquée.

2.5.4 Coefficient de traînée du vent: τ_w

La sollicitation du vent est parfois importante pour comprendre l'équilibre hydrodynamique d'un plan d'eau. Cette contrainte tangentielle est calculée par la formule classique suivante:

$$\tau_w^i = C_w \rho_a |\overline{W}_{10}^i| W_{10}^i \quad i = 1,2 \quad [2.25]$$

où,

C_w : le coefficient de traînée;



-
- $|\vec{W}_{10}|$: le module du vecteur-vent à 10 mètres au-dessus de l'eau;
- W_{10}^i : la composante selon i du vent;
- ρ_a : la masse spécifique de l'air;
- τ_w^i : la contrainte du vent.

La rugosité du plan d'eau varie avec la force du vent; c'est pourquoi le coefficient de traînée C_w varie en fonction de ce facteur. Shanahan et Harleman (1982) ont réalisé une revue bibliographique sur cet aspect. Ils ont consulté les auteurs suivants: Wu (1969), Wilson (1960), Ottesen-Hansen (1975), Banks (1975), Ruggles (1970), Hsu (1975) et Van Dorn (1953). La figure 2.6 représente graphiquement les résultats de leurs travaux alors que le tableau 2.1 expose les relations algébriques qu'ils ont proposées. De ces relations, nous avons retenu, pour la présente étude, celle de Wu (1969) qui semble le mieux représenter l'ensemble.

2.6 Post-traitement des résultats

2.6.1 Besoins des applications

Pour la présente étude, divers besoins spécifiques requièrent des traitements particuliers des résultats du modèle:

- *la délimitation moyenne des masses d'eau de diverses provenances dans le but de procéder à l'analyse globale de la contamination du milieu;*
- *l'élaboration d'un indice (coefficient) de diffusivité dans le but de simuler la dispersion d'effluents industriels dans le milieu récepteur;*

Ces diverses préoccupations reçoivent un éclairage particulier par les post-traitements expliqués dans les sections suivantes.

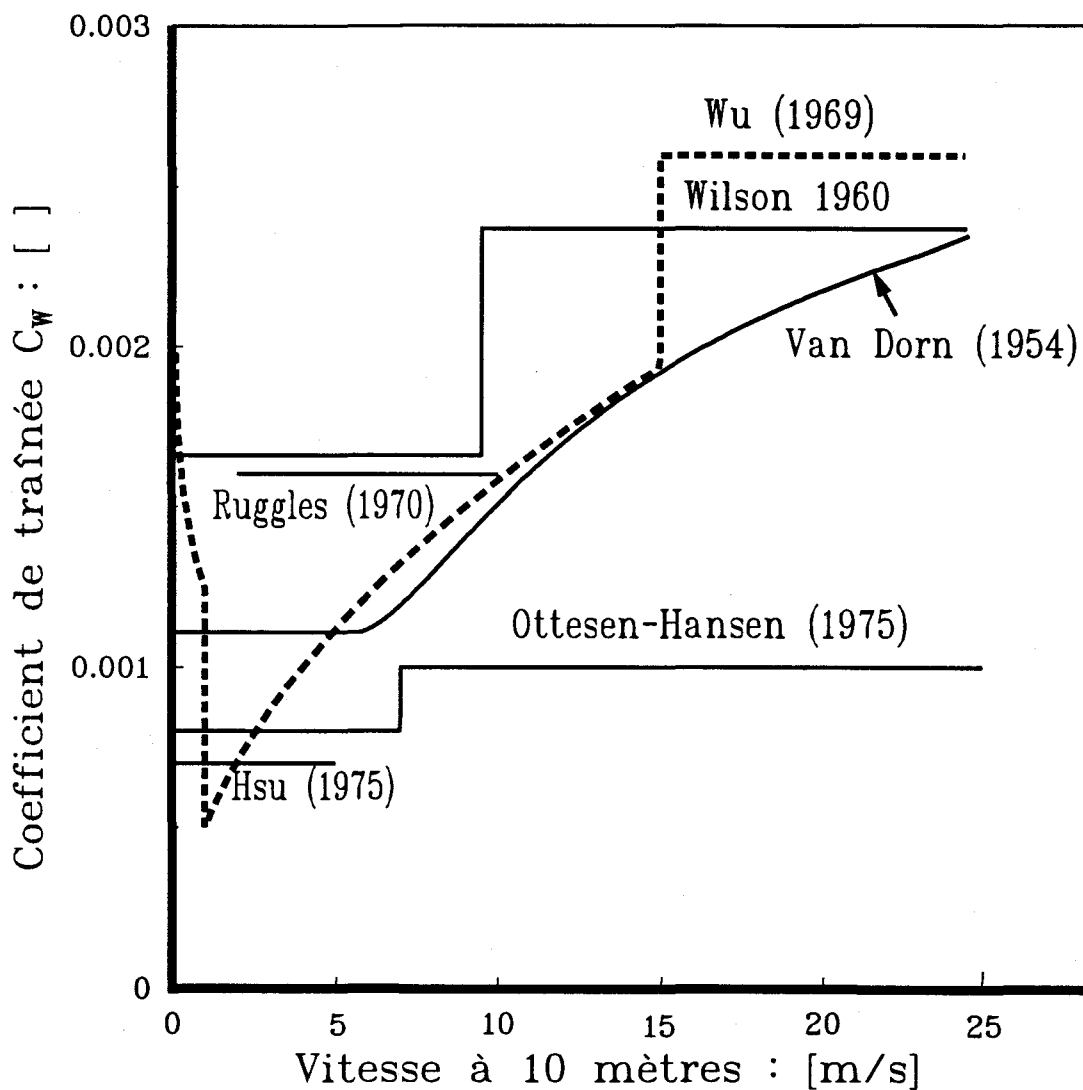


Figure 2.6 Modèles d'estimation du coefficient de traînée du vent
(tiré de Shanahan et Harleman, 1982)



Tableau 2.1 Modèles d'estimation du coefficient de traînée du vent
(tiré de Shanahan et Harleman, 1982)

Auteurs	Formules proposées	Intervalles d'application
Wu (1969)	$1,25 \times 10^{-3} W_{10}^{-\frac{1}{5}}$	$W_{10} < 1 \text{ m/s}$
	$0,5 \times 10^{-3} W_{10}^{\frac{1}{2}}$	$1 < W_{10} < 15 \text{ m/s}$
	$2,6 \times 10^{-3}$	$15 < W_{10} \text{ m/s}$
Wilson (1960)	$1,66 \times 10^{-3}$	Vents légers
	$2,37 \times 10^{-3}$	Vents forts
Ottesen-Hansen (1975)	$0,8 \times 10^{-3}$	$W_{10} < 7 \text{ m/s}$
	$1,0 \times 10^{-3}$	$W_{10} > 7 \text{ m/s}$
Banks (1975)	$9,0 \times 10^{-3} W_{10}^{-\frac{1}{2}}$	Vents faibles
	$3,8 \times 10^{-3}$	Vents moyens
	$0,7 \times 10^{-4} W_{10}$	Vents forts
Ruggles (1970)	$1,6 \times 10^{-3}$	$2 \text{ m/s} < W_{10} < 10 \text{ m/s}$
Hsu (1975)	$0,7 \times 10^{-3}$	$W_{10} < 5 \text{ m/s}$
Van Dorn (1953)	$1,11 \times 10^{-3}$	$W_{10} \leq 5,6 \text{ m/s}$
	$1,11 \times 10^{-3} + 2,06 \times 10^{-3} \left(1 - \frac{5,6}{W_{10}}\right)^2$	$W_{10} > 5,6 \text{ m/s}$



2.6.2 Fonction-courant

La fonction-courant (streamline-function en anglais) permet de cartographier le débit qui transite à travers un milieu. Il en résulte ce que nous appelons des "couloirs de débit". Entre les limites de chacun de ces couloirs, il n'y aurait aucun transfert de masse d'eau si les processus de dispersion étaient nuls, ce qui n'est bien sûr qu'une perception théorique mais commode du milieu.

La valeur de la fonction-courant donne, pour tout point du domaine d'écoulement, le débit cumulé depuis le littoral, habituellement la rive droite du cours d'eau. La méthode générale pour calculer la fonction-courant tient compte du débit spécifique local qui est fonction de la vitesse moyenne du courant et de la profondeur:

$$q(x, y) = V(x, y) H(x, y) \quad [2.26]$$

où:

$q(x,y)$: le débit spécifique local (i.e, en x,y).

Normalement, la fonction-courant est appliquée pour des écoulements en régime permanent car la variation temporelle du niveau de l'eau n'est pas prise en compte dans son calcul. La relation suivante exprime la valeur locale de la fonction-courant dans le milieu continu:

$$Q(x, y) = \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} q(x, y) dA \quad [2.27]$$

Les conditions aux limites (en x_0, y_0) sont spécifiées sur une rive, généralement la droite (*RD*). Habituellement, une valeur nulle est imposée au point le plus en aval possible de cette frontière. La fonction-courant n'est pas nécessairement nulle sur toute la frontière car l'apport des tributaires contribue à en augmenter la valeur à mesure qu'on progresse vers l'amont. En passant d'un côté à l'autre d'un tributaire, la fonction-courant s'accroît du débit de celui-ci.

La fonction-courant s'évalue dans le milieu discret (modèle discrétisé) par une boucle cumulative sur les côtés des éléments et la valeur obtenue est affectée aux noeuds du modèle. Il s'agit donc d'une variable nodale de nature scalaire.

$$Q_n(x, y) = \sum_{c=1}^{NC} \int_c H u_N ds \quad [2.28]$$

où:



c :	côté d'un élément;
H :	la profondeur d'eau;
NC :	le nombre de côtés cumulés pour donner la valeur locale;
$Q_n(x,y)$:	le noeud indicé n dans le modèle;
s :	une coordonnée rectiligne dans le repère des côtés de l'élément;
u_N :	vitesse normale au côté de l'élément considéré.

La fonction-courant est tout d'abord calculée sous la forme d'incrément de débit (valeurs relatives) aux frontières de tous les éléments. Comme la masse n'est pas parfaitement conservée au niveau de l'élément dans la formulation choisie (Saint-Venant), un lissage des résultats de la fonction-courant est nécessaire. Le débit est par contre conservé par groupe d'éléments, et globalement à l'intérieur du domaine. En effet, lorsqu'il y a une perte sur un élément, les éléments adjacents présentent normalement un gain pour compenser. Le résidu obtenu en faisant le bilan des débits locaux sur les segments d'un élément est redistribué proportionnellement au débit passant sur chaque segment afin d'obtenir un bilan nul sur l'élément. Le débit sur un segment appartenant à deux éléments à la fois est obtenu en faisant la moyenne des débits sur le segment provenant du bilan fait sur ces deux éléments. Le processus est itératif et peut être répété jusqu'à ce qu'une norme sur le bilan du débit obtenu sur chaque élément soit respecté.

Une fois le lissage effectué, la fonction-courant est calculée à l'aide d'une boucle sur tous les éléments du modèle. Le débit est cumulé sur chaque segment où la valeur de la fonction-courant est connue sur le premier noeud du segment. Il faut au départ qu'au moins un noeud au sein d'un domaine ait sa valeur de fonction-courant imposée. La boucle est effectuée sur les éléments autant de fois que nécessaire, pour que chaque noeud se soit vu attribuer une valeur.

Pour favoriser l'obtention d'un chemin critique dans le calcul de la fonction-courant, une renu-mérotation des éléments en partant de la rive où sont imposées les conditions aux limites de la fonction-courant est souhaitable.

2.6.3 Diffusivités

La diffusivité du milieu fluvial est sa capacité de diluer un soluté dans sa propre masse liquide. Presque totalement conditionnée par la turbulence et les mouvements différentiels de l'eau, il s'agit d'une propriété de l'écoulement plutôt que du fluide lui-même. Une bonne simulation hydrody-



namique doit donc permettre d'estimer cette propriété du milieu. Un traitement élaboré de cette question a été effectué dans le rapport No 2¹ de cette série. Seuls les résultats essentiels de cette démonstration seront repris ici.

Deux aspects particuliers retiendront notre attention:

- *la diffusivité provoquée localement par les résistances de type Manning;*
- *la diffusivité induite par les cisaillements latéraux lesquels sont associés aux gradients horizontaux du champ de vitesse.*

Estimation de la diffusivité de type Manning : D_{fm} Le mélange associé à la turbulence de fond a fait l'objet de nombreuses recherches empiriques (problème de la couche limite). Ayant souvent comme objets des écoulements quasi-uniformes en canal, ces travaux ont permis d'identifier la relation suivante entre un coefficient de diffusivité isotrope de fond D_f et le cisaillement au bas de la couche limite turbulente de tels milieux (formule de Taylor). Un tableau complet de ces travaux empiriques a été présenté dans Fischer (1979) et rapporté dans le rapport No 2 de cette série (tableau 2.2). Essentiellement, il a été établi que:

Formule de Taylor

$$D_f = KHu_*$$

$$= KH \sqrt{\frac{\tau_f}{\rho}} \quad [2.29]$$

où:

K : une constante empirique dont la valeur est comprise entre 0,135 et 0,17.

u_* : une vitesse dite "de cisaillement".

Par analogie avec ce résultat majeur, il a été décidé d'inclure les processus de résistance macrophytiques dans le calcul de cette forme de diffusivité. Le "n de Manning" utilisé est donc le coefficient composite représenté par la relation 2.19.

¹Rapport No 2: *Développement et validation analytique d'un modèle lagrangien de simulation de panaches d'effluent.*



La diffusivité totale de type Manning (D_{fm}) peut être évaluée directement à la sortie des résultats du modèle hydrodynamique et le coefficient est fourni sous la forme de valeurs nodales tout comme les résultats du modèle. Conformément à 2.17, elle s'exprime ainsi:

$$D_{fm}(x, y) = K \sqrt{g} H(x, y)^{5/6} n(x, y) |V(x, y)| \quad [2.30]$$

Diffusivité transversale: D_N Dans les cours d'eau naturels, la dispersion transversale associée aux contraintes de cisaillement latérales est globalement proportionnelle à la vitesse de cisaillement et domine nettement la diffusivité de fond. De plus, des variations assez considérables se manifestent dues à l'ampleur des gradients de vitesse produits par les singularités et la morphologie transversale du lit. Cet aspect a également été traité en détails dans le rapport No 2.

Dans les cours d'eau légèrement méandrés et de section normale, la valeur du coefficient D (incluant cependant la diffusivité de fond) varie ainsi selon Fischer et coll. (1980):

$$D = (0,6 \pm 50\%) H u_* \quad [2.31]$$

Cette relation a été obtenue et confirmée par de nombreuses recherches empiriques comme le montre le tableau 2.3 du rapport No 2. Le coefficient multiplicateur peut prendre des valeurs nettement plus considérables, jusqu'à 3,4 et même plus.

Les singularités plus importantes comme les jets, les confluences de cours d'eau, les structures de génie ou les méandres accentués produisent en effet des circulations secondaires fortement génératrices de turbulence et une manière pratique d'en tenir compte est d'introduire dans le calcul du coefficient de dispersion les éléments de base de la déformation angulaire (gradients de vitesse) des masses d'eau de même que les longueurs caractéristiques des processus. La notion de longueur de mélange (Rodi, 1981) permet justement de construire un bon indicateur des processus de mélange. Cet indicateur est calculé à l'aide de la relation 2.8.

Le traitement de la dispersion associée aux instabilités dans le plan horizontal a donc été effectué à partir de ce concept. L'estimation des gradients de vitesse est effectuée à partir des résultats du modèle hydrodynamique, et en mettant à profit la dérivabilité des fonctions d'interpolation de la méthode des éléments finis.

Le coefficient de diffusivité transversale D_N peut être obtenu par la relation suivante:



$$D_N = \beta v_T = \beta l_m^2 \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad [2.32]$$

β : une constante d'ajustement.

Comme la diffusivité transversale présentée ici ne comprend pas celle produite distinctement par le fond, le coefficient D_N doit être calibré pour reproduire de manière générale le registre de valeurs suivant:

$$\begin{aligned} [(0,6 - 50\%) - 0,15] &\leq \left(\frac{D_N}{Hu_*}\right) \leq [(0,6 + 50\%) - 0,15] \quad \text{ou} \\ 0,15 &\leq \left(\frac{D_N}{Hu_*}\right) \leq 0,75 \end{aligned} \quad [2.33]$$

La borne maximale peut être dépassée en se souvenant que le registre a été établi pour des écoulements légèrement à moyennement méandrés. Localement, le rapport pourra donc prendre des valeurs nettement plus considérables, en particulier, au confluent de cours d'eau ou de bras de delta, ou encore près de singularités comme des quais ou ports. Comme le modèle hydrodynamique ne permet pas de reproduire fidèlement les écoulements secondaires à une échelle inférieure à la taille du maillage, on doit s'attendre à ce que le coefficient de dispersion obtenu devienne moins précis dans les zones à forts gradients et discrétisées de manière approximative.

Diffusivité totale: D Finalement, la diffusivité produite par la turbulence de fond et celle des macrophytes seront combinées à celle produite par la turbulence horizontale, les deux étant considérées ici comme isotropes, pour donner la diffusivité totale du milieu.

$$D = D_{fm} + D_N \quad [2.34]$$

Anisotropie, diffusivité longitudinale: D_L Si la diffusivité du milieu était isotrope, la valeur de D serait la même quelle que soit la direction considérée. Cependant, l'expérience montre que la dispersion longitudinale est supérieure à la dispersion transversale (Fisher et coll., 1979). Un certain degré d'anisotropie doit donc être introduit dans le coefficient de dispersion. En pratique, cet ajustement est effectué en introduisant un coefficient longitudinal proportionnel au coefficient transversal. Fisher et coll. (1979) proposent d'utiliser une valeur de D_L se situant autour de 6 fois



Hu_* , ce qui est environ 10 fois la valeur combinée de D . Cependant, il est important de noter que la dispersion longitudinale tient souvent compte (dans les modèles unidimensionnels surtout) des carences du champ de vitesse, ce qui explique les grandes valeurs proposées. Dans les modèles bidimensionnels, les écarts horizontaux du champ de vitesse sont décrits, jusqu'à un certain point, puisqu'ils font partie de la formulation. En pratique, l'anisotropie sera donc nettement plus faible que la valeur proposée précédemment et sera obtenue par calibration.

2.7 Infographie - Atlas des courants

Certaines informations nécessaires au fonctionnement du modèle *HYDREAU* ainsi que les principaux résultats des simulations hydrodynamiques sont présentés dans l'*Atlas des courants* (rapport #1, volume 1, tome 2). Le domaine étudié est constitué de deux zones qui se distinguent par leurs caractéristiques et par l'échelle des phénomènes: la région du delta de Sorel et la zone fluvio-lacustre du lac Saint-Pierre. Pour une meilleure visualisation, chacune de ces zones a fait l'objet d'une cartographie à une échelle appropriée pour chaque information se retrouvant dans l'*Atlas*. Les cartes des variables nécessitant une interpolation ont été produites en utilisant un module d'interpolation linéaire, du système *SPANST*TM, spécialement développé par *Intera TYDAC* conformément à nos instructions. Ce module utilise le maillage ayant servi aux simulations hydrodynamiques.

Les informations présentées dans l'*Atlas des courants* sont le maillage (section 4.2.1), la bathymétrie (section 4.2.2), le substrat (section 4.2.3), les macrophytes (section 4.2.4), la profondeur d'eau (section 5.3.1), le module de la vitesse du courant (section 5.3.3) et la fonction-courant (section 5.3.4).

Le maillage est l'information de base de tout modèle d'éléments finis. Il est important, rappelons-le, d'avoir à sa disposition une carte de la grille de calcul pour supporter l'interprétation. La bathymétrie est une cote géodésique du fond donnée dans le repère RIGL telle qu'introduite dans le modèle de terrain. Le substrat est le résultat de la numérisation de la carte des substrats produite par la firme Argus Groupe-Conseil Inc. (ARGUS, 1990). Les macrophytes se divisent en trois classes définies à partir des échosondages et trois cartes ont été produites, une par classe.

La profondeur d'eau est la différence entre la cote du fond et celle de la surface pour un événement donné. C'est donc l'épaisseur de la colonne d'eau.



La fonction-courant est un résultat important puisqu'elle permet de délimiter les masses d'eau. Elle a été tracée pour chaque événement simulé en mettant en évidence l'espace occupé par chaque tributaire. Les cartes tracées à partir du module de la vitesse, pour différents débits, permettent d'apprécier l'amplitude des courants et de localiser les régions où ces courants varient le plus.

Seul un sous-ensemble des événements simulés a été retenu pour être présenté dans l'*Atlas*. En effet, dans plusieurs cas, les images obtenues sont fortement redondantes et leur pouvoir évocatif diminue considérablement. Cependant, tous les fichiers de résultats ont été transformés dans le format *Quadtree* supporté par *SPANS*; ils peuvent ainsi être consultés par les utilisateurs de ce système d'information géographique (*SIG*). De plus, un échantillon des images de l'*Atlas* a été inclus dans ce rapport (Annexe I) pour rendre sa consultation indépendante jusqu'à un certain point du volume 2. Les explications relatives aux événements de référence décrits dans cet *Atlas* et aux résultats transformés en *Quadtree* sont présentées à la section 5.2 (Événements simulés).

Il est important de noter que tous les fichiers des résultats hydrodynamiques peuvent également être visualisés graphiquement à l'écran à l'aide du sous-menu *Visualisation* du logiciel *PANACHE*. Pour ce faire, le lecteur consultera le rapport No 2 et le Manuel de l'utilisateur du logiciel.

La plupart des images de l'annexe I de ce volume ont été produites avec *PANACHE*, capturées à l'écran par un utilitaire et sauvées dans des fichiers *.BMP. Les images capturées ont été éditées avec les logiciels *Paintbrush*TM et *Coreldraw*TM sous l'environnement *Windows*TM et imprimées avec une *Paintjet* de Hewlett-Packard.



3 DONNÉES UTILISÉES

3.1 Bathymétrie

La bathymétrie du tronçon étudié est conforme aux "minutes hydrographiques" produites par le Service Hydrographique du Canada (SHC: Pêches et Océans Canada, Institut Maurice Lamontagne). Au-delà de 300 000 données de sondage documentent la zone à l'étude. Des divers ensembles de données utilisées pour la modélisation, celui sur la bathymétrie est sans doute le plus fiable.

Il est à noter que l'utilisation des cartes de navigation produites par le même service n'est pas recommandable pour les fins présentes. En effet, ces cartes sont produites pour les navigateurs comme leur nom l'indique. Pour les établir, ce sont surtout les informations susceptibles d'affecter la sécurité des navires qui sont retenues. L'image obtenue est donc sommaire mais suffisante au niveau local pour prévenir les accidents.

Une carte spécialisée pour les besoins spécifiques de la modélisation a été établie suite à une collaboration entre l'INRS-Eau et le SHC. En effet, les données de base (sondes réduites) du SHC n'étant pas utilisables dans leur forme originale en raison de leur abondance et du format dans lequel elles apparaissent, il devenait nécessaire de produire une carte adaptée à nos besoins. La méthode employée par l'INRS-Eau pour construire un modèle géométrique est basée sur une interprétation visuelle de la variabilité bathymétrique (section 4.2: Modèle de terrain). Elle requiert donc des cartes définissant les isocontours de profondeur, tous rapportés au même référentiel de niveau. Pour réaliser ces cartes, la procédure utilisée est la suivante:

- un sous-ensemble de données de sondages équivalant à environ 1/10 de l'ensemble initial, soit 30 000 points, a été retenu pour représenter la variabilité bathymétrique du milieu; le critère de sélection était basé sur la plus basse valeur dans le rayon immédiat, celui-ci étant choisi pour produire une quantité limitée mais suffisante de données;
- les valeurs extrêmes du registre des données ont été établies et un mode de classification a été élaboré pour cartographier les sondages avec des couleurs distinctes pour chaque classe; le critère de classification était l'efficacité de la représentation; les milieux peu profonds faisaient l'objet de classes plus étroites que le chenal de navigation;



- huit cartes du tronçon à l'échelle 1/20 000 dans le lac Saint-Pierre et à 1/10 000 dans la région fluviale du delta de Sorel ont été produites; celles-ci indiquent les valeurs locales des sondages en mètres sous le référentiel local du zéro navigable avec une couleur particulière associée à chaque classe.

Les cartes ainsi produites n'ont pas été présentées dans ce rapport en raison des coûts de reproduction. Elles peuvent cependant être consultées sur demande. Les données discrétisées ont été traitées par SPANS™ pour produire des fichiers *Quadtree*. Ces cartes ont servi à la construction du modèle géométrique (section 4.2.2: Bathymétrie discrétisée).

3.2 Substrat

La nature des sédiments de fond, on l'a vu, est considéré comme un facteur important dans le choix des coefficients de Manning. Par conséquent, une caractérisation de la granulométrie des sédiments de fond est essentielle à l'élaboration du modèle de terrain (section 4.2.3: Substrat discrétisé).

A cette fin, les services de la firme ARGUS Groupe-Conseil Inc. (ARGUS, 1990) ont été retenus par l'INRS-Eau pour réaliser une synthèse cartographique des sédiments de fond du tronçon fluvial compris entre la ville de Tracy et l'embouchure du lac Saint-Pierre à l'exclusion des bras secondaires du delta de Sorel.

3.2.1 Méthodologie

Dans un premier temps, le travail consistait à réaliser une recherche bibliographique qui a permis de dresser une première ébauche de la distribution des textures sédimentaires présentes dans le tronçon étudié. Dans un deuxième temps, une campagne de terrain a servi à la validation des données historiques et à la caractérisation de certaines zones présentant une carence en information sédimentologique, en particulier, dans le tronçon fluvial compris entre Tracy et le lac Saint-Pierre.

Parmi la trentaine de documents consultés, seulement quatre rapports ont été jugés pertinents et retenus par ARGUS (1990) pour la synthèse cartographique. Ces quatre rapports sont ceux de Hardy et coll. (1989), Sérodes (1978) et Simard (1971). Pour être jugés pertinents, les documents doivent satisfaire deux conditions:

- les données granulométriques brutes doivent être accessibles;
- les stations d'échantillonnage doivent être localisables géographiquement.



Les activités de terrain ont été réalisées entre le 7 et le 12 novembre 1990 à partir d'une embarcation de type Zodiac et au moyen d'une benne modifiée de type Ponar. De cette façon, ARGUS (1990) a procédé à une évaluation qualitative de la granulométrie sur 56 échantillons prélevés le long de 10 transects orientés perpendiculairement à la rive.

Ainsi au total, les données provenant de 360 stations d'échantillonnage ont servi à la préparation de la synthèse cartographique illustrant la texture des sédiments de fond du secteur fluvial du delta et du lac Saint-Pierre. Cette carte a été préparée à l'échelle de 1:36 000 et a été, ensuite, numérisée sur SPANS™ et convertie dans un format *Quadtree*.

3.2.2 Résultats

Les planches No 8 et No 9 (Annexe I) illustrent les données résultant des travaux d'ARGUS (1990) telles qu'introduites dans le modèle de terrain. Les quatre groupes texturaux formant le lit du tronçon sont:

- Groupe à texture très grossière (TG): pierres, cailloux et gravier;
- Groupe à texture grossière (G): sables et sables loameux, loams sableux et loams sableux fins;
- Groupe à texture moyenne (M): loam, loam limoneux et limon, loam sablo-argileux, loam argileux et loam limono-argileux;
- Groupe à texture fine (F): argile sableuse, argile et argile limoneuse, argile lourde.

Les classes de diamètre des particules utilisées sont présentées au tableau 3.1

Tableau 3.1 . Diamètres caractéristiques des classes de particules (ARGUS, 1990)

Classe	Diamètre caractéristique
Argile	< 0.002 mm
Limon	0.002 à 0.05 mm
Sable	0.05 à 2 mm
Gravier	2 mm à 10 cm
Caillou	10 cm à 50 cm
Pierre	> 50 cm



Le qualificatif "loameux" utilisé par ARGUS (1990) indique une accumulation de particules dont la fraction fine contient moins de 35% d'argile et 15% ou plus, en poids, de sable fin (de 0.25 à 0.1 mm) ou de particules plus grossières. Par ailleurs, le qualificatif "limoneux" décrit une accumulation de particules dont la fraction fine contient moins de 15% de sable fin ou de particules plus grossières, et moins de 35% d'argile, les particules de plus de 2 mm occupant moins de 38% du volume.

Le patron de distribution des faciès sédimentaires peut sembler inusité par rapport au régime hydrodynamique généralement considéré pour ce secteur du fleuve Saint-Laurent. La présence d'un sédiment fin dans le chenal maritime, où les courants sont généralement forts, ne représente aucunement un secteur d'accumulation. Au contraire, ce faciès peut s'expliquer par l'érosion de sédiments anciens, mettant à jour une argile compacte probablement datant de la mer de Champlain.

3.2.3 Discussion

Dans une approche numérique, seule la texture des sédiments de fond, lorsque traduite en coefficients de frottement (ou de Manning), a un impact sur les résultats de la calibration du modèle prédictif de courants. L'origine et l'âge des unités sédimentaires n'ont pas d'influence directe sur l'écoulement simulé par le modèle, quoique ces informations peuvent être utiles dans le processus de validation "sédimentologique" du modèle hydrodynamique.

Toutefois, la dynamique saisonnière des sédiments de fond pourrait jouer un certain rôle dans une simulation du régime hydrodynamique si l'évolution temporelle du substrat était connue. Mais la carte des textures sédimentaires du tronçon présente uniquement une compilation d'observations effectuées à différentes dates sur une période d'une vingtaine d'années, et ne représente nullement les conditions sédimentologiques à un temps donné d'une saison. Il n'est donc pas possible d'incorporer le dynamisme du phénomène sédimentologique dans le processus d'ajustement des paramètres du modèle hydrodynamique dans l'état actuel des connaissances.

3.3 Macrophytes

La présence de grands herbiers submergés a une influence importante sur le régime hydrodynamique du tronçon retenu, principalement dans les zones peu profondes du lac Saint-Pierre où la végétation aquatique est abondante. Dans l'implantation du modèle hydrodynamique, des observations *in situ*



sur la distribution spatiale des herbiers, sur la forme de croissance des espèces dominantes dans un peuplement et sur la densité de la couverture végétale constituent des données de base qui permettent de prendre en considération l'effet des macrophytes sur l'écoulement.

En raison de l'importance de ce facteur dans cette étude et de l'aspect innovateur de la méthodologie de caractérisation, il importe d'élaborer un peu plus sur cet aspect des données. De plus, l'influence que peuvent exercer les macrophytes sur les courants dans la colonne d'eau sera discutée qualitativement à l'aide de résultats de mesures courantométriques.

3.3.1 Méthodologie

Au lac Saint-Pierre, la reconnaissance des macrophytes immergés a été effectuée entre le 25 août et le 6 septembre 1990 alors que le cycle végétatif était à son apogée (Fortin et coll., 1991). L'étude a été réalisée au moyen d'un échosondeur de marque Raytheon et de type DE-719 émettant à une fréquence de 208 kHz avec une directivité de 8°.

Les relevés d'échosondage ont été effectués le long d'un réseau de transects distants de 1 km dans la direction nord ou sud et couvrant une superficie totale de 205 km². En raison de la durée de l'impulsion ultrasonore (0.2 ms) émise par ce type d'échosondeur et du tirant d'eau de l'embarcation, les sondages acoustiques couvrent les herbiers aquatiques situés à des profondeurs supérieures à environ 80 cm où la hauteur des plantes dépasse 30 cm. Un appareil de radio-localisation de marque Motorola et de type Mini-Ranger MRS-III, et un ordinateur de navigation NavBox ont servi au positionnement et au pilotage du bateau le long des transects d'échosondage.

La cueillette directe de macrophytes par des plongeurs en scaphandre autonome (SCUBA) et leur identification par une spécialiste (Saint-Cyr et Campbell, 1990) ont permis de caler l'interprétation des échos réfléchis par la végétation sur une trentaine de prélèvements effectués dans la zone aquatique. L'étude du caractère de ces échos, ou "l'image bioacoustique" produite par les différentes associations végétales, permet d'approcher la structure d'une communauté de macrophytes vivant en zone aquatique. Par ailleurs, il faut se rappeler que le terme "image bioacoustique" fait référence uniquement au caractère des échos réfléchis et que les sondages acoustiques à eux seuls ne permettent pas d'identifier directement les espèces de macrophytes. C'est pourquoi nous avons introduit l'expression "faciès phytoacoustique" pour désigner les données produites par les images.



3.3.2 Analyse des échogrammes

L'analyse de la signature acoustique des échos visibles sur les échogrammes a permis de subdiviser les macrophytes en trois classes principales. Ces classes permettent de tirer des conclusions immédiates sur la forme de croissance des espèces dominantes dans un peuplement et, par la suite, de cartographier les aires de distribution des principales unités végétales ainsi définies. Les trois classes de macrophytes ont été définies comme suit:

- Classe 1: l'image bioacoustique des espèces de cette classe (Figure 3.1) est caractérisée par une succession d'échos discontinus, généralement très rapprochés les uns des autres, qui se produisent près de la surface du lac (Figure 3.1a).
- Classe 2: l'image bioacoustique des espèces de cette classe (Figure 3.2a) est caractérisée par une succession d'échos très discontinus qui se produisent entre le fond du lac et la bande d'émission, sans toutefois atteindre la surface. Les échos sont distribués en plages plus ou moins serrées suggérant des variations dans la densité de la couverture végétale.
- Classe 3: l'image bioacoustique des espèces de cette classe (Figure 3.3) est caractérisée par la persistance latérale des échos qui forment un réflecteur quasi rectiligne à moins de 50 cm au-dessus du fond du lac.

Les associations végétales du lac Saint-Pierre comprennent souvent deux classes (Figure 3.1c) et parfois même trois classes de forme de croissance (Figure 3.4b), témoignant ainsi de la présence de plusieurs espèces de macrophytes dans un groupement.

Un indice de densité de peuplement a été introduit dans un deuxième niveau d'analyse des signatures bioacoustiques afin de préciser davantage l'espace de la colonne d'eau qui est occupé par les macrophytes. L'indice de densité est établi selon une échelle semi-quantitative, de 0 à 4, qui est inspirée de celle proposée par Dushenko et coll. (1988). L'indice fournit une estimation de la densité de la couverture végétale selon les critères d'interprétation donnés au tableau 3.2.

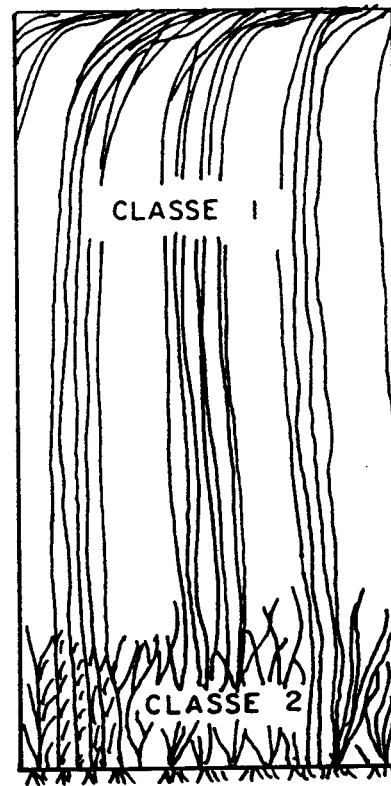
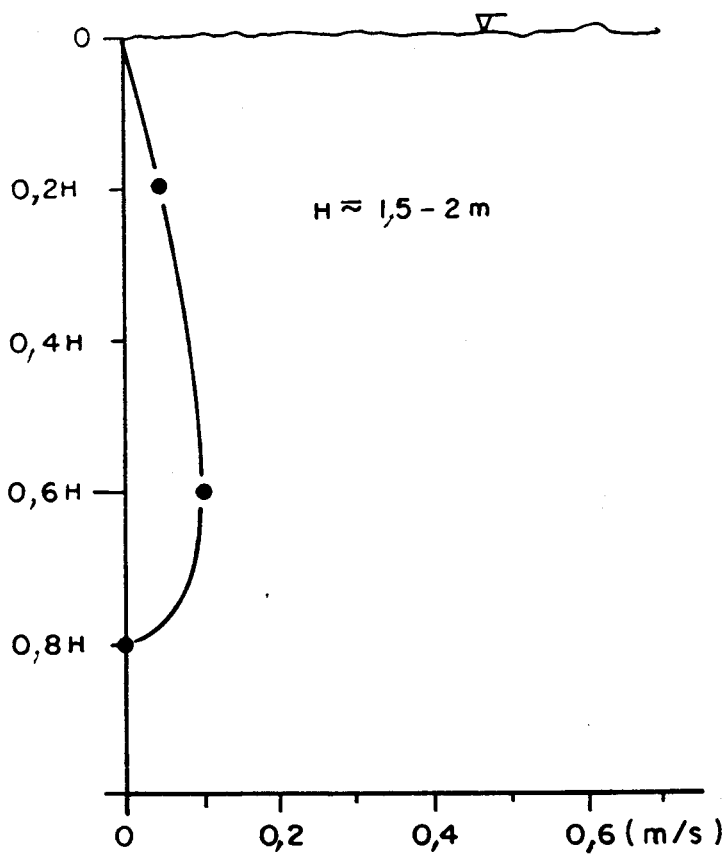
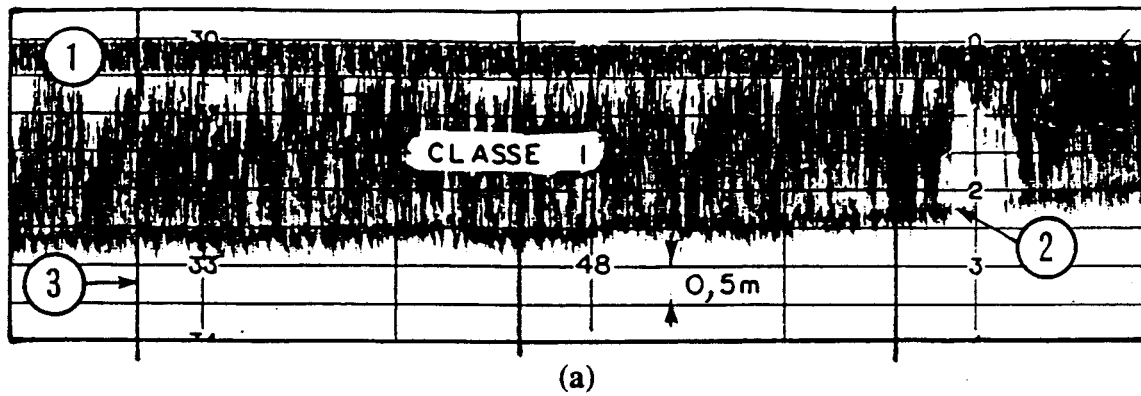
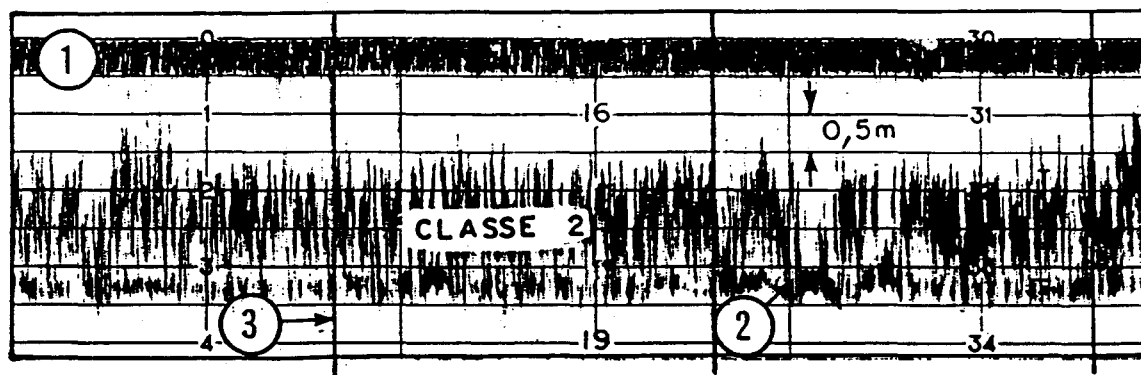
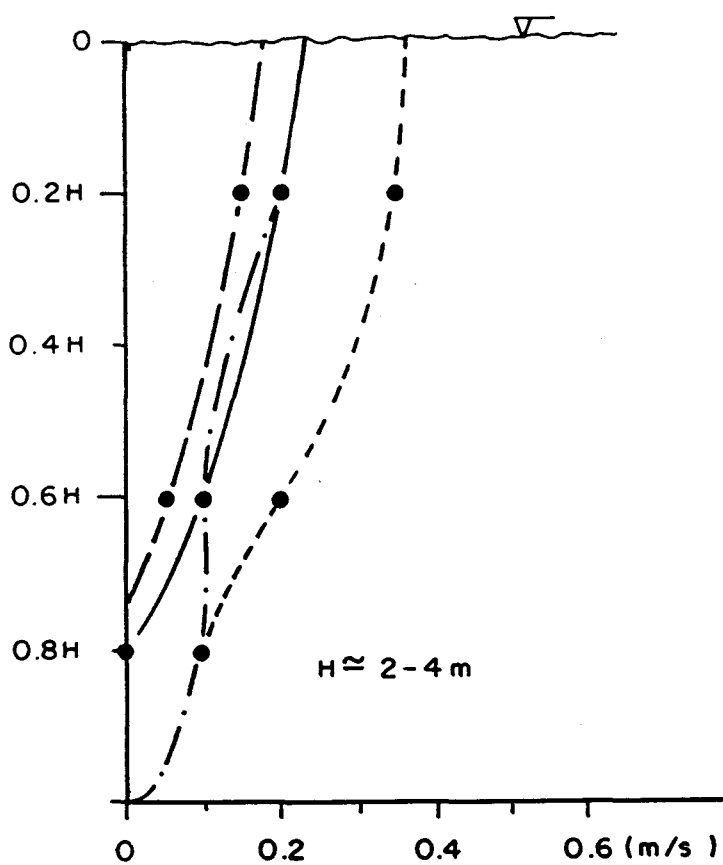


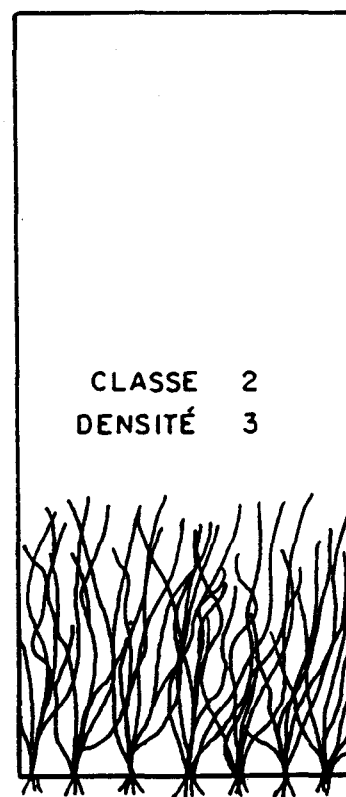
Figure 3.1 Image bioacoustique (a), courantométrique (b) et structure végétale (c) des herbiers de classe 1, densité 4^+



(a)



(b)



(c)

Figure 3.2 Image bioacoustique (a), courantométrique (b) et structure végétale (c) des herbiers de classe 2, densité 3

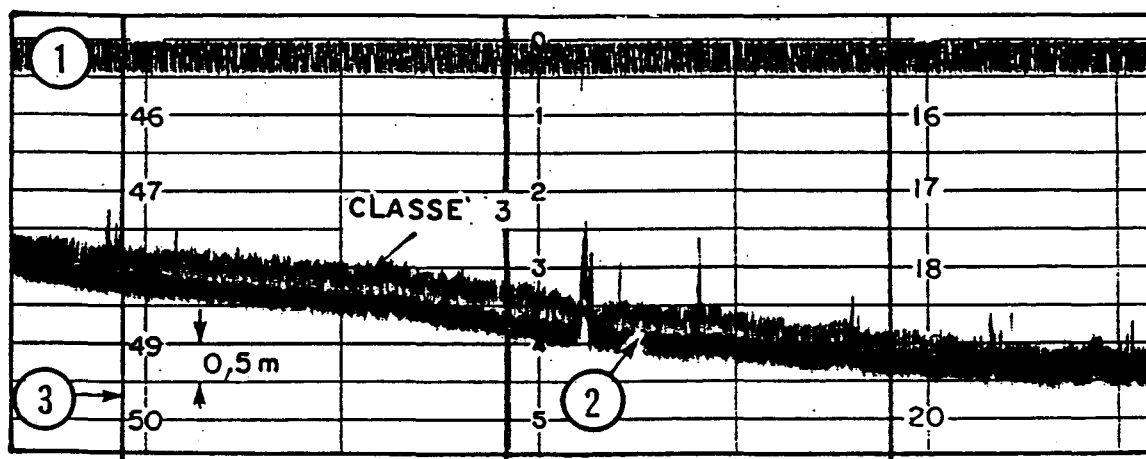


Figure 3.3 Image bioacoustique des herbiers de classe 3 formant un tapis au fond du lac

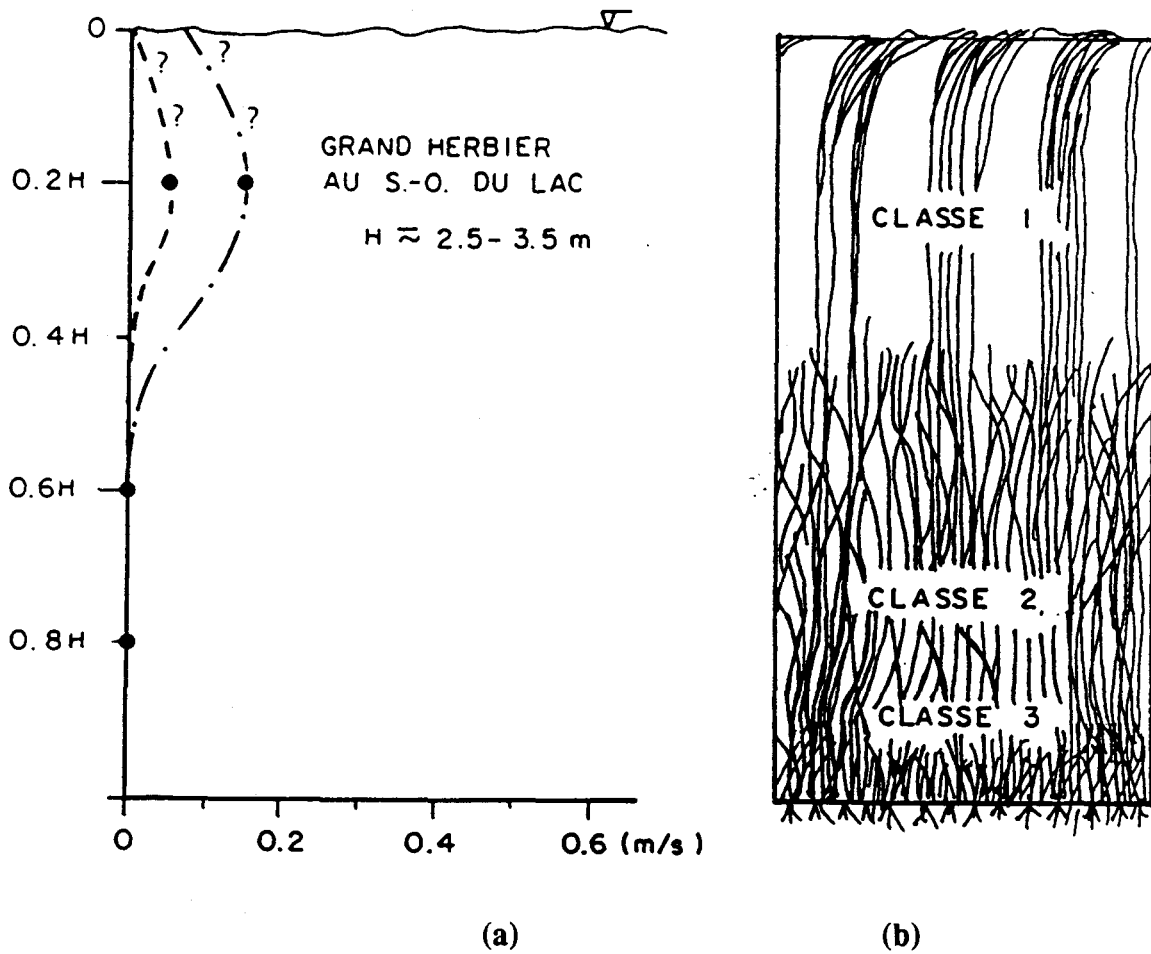


Figure 3.4 Image courantométrique (a) et structure végétale (b) d'un peuplement mixte



Tableau 3.2 Classification de la densité de la végétation mise en relation avec les échogrammes (d'après Fortin et coll., 1991)

• Densité 0	Absence apparente d'espèces végétales sur les échogrammes
• Densité 1	Végétation peu abondante formant des îlots irréguliers
• Densité 2	Végétation modérée, la flore apparaît en touffes de densité régulière
• Densité 3	Végétation très abondante, grands herbiers de forte densité n'atteignant pas la surface du lac
• Densité 4	Végétation très dense, de grands herbiers atteignant la surface de l'eau et présentant des difficultés pour la navigation de plaisance. Les relevés acoustiques permettent de subdiviser cet indice en des degrés 4+ et 4- correspondant à une couverture végétale continue ou discontinue respectivement

3.3.3 Principales espèces de macrophytes au lac Saint-Pierre

L'échantillonnage de la végétation effectuée en plongée sous-marine a permis d'identifier trois espèces prédominantes peuplant la zone aquatique qui a fait l'objet des sondages acoustiques (Saint-Cyr et Campbell, 1990). La *Vallisneria americana* (*Vallisnérie*) dont la tige est enfouie dans le substrat produit beaucoup de feuilles rubanées poussant sous la surface de l'eau. Le feuillage semble offrir une prise différente à l'action mécanique des courants selon la densité de la couverture végétale (Figures 3.2 et 3.4). Des bourgeons qui terminent les rhizomes souterrains semblent persister tout l'hiver servant de nourriture aux canards. La *Vallisnérie* est la plante dominante du lac Saint-Pierre. L'échantillonnage de la végétation a permis d'associer l'image bioacoustique des espèces de Classe 2 (Figure 3.2) à la *Vallisnérie*.

Les colonies de *Potamogeton richardsonii* (*Potamogeton*) forment en abondance la deuxième espèce végétale au lac Saint-Pierre. A l'apogée du cycle végétatif, le *Potamogeton* est une plante enracinée avec une grande tige portant un feuillage très dense qui flotte à la surface de l'eau. Cette structure végétale semble offrir une résistance importante aux courants près de la surface (Figures 3.1b et 3.4a). Ce recouvrement végétal donne également la fausse impression de la présence d'une flore abondante sur toute la colonne d'eau.



En période de croissance, cependant, le *Potamogeton* possède une tige submergée qui est très feuillée et très ramifiée à base fortement embrassante; cette structure offre sans doute une emprise importante sur l'écoulement. Notons également qu'après la dégénérescence du *Potamogeton*, de courtes boutures dressées persistent pendant tout l'hiver. Les échantillons de végétaux prélevés en plongée dans les zones caractérisées par une image bioacoustique de Classe 1 contenaient principalement du *Potamogeton*.

La troisième espèce en importance de la zone aquatique est représentée par une algue qui forme de grands tapis dont l'épaisseur peut atteindre environ 50 cm. Cette espèce a été identifiée comme étant *Nitella*, une algue formée d'une tige molle qui colonise de grandes zones sous forme de longs filaments entremêlés. Nous avons observé que ces colonies sont rarement pures et qu'elles constituent souvent une unité à l'intérieur d'autres unités telles *V. Americana* et *P. Richardsonii*. La cueillette des plantes, faite en plongée sous-marine, a permis de constater que l'image bioacoustique associée aux espèces de Classe 3 a été produite par un tapis de *Nitella* qui occupe les espaces libres entre les zones peuplées par les espèces de Classes 1 et 2.

3.3.4 Aires de distribution des classes de macrophytes

Les images bioacoustiques ont permis d'établir la distribution des trois principales classes de plantes qui ont été identifiées dans la zone aquatique du lac Saint-Pierre (Section 3.3.2). La planche #1 (Annexe I) illustre les zones colonisées avec une densité 4+ et 4- qui sont dominées par les espèces de Classe 1, celle-ci étant associée principalement au *Potamogeton Richardsonii*. Cette unité végétale peuple une superficie d'environ 53 km² et forme de grands herbiers apparaissant surtout en bordure du lac. A ces endroits, les colonies se révèlent "acoustiquement" monospécifiques, mais cette structure est différente pour les zones légèrement plus profondes où cette unité forme la flore compagne, l'espèce principale étant de Classe 2 (Vallisnérie).

Les observations directes faites en plongée sous-marine témoignent de la présence d'une flore compagne dans certaines zones qui, sur les échogrammes, apparaissent peuplées uniquement par des espèces de Classe 1. Ceci peut s'expliquer par l'abondance des feuilles de *Potamogeton* près de la surface qui causent une multitude d'échos masquant l'information sous-jacente, ou encore qui bloquent la transmission du signal ultrasonore vers le fond du lac.



La planche No 2 (Annexe I) illustre les densités de couverture végétale 1, 2 et 3 qui sont dominées par les espèces de Classe 2, associées principalement à *Vallisneria Americana* (*Vallisnérie*). Le levé d'échosondage indique que de très grandes zones du lac sont colonisées par cette unité de sous-étage, soit une superficie de 113 km². Par ailleurs, la densité de peuplement semble diminuer vers l'aval à cause de la carence graduelle en éléments nutritifs dans cette direction.

La planche No 3 (Annexe I) illustre la distribution des tapis d'algues formés par les espèces de Classe 3, associées principalement à *Nitella*, qui occupent une superficie d'environ 17 km². Cette unité est relativement peu abondante et, d'une manière générale, constitue la flore compagne dans les parties profondes (3 à 4 m) de la zone aquatique en bordure du chenal maritime.

La planche No 3 illustre aussi les zones peu peuplées (touffes d'herbe) et non peuplées de la région étudiée. L'absence de végétation dans le chenal de navigation peut s'expliquer par la profondeur d'eau, la turbidité et la force des courants. En effet, les relevés d'échosondage ont mis en évidence une particularité du lac Saint-Pierre, soit deux chenaux secondaires identifiés d'une façon informelle par les termes de "Passage Sud" et de "Passage Nord". Aussi, nous avons observé que dans ces chenaux l'écoulement est rapide et les eaux sont assez turbides, ce qui laisse croire que l'enracinement de macrophytes est très difficile sous ces conditions. Ces données courantométriques seront introduites à la section 4.5 (Comparaison des résultats du modèle avec les mesures).

3.3.5 Aspects dynamiques

Le cycle de croissance et de sénescence des macrophytes est important pour la prise en considération de ce facteur dans la modélisation. La caractérisation par Fortin (1990) qui a été faite pendant la période de pleine croissance des plantes aquatiques, ne permet pas d'en définir la dynamique. Cependant, des communications personnelles avec Louise Saint-Cyr de l'INRS-Eau (qui a mené de nombreuses expériences empiriques sur le milieu à l'étude au cours de l'été 1990) ont permis de définir conceptuellement le cycle saisonnier de croissance de chacune des espèces présentes dans le lac Saint-Pierre et d'en déterminer grossièrement les principaux paramètres.

La représentation du cycle de croissance peut se faire en fonction de la biomasse spécifique présente en fonction du temps. Des données élaborées n'étant pas disponibles à cet égard, il fut décidé de définir une variable $c(t)$ variant potentiellement entre 0 et 1 et définissant le résidu unitaire de



biomasse vivante, en dormance ou morte dans le milieu à un moment t donné. Cette variable adimensionnelle servira ultérieurement à définir le paramètre de frottement du modèle hydrodynamique (Section 4.4.2: Coefficient de Manning des macrophytes (n_m))

Typiquement, le coefficient $c(t)$ est défini par une valeur-plancher en hiver, valeur qui persiste jusqu'à ce que la croissance des plantes soit entreprise avec la saison estivale. Un maximum de croissance est atteint au milieu de l'été, moment où le coefficient $c(t)$ atteint la valeur-plafond (1,0). Puis la sénescence commence à apparaître graduellement avec la réduction de la photopériode et le refroidissement de l'eau; le modèle revient alors graduellement à sa valeur plancher. Selon Saint-Cyr, le rythme de sénescence serait nettement plus rapide que celui de croissance. Les conditions climatiques régnant sur le lac peuvent influencer la rapidité de la sénescence.

La figure 3.5 montre le résultat de cette démarche pour le lac Saint-Pierre. La valeur-plancher, sur la figure, a été fixée un peu arbitrairement au niveau 0,1. Toutefois, il est à noter que le paramètre $c(t)$ n'a véritablement de pertinence qu'en fonction de la modélisation hydrodynamique du tronçon. La valeur utilisée peut également être influencée par la calibration du modèle hydrodynamique sur les mesures de terrain.

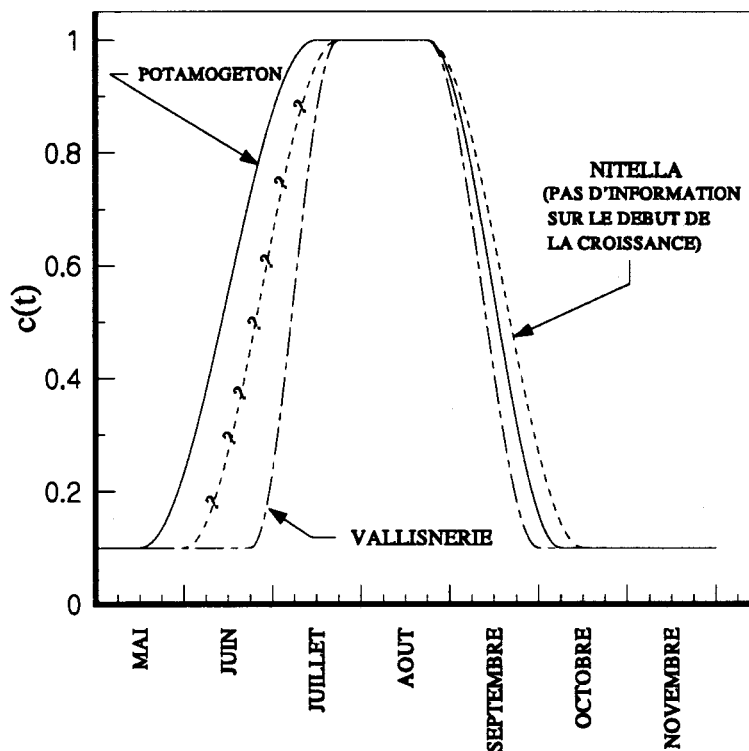


Figure 3.5
Dynamique unitaire du cycle végétatif des principales espèces de macrophytes du lac Saint-Pierre



3.4 Reversoirs du delta de Sorel

Pour favoriser la navigation fluviale (tirant d'eau des navires) à l'amont de Sorel, cinq reversoirs (seuils déversants) ont été construits en travers de certains bras du delta afin d'en réduire l'efficacité hydraulique. L'effet visé était de détourner les écoulements du delta vers le chenal principal du fleuve y provoquant ainsi un relèvement du niveau d'eau. La conséquence de ce détournement se fait sentir jusqu'au port de Montréal. La figure 3.6 montre l'emplacement de ces ouvrages ainsi que la numérotation utilisée pour l'étude.

3.4.1 Données disponibles

Les reversoirs sont des ouvrages qui ont subi beaucoup d'usure et de réfections depuis leur construction à la fin des années vingt. Les données recherchées se devaient donc d'être récentes et celles relatives aux reversoirs sont plutôt rares ou sont livrées dans une forme peu appropriée à la modélisation qui requiert surtout des relations niveau-débit. Parmi les documents consultés, citons *Évaluation des reversoirs de Sorel* de Saucet et coll. (1988) et *Perte d'élévation d'eau à Sorel due à l'usure des reversoirs* de Simard (1987). À défaut de relations niveau-débit mesurées, des relations théoriques ont été élaborées à l'aide des informations tirées de ces rapports.

3.4.2 Relations niveau-débit sur les reversoirs

Méthode La méthode utilisée pour établir les relations du niveau-débit sur les reversoirs est celle du *débit critique* (critical-depth meter) développée par Streeter (1981). Cette méthode (Équation 3.1) suppose que le canal est de section rectangulaire, de largeur constante avec un relèvement de son fond d'une largeur d'au moins $3 y_c$ (Figure 3.7) et une hauteur z pour obtenir la vitesse critique à cet endroit:

$$q = 0,517g^{1/2} \left(y_1 - z + \frac{0,55q^2}{g y_1^2} \right)^{3/2} \quad [3.1]$$

- q : débit unitaire ($m^3/s/m$);
- y_1 : profondeur de l'eau en amont du reversoir(m);
- y_c : profondeur critique (m);
- z : hauteur du reversoir (m).

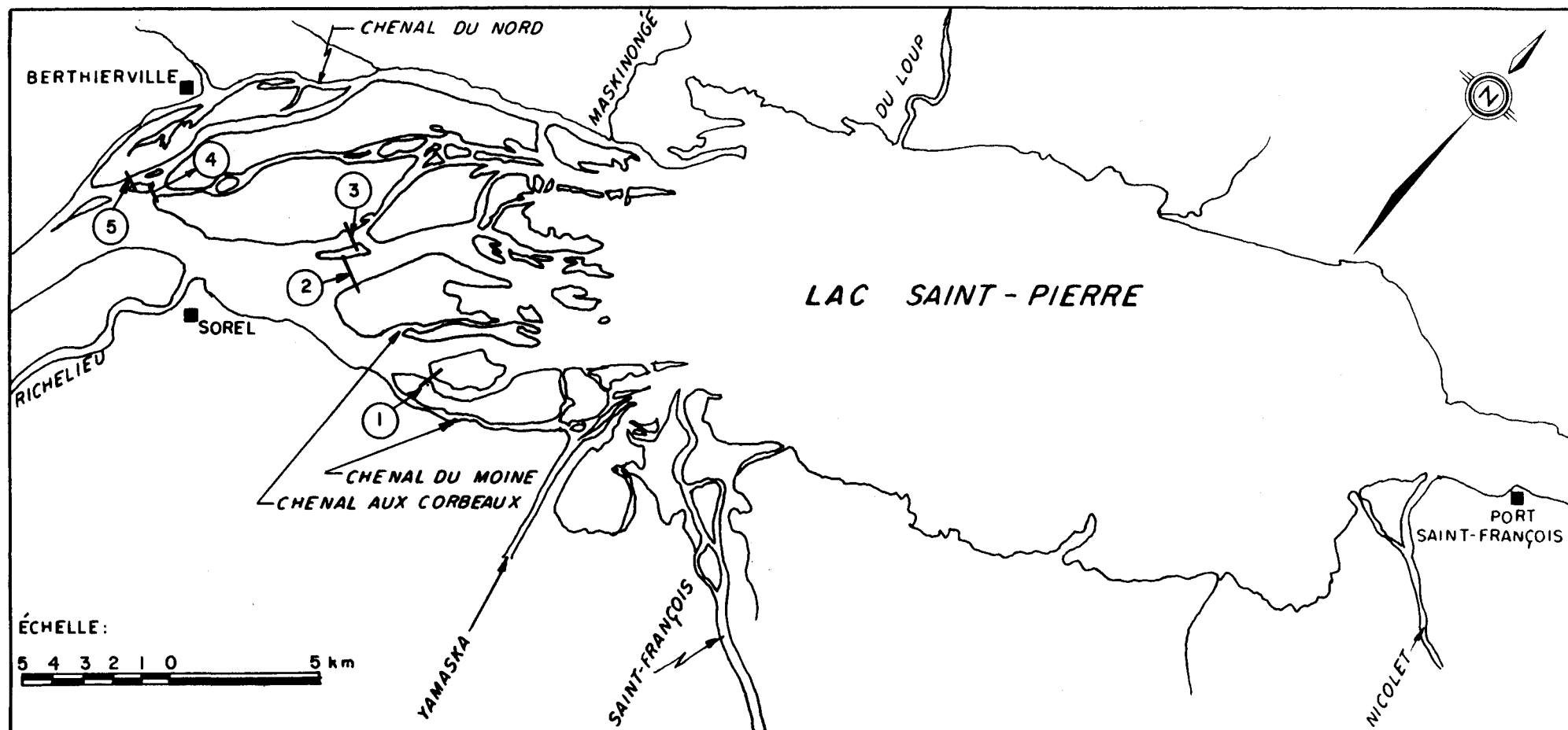


Figure 3.6 Localisation et numérotation des reervoirs du delta de Sorel



Le débit total est calculé en multipliant le débit unitaire par la largeur du reversoir. Bien que les chenaux où se trouvent les reversoirs ne sont pas des canaux très droits, leur forme s'en approche assez, et nous avons décidé d'utiliser la relation 3.1 à défaut de meilleures informations.

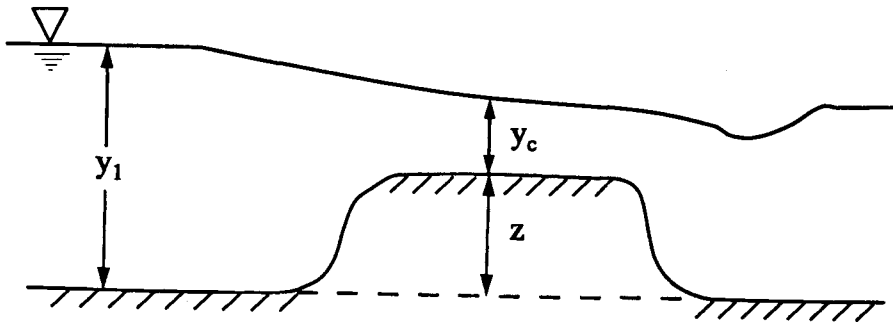


Figure 3.7 Conventions pour la formule du débit critique (d'après Streeter, 1981)

La valeur de la cote bathymétrique moyenne du sommet des reversoirs et celle de la largeur L , pour un débit moyen, sont tirées de Saucet et coll. (1989). La valeur de la cote bathymétrique du fond en amont des reversoirs est estimée d'après la carte produite par INRS-Eau en collaboration avec SHC. z est la différence entre ces deux cotes bathymétriques (Tableau 3.3). y_1 est obtenue en fonction du niveau d'eau imposé à l'amont du domaine lors d'une simulation en utilisant une pente moyenne du niveau d'eau entre Tracy et Sorel. La relation entre y_1 et q est de forme exponentielle et n'est pas valide lorsque la profondeur d'eau sur les reversoirs devient trop grande, et que l'écoulement n'est plus critique. Afin de compléter les relations niveau-débit sur les reversoirs pour les débits très élevés, nous avons décidé de limiter la pente dans les relations niveau-débit selon la largeur occupée par les reversoirs. La pente des relations niveau-débit des reversoirs a été établie à l'aide de l'équation 3.2, ce qui revient à répartir l'augmentation du débit au prorata de la largeur du réversoir considéré par rapport à l'ensemble des sections utiles.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial h} \leq 1.1 \frac{L_i}{L} \frac{\partial Q_i}{\partial h} \quad [3.2]$$



- h : niveau d'eau immédiatement à l'amont du reversoir;
 L_i : largeur occupée par le reversoir i ;
 L : largeur cumulée des reversoirs et des autres bras du fleuve y compris le chenal maritime;
 Q_i : débit sur le reversoir i ;
 $\partial Q_i / \partial h$: pente de la relation niveau-débit du fleuve de Simard (1987).

Tableau 3.3 Caractéristiques géométriques des reversoirs du delta de Sorel

REVERSOIR	Largeur	Cote moyenne du sommet (RIGL)	z
	[m]	[m]	[m]
Reversoir No 1	296	3,60	3,88
Reversoir No 2	880	3,80	6,08
Reversoir No 3	307	3,75	10,03
Reversoir No 4*	161	4,60	3,68
Brèche du No 4	31	2,48	1,56
Reversoir No 5*	188	4,20	3,48
Brèche du No 5	51	3,14	2,42
Bras du chenal maritime	1085	-	-
Chenal du Nord	115	-	-

* Les reversoirs No 4 et No 5 présentent des brèches étroites entre l'ouvrage et la rive.

Résultats Les relations niveau-débit ainsi trouvées pour les différents reversoirs sont présentées à la figure 3.8. Elles ont été tracées en fonction du niveau à Sorel, donnée de référence connue et documentée par le SHC, en utilisant l'hypothèse développée à la section 3.6.6 (Relations niveau-débit aux extrémités du modèle). De par sa largeur (880 m), le reversoir No 2 est de loin le plus important des ouvrages pour la débitance. Les reversoirs No 4 et No 5, malgré des cotes de sommet relativement élevées, maintiennent un débit même pour des faibles niveaux d'eau à Sorel à cause de la présence de brèches.

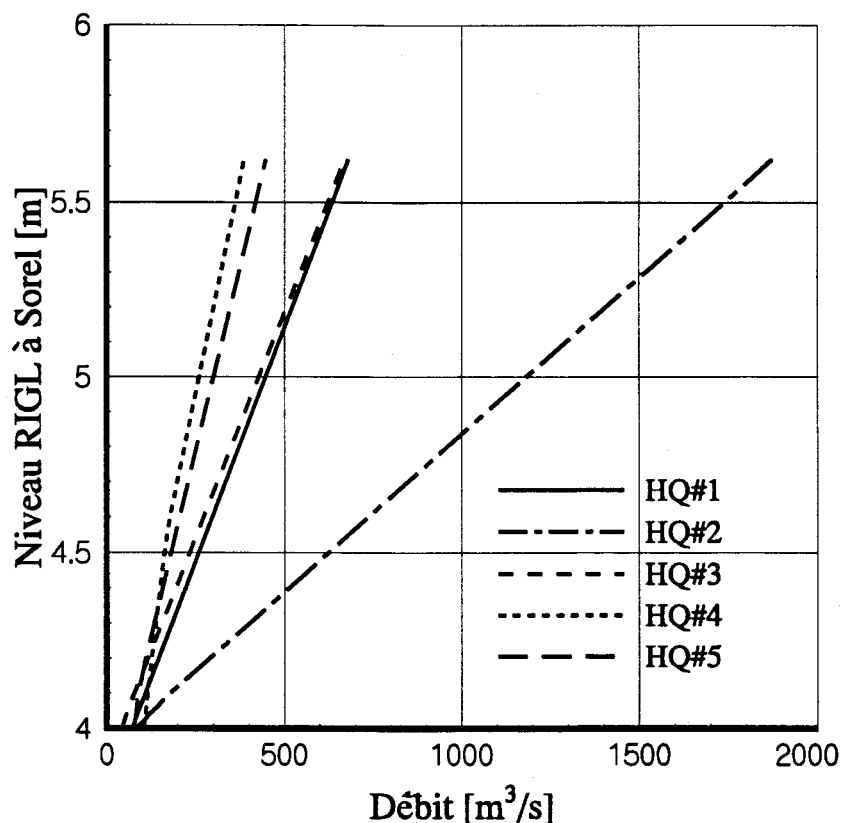


Figure 3.8 Relations niveau-débit estimées sur les différents revoirs du delta de Sorel
(HQ#i désigne la relation attribuable au reervoir No i)

Validation Lors de la campagne courantométrique d'automne de l'INRS-eau (Section 3.9: Courantométrie), quelques mesures ont été prises à l'amont des revoirs en des endroits assez caractéristiques des sections. En supposant que les vitesses mesurées soient représentatives des vitesses moyennes sur ces sections, une évaluation grossière des débits transitant par les revoirs a pu être faite. L'aire de la section est estimée à l'aide de la carte bathymétrique produite par l'INRS en collaboration avec le SHC. Les débits calculés à partir des relations niveau-débit et des mesures de vitesses sont présentés dans le tableau 3.4.



Tableau 3.4 Comparaison entre le débit estimé à partir de la campagne de novembre et le débit calculé à partir de la formule du débit critique (avec contrainte)

REVERSOIR	CAMPAGNE DE NOVEMBRE 1990		FORMULE	
	Vitesse	Section	Débit estimé	Débit calculé
	[m/s]	[m ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Reversoir No 1	0,450	825	371	420
Reversoir No 2	0,322	4 800	1 545	1 103
Reversoir No 3	0,200	2 105	421	400
Reversoir No 4*	0,500	433	217	245
Reversoir No 5*	0,600	549	329	283
Chenal du Nord	0,450	346	156	157

* Les reversoirs No 4 et No 5 présentent des brèches entre le barrage et la rive. Le débit calculé à partir de la formule en tient compte.

Recommandation Il est recommandable, à notre avis, de procéder dans le futur à l'établissement de relations niveau-débit rigoureuses pour les reversoirs. Une caractérisation permettrait d'obtenir des données plus justes sur l'hydraulicité du delta. Pour ce faire, il est nécessaire d'effectuer, surtout en période de crues, des jaugeages précis dans les diverses sections, en plus de procéder à un levé hydrographique au droit des reversoirs. La méthode utilisée pour développer les relations niveau-débit dans le cadre de ce projet est une alternative raisonnable permettant d'imposer des débits dans le modèle hydrodynamique. Il faut garder cet aspect à l'esprit lors de l'analyse des résultats dans les bras secondaires du delta de Sorel.

3.5 Chenal du Nord

Le débit transitant par le Chenal du Nord a été estimé à l'aide de la formule classique de Manning calibrée avec les données recueillies par la campagne de novembre et en supposant que le canal est droit. Le modèle donnait une dénivellation de la surface libre de 0,41 m entre l'entrée et la sortie du Chenal du Nord. La longueur du Chenal du Nord mesurée sur les cartes donne environ 21 750 m. Sa largeur et sa profondeur telles que mesurées lors de la campagne de novembre sont de



respectivement 108 m et 3,2 m. Si l'on suppose que le canal est droit, le coefficient de Manning doit être nécessairement égal à 0,02 si l'on veut retrouver la valeur de la vitesse telle que mesurée soit 0,45 m/s.

La relation niveau-débit, à l'entrée du Chenal du Nord, obtenue à partir de ces données est présentée dans la figure 3.9. Comme pour les revoirs, le niveau de référence est celui de Sorel. Encore ici, il est utile de recommander une caractérisation plus poussée de l'efficacité générale du Chenal du Nord afin d'en déterminer l'hydraulicité.

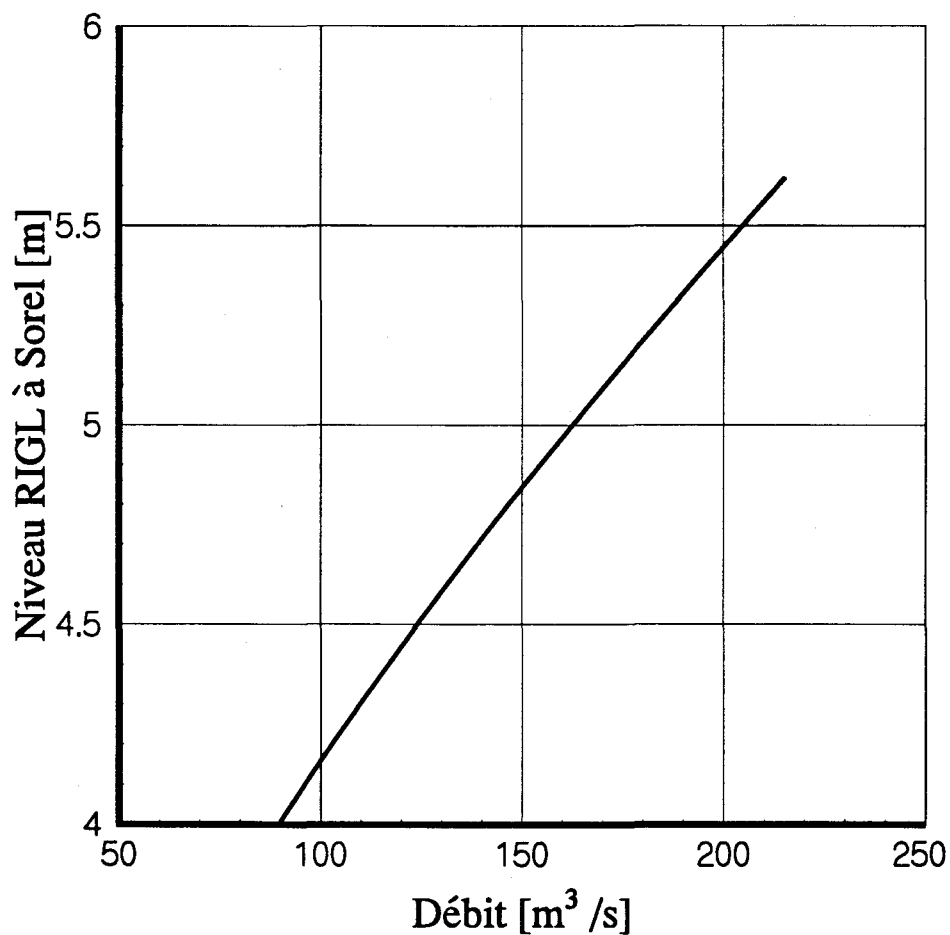


Figure 3.9 Relation niveau-débit estimée à l'entrée du Chenal du Nord



3.6 Données de niveaux d'eau

Après l'identification des sources de données relatives aux niveaux d'eau utilisées dans cette étude, une attention particulière sera portée ici sur la variation de l'élévation du plan d'eau en fonction de l'influence de certains facteurs tels le débit, la marée du fleuve, le vent et les macrophytes. Cette compréhension est nécessaire pour établir les relations niveaux-débits aux extrémités du modèle.

3.6.1 Source de données

Les données relatives aux niveaux d'eau utilisées pour définir les relations niveau-débit aux frontières du modèle, ou pour vérifier les résultats de celui-ci, ont été recueillies par différentes stations limnimétriques ou marégraphiques situées au sein, ou à proximité, du tronçon à l'étude. Ces stations, et les périodes d'observation disponibles, sont celles de Sorel (1965-1988), de Lac Saint-Pierre (1978-1988), de Port Saint-François (1968-1988) et de Trois-Rivières (1960-1987). Ces stations sont opérées par le service hydrographique du Canada (SHC) du Ministère des Pêches et Océans Canada. Les données recueillies par ces stations en 1990 ont également été utilisées pour valider le modèle. La fréquence des mesures pour 1990 est horaire (Figure 3.13) alors que les données utilisées des autres années étaient des moyennes journalières (Figure 3.14). Les niveaux d'eau présentés dans les figures sont établis par rapport au RIGL.

3.6.2 Influence du débit et ligne d'énergie

La figure 3.11 montre l'influence moyenne du débit du fleuve Saint-Laurent sur le niveau d'eau à Sorel telle que proposée par Simard (1987) et les observations effectuées en 1984 sur le débit du fleuve ainsi que le niveau moyen à Sorel et à Trois-Rivières. Selon la figure 3.10, la relation niveau-débit établie par Simard (1987) est bien fondée. Mais pour un débit donné, le niveau d'eau peut varier d'environ ± 20 cm par rapport au centre du nuage de points. Cette variation significative par rapport au niveau moyen peut être attribuable aux influences respectives de la marée semi-lunaire (section 3.6.3), du vent (section 3.6.4) et des macrophytes (section 3.6.5).

Pour établir les relations niveau-débit plus précises aux extrémités du modèle, la perte de charge moyenne entre la station de Sorel et celle de Port-Saint-François a été déterminée et sa stabilité a été examinée. Cette perte de charge se traduit par une dénivellation dans la ligne d'énergie du fleuve laquelle s'exprime principalement par une différence de niveau d'eau entre les deux points (Figure 3.11).



Pour les années 1981 à 1987, si on utilise une moyenne mobile de 14 jours pour exclure l'influence de la marée, la dénivellation, entre les deux stations, est voisine de 80 ± 10 cm de mi-juillet à mi-octobre (jours juliens 200 à 290) et de 65 ± 10 cm de mi-octobre à mi-décembre (jours juliens 290 à 350). Cette baisse est sans doute attribuable à l'absence de macrophytes car les débits enregistrés sont sensiblement dans le même registre que ceux observés durant la saison estivale. La dénivellation qui est associée aux débits très élevés du printemps est encore plus faible. Elle se situe aux environs de 0.55 ± 10 cm. Le rôle accru joué par les revoirs et associé aux forts débits de cette période pourrait expliquer ce phénomène. De mi-décembre à mi-mars, la dénivellation est plus grande. Elle est due à la présence de la glace. La section 3.6.6 traite des relations niveau-débit établies aux extrémités du modèle en tenant compte des divers facteurs d'influence.

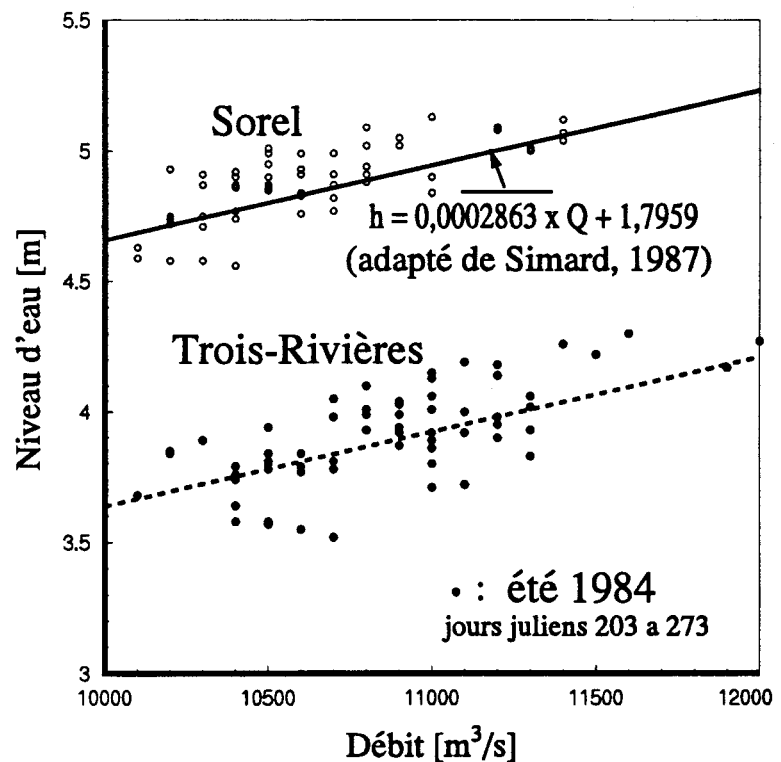


Figure 3.10
Observations simultanées du niveau d'eau (moyenne journalière 1984) et du débit à Sorel et à Trois-Rivières et relations niveau-débit adaptées de Simard (1987)

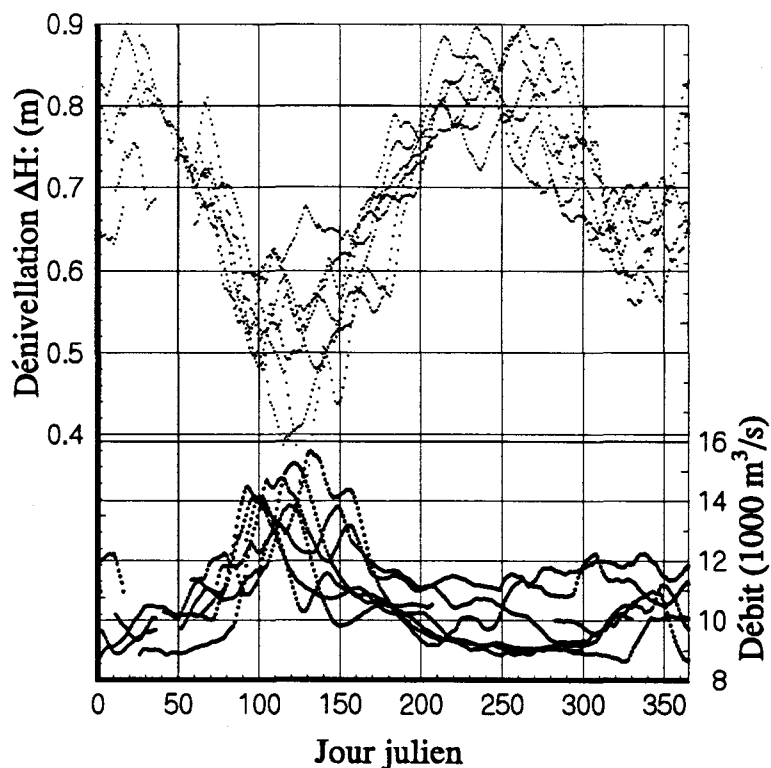


Figure 3.11
Dénivellation totale entre Sorel et Port-Saint-François pour les niveaux d'eau moyens (moyenne mobile de 14 jours) pour les années 1981 à 1987

3.6.3 Influence de la marée¹

Il est bien connu que la marée du fleuve Saint-Laurent est de type semi-diurne, c'est-à-dire que deux maximums et deux minimums peuvent être observés par période de 24h50, que la période de la marée baissante (jusant) et celle du montant (flot) sont égales jusqu'à Québec et que l'onde de marée commence à se déformer de plus en plus en amont de Québec en raison de l'effet dit "des eaux peu profondes" (composante quart-diurne) et du rétrécissement du chenal d'écoulement (Figure 3.12). Dans la région de Grondines, et encore plus à Trois-Rivières, la période de flot diminue considérablement pour atteindre typiquement 1 à 3 heures tandis que la période de jusant s'allonge, en conséquence, pour constituer la période totale invariante de la marée semi-diurne, soit 12h25. Dans la région de Trois-Rivières, le rapport des périodes de flot et de jusant se situe autour de 1/10.

¹Pour de plus amples informations concernant les phénomènes de marée dans le fleuve Saint-Laurent ou dans les estuaires en général, consulter la bibliographie suivante: Forrester (1983); les tables de marée POC (1990, édition annuelle), Thomson (1984), ou encore, Leclerc et coll. (1990b).

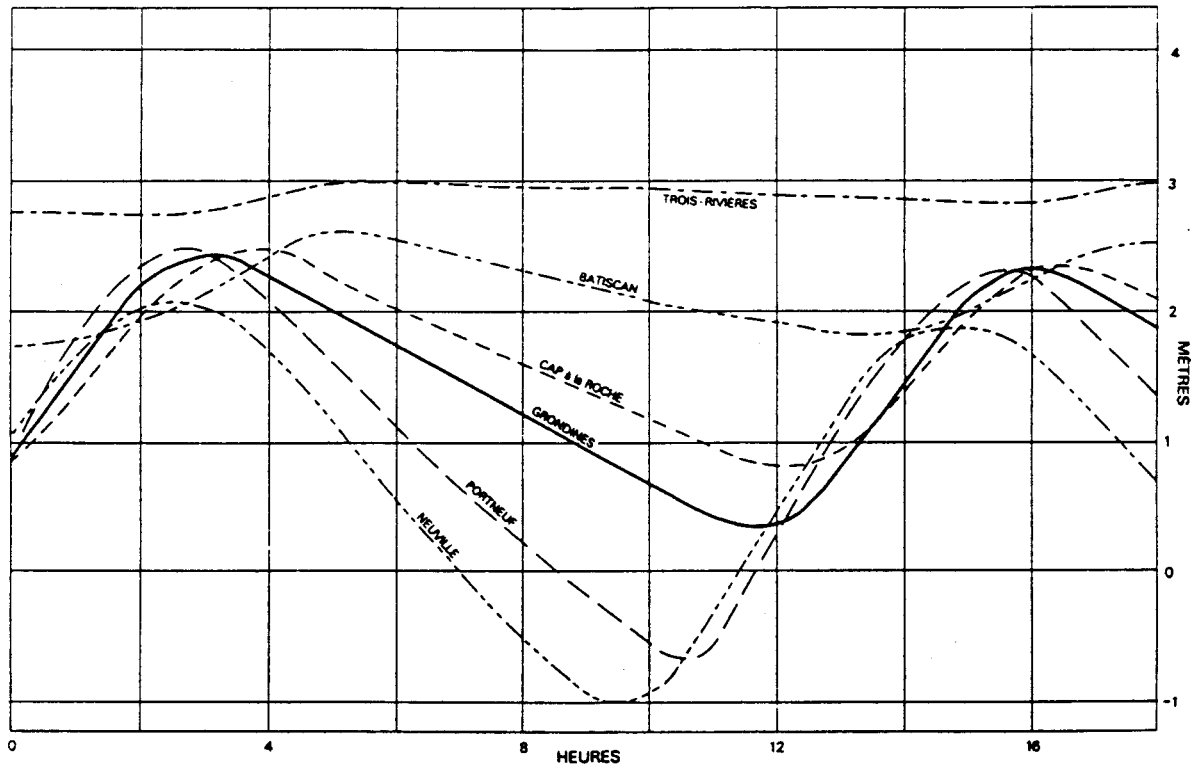


Figure 3.12 Évolution typique de la marée semi-diurne dans la région de Portneuf - Trois-Rivières due à l'effet des eaux peu profondes (tiré de Forrester, 1983)

Le marnage de la marée semi-diurne qui est considérable à Québec (3 à 5 m selon la phase lunaire), n'est plus que de 10 à 30 cm dans la région de Trois-Rivières. Ce résultat est aussi attribuable à l'effet des eaux peu profondes.

Dans la région du lac Saint-Pierre, c'est un signal de marée atténué et déformé considérablement qui parvient à l'exutoire du lac. Le graphique de la figure 3.13 est un tracé de niveaux d'eau horaires mesurés pendant la journée du 27 juillet 1990 aux quatre stations présentées précédemment. Le marnage de la marée semi-diurne à Trois-Rivières y était de 15 cm environ tandis qu'aux stations de Port-Saint-François, de Lac Saint-Pierre et de Sorel, les écarts de niveau d'eau n'étaient plus



que de 10, de 5 et de 3 cm respectivement. L'effet de la marée semi-diurne met environ six heures à parvenir à Sorel en partant de Trois-Rivières comme le montre le décalage temporel des maximums sur la figure 3.13.

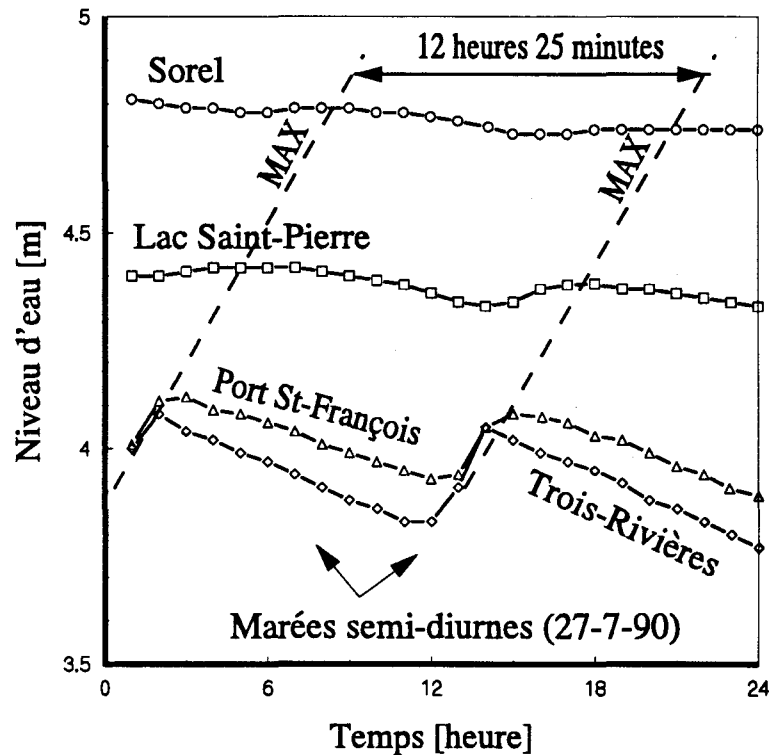


Figure 3.13
Niveau horaire de la marée semi-diurne à diverses stations limnimétriques dans la région à l'étude le 27 juillet 1990

Il est intéressant d'analyser le résidu de l'effet des marées sur les niveaux d'eau mesurés aux quatre stations sur une plus longue période. Ainsi, rappelons-le, durant le cycle de 28 jours de rotation de la lune autour de la terre, la lune vient en conjonction avec le soleil (nouvelle lune), en opposition avec le soleil (pleine lune) ou encore en quadrature avec le soleil (quadrature de lune, premier et dernier quartiers). C'est 2 à 4 jours après la pleine lune que sont observées les marées d'amplitude maximale (marées de syzigie ou marées de vives-eaux) suivies de celles de la nouvelle lune qui produisent également des marées semi-diurnes de plus grande amplitude que la moyenne. Les marées de mortes-eaux s'intercalent naturellement entre les événements de vives-eaux. La période de cette composante harmonique de la marée est donc de 14 jours et son effet se fait sentir à la fois sur le marnage semi-diurne et sur le niveau moyen du signal (niveau moyen de l'eau).



La figure 3.14 présente le tracé des niveaux d'eau moyens journaliers mesurés aux quatre stations de référence du SHC entre 22 juillet et 30 septembre 1984. Sur cette figure, les dates des jours de pleine lune et de nouvelle lune de la période ont également été mises en évidence. Il est facile de constater que, peu après les jours de pleine lune, le niveau d'eau moyen journalier atteint sa valeur maximale; de même, suite aux jours de nouvelle lune, le niveau d'eau maximal atteint également un maximum mais de moindre importance que celui correspondant aux jours suivant la pleine lune. Ces maximums, rappelons-le, sont directement reliés aux marées de vives-eaux du mois.

Le graphique de la figure 3.15 montre, à titre indicatif, les moyennes mobiles 14 jours consécutifs sur les niveaux pour la même période. Une diminution lente et systématique du niveau d'eau associée à la récession hydrologique du fleuve au cours de l'été y est constatée. En effet, le débit fluvial diminue d'environ 1000 m³/s, passant d'approximativement 11 000 m³/s à 10 000 m³/s au cours de cette période.

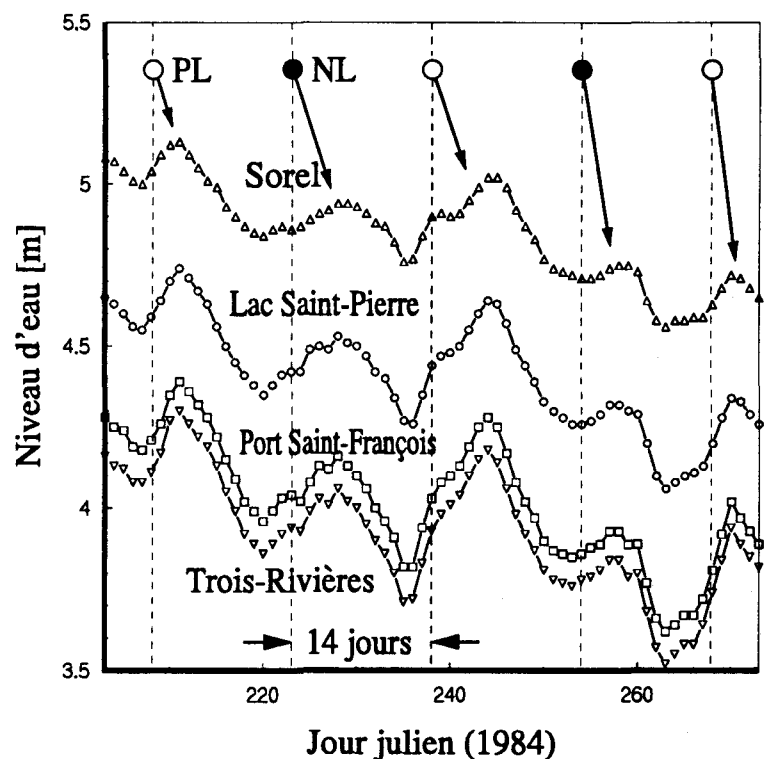


Figure 3.14
Niveau journalier moyen de l'eau à diverses stations limnimétriques dans la région à l'étude entre le 22 juillet et le 30 septembre 1984 (PL : pleine lune ; NL : nouvelle lune)

Les marnages maximaux de la marée semi-diurne mesurés aux quatre stations varient typiquement de 35 à 20 cm de Trois-Rivières à Sorel. Ces valeurs ne sont cependant présentées qu'à titre indicatif car aucune étude systématique n'a été réalisée sur une plus longue période. Ces



modulations semi-diurnes (12h25) et semi-lunaires (14 jours) ont été étudiées en vue d'en jauger l'effet potentiel sur les courants dans le tronçon à l'étude. C'est au travers des variations de débit du fleuve que l'effet sur les courants a été apprécié.

En appliquant sommairement une méthode de type "prisme de marée" qui consiste à évaluer le volume d'eau stockée en amont d'un lieu dû à un rehaussement du niveau d'eau différentiel pendant une période donnée (ex: la moitié de la période 12h25 ou 14 jours) puis, à évacuer ce volume durant l'autre moitié, il est apparu que la modulation du débit du fleuve qui en résulterait serait typiquement de 100-500 m³/s selon le cycle étudié. Cette valeur tend naturellement à être plus faible en allant vers la limite amont du modèle.

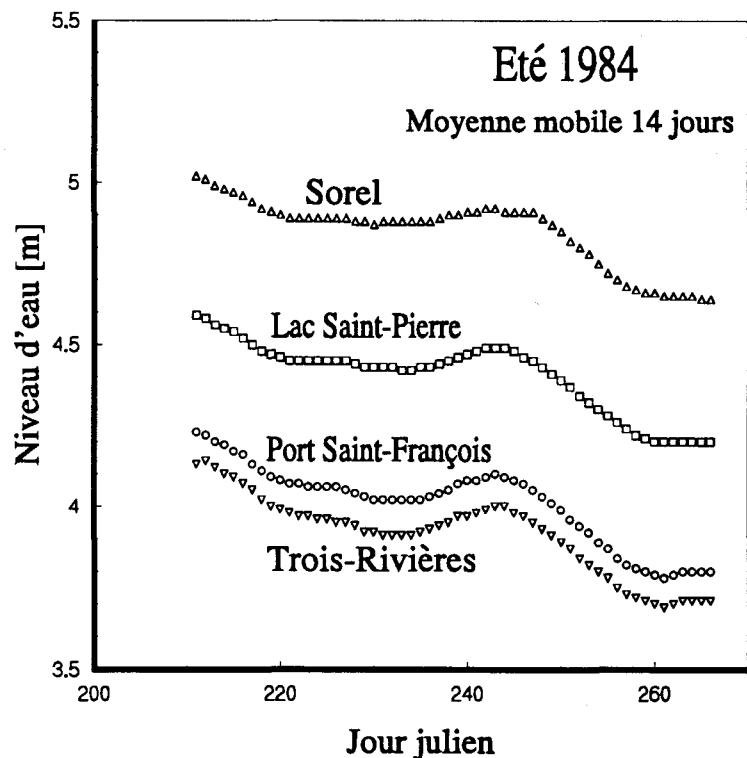


Figure 3.15
Niveau moyen de l'eau (moyenne mobile 14 jours) à diverses stations limnimétriques dans la région à l'étude entre le 22 juillet et le 30 septembre 1984

Compte tenu que le débit du fleuve est deux fois plus élevé que sa modulation, soit 10 000 m³/s, et que la précision dans la mesure du débit est de l'ordre de 5%, l'effet des marées semi-diurnes ou semi-lunaires, quoique sensible sur le niveau d'eau, est négligeable pour le calcul des courants dans le domaine à l'étude.



Par ailleurs, il est utile de mentionner qu'une prise en considération non-stationnaire du niveau d'eau dans la modélisation aurait accru la tâche informatique, ainsi que les fichiers de résultats, par un facteur 24 (avec un pas de temps de simulation horaire et des événements de référence constitués de deux cycles semi-diurnes successifs). Bref, le rendement sur l'effort ne justifiait pas la prise en considération de ce facteur.

Ces deux effets marégraphiques de périodes distinctes ont donc été négligés dans la modélisation.

3.6.4 Influence du vent

Il est difficile d'établir l'influence spécifique du vent sur le niveau d'eau du tronçon compte tenu de la diversité des facteurs qui jouent simultanément un rôle significatif. Cependant l'effet du vent est bien connu en théorie. Sans changer la dénivellation de la ligne d'énergie, la présence d'un vent important s'exerçant sur un écoulement à prédominance gravitationnelle orienté de l'aval ou de l'amont du cours d'eau peut avoir pour effet de freiner l'écoulement ou de l'accélérer. Pour un débit donné, cela se traduit par un léger rehaussement ou abaissement du plan d'eau selon le cas. La dénivellation de la surface libre peut ne pas être affectée ou être affectée assez faiblement. La règle qui a été appliquée pour établir les conditions limites a été de conserver la même dénivellation de la surface libre en absence ou en présence de sollicitation par le vent.

3.6.5 Influence des macrophytes

Le cas de l'influence des macrophytes se pose différemment. Si l'ensemble du tronçon modélisé était du type "fluvial dominant" et si l'influence des macrophytes était quasi-uniforme dans le tronçon (ex: des estrans envahis par les macrophytes, un chenal principal libre de végétation et une morphologie transversale variant peu), alors le résultat serait un rehaussement général du niveau d'eau sur l'ensemble du domaine d'écoulement sans que la dénivellation soit affectée. Cependant, tel n'est pas le cas à cause de la présence du lac Saint-Pierre qui interrompt momentanément la quasi-uniformité des écoulements du fleuve. Dans le tronçon fluvial étudié, l'influence relative des macrophytes est plus grande dans le lac Saint-Pierre qu'ailleurs et l'effet sur le niveau d'eau peut se traduire par une augmentation légère de la dénivellation totale entre les extrémités du modèle.

Cette augmentation de la pente de la surface libre du fleuve est nettement perceptible au cours des mois d'été (Figure 3.11). En effet, la dénivellation totale entre la station de Sorel et celle de Port Saint-François (moyenne mobile 14 jours) augmente à partir du mois de juillet (jour julien 181)



pour atteindre un maximum durant l'été (milieu d'août) puis retombe graduellement jusqu'à la fin d'octobre et ce pour des débits de même ordre de grandeur. La chronologie de cette influence est due au cycle de croissance estivale et de sénescence automnale des plantes aquatiques (Section 3.3.5: Aspects dynamiques).

3.6.6 Relations niveau-débit aux extrémités du modèle

La relation qui existe entre le niveau et le débit à Sorel n'est pas univoque. Elle peut être influencée par le vent, par l'état des macrophytes, par la marée, etc. La relation proposée par Simard (1987), présentée dans la figure 3.10, est une relation niveau-débit "moyenne" établie selon les niveaux d'eau observés à Sorel.

En utilisant la ligne d'énergie de Lapointe (1983) ou les dénivellations présentées dans la figure 3.11, il est possible d'extrapoler la relation niveau-débit établie par Simard (1987) aux extrémités du modèle. Ces relations niveau-débit aux extrémités et à Sorel ne servent pas directement à la modélisation, mais sont plutôt utilisées pour s'assurer que les conditions limites imposées sont valables compte tenu des particularités de l'événement simulé. Il faut apprécier l'effet des différents facteurs d'un événement pour pouvoir le comparer aux relations niveau-débit dérivées de celles de Simard (1987). Par exemple, un événement avec vent important provenant du sud-ouest, donc dans le sens de l'écoulement, fait transiter un débit avec un niveau d'eau plus faible qu'un événement identique mais sans vent. Cet événement avec vent du sud-ouest devrait normalement se retrouver sous la courbe de Simard (1987) présentée dans la figure 3.10.

Pour effectuer une simulation, il faut tout d'abord déterminer la dénivellation du niveau d'eau d'une extrémité à l'autre du domaine associé à l'événement choisi. Puis, les niveaux d'eau aux extrémités sont ajustés de façon parallèle jusqu'à l'obtention du débit visé. Ainsi, lors de la simulation des événements pour la période estivale, le niveau d'eau est ajusté jusqu'à obtenir le débit recherché tout en maintenant une dénivellation de 85 cm entre les extrémités du domaine. Le cas du printemps est différent puisque la dénivellation n'est que d'environ 55 cm entre Sorel et Port Saint-François (Figure 3.11). Les débits élevés caractérisant cette période et le rôle accru joué par les revoirs expliquent ce phénomène. Port Saint-François constitue la limite aval du domaine tandis que l'autre limite se situe à environ 5 km en amont de Sorel. Pour la période printanière, des dénivellations



de 65, 70 et 75 cm ont été imposées d'une extrémité à l'autre du domaine selon la classe de débit du fleuve soit fort, moyen et faible respectivement (section 5.2.2) puisqu'il semble y avoir une relation entre le débit et la dénivellation pour la période printanière (Figure 3.16).

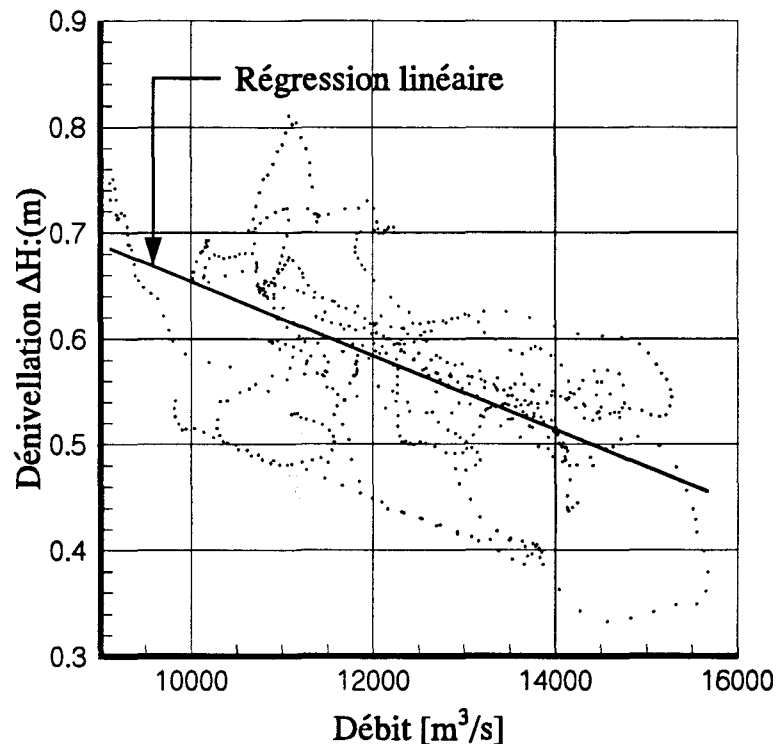


Figure 3.16
Dénivellation totale entre Sorel et Port Saint-François pour la période printanière (moyenne mobile de 14 jours) pour les années 1981 à 1987

La relation niveau-débit obtenue avec le modèle n'est pas univoque et n'est pas connue *a priori*. Elle est dépendante des données mesurées pour la calibration et la validation du modèle et ne sera connue qu'après modélisation. La sollicitation du vent, le niveau de croissance des macrophytes imposé et le débit des tributaires sont des facteurs qui sont pris en considération lors de la modélisation. Ils influencent la relation niveau-débit établie par le modèle.

Pour déterminer le débit passant par chaque reversoir, pour un niveau d'eau mesuré à Sorel ou en amont du domaine de simulation, il est très important d'évaluer d'abord le niveau d'eau à la hauteur de ceux-ci. Pour ce faire, les dénivellations entre les niveaux d'eau, à la limite amont du modèle, à Sorel et aux différents reversoirs, sont estimées à l'aide de la pente de la ligne d'énergie tirée de Lapointe (1983). Ces dénivellations sont, ensuite, calculées en fonction de la localisation sur la



coordonnée longitudinale curviligne utilisée par Lapointe (1983) pour différents points. Pour les reervoirs 1 à 5, les dénivellations calculées par rapport au niveau de Sorel sont, respectivement, de -12,-5,-6,+5 et +8 cm .

3.7 Hydrologie du tronçon

Le débit qui transite dans le tronçon Tracy - Lac St-Pierre provient principalement du fleuve à l'amont du delta et des principaux tributaires tels les rivières Richelieu, Saint-François et Yamaska. Il est à noter que l'effet possible de modulation de la série par les événements de marée est considéré négligeable comparativement aux effets des autres facteurs. Les reervoirs du delta de Sorel transitent une part significative du débit du fleuve Saint-Laurent (section 3.4).

Les données hydrodynamiques utilisées sont celles recueillies par les stations caractérisées dans le tableau 3.5. Les valeurs des débits ont été majorées pour tenir compte du rapport entre la superficie des bassins versants aux stations et celles à l'embouchure des rivières.



Tableau 3.5 Caractéristiques des stations hydrométriques

COURS D'EAU	Station hydrométrique	Bassin versant [(km ²) (station)]	Bassin versant [km ²] (embouchure)	Facteur de majoration
Saint-Laurent (amont du delta)	001908 ¹ (virtuelle)	n/d	n/d	n/d
Richelieu	030401	22 000	23 700	1,077
Yamaska	030302	1230	4780	3,886
Saint-François	030203	9600	10200	1,062

¹ Données fournies par le Menviq. Elles ont été obtenues par la somme des débits mesurés dans le fleuve à Ville Lasalle et de ceux arrivant dans le tronçon en aval.

Les données sur le débit utilisées dans cette étude comprennent des mesures effectuées en deux périodes, au printemps et en été. Ces périodes sont départagées, au mieux, selon une définition hydrologique. La période printanière s'étend sur 91 jours, du 2 mars au 31 mai, et la saison estivale s'étend sur 122 jours, du 1^{er} juin au 30 septembre. Les données étant traitées selon le calendrier julien, un décalage se produit pendant les années bissextiles. Pour ces années, chaque saison débute une journée avant les dates citées précédemment. Les débits journaliers du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires sont retenus pour chacune de ces périodes. Comme les données relatives au débit ont été étudiées en conjonction avec les données relatives au vent, une série écourtée a été utilisée. Toutes ces données n'étaient disponibles simultanément que pour neuf années, pour 1969 à 1976 et pour 1984.

Seulement quelques données analytiques relatives à l'hydraulicité du tronçon seront présentées ici. L'analyse simultanée des divers facteurs qui expliqueraient la variabilité de l'hydrodynamique du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre sera présentée à la section 5.2 (Événements simulés). L'hydraulicité globale du tronçon est représentée dans les tableaux 3.6 et 3.7. Ces tableaux contiennent les principales statistiques descriptives calculées sur la série écourtée utilisée.



Tableau 3.6 Statistiques descriptives pour les débits (m^3/s) du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires dans le tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre pour la période printanière (2 mars au 31 mai)

SERIE	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Saint-Laurent ¹	819	1 2740	2 474	7 880	19 800
Richelieu	819	763	275	171	1 293
Saint-François	819	506	386	49	1 966
Yamaska	819	212	206	12	1 465

¹ Débit du Saint-Laurent à la hauteur de Sorel (incluant celui du Richelieu)

Tableau 3.7 Statistiques descriptives pour les débits (m^3/s) du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires dans le tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre pour la période estivale (premier juin au 30 septembre)

SERIE	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Saint-Laurent ¹	1 098	10 832	1 405	8 500	16 100
Richelieu	1 098	373	213	80	936
Saint-François	1 098	160	143	25	1 232
Yamaska	1 098	53	79	7	913

¹ Débit du Saint-Laurent à la hauteur de Sorel (incluant celui du Richelieu)

3.8 Vents

En tant que force motrice, le vent est la seconde sollicitation en importance après la gravité pour mettre les masses d'eau en mouvement ou pour influencer leur trajectoire. La vitesse et la direction du vent sont mesurées régulièrement, généralement à des fins météorologiques. Des mesures peuvent aussi être prises à l'occasion de projets spéciaux. Le tableau 3.8 donne une description sommaire des stations qui ont servi à recueillir les données relatives au vent.



Tableau 3.8 Données disponibles sur le vent dans la région de Tracy - lac Saint-Pierre

STATION	Lieu	Période	Description
Lac Saint-Pierre	Navires	1887-1988	Mesures ponctuelles dans le temps à partir de navires
Trois-Rivières	Aéroport	1963-1977	Données horaires de la vitesse et de la direction du vent
Cap-de-la Madeleine	Bateaux	été 1984	Données aux 15 minutes de la vitesse et de la direction du vent

Les données relatives au vent utilisées dans cette étude sont celles recueillies par les stations de Trois-Rivières et du Cap-de-la-Madeleine. Une moyenne journalière a été établie pour la direction et l'intensité du vent à ces stations. Quelques statistiques de base ont été produites à partir des données disponibles. Il est à noter que les séries utilisées ne sont pas complètes, de nombreuses carences de données s'intercalant dans celles-ci. Les échantillons de référence utilisés pour estimer les probabilités d'occurrence sont réduits aux jours disponibles. Les statistiques sur les vitesses du vent journalières moyennes au printemps et en été sont présentées au tableau 3.9. Les provenances prédominantes du vent sont sud-ouest, nord-est et nord-ouest (Tableau 3.10).

Tableau 3.9 Vitesse du vent (km/h) à Trois-Rivières et au Cap de la Madeleine

PÉRIODE	N ¹	Moyenne	écart-type	Minimum	Maximum
Printanière	459/819	12.8	5.66	0.0	38.0
Estivale	789/1098	11.0	4.82	0.0	32.0

¹ Nombre de jours disponibles / Taille de l'échantillon total

Tableau 3.10 Directions dominantes du vent à Trois-Rivières et au Cap de la Madeleine

PÉRIODE	Nord-ouest 280° ¹ - 360°		Nord-est 0° - 100°		Sud-ouest 180° - 280°	
	Fréquence	Fréq. [%]	Fréquence	Fréq. [%]	Fréquence	Fréq. [%]
Printanière	144	31,4	146	31,8	169	36,8
Estivale	249	31,6	127	16,1	413	52,3

¹ 0° correspond au nord et 90° à l'est.



3.9 Courantométrie

La connaissance des courants (intensité et direction) est une donnée de base essentielle à la réalisation de cette étude. En effet, cette donnée sert à la vérification des résultats numériques obtenus avec le modèle hydrodynamique. Quatre campagnes de mesure ont été menées, de juillet à novembre 1990, à divers endroits du tronçon modélisé, deux par l'INRS-Eau et les deux autres par le Groupe conseil Roche Ltée. Les objectifs de ces campagnes sont de:

- *définir les principales structures courantométriques en présence et en absence (relative) de plantes aquatiques pour caractériser l'influence de ces plantes sur les écoulements (campagnes de l'INRS-Eau);*
- *obtenir une image plus précise des courants dans la région des tests de rhodamine pour caractériser la diffusivité de l'écoulement¹ (campagnes du Groupe-conseil Roche Ltée).*

Dans ce qui suit, une description sommaire des activités de chacune de ces campagnes sera présentée. L'accent sera mis sur la méthodologie de réalisation adoptée et sur l'instrumentation utilisée. Quant aux résultats des mesures de ces campagnes, ils seront présentés et analysés au chapitre suivant (chapitre 4): Calibration et validation) alors qu'ils seront comparés à ceux du modèle hydrodynamique.

3.9.1 Campagnes de l'INRS-Eau

Les deux campagnes menées par l'INRS-Eau, en collaboration avec le Centre Saint-Laurent, ont permis de mesurer les courants du tronçon étudié. Les opérations de terrain ont été organisées en fonction du cycle végétatif des plantes aquatiques.

Méthodologie et instrumentation Chacune des positions du bateau lors des mesures, a été relevée en utilisant la méthode dite "range-bearing". Cette méthode nécessite la mesure d'un angle et d'une distance entre un point connu au sol et le bateau. Selon les spécialistes du SHC, la méthode est flexible d'utilisation et permet de localiser un point à l'intérieur d'un rayon de 2,5 m.

¹ Voir Rapport No 1, volume 2 : *Caractérisation de la diffusivité des écoulements du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre par tests de rhodamine et télédétection aéroportée.*



Les vitesses et les directions du courant ont été mesurées la plupart du temps à 20%, à 60% et à 80% de la profondeur locale à l'aide d'un courantomètre de marque *Aquamate 1000*. Les vitesses mesurées ont été arrondies au dixième de décimale (0,1 m/s). Cette imprécision est reliée à l'effet des fluctuations causées par les mouvements verticaux de l'appareil en réponse aux vagues et au balancement de l'axe de l'appareil lorsque soumis à la force des courants. Une plus grande précision de lecture n'était pas jugée significative.

En plus de mesurer les vitesses et les directions du courant, le courantomètre *Aquamate 1000* a été utilisée pour mesurer d'autres caractéristiques de la colonne d'eau telles la température, la conductivité, l'oxygène dissous, la turbidité et la salinité. Il est à noter que pour mesurer ces caractéristiques, l'appareil n'a été soumis à aucune calibration et les résultats de mesure n'ont pas été validés. Ces résultats n'étaient pas nécessaires pour la présente étude et, par conséquent, ont été exclus de ce rapport.

Il est à noter que les mêmes méthodologie et instrumentation ont été utilisées pour les deux campagnes.

Description de la campagne d'été (INRS) 1990 La première campagne (campagne d'été) a eu lieu du 22 au 29 juillet. Elle a permis de mesurer le courant du tronçon étudié alors que le débit du fleuve à l'amont du Richelieu était d'environ 9 500 m³/s. La croissance des plantes aquatiques était presque à son apogée. Cette campagne a porté un intérêt particulier sur la partie du tronçon compris entre Tracy et l'embouchure de la rivière Richelieu où se situent les effluents industriels majeurs du tronçon. Les mesures de courant ont été prises à 21 points de mesure (Figure 4.2). Les autres mesures ont été prises dans le lac Saint-Pierre à 55 points de mesure situés dans la partie aval du tronçon entre l'Île-de-Grâce et l'embouchure de la rivière Nicolet (Figure 4.3). Les résultats de ces mesures (Tableau 4.6) ont permis d'évaluer l'influence des rétrécissements du lac, des chenaux, des confluent et des macrophytes sur l'hydrodynamique du fleuve.

Description de la campagne d'automne (INRS) 1990 La deuxième campagne (campagne d'automne) a eu lieu du 4 au 11 novembre. Le débit du fleuve était d'environ 10 283 m³/s. Cette période correspondait à la phase très avancée de dégénérescence des macrophytes. Les mesures de la vitesse et de la direction du courant à l'entrée des chenaux secondaires dans la région de Sorel-Tracy et



dans les grands herbiers du lac Saint-Pierre ont été prises à 43 points de mesure dont 12 étaient situées dans le secteur de Sorel-Tracy et les autres étaient situées dans le lac Saint-Pierre (Figure 4.4).

3.9.2 Campagnes du Groupe-conseil Roche Ltée

Les deux campagnes menées par la firme Groupe-conseil Roche Ltée (Roche, 1990), sous le mandat de l'INRS-Eau, rappelons-le, ont été effectuées pour caractériser la diffusivité de l'écoulement en milieu fluvial. Les mesures de courant ont été prises dans 64 points de mesure dans la région de Tracy-Sorel et à l'entrée du lac Saint-Pierre.

Méthodologie et instrumentation Les courants ont été mesurés à l'aide d'un courantomètre de marque NBA et de modèle DMC-3. Ce type d'appareil donne une mesure directe de la vitesse et de la direction des courants. L'appareil était supporté par un câble gradué et la profondeur de son immersion était, ainsi, facilement lisible. Les mesures ont été prises de façon systématique à 20%, à 60% et à 80% de la profondeur d'eau locale. L'imprécision due à l'instrumentation sur les valeurs mesurées peut atteindre 5% sur les vitesses et 10° sur la direction des courants.

Un système de positionnement de marque Del Norte, utilisant les ondes radio émises par des balises au sol, a servi à établir la position des stations avec une précision supérieure à environ 4 m.

Description de la première campagne La première campagne du Groupe-conseil Roche Ltée a eu lieu le 30 août. Elle a permis de mesurer la vitesse et la direction du courant dans le secteur de Sorel-Tracy à partir de 34 stations courantométriques (Figure 4.5). Le débit du fleuve à l'amont du Richelieu était de 9100 m³/s et le vent était relativement faible.

Les résultats des mesures de cette campagne sont présentés au tableau 4.8.

Description de la deuxième campagne La deuxième campagne du Groupe-conseil Roche Ltée a eu lieu le 11 novembre. Elle a permis de mesurer la vitesse et la direction du courant dans le secteur sud-est du lac Saint-Pierre à partir de 30 stations courantométriques (Figure 4.6). Le débit du fleuve à l'amont du Richelieu était de 8500 m³/s et le vent était relativement faible.

Les résultats des mesures de cette campagne sont présentés au tableau 4.9.



4 CALIBRATION ET VALIDATION

4.1 Objectifs et approche générale

L'objectif général de la *calibration* et de la *validation* est d'*obtenir un modèle représentatif des phénomènes hydrodynamiques du tronçon étudié.*

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2 (Méthodologie), l'élaboration du *modèle de terrain* est une phase importante pour intégrer l'influence des facteurs tels les macrophytes, le substrat et la bathymétrie locale et pour ajuster, par zone, la précision relative des résultats que produira le modèle. Cette précision est essentiellement reliée à la taille des éléments.

La valeur de base des paramètres ajustables du modèle hydrodynamique, les coefficients de Manning et la viscosité turbulente, est tirée de la littérature ou de l'expérience du modélisateur. Les données recueillies sur le terrain pour certains événements permettent de raffiner la valeur locale des paramètres et de vérifier la pertinence de ces choix. La consistance en débit-niveau des résultats du modèle pour une gamme plus large d'événements permettra, de son côté, de valider le modèle en vue d'extrapoler son application.

Le patron des conditions aux limites (C.L.) et les valeurs imposées aux frontières déterminent globalement l'écoulement simulé. Les C.L. agissent à la fois comme un facteur de sollicitation sur l'écoulement et comme un facteur de confinement pour les zones littorales. Ainsi, une attention particulière est requise pour cette phase. Les C.L. permettent également de contourner certaines difficultés telle la rupture des pentes présentes dans le réseau hydrographique du tronçon à l'étude comme c'est le cas pour les revoirs.

Le présent chapitre présente une analyse comparative des résultats numériques avec les mesures de terrain.



4.2 Modèle de terrain

Le *modèle de terrain* est à la base du modèle hydrodynamique et le maillage en constitue la charpente. Lorsqu'on inclut la bathymétrie au maillage, on obtient un *modèle géométrique*.

Le modèle de terrain représentant le réseau hydrographique du domaine à l'étude est défini par le modèle géométrique auquel on ajoute des informations sur le substrat, sur les macrophytes et sur les réservoirs. Il est à noter que nous avons associé le qualificatif de discrétisées aux données utilisées dans le modèle de terrain pour bien montrer qu'elles appartiennent au domaine de la modélisation et qu'elles ont été définies en fonction de cet objectif.

4.2.1 Maillage

Le tronçon Tracy-lac Saint-Pierre est, sans contredit, le maillage le plus vaste et le plus élaboré qu'il nous a été donné de concevoir jusqu'à maintenant. Cette modélisation étant réalisée pour alimenter l'analyse de la diffusivité des écoulements, le maillage du domaine a été conçu suffisamment fin pour tenir compte des zones de propagation des effluents et des tributaires.

Les particularités hydrauliques du tronçon ont nécessité l'élaboration d'un maillage à deux niveaux de précision. Le premier niveau, assez grossier, a été appliqué au tronçon fluvio-lacustre (lac Saint-Pierre) alors que le second niveau, de 10 à 100 fois plus précis que le premier, est appliqué à la zone du delta et à l'entrée des tributaires. Le chenal maritime a fait l'objet d'une attention particulière à cause de l'importance du débit qui y est transité. Les éléments qui s'y trouvent sont presque de la même dimension que ceux qui se trouvent dans la zone du delta quoique plus allongés.

Le maillage comporte 4 902 éléments et 10 257 noeuds. Le nombre d'inconnues est de 23 190. Les planches No 4 et No 5 de l'annexe I présentent les résultats de cette discrétisation.

4.2.2 Bathymétrie discrétisée

La bathymétrie discrétisée a été établie lors de l'élaboration du maillage. Une cote bathymétrique a été associée à chaque noeud-sommet des éléments tracés. Cette cote a été établie à partir des cartes produites en collaboration avec le SHC (section 3.1: Bathymétrie). Cette opération a été menée avec beaucoup de soin pour bien représenter la variabilité morphologique du lit. Comme la



cote du fond n'est spécifiée qu'aux noeuds-sommets des éléments et que cette donnée est ensuite interpolée linéairement à l'intérieur, la variation dans les formes du lit (arrondie, convexe et concave) d'un élément est perdue pendant l'opération.

Les cotes bathymétriques ont été transférées dans un même repère soit le RIGL et pour les besoins de la modélisation, la bathymétrie de certaines zones du tronçon étudié a été estimée.

En effet, la bathymétrie du Chenal des Barques a été estimée à partir des données datant du début du siècle parce que celui-ci ne fait plus l'objet de sondages depuis qu'il sert de cimetière de bateaux. La bathymétrie du littoral de la région du delta de Sorel a été modifiée légèrement pour éviter les découvements et favoriser la conservation locale du débit. La bathymétrie des zones aux abords des reervoirs a été ajustée de manière à présenter des sections plus homogènes pour y faciliter l'imposition des débits. La bathymétrie de la zone près de la limite aval du domaine a également été modifiée légèrement pour favoriser la convergence numérique du problème. Le SHC ne possède pas assez d'informations sur la bathymétrie des battures du lac Saint-Pierre. Seulement quelques données bathymétriques sur des transects, qui partent de la rive et vont vers le lac, documentent cette zone. Dans ces conditions, et pour limiter le nombre d'éléments finis utilisés, le maillage utilisé pour caractériser les battures du lac est plutôt grossier. Ceci implique que la bathymétrie des battures dans le modèle est sommaire. Les planches No 6 et No 7, de l'annexe I, présentent les bathymétries discrétisées respectives du lac Saint-Pierre et du delta de Sorel. Nous rappelons que le terme discrétisé est utilisé pour désigner les données réellement utilisées dans la modélisation.

4.2.3 Substrat discrétisé

La carte des substrats du lac Saint-Pierre décrite à la section 3.2 (Substrat) n'était pas disponible au moment de la conception du maillage, alors une fois la carte des substrats numérisée, le substrat a été associé à chaque élément en fonction de la zone où se trouvait le centre géométrique de l'élément. Le tableau 4.1 montre les cinq groupes de substrat définis d'après la classification proposée dans le rapport de ARGUS (1990). Les planches No 8 et No 9, de l'annexe I, présentent le résultat de la discrétisation du substrat.

La discrétisation respecte grosso modo la distribution des quatre grands ensembles texturaux identifiés par ARGUS (1990). Cependant, le Chenal des Barques forme un ensemble textural distinct pour tenir compte, éventuellement, de l'effet des épaves de navires, qui y sont mouillées, sur l'écoulement.



Tableau 4.1 Valeurs du coefficient de Manning associé à chaque classe de substrat utilisée dans le modèle de terrain (adapté de ARGUS, 1990)

Groupe	Manning (n_f)	Description
1	0,016	Texture Fine (F); argile sableuse, argile et argile limoneuse, argile lourde.
2	0,017	Texture Moyenne (M); loam, loam limoneux et limon, loam sablo-argileux, loam argileux et loam limono-argileux.
3	0,018	Texture Grossière (G); sables et sables loameux, loams sableux et loams sableux fins.
4	0,027	Texture Très Grossière (TG); pierres, cailloux et gravier.
5	0,020	Zone de mouillage d'épaves de navire en aval du Chenal des Barques.

4.2.4 Macrophytes discrétisés

La cartographie des macrophytes réalisée par échosondage (section 3.3: Macrophytes; Fortin, 1990) a permis d'identifier trois catégories de forme de croissance (Classes 1, 2 et 3) correspondant aux espèces dominantes de macrophytes qui ont été identifiées dans la zone aquatique du lac Saint-Pierre. Cette flore aquatique peuple de grands herbiers qui sont séparés par des zones non-colonisés (Classe 5). Dans la zone semi-aquatique, des observations visuelles lors des sondages acoustiques indiquent que la nappe d'eau comprise entre 50 et 80 cm est occupée principalement par des touffes d'herbes (Classe 4; *Vallisneria*) qui couvrent environ 10 à 20% de la surface. A des fins de modélisation, un milieu composé principalement par des battures (Classe 6) a été retenu pour la zone riveraine à la périphérie des relevés acoustiques. Les six classes de macrophytes utilisées dans le modèle sont définies au tableau 4.3.

La distribution et la structure des communautés de macrophytes peuvent être représentées par quinze unités végétales caractérisées par la forme de croissance de l'espèce dominante dans une colonie, par une ou deux espèce(s) compagne(s) et par la densité de la couverture végétale.



La carte des macrophytes était disponible lors de la conception du maillage et elle a été utilisée afin que chaque élément ne recoupe qu'un seul type d'unité végétale. Les éléments tracés sont ainsi divisés en 15 groupes (tableau 4.2). Les indices de densité sont présentés à la section 3.3.2 (Analyse des échogrammes). La planche No 10 (Annexe I) présente le résultat obtenu pour le tronçon lac Saint-Pierre selon les unités végétales.

Tableau 4.2 Caractéristiques et coefficients de Manning correspondant aux unités végétales que forment la flore aquatique du tronçon Tracy-Lac Saint-Pierre à l'apogée du cycle végétatif.

Unité	Densité	Classe pré-dominante	Classe secondaire	Manning (n_m)
1	4+	1	2?	0,100
2	4-	1	2?	0,084
3	3	2	-	0,095
4	3	2	1	0,111
5	3	2	1 et 3	0,111
6	2	2	-	0,052
7	2	2	1	0,069
8	2	2	1 et 3	0,069
9	1	2	-	0,042
10	1	2	3	0,043
11	1	2	1 et 3	0,049
12	-	3	-	0,005
13	-	4	-	0,030
14	-	5	-	0,000
15	-	6	-	0,035

Tableau 4.3 Définition des classes de macrophytes utilisées en vue de la modélisation (adaptée pour la discrétisation de Fortin, 1990)

Classe	Définition
Classe 1	Macrophytes atteignant la surface (généralement Potamogéton)
Classe 2	Macrophytes n'atteignant pas la surface (généralement Valisnèrii)
Classe 3	Tapis de macrophytes (généralement Nitella)
Classe 4	Touffes d'herbes se trouvant dans des zones peu profondes \approx 1 m et occupant 10 à 20 % de la surface
Classe 5	Absence de macrophytes
Classe 6	Batture



4.2.5 Reversoirs et delta de Sorel

Seuls les principaux embranchements du delta de Sorel ont été modélisés. En effet, le coût informatique d'une modélisation complète du delta aurait été prohibitif. Les données relatives à la bathymétrie de plusieurs endroits du delta manquaient et pour obtenir les levés hydrographiques, des coûts supplémentaires importants auraient été nécessaires en plus de ralentir considérablement la bonne marche du projet.

Les cinq reversoirs du delta de Sorel ne pouvaient pas être modélisés directement, c'est-à-dire par la représentation en détails des champs de vitesses sur les structures. Comme une connaissance précise de la courantométrie dans ces zones n'était pas requise, nous avons substitué les reversoirs par leur effet global sur la circulation du delta. Pour ce faire, le maillage est intercalé de coupures aux sites des reversoirs et des conditions aux limites de type débit sont appliquées aux frontières ouvertes contrôlant le débit passant par là.

Deux situations se produisent:

- la largeur de la coupure introduite n'est que quelques mètres et le même débit est imposé de part et d'autre de celle-ci;
- la coupure débute au reversoir et s'arrête à l'aval du delta à un endroit où plusieurs bras non-modélisés convergent; le débit est imposé à une section d'entrée au lac en tenant compte d'un bilan à respecter.

Ainsi, le modèle a été interrompu au niveau des reversoirs 1, 2 et 3 (Figure 3.7). Les débits obtenus avec les relations niveau-débit trouvées à la section 3.4.2 ont été imposés de part et d'autre des coupures (première situation). Pour obtenir une bonne imposition des débits, les seuils ont été ramenés artificiellement au niveau de la bathymétrie générale de la section qu'ils bloquaient. Donc, les vitesses et les profondeurs dans les environs immédiats des reversoirs ne sont pas valables. Cette façon de procéder nous assure que le débit désiré est transité dans chacun des bras du delta.

Le Chenal du Nord et les bras contenant les reversoirs 4 et 5 n'ont pas été modélisés, le domaine de simulation ayant été interrompu à l'entrée de ces chenaux (deuxième situation). Une relation niveau-débit développée à la section 3.5 a servi pour calculer le débit à imposer à l'entrée du Chenal du Nord en tenant compte du niveau d'eau à Sorel. Il en était de même pour les deux autres bras.



Le débit entrant dans le lac Saint-Pierre en provenance de ces chenaux est le cumul de ceux-ci corrigé pour tenir compte des rivières qui se jettent dans le Chenal du Nord. Le Chenal du Moine a été négligé complètement.

4.3 Événements de calibration et de validation

La flexibilité du modèle hydrodynamique est largement en fonction de sa performance à reproduire avec exactitude l'écoulement pour différents états. Ainsi, les paramètres du modèle ont été calibrés à partir des quatre événements distincts caractérisés sur le terrain lors des campagnes qui ont eu lieu en été et en automne 1990 (section 3.9: Courantométrie). Ces campagnes de caractérisation de l'écoulement ont permis de recueillir des mesures de courants sur l'ensemble du domaine pour différents débits du fleuve; et cela, à l'apogée du cycle végétatif de même qu'en période avancée de sénescence des macrophytes. Le tableau 4.4 présente les informations pertinentes relatives aux événements qui ont servi à la calibration et à la validation du modèle hydrodynamique.

Tableau 4.4 Caractéristiques générales des quatre événements utilisés pour la calibration et la validation du modèle hydrodynamique sur le tronçon à l'étude

Date de l'événement (1990)	Nombre de stations	Débit du fleuve (m ³ /s)			
		Limite amont		Limite aval	
		reconstitué ¹	simulé	reconstitué ¹	simulé
24 au 29 juillet ²	76	9 530	10 010	10 050	10 424
2 au 7 novembre ²	43	10 283	11 196	11 273	12 054
30 août ³	30	9 095	8 800	10 133	9 800
11 septembre ⁴	34	8 486	8 456	9 210	9 106

¹ Débit reconstitué à partir de celui du fleuve et de ses tributaires depuis la dernière station de jaugeage sur le fleuve.

² Campagnes de l'INRS-eau sur l'ensemble du domaine.

³ Campagne réalisée par Roche (1990) dans le secteur sud-ouest du lac Saint-Pierre.

⁴ Campagne réalisée par Roche (1990) dans le secteur de Tracy-Sorel.



4.3.1 Données disponibles

183 points de mesure des vitesses ont été prélevés au cours des quatre campagnes de terrain (section 3.9; Tableau 4.4). Pour assurer l'homogénéité des données de terrain et pour les rendre compatibles avec celles du modèle, la valeur de la vitesse retenue pour la comparaison est égale à la moyenne des trois valeurs des vitesses mesurées à 20, à 60 et à 80% de la profondeur d'eau. La valeur centrale compte pour le double des deux autres prises individuellement.

Les valeurs du niveau d'eau retenues sont celles enregistrées lors des événements de référence par les stations limnimétriques de Sorel, de Lac Saint-Pierre et de Port Saint-François opérées par le SHC.

Les valeurs des débits retenues sont celles enregistrées lors des événements de référence par les stations des rivières Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet ainsi que par les stations installées sur le fleuve St-Laurent en amont du Richelieu. Ces stations sont opérées par le Menviq. Les valeurs retenues ont été majorées en fonction du rapport entre le bassin versant à la station et à l'embouchure des rivières.

Le vent était relativement calme pendant les campagnes de terrain. Sa vitesse et sa direction pour différents événements sont données au tableau 4.5.

4.3.2 Conditions aux limites

Une condition d'imperméabilité a été appliquée sur les berges du domaine, c'est-à-dire les vitesses normales aux frontières fermées sont imposées nulles.

Des conditions limites en niveaux d'eau ont été imposées aux frontières ouvertes amont et aval du domaine. Ces niveaux d'eau sont une moyenne des mesures prélevées aux stations de Sorel et de Port Saint-François pendant les campagnes de terrain. Les valeurs des niveaux d'eau de la station de Sorel ont été extrapolées à la limite amont en fonction de la pente moyenne sur le tronçon telle que donnée par Lapointe (1983). La station de Port Saint-François étant située directement sur la limite aval du domaine, aucun transfert n'était requis dans ce cas. En tout, 941 degrés de liberté sont imposés pour la vitesse, ou pour le niveau d'eau, sur les 23 190 inconnues que compte le modèle.



Des conditions limites en débit ont été imposées à l'entrée des principaux tributaires sur le tronçon Tracy-Port Saint-François ainsi qu'au niveau des reversoires et des deux extrémités du Chenal du Nord. Les rivières où un débit a été imposé sont celles de Richelieu, de Yamaska, de Saint-François et de Nicolet. Encore là, une moyenne a été tirée des valeurs obtenues à l'embouchure des rivières pour la durée de chaque campagne. Les autres rivières n'étant pas importantes alors elles ont été négligées.

Des conditions limites en débit ont été imposées sur le Chenal du Nord et sur les différents reversoires en fonction du niveau à Sorel en utilisant les diverses relations niveau-débit établies (section 3.4.2: Relations niveau-débit sur les reversoires).

4.4 Valeur des paramètres retenue

Les deux paramètres du modèle ajustables sont la viscosité turbulente et le coefficient de Manning. La viscosité turbulente n'a pas une très grande influence sur les résultats obtenus, mais elle est très importante pour assurer la convergence du modèle alors que le coefficient de Manning a une influence marquante sur les résultats obtenus. La résistance à l'écoulement causée par le substrat et les macrophytes est très variable dans le tronçon étudié.

Les coefficients de Manning du substrat et des macrophytes ont été ajustés distinctement et successivement.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une série de simulations de l'écoulement pour reproduire le plus fidèlement possible l'événement d'automne, celui du 2 au 7 novembre 1990, où les macrophytes étaient quasi-absents. La résistance des macrophytes à l'écoulement était négligeable et nous avons ajusté les valeurs du coefficient de Manning du substrat pour que les résultats du modèle soient le plus près possible des mesures prises lors de cet événement.

Dans un deuxième temps, nous avons procédé à une autre série de simulations en modifiant seulement les valeurs du coefficient de Manning des macrophytes, tout en conservant les valeurs du coefficient de Manning obtenues pour les substrats pour reproduire le plus fidèlement possible les trois autres événements où les macrophytes jouent un rôle important.

4.4.1 Coefficient de Manning du substrat (n_p)

En s'inspirant de la littérature et de nos expériences, un coefficient de Manning a été défini pour chaque substrat. Nous avons attribué à chacun des éléments du modèle un coefficient de Manning



en fonction du substrat présent à l'endroit où il se trouve puis. Une série de simulations pour l'événement d'automne a permis d'ajuster chacun de ces coefficients. Le tableau 4.1 donne la valeur du coefficient de Manning qui a été retenue pour chaque groupe textural.

4.4.2 Coefficient de Manning des macrophytes (n_m)

La procédure de calibration du coefficient de Manning des macrophytes a nécessité plusieurs simulations en raison du peu d'information de base disponible dans la littérature et de la diversité des associations végétales. Les travaux antérieurs dans ce domaine se limitent à des modèles unidimensionnels dans lesquels le coefficient de Manning traduit l'effet combiné d'une multitude de facteurs tels que le type de cours d'eau, le substrat, les plantes aquatiques et le degré d'irrégularité du lit d'écoulement.

Nous avons attribué à chaque classe de forme de croissance un coefficient de Manning maximal en supposant qu'elle formait une colonie pure à l'apogée du cycle végétatif avec une densité maximale (section 2.5.2: Résistance des macrophytes: n_m). Pour chaque unité végétale, les valeurs du coefficient de Manning des classes formant une colonie mixte étaient combinées ensemble en les pondérant en fonction de leur densité. De nombreuses simulations ont permis de déterminer la valeur du coefficient de Manning pour chaque classe de forme de croissance et les pondérations à affecter à chaque densité. Ce processus itératif permet d'ajuster les coefficients de Manning selon la structure végétale propre à chaque unité (Tableau 4.2).

Pendant le cycle végétatif, le modèle tient compte de la variation de la résistance des plantes aquatiques à l'écoulement selon la saison en pondérant leur contribution. La contribution du substrat demeure toujours la même. La figure 4.1 illustre le coefficient $c(t)$ choisi pour représenter la courbe de croissance des macrophytes en vue de la modélisation.

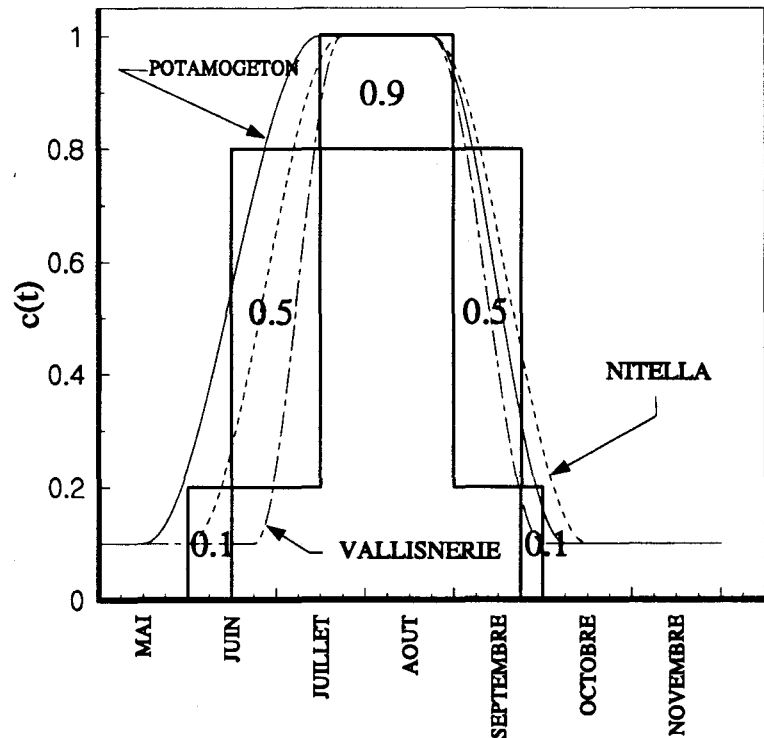


Figure 4.1
 Discrétisation du cycle
 de croissance des macrophytes
 en vue de la modélisation

4.4.3 Viscosité turbulente

La viscosité turbulente est utilisée dans le calcul des contraintes turbulentes. Ce paramètre est relié au degré de raffinement du maillage d'éléments finis. La viscosité a été définie en se basant sur une longueur de mélange qui tient compte de la profondeur (section 2.5.3: Viscosité turbulente (ν_T) et longueur de mélange (l_m)). L'intervalle de valeurs que peut prendre la viscosité a été borné afin d'assurer la convergence du modèle tout en préservant les gradients de vitesses dans les régions plus profondes. Sans cette protection, les éléments faiblement recouverts auraient obtenu des viscosités très faibles. Les bornes et le coefficient λ choisis sont les plus faibles assurant une bonne convergence du modèle. La borne inférieure est de $17 \text{ m}^2/\text{s}$ et la borne supérieure est de $30 \text{ m}^2/\text{s}$. La viscosité utilisée pour les éléments partiellement découverts est de $5 \text{ m}^2/\text{s}$. Le coefficient λ utilisé dans la longueur de mélange est de 14. Ces valeurs se situent d'ailleurs dans le registre usuel selon la taille des éléments utilisés (Leclerc et coll., 1987, 1990b,c)



4.4.4 Coefficient de traînée du vent

Le coefficient de traînée du vent est déterminé selon l'approche de Wu (1969) (section 2.5.4: Coefficient de traînée du vent: τ_w). Les conditions étant relativement calmes lors des quatre campagnes de terrain, les événements de calibration ont été simulés avec un vent nul. Les données obtenues pour la campagne du 24 au 29 juillet indiquent des vents de provenances diverses mais toujours faibles, moins de 15 km/h avec une moyenne de 9 km/h. Lors de la campagne du 2 au 7 novembre, les vents étaient un peu plus forts mais leur direction et leur intensité n'étaient pas constantes sur toute la période, 16 km/h en moyenne. Les données relatives au vent pour ces deux campagnes sont présentées au tableau 4.5. Lorsque les vents étaient plus forts, les conditions de navigation sur le lac devenaient difficiles et seules des mesures dans le delta de Sorel ont été effectuées, lieu où l'écoulement est moins influencé par le vent.

4.4.5 Diffusivités

Les diffusivités sont le résultat du post-traitement des résultats hydrodynamiques. Le coefficient β de l'équation 2.32 n'a pas été utilisé dans le calcul des courants. Pour le calcul des diffusivités, le coefficient β a été fixé dans un premier temps à 0.01 pour l'équation 2.33. Cette valeur est un estimé approximatif et nécessaire aux processus de diffusion. Cette activité menée dans le volume 3 de ce rapport.



Tableau 4.5 Vitesse et direction du vent lors des campagnes de l'INRS

Date	Heure GMT	Direction (degré) ¹	Vitesse (km/h)
24-07-90	0	30	14,8
	6	300	3,7
	12	280	3,7
	18	90	13,0
25-07-90	0	10	14,8
	6	20	7,4
	12	-	-
	18	100	7,4
26-07-90	0	280	7,4
	6	290	3,7
	12	-	-
	18	140	11,1
02-11-90	0	70	7,4
	6	60	3,7
	12	40	7,4
	18	230	11,1
03-11-90	0	260	18,0
	6	270	22,0
	18	270	22,0
04-11-90	0	10	-
	6	10	1,8
	18	260	37,0
05-11-90	0	300	7,4
	6	310	14,8
	18	120	22,0
06-11-90	0	70	22,0
	18	10	7,4
07-11-90	0	270	37,0
	6	280	18,0
	12	280	18,0
	18	260	7,4

¹ Par définition, le nord est à 0° et l'est à 90°.



4.5 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures

Pendant la calibration et la validation des paramètres, le comportement général du modèle est vérifié en comparant les résultats des simulations aux données recueillies sur le terrain. Les tableaux 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9 présentent la comparaison des mesures de vitesses et de directions du courant, pour les quatre événements de calibration, avec les résultats du modèle. Les stations de mesure de courants pour les quatre événements de calibration sont localisées sur les cartes présentées dans les figures 4.2 à 4.6. Il est à noter que la numérotation des stations de mesure utilisée dans ce rapport est la même que celle utilisée sur le terrain. Les trous dans les séquences de numérotation des stations de mesure ne sont pas dus à l'élimination de certaines mesures de terrain. Aucune mesure n'a été écartée. C'est tout simplement le résultat de la numérotation utilisée sur le terrain. Les débits reconstitués aux limites amont et aval du domaine (tableau 4.4) sont comparables aux débits calculés à partir des résultats du modèle. Les écarts entre les débits sont toujours inférieurs à 5% sauf pour l'événement du 2 au 7 novembre pour lequel la différence entre les débits est d'environ 9%. Ces écarts sont jugés acceptables compte tenu que les vitesses mesurées et celles calculées se comparent bien et que le débit mesuré est extrapolé à partir d'une station de jaugeage situé beaucoup plus loin en amont du site.

Les vitesses de courants mesurées lors des campagnes menées par l'INRS-eau sont, on l'a vu, précises à $\pm 0,10$ m/s, tandis que les mesures de vitesse recueillies par le Groupe Roche le sont à $\pm 0,05$ m/s. Pour la majorité des stations, les vitesses mesurées sont des valeurs moyennes sur la verticale.

4.5.1 Campagnes courantométriques de l'INRS-eau

Les tableaux 4.6 et 4.7 présentent sous forme synoptique les mesures de courants, pour les événements de juillet et de novembre 1990, et les résultats des simulations hydrodynamiques.

Événement de calibration du 24 au 29 juillet 1990 Des mesures de la vitesse et de la direction des courants ont été effectuées à 76 stations distribuées sur l'ensemble du domaine étudié (figures 4.2 et 4.3). Pour 67% des points de mesure (51 stations), l'écart entre les vitesses mesurées et celles calculées est inférieur à 0,1 m/s (tableau 4.6) alors que pour 15% des points de mesure (16 stations), cet écart varie entre 0,1 et 0,2 m/s, ce qui représente un écart de moins de 20% pour la plupart des vitesses supérieures à 0,4 m/s.



Pour les autres 10% des points de mesure (9 stations), cet écart est important et dépasse 0,2 m/s (tableau 4.6: stations No 22, No 23, No 41, No 50, No 61, No 62, No 69, No 73 et No 77). Pour la plupart de ces 9 stations, les écarts entre les vitesses s'expliquent par ceci:

- les stations No 22 et No 23 se situent dans la région où les eaux de la rivière Richelieu se mélangent à celles du fleuve, causant des turbulences qui pourraient également expliquer l'écart important dans la direction des courants;
- la station No 41 est localisée à la bordure d'un herbier où un fort gradient horizontal de vitesse peut exister entre le chenal maritime et les macrophytes;
- les stations No 69 et No 77 présentent des vitesses mesurées (0,4-0,5 m/s) beaucoup plus élevées que celles normalement mesurées (0,1-0,2 m/s) dans les grands herbiers, indiquant la présence de couloirs de courants à travers les champs de macrophytes ou une erreur dans les mesures;
- les mesures à la station No 73 ont été prises à la sortie du Passage Sud du lac Saint-Pierre et peuvent représenter des conditions locales qui sont difficiles à reproduire considérant la densité du maillage utilisée;

A l'exception de la station No 22, des écarts importants entre les directions des courants mesurées et celles calculées ($> 50^\circ$) se produisent à des stations situées dans les herbiers en bordure du lac où la vitesse des courants mesurée est très faible ($< 0,2$ m/s) et où leur direction est peu significative. Ces stations sont la No 72, la No 76, la No 98 et la No 99.

Événement de calibration du 2 au 7 novembre 1990 Des mesures de courants ont été effectuées à 43 stations lors de la campagne d'automne 1990 (figure 4.4). Dix de ces stations ont été localisées de façon à caractériser les courants dans des endroits particuliers (reversoirs et chenaux secondaires). Certaines de ces stations n'ont pas fait l'objet de repérage instrumenté mais ont été localisées visuellement. Elles sont identifiées dans le texte et dans le tableau 4.7 par leur numéro suivi d'une étoile (*). L'écart entre les vitesses mesurées et celles calculées est inférieur à 0,1 m/s pour environ 84% des stations (36 points de mesure) alors qu'il varie entre 0,1 et 0,2 m/s pour 14% des stations (6 points de mesure). Cet écart est légèrement supérieur à 0,2 m/s pour seulement une station (la station No 12*).

La plupart des écarts de vitesse qui sont supérieurs à 0,1 m/s sont observés près des reversoirs (stations No 20* et No 25A*), dans le Chenal du Nord (stations No 12* et No 13*) ainsi que près de l'embouchure des rivières Saint-François et Yamaska (stations No 36 et No 37).

L'écart entre la direction des courants mesurée et celle calculée n'excède dans aucun cas 45° .



L'écart entre les débits simulés et ceux reconstitués dépasse légèrement 5%. Cependant, le débit calculé par le modèle est plus grand que celui reconstitué alors que les vitesses calculées ont une légère tendance à être sous-estimées par rapport à celles mesurées. Cette contradiction montre qu'il est difficile de faire un meilleur ajustement des paramètres lors de la calibration.

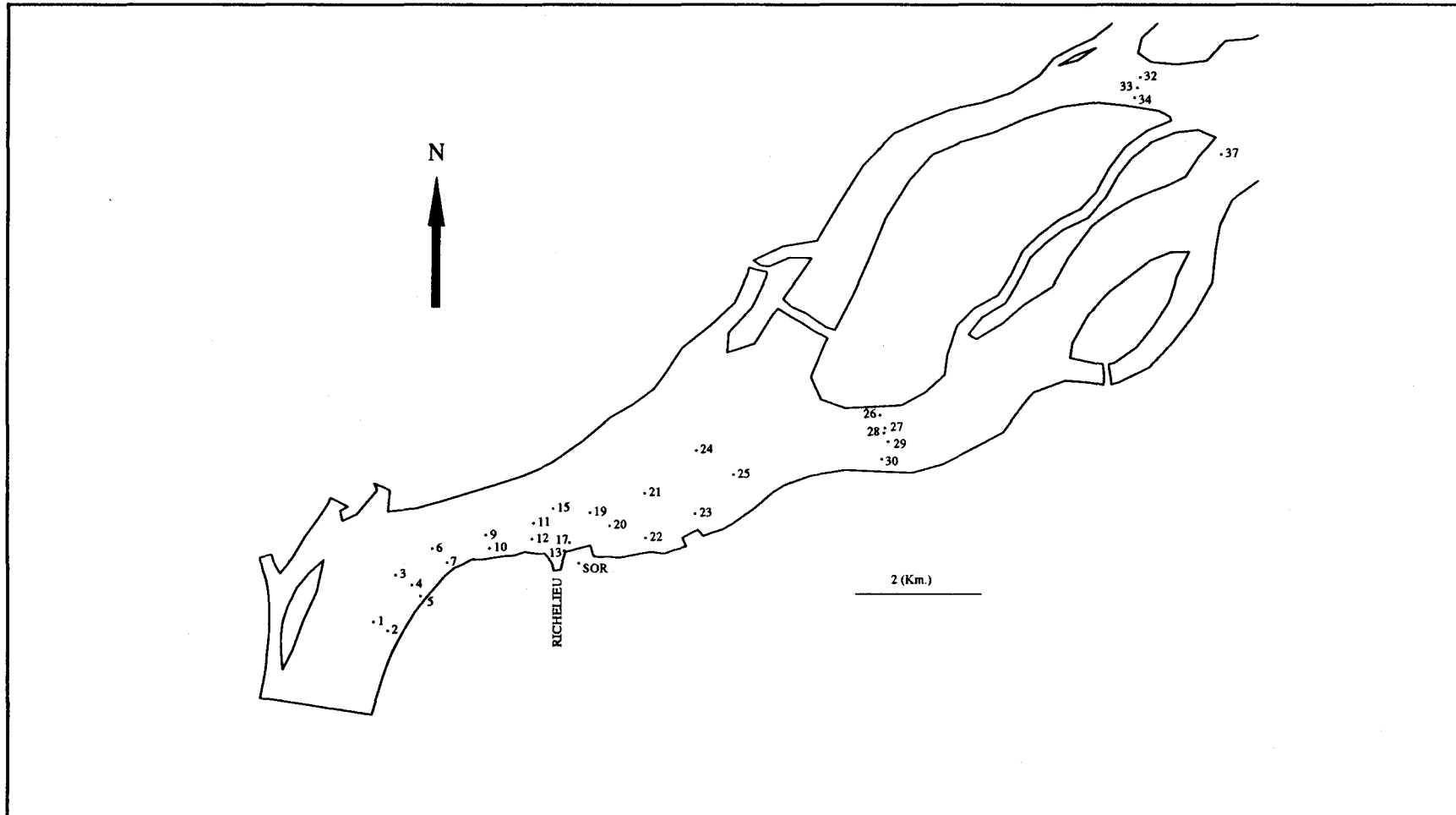


Figure 4.2 : Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau, campagne d'été 1990

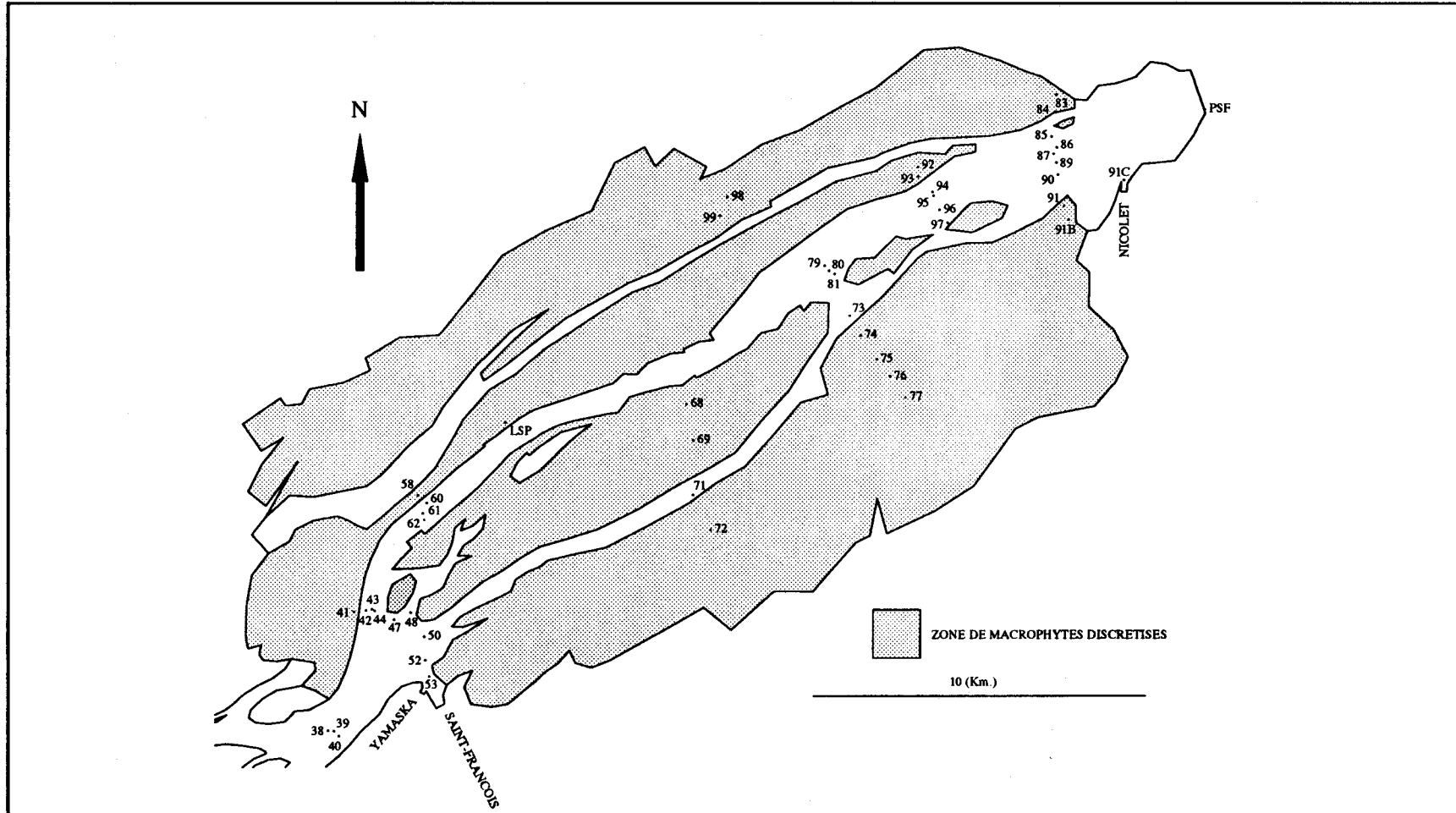


Figure 4.3 : Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau, campagne d'été 1990

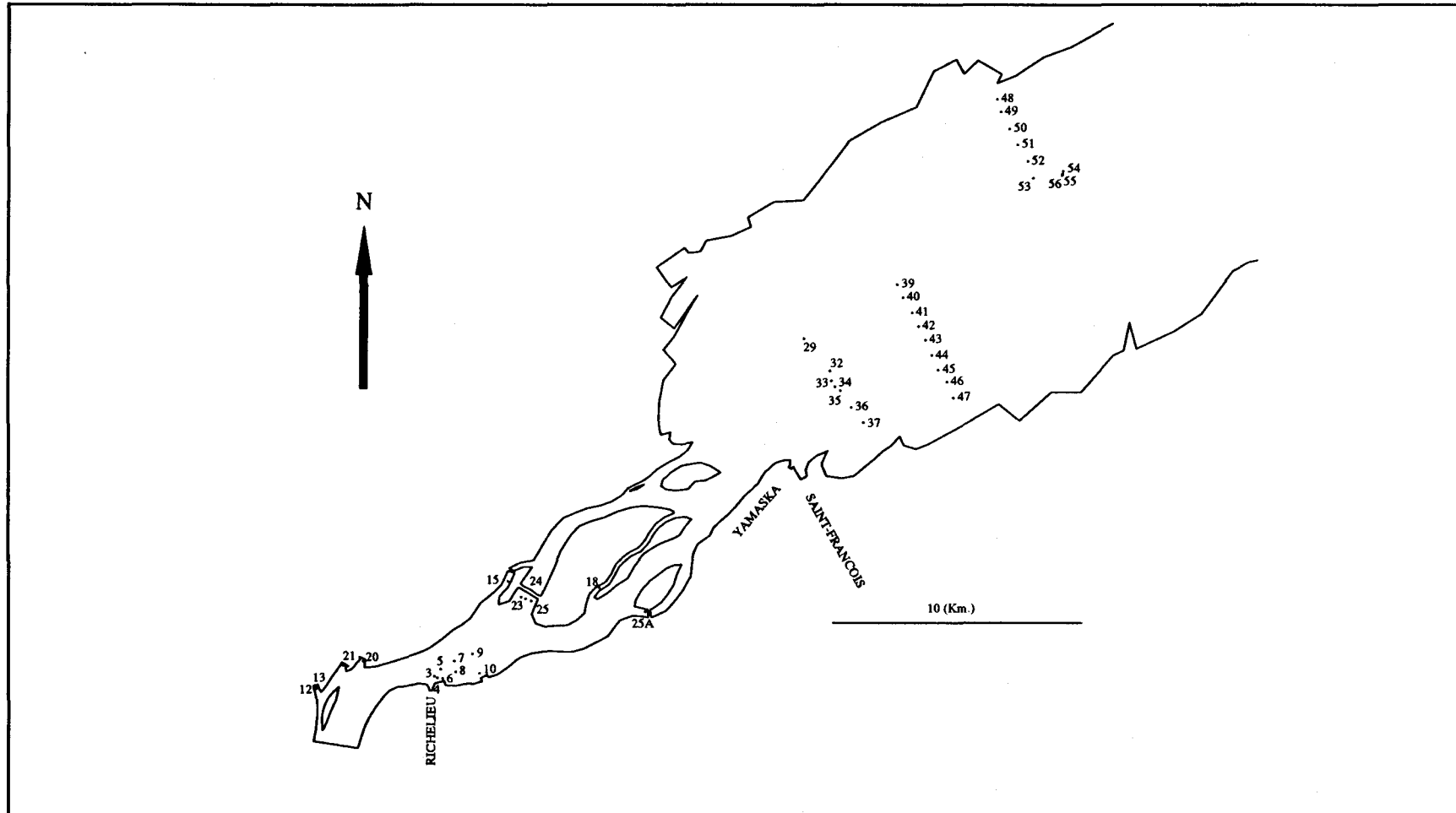


Figure 4.4 : Localisation des stations courantométriques de l'INRS-Eau, campagne d'automne 1990



Tableau 4.6 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne de l'INRS-Eau du 24 au 29 juillet 1990

Point No.	VITESSE (m/s)			Direction (degré)			Macrophytes (Classe)
	Mesurée	Écart	Calculée	Mesurée	Calculée	Écart	
1	0,800	0,678	-0,122	3,7	26,6	22,9	14
2	0,700	0,591	-0,109	5,0	25,8	20,8	14
3	0,867	0,738	-0,129	30,7	47,0	16,3	14
4	0,733	0,657	-0,076	26,7	45,4	18,7	14
5	0,567	0,534	-0,033	22,7	39,7	17,0	14
6	0,833	0,797	-0,036	53,0	61,9	8,9	14
7	0,667	0,664	-0,003	63,7	63,4	-0,3	14
9	0,933	0,844	-0,089	61,7	70,8	9,1	14
10	0,733	0,730	-0,003	60,7	69,0	8,3	14
11	0,833	0,811	-0,022	68,3	77,4	9,1	14
12	0,700	0,695	-0,005	69,7	83,4	13,7	14
13	0,100	0,134	0,034	11,3	27,4	16,1	14
15	0,833	0,807	-0,026	66,0	74,7	8,7	14
17	0,167	0,254	0,087	56,3	73,6	17,3	14
19	0,733	0,654	-0,079	60,0	73,5	13,5	14
20	0,500	0,447	-0,053	73,0	73,5	0,5	14
21	0,700	0,652	-0,048	57,3	71,1	13,8	14
22	0,100	0,306	0,206	129,0	78,1	-50,9	14
23	0,000	0,363	0,363	37,0	65,3	28,3	14
24	0,633	0,632	-0,001	58,3	69,9	11,6	14
25	0,567	0,598	0,031	62,3	75,7	13,4	14
26	0,667	0,667	0,000	69,7	82,7	13,0	14
27	0,933	0,938	0,005	67,7	77,4	9,7	14
28	0,933	0,948	0,015	73,0	77,6	4,6	14
29	1,000	0,950	-0,050	60,7	78,0	17,3	14
30	0,800	0,784	-0,016	70,5	85,0	14,5	14
32	0,300	0,301	0,001	80,0	92,6	12,6	14
33	0,267	0,302	0,035	79,7	95,5	15,8	14
34	0,133	0,268	0,135	91,3	96,9	5,6	14
37	0,933	0,932	-0,001	26,7	39,4	12,7	14
38	1,033	0,926	-0,107	23,3	38,0	14,7	14
39	1,067	0,920	-0,147	18,3	38,5	20,2	14
40	0,700	0,696	-0,004	17,0	38,7	21,7	14
41	0,700	0,205	-0,495	339,5	3,6	24,1	4
42	0,867	0,743	-0,124	348,7	8,5	19,8	14
43	0,967	0,875	-0,092	352,3	5,9	13,6	14
44	0,900	0,883	-0,017	341,0	2,1	21,1	14
47	0,533	0,550	0,017	4,3	16,1	11,8	14
48	0,567	0,571	0,004	17,3	28,8	11,5	14
50	0,833	0,619	-0,214	21,0	48,2	27,2	14
52	0,300	0,292	-0,008	339,5	27,8	48,3	14
53	0,333	0,215	-0,118	337,7	357,0	19,3	14
58	0,200	0,206	0,006	0,0	19,5	19,5	3
60	0,600	0,643	0,043	33,3	45,3	12,0	14
61	0,933	0,724	-0,209	43,3	45,2	1,9	14



Tableau 4.6 (suite) Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne de l'INRS-Eau du 24 au 29 juillet 1990

Point No	Vitesse (m/s)			Direction (degré)			Macrophytes (classe)
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart	
62	0,867	0,641	-0,226	43,3	47,2	3,9	14
68	0,200	0,213	0,013	59,0	47,7	-11,3	9
69	0,400	0,134	-0,266	43,0	48,3	5,3	3
71	0,200	0,390	0,190	25,0	58,3	33,3	14
72	0,200	0,083	-0,117	357,0	49,9	52,9	4
73	0,100	0,344	0,244	24,0	41,8	17,8	14
74	0,200	0,071	-0,129	24,0	36,7	12,7	4
75	0,100	0,073	-0,027	21,0	55,1	34,1	4
76	0,100	0,068	-0,032	347,0	56,3	69,3	4
77	0,500	0,059	-0,441	22,0	66,8	44,8	1
79	1,000	0,839	-0,161	39,3	54,6	15,3	14
80	0,900	0,790	-0,110	32,7	55,8	23,1	14
81	0,733	0,633	-0,100	32,3	51,0	18,7	14
83	0,200	0,140	-0,060	85,0	99,1	14,1	13
84	0,200	0,199	-0,001	79,0	87,8	8,8	9
85	0,533	0,526	-0,007	61,7	84,8	23,1	14
86	0,633	0,629	-0,004	69,3	88,6	19,3	14
87	0,667	0,624	-0,043	71,7	86,1	14,4	14
89	0,467	0,534	0,067	64,7	80,2	15,5	14
90	0,533	0,498	-0,035	52,0	69,2	17,2	14
91	0,233	0,232	-0,001	46,7	63,6	16,9	9
91	0,100	0,099	-0,001	15,0	35,7	20,7	9
91	0,100	0,177	0,077	345,0	20,6	35,6	14
92	0,267	0,188	-0,079	52,3	75,5	23,2	6
93	0,300	0,231	-0,069	74,0	76,4	2,4	6
94	0,900	0,735	-0,165	38,7	59,9	21,2	14
95	0,900	0,748	-0,152	43,0	61,8	18,8	14
96	0,800	0,626	-0,174	49,0	67,6	18,6	14
97	0,467	0,430	-0,037	54,7	71,9	17,2	14
98	0,100	0,089	-0,011	7,0	78,4	71,4	4
99	0,100	0,099	-0,001	28,0	81,2	53,2	4

Tableau 4.6 (suite) Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne de l'INRS-Eau du 24 au 29 juillet 1990

Station	Niveau d'eau - RIGL (m)		
	Mesuré	Calculé	Écart
SOR (port de Sorel)	4,76	4,85	0,09
LSP (lac Saint-Pierre)	4,38	4,41	0,03
PSF (Port Saint-François)	4,03	4,03	0,00



Tableau 4.7 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne de l'INRS-Eau (du 4 au 7 novembre 1990)

Point No	VITESSE (m/s)			Direction (degré)			Macrophytes (classe)
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart	
12*	0,500	0,297	-0,203	356,5	344,5	-12,0	14
13*	0,400	0,291	-0,109	11,2	345,1	-26,1	14
15*	0,200	0,275	0,075	19,0	28,0	9,0	14
18*	0,633	0,698	0,065	62,3	55,8	-6,5	14
20*	0,500	0,381	-0,119	11,1	11,2	0,1	14
21*	0,600	0,650	0,050	35,6	35,2	-0,4	14
25A*	0,450	0,632	0,182	98,2	98,4	0,2	14
23	0,367	0,367	0,000	24,6	36,2	11,6	14
24	0,300	0,390	0,090	32,5	33,0	0,5	14
25	0,300	0,385	0,085	27,4	32,7	5,3	14
29	0,200	0,290	0,090	26,5	52,7	26,2	14
32	0,200	0,265	0,065	50,9	64,4	13,5	9
33	0,200	0,255	0,055	32,5	49,0	16,5	1
34	0,500	0,499	-0,001	25,1	52,4	27,3	14
35	0,500	0,514	0,014	37,0	62,3	25,3	14
36	0,300	0,160	-0,140	69,2	96,5	27,3	1
37	0,400	0,220	-0,180	117,6	97,3	-20,3	15
39	0,400	0,371	-0,029	77,9	64,3	-13,6	6
40	0,200	0,223	0,023	69,2	70,1	0,9	3
41	0,200	0,226	0,026	71,6	69,4	-2,2	3
42	0,300	0,222	-0,078	81,6	66,8	-14,8	3
43	0,200	0,236	0,036	79,2	67,4	-11,8	3
44	0,350	0,333	-0,017	55,1	62,8	7,7	14
45	0,200	0,149	-0,051	53,7	57,9	4,2	4
46	0,200	0,202	0,002	52,3	59,7	7,4	6
47	0,200	0,184	-0,016	49,6	62,6	13,0	15
3	0,633	0,552	-0,081	72,9	73,3	0,4	14
4	0,500	0,440	-0,060	97,0	74,7	-22,3	14
5	0,700	0,698	-0,002	88,8	74,7	-14,1	14
6	0,400	0,405	0,005	119,8	77,1	-42,7	14
7	0,700	0,737	0,037	75,4	72,8	-2,6	14
8	0,500	0,500	0,000	86,4	72,5	-13,9	14
9	0,800	0,748	-0,052	74,2	72,2	-2,0	14
10	0,400	0,398	-0,002	76,6	68,2	-8,4	14
48	0,200	0,151	-0,049	85,2	91,9	6,7	4
49	0,200	0,157	-0,043	75,4	87,1	11,7	4
50	0,400	0,294	-0,106	61,4	71,8	10,4	14
51	0,300	0,300	0,000	48,2	69,5	21,3	10
52	0,200	0,200	0,000	53,6	66,3	12,7	3
53	0,500	0,486	-0,014	35,6	45,8	10,2	14
54	0,667	0,724	0,057	55,4	54,4	-1,0	14
55	0,633	0,688	0,055	54,5	53,9	-0,6	14
56	0,733	0,708	-0,025	54,5	53,5	-1,0	14



Tableau 4.7 (suite) Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne de l'INRS-Eau (du 4 au 7 novembre 1990)

Station	Niveau d'eau - RIGL (m)		
	Mesuré	Calculé	Écart
SOR (port de Sorel)	4,93	5,01	0,08
LSP (lac Saint-Pierre)	4,63	4,59	-0,04
PSF (Port Saint-François)	4,30	4,30	0,00

4.5.2 Campagnes courantométriques du Groupe Roche

Les levés courantométriques effectués par le Groupe Roche lors des essais de diffusion couvrent essentiellement deux secteurs du tronçon modélisé: une zone à l'entrée du lac Saint-Pierre, près de l'embouchure des rivières Saint-François et Yamaska; et, une zone située le long de la rive sud du fleuve dans le secteur de Tracy-Sorel, à l'embouchure de la rivière Richelieu. Ces données constituent donc un deuxième ensemble de mesures de courants qui permet une validation plus détaillée des résultats du modèle dans deux secteurs limités du domaine étudié.

Événement de validation du 30 août 1990: La caractérisation courantométrique du secteur sud-ouest du lac Saint-Pierre a permis de recueillir des mesures de vitesse et de direction des courants à 30 points de mesure. Ces points sont répartis le long des transects distants de 0,5 à 1,0 km et couvrant une superficie d'environ 15 km² (Figure 4.5). Un peu plus de 50% de ces points de mesure, soit 16 points, présentent des écarts, entre les valeurs des vitesses mesurées et celles calculées, inférieurs à 0,1 m/s (Tableau 4.8). La différence entre les valeurs des vitesses observées et celles calculées varie de 0,1 à 0,2 m/s à six points de mesure. Un nombre relativement important de points de mesure, soit 8 au total, présente des écarts supérieurs à 0,2 m/s.

Six des points de mesure (No 5003, No 5004, No 5006, No 5009, No 5011 et No 5013) parmi ceux présentant une variation importante de vitesse sont situées dans une zone de mélange au confluent du chenal maritime avec les rivières Saint-François et Yamaska, et près de l'entrée d'un chenal secondaire (Passage Sud). Par ailleurs, la grande variabilité dans les vitesses mesurées (de 0,00 à



Les deux autres points (No 5017 et No 5021) sont situés en bordure d'un grand herbier au sud du chenal secondaire. Les très faibles vitesses qui y sont mesurées (0,002 m/s) indiquent un très fort gradient de vitesse sur une très courte distance en direction du Passage Sud, où les vitesses sont beaucoup plus élevées (0,5-0,6 m/s). Ces conditions montrent que les grands herbiers forment des parois de chaque côté du passage confinant ainsi l'écoulement à un couloir étroit. Ces frontières quasi-verticales sont partiellement lissées dans le modèle hydrodynamique en raison de la technique des éléments finis. Cet effet de lissage produit un gradient de vitesse moins accentué s'étalant sur une plus grande distance de chaque côté du passage modélisé. Il en résulte alors des vitesses prédites plus élevées que celles mesurées en bordure des grands herbiers.

A l'exception du point No 5002, les écarts entre les directions des courants mesurées et celles calculées sont tous inférieurs à 40°.

Événement de validation du 11 septembre 1990: Cet événement regroupe 34 points de mesure qui sont répartis sur 9 transects perpendiculaires à l'écoulement dans le secteur de Tracy-Sorel (Figure 4.6). L'écart entre les vitesses de courants mesurées et celles calculées est moins de 0,1 m/s pour 24 points, soit pour un peu plus de 70% des prédictions (Tableau 4.9). Cet écart se situe entre 0,1 et 0,2 m/s pour 6 points et est supérieur à 0,2 m/s pour 4 points seulement soit No 4001, No 4003, No 4011 et No 4012.

Les écarts dans la vitesse et la direction des courants aux points No 4017 et No 4021 peuvent être attribués, en partie, à des contre-courants dans le voisinage du quai de Sorel. Les écarts supérieurs à 0,2 m/s demeurent sans explication immédiate, si ce n'est une anomalie dans les vitesses mesurées à ces points qui montre une diminution inattendue des vitesses en direction des eaux profondes de la partie centrale du fleuve.

Mise à part l'écart considérable (173°) observé à la station No 4017 située près du quai de Sorel, la plupart des écarts entre la direction des courants mesurée et celle calculée sont inférieurs à 40°.

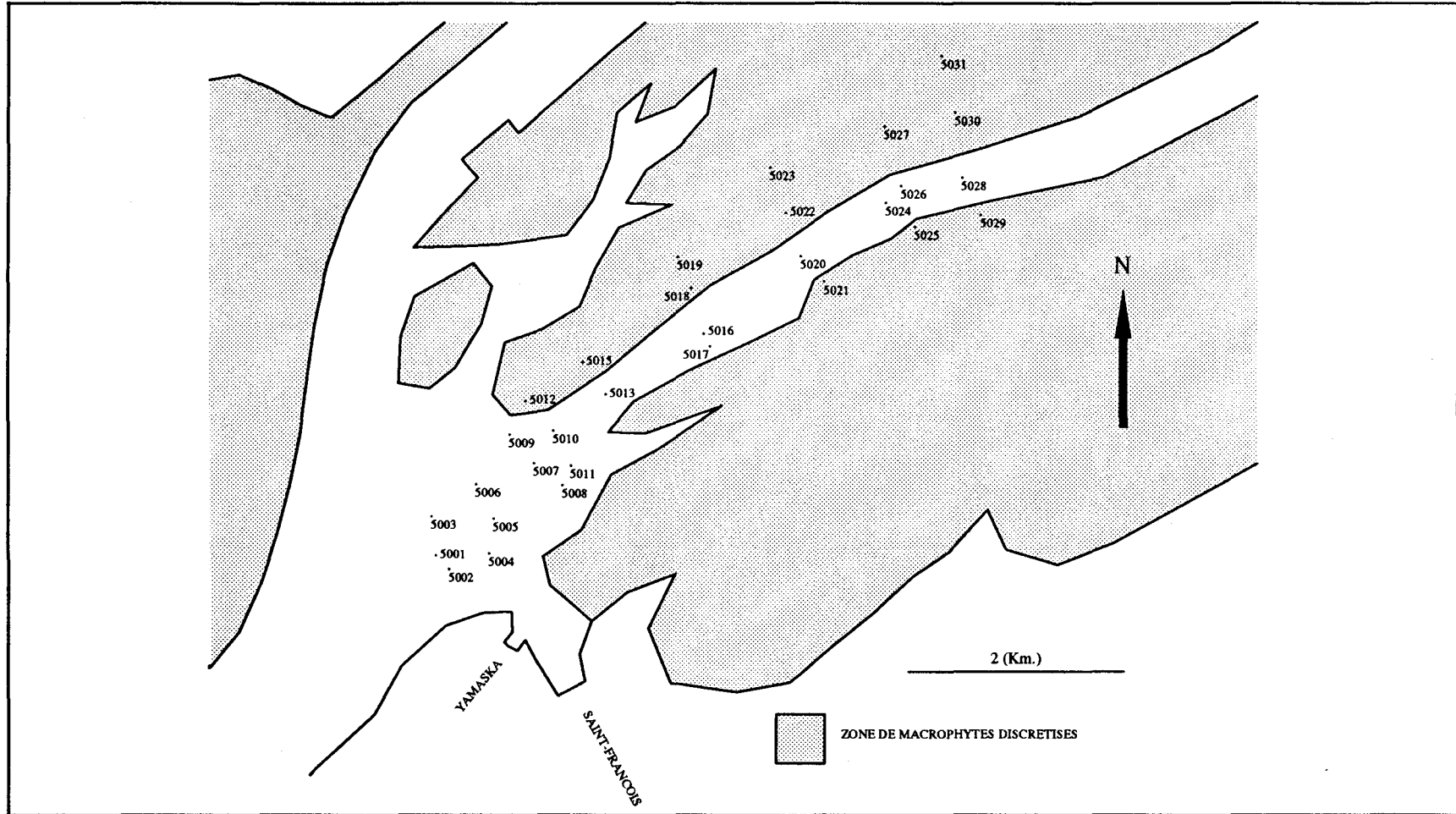


Figure 4.5 : Localisation des stations courantométriques de Roche - 30 août 1990

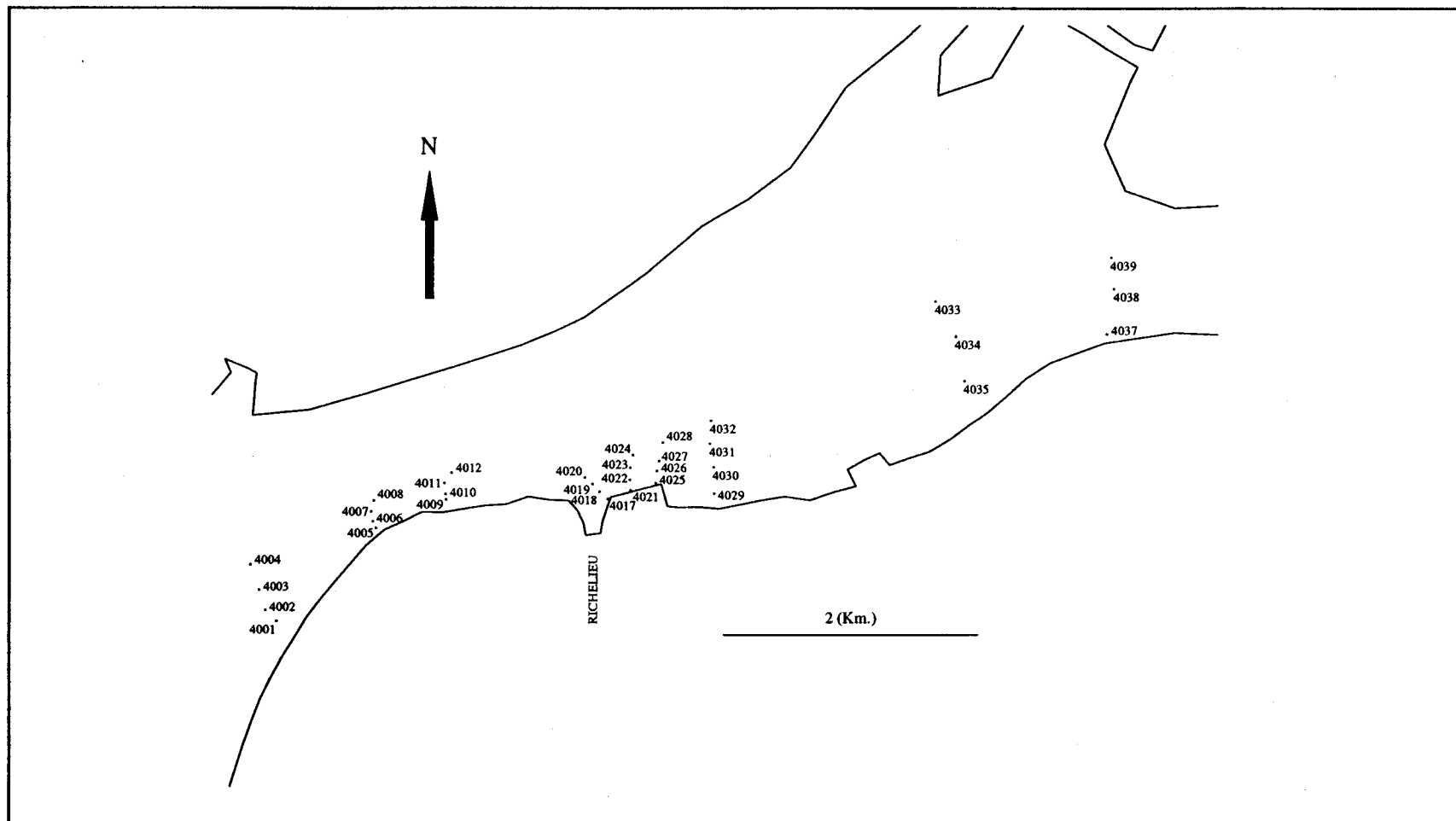


Figure 4.6 : Localisation des stations courantométriques de Roche - 11 septembre 1990



Tableau 4.8 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche (du 30 août 1990)

Point No	Vitesse (m/s)			Direction (degré)			Macrophytes (classe)
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart	
5001	0,367	0,512	0,145	42,3	47,0	4,7	14
5002	0,167	0,360	0,193	155,7	49,1	-106,6	14
5003	0,367	0,574	0,207	5,7	34,6	28,9	14
5004	0,000	0,246	0,246	30,7	22,6	-8,1	14
5005	0,427	0,433	0,006	25,7	24,8	-0,9	14
5006	0,050	0,461	0,411	19,0	39,1	20,1	14
5007	0,483	0,650	0,167	34,0	49,0	15,0	14
5008	0,333	0,376	0,043	37,3	48,8	11,5	14
5009	0,083	0,416	0,333	35,7	53,2	17,5	14
5010	0,717	0,704	-0,013	47,3	55,2	7,9	14
5011	0,150	0,446	0,296	19,0	52,4	33,4	14
5012	0,050	0,134	0,084	74,0	63,2	-10,8	1
5013	0,933	0,723	-0,210	50,7	48,8	-1,9	14
5015	0,050	0,100	0,050	69,0	33,6	-35,4	1
5016	0,633	0,631	-0,002	57,3	56,9	-0,4	14
5017	0,002	0,360	0,358	90,7	66,5	-24,2	14
5018	0,100	0,225	0,125	37,3	40,7	3,4	9
5019	0,050	0,149	0,099	7,3	45,0	37,7	9
5020	0,517	0,597	0,080	57,3	56,0	-1,3	14
5021	0,002	0,205	0,203	87,3	71,2	-16,1	1
5022	0,217	0,153	-0,064	54,0	58,2	4,2	3
5023	0,100	0,160	0,060	50,7	63,8	13,1	3
5024	0,630	0,595	-0,035	57,3	68,7	11,4	14
5025	0,002	0,157	0,155	70,7	73,6	2,9	4
5026	0,683	0,543	-0,140	72,3	72,2	-0,1	14
5027	0,100	0,158	0,058	50,7	67,1	16,4	3
5028	0,483	0,535	0,052	94,0	74,4	-19,6	14
5029	0,050	0,127	0,077	100,7	62,9	-37,8	3
5030	0,067	0,149	0,082	70,7	70,8	0,1	3
5031	0,133	0,140	0,007	70,7	68,3	-2,4	3

Tableau 4.8 (suite) Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche (du 30 août 1990)

Station	Niveau d'eau - RIGL (m)		
	Mesuré	Calculé	Écart
SOR (port de Sorel)	4,37	4,46	0,09
PSF (Port Saint-François)	3,46	3,46	0,00



Tableau 4.9 Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche (du 30 septembre 1990)

Point No	VITESSE (m/s)			Direction (degré)			Macrophytes (classe)
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart	
4001	0,250	0,476	0,226	354,0	34,8	40,8	14
4002	0,533	0,535	0,002	19,0	33,2	14,2	14
4003	0,333	0,589	0,256	47,3	39,9	-7,4	14
4004	0,450	0,637	0,187	22,3	42,6	20,3	14
4005	0,400	0,485	0,085	72,3	61,8	-10,5	14
4006	0,450	0,535	0,085	62,3	62,3	0,0	14
4007	0,533	0,589	0,056	60,7	63,1	2,4	14
4008	0,467	0,636	0,169	54,0	63,8	9,8	14
4009	0,500	0,529	0,029	70,7	69,0	-1,7	14
4010	0,583	0,587	0,004	75,7	68,8	-6,9	14
4011	0,417	0,641	0,224	60,7	69,5	8,8	14
4012	0,333	0,684	0,351	65,7	71,1	5,4	14
4017	0,057	0,213	0,156	204,0	16,9	172,9	14
4018	0,117	0,245	0,128	47,3	45,6	-1,7	14
4019	0,167	0,223	0,056	354,0	37,3	43,3	14
4020	0,150	0,240	0,090	35,7	57,2	21,5	14
4021	0,083	0,225	0,142	94,0	75,4	-18,6	14
4022	0,150	0,243	0,093	72,3	74,0	1,7	14
4023	0,383	0,378	-0,005	55,7	73,8	18,1	14
4024	0,450	0,448	-0,002	72,3	74,8	2,5	14
4025	0,133	0,162	0,029	77,3	76,3	-1,0	14
4026	0,350	0,339	-0,011	79,0	79,3	0,3	14
4027	0,367	0,371	0,004	77,3	77,4	0,1	14
4028	0,383	0,440	0,057	60,7	74,8	14,1	14
4029	0,300	0,251	-0,049	79,0	107,0	28,0	14
4030	0,300	0,299	-0,001	74,0	78,3	4,3	14
4031	0,383	0,380	-0,003	67,3	70,5	3,2	14
4032	0,483	0,492	0,009	77,3	72,9	-4,4	14
4033	0,667	0,652	-0,015	75,7	75,7	0,0	14
4034	0,567	0,593	0,026	67,3	76,6	9,3	14
4035	0,267	0,337	0,070	67,3	66,7	-0,6	14
4037	0,467	0,618	0,151	54,7	75,9	21,2	14
4038	0,925	0,901	-0,024	84,0	84,1	0,1	14
4039	0,783	0,814	0,031	89,0	94,1	5,1	14

Tableau 4.9 (suite) Comparaison des résultats du modèle avec les mesures de la campagne du Groupe Roche du (30 septembre 1990)

Station	Niveau d'eau - RIGL (m)		
	Mesuré	Calculé	Écart
SOR (port de Sorel)	4,36	4,45	0,09
LSP (lac Saint-Pierre)	3,92	3,97	0,05
PSF (Port Saint-François)	3,55	3,55	0,00



4.6 Conclusion

Les quatre événements qui ont servi à la calibration et à la validation ont permis d'évaluer la performance du modèle *HYDREAU* à reproduire les conditions d'écoulement à 183 points de mesure. Le modèle a été en mesure de prédire les vitesses de courants d'une façon adéquate pour 70% des points (écart < 0,1 m/s) et de façon acceptable pour 19% des points (écart entre 0,1 et 0,2 m/s). Des écarts significatifs ont été notés pour à peine plus de 10% des points de contrôle (> 0,2 m/s). La plupart des écarts importants entre les vitesses mesurées et celles calculées sont dus aux particularités du milieu (quai, reverseurs, chenaux secondaires, confluents de rivières, région en bordure des champs de macrophytes) dont la complexité dépasse souvent la finesse de résolution du modèle hydrodynamique.

L'exactitude des prédictions ponctuelles du modèle semble diminuée légèrement lorsque les caractéristiques du milieu (événement du 30 août) sont compliquées par les interactions entre différentes masses d'eau et par la présence de chenaux secondaires dans les champs de macrophytes.

Par ailleurs, la justesse de prédiction du modèle *HYDREAU* est plus marquée pour les événements de validation correspondant à une période de sénescence des macrophytes (événements du 2 au 7 novembre) ou à une zone non-colonisée par les plantes aquatiques (événement du 11 septembre).

Les débits calculés par le modèle se comparent bien avec les débits reconstitués. Donc, les résultats de la calibration et de la validation indiquent que le modèle hydrodynamique *HYDREAU* est en mesure de reproduire de façon acceptable l'écoulement dans le tronçon Tracy-Lac Saint-Pierre.



5 SIMULATIONS REPRÉSENTATIVES

5.1 Objectifs et approche

Les simulations hydrodynamiques effectuées dans le cadre de ce projet nécessitaient la sélection d'un ensemble d'*événements de référence* qui sont représentatifs des différents régimes d'écoulement du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre. Un événement de référence est caractérisé par une combinaison de certains facteurs dynamiques (variables dans le temps) significatifs déterminant le comportement hydrodynamique à divers moments de l'année. Cinq facteurs physiques externes ou internes au milieu ont été retenus pour définir la gamme des principaux événements possibles:

- *le débit du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Sorel;*
- *le débit des principaux affluents (rivières Richelieu, Saint-François et Yamaska);*
- *la croissance des macrophytes;*
- *la vitesse et la direction du vent.*

Le choix de ces facteurs repose sur une expérience de la modélisation acquise lors des applications dans des milieux très divers et sur la démarche qui a été conduite au chapitre 3 concernant la sensibilité des données de base. De plus, l'objectif ultime du projet étant l'analyse de la qualité de l'eau du tronçon, cet aspect a également joué un rôle dans le choix des événements.

Quoique la présence d'un couvert de glace en hiver représente un facteur aussi important que ceux mentionnés ci-haut pour comprendre l'hydrodynamique du tronçon en cette saison, seule la période d'eau libre a été retenue dans la présente étude. Le choix, à priori, de modéliser la période d'eau libre est pertinent parce que c'est au cours de cette période que les impacts des rejets toxiques sur le milieu aquatique risquent d'être les plus significatifs. C'est pendant la période d'eau libre que les usages sont très nombreux. Concernant la période sous couvert de glace, des développements ultérieurs du modèle permettront à celui-ci de tenir compte de cet aspect.

La procédure de sélection des événements de référence s'est déroulée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, la probabilité d'occurrence pour une période-cible des facteurs combinés a été établie et les événements les plus probables ont été sélectionnés. Dans un second temps, d'autres



événements ont été ajoutés dans le but de mieux définir l'influence individuelle de certains facteurs sur la propagation des masses d'eau dont quelques uns ont été retenus parce qu'ils sont probablement critiques dans la problématique de la contamination.

Nous avons simulé la période estivale et avons poursuivi avec les événements du printemps. La période printanière ayant des caractéristiques hydrologiques différentes de la période estivale, nous avons alors établi des classes différentes pour tenir compte de ces particularités.

5.2 Événements simulés

Pour déterminer de façon objective les événements les plus représentatifs de l'hydrodynamique (événements de référence), la probabilité d'occurrence d'un ensemble de combinaisons de facteurs a été estimée en utilisant un échantillon de données historiques. La méthode employée est celle des tableaux de fréquence qui consiste à dénombrer systématiquement le nombre de fois que chaque événement s'est produit historiquement. Cette analyse statistique, qui a l'avantage d'être simple et naturelle pour estimer les probabilités d'occurrence, a permis de dégager parmi l'ensemble des événements observés historiquement, ceux ayant la plus grande probabilité d'occurrence donc la meilleure représentativité.

La section 5.2.1 contient une brève description des données utilisées dans cette étude. A la section 5.2.2, les événements possibles (combinaison de facteurs) sont définis en effectuant sur les données un codage permettant de diviser chaque variable, ou facteur, en classes. La méthodologie nous permettant d'associer à chaque événement une probabilité d'occurrence est également expliquée dans cette section. Les résultats obtenus de cette manière sont présentés à la section 5.2.3. La dernière section est une présentation de la gamme d'événements ayant été effectivement retenus en tenant compte de la représentativité et également des objectifs complémentaires de l'étude.

5.2.1 Données utilisées

L'échantillon de données est sélectionné en fonction de la *disponibilité simultanée* de valeurs mesurées pendant une période donnée. Les séries utilisées sont limitées à la période où le fleuve est libre de glace pour les raisons mentionnées précédemment. Plus précisément, nous nous sommes limités à l'intervalle du 2 mars au 30 septembre. Cet intervalle a été divisé en période printanière et estivale en fonction d'une délimitation naturelle des régimes hydrologiques (débits) particuliers de ces deux saisons. La définition de ces périodes est donnée au tableau 5.1. La période estivale



a ultérieurement été redivisée en 3 sous-périodes correspondant aux divers stades de croissances des macrophytes. Les statistiques descriptives des données sur le débit et sur le vent pour ces deux périodes sont présentées au chapitre 3.

Tableau 5.1 Définition des saisons de référence pour la détermination des événements

Saison hydrologique	Période (date)	Période (jours juliens)	Durée (jours)
Printemps	[02/03 au 31/05]	61 à 151	91
Été	[01/06 au 30/09]	152 à 273	122

Pour tenir compte des macrophytes, c'est le taux de croissance qui a été introduit dans l'analyse. Cette variable est catégorique (spécifiée par classe) et est définie d'après l'expertise de biologistes spécialisés sur ces aspects. Quoique les périodes caractéristiques de croissance puissent varier d'une espèce à l'autre (section 3.3, Macrophytes), elles ont été regroupées globalement de la façon telle que présentée au tableau 5.2. Cette discrétisation de la courbe de croissance des macrophytes en assure une bonne représentativité (Figure 4.1) tout en ne multipliant pas de façon exagéré le nombre d'événements possibles (section 5.2.2)

Tableau 5.2 Définition globale de la variable taux de croissance des macrophytes au lac Saint-Pierre

Pourcentage de croissance	Coefficient $c(t)$ utilisé	Période correspondante (date)	Durée (jours)
État latent	0,0	[02/03 au 31/05]	91
(0% à 20%)	0,1	[01/06 au 15/06] et [22/09 au 30/09]	24
(21% à 80%)	0,5	[16/06 au 15/07] et [01/09 au 21/09]	51
(81% à 100%)	0,9	[16/07 au 31/08]	48

5.2.2 Définition de la gamme d'événements possibles

La méthode des tableaux de fréquences pour estimer la probabilité d'occurrence d'un événement donné consiste tout simplement à dénombrer le nombre de fois que la combinaison de facteurs correspondante est observée dans les données historiques. En divisant ce nombre par la taille de l'échantillon, nous avons obtenu une estimation de la probabilité d'observer un tel événement.



Avant d'appliquer cette méthode, un ensemble d'événements théoriquement possibles, compte tenu des différents facteurs retenus, a été défini. Pour ce faire, les variables de type continu (débit ainsi que la vitesse et la direction du vent) ont été transformées en variables de type catégorique. Par exemple, la variable débit peut être transformée de façon à n'admettre que trois valeurs possibles: un débit faible, moyen ou fort. Une fois ces variables divisées en classes, les facteurs ont été combinés les uns avec les autres pour définir une gamme d'événements possibles. Le dénombrement est ensuite effectué sur un ensemble de données historiques en identifiant pour chacune des journées quelle combinaison a été effectivement produite.

Variables catégoriques Les variables débit, vitesse du vent et direction du vent ont donc été transformées en variables catégoriques. Pour ce faire, un codage sur les données a été effectué en considérant trois classes quasi-équiprobables pour les variables de débit pour la saison estivale. La période printanière présentant évidemment des débits beaucoup plus importants que durant la période estivale, trois classes distinctes de débits équiprobables ont également été définies pour représenter les crues printanières. Le tableau 5.3 donne pour chacune des variables les bornes de chaque classe ainsi formée. Les variables vitesse et direction du vent ont été divisées en deux et trois classes respectivement par les spécialistes de l'INRS-Eau selon leur expertise (Tableau 5.4). L'intensité du vent à partir de laquelle on perçoit une influence sur l'écoulement a été utilisée afin de fixer les bornes sur la vitesse du vent. L'orientation des vents dominants sur le lac Saint-Pierre ont servi de base dans le choix des bornes de la direction du vent.



Tableau 5.3 Définition des bornes des variables catégoriques de débit

Variables	Classe	PRINTEMPS			ÉTÉ		
		Bornes	Fré	Fré %	Bornes	Fré	Fré%
Débit Saint-Laurent (m ³ /s)	Faible	7880 - 11100	267	32,6	8500 - 10150	350	31,9
	Moyen	11100 - 14100	271	33,1	10150 - 11310	373	34,0
	Fort	14100 - 19800	281	34,3	11310 - 16400	375	34,2
	Total		819	100		1098	100
Débit Richelieu (m ³ /s)	Faible	171 - 623	273	33,3	80 - 227	365	33,2
	Moyen	623 - 906	277	33,8	227 - 445	364	33,2
	Fort	906 - 1293	269	32,8	445 - 949	369	33,6
	Total		819	100		1098	100
Débit St-François (m ³ /s)	Faible	49 - 243	272	33,2	25 - 89	363	33,0
	Moyen	243 - 554	274	33,5	89 - 160	364	33,2
	Fort	554 - 1966	273	33,3	160 - 1233	371	33,8
	total		819	100		1098	100
Débit Yamaska (m ³ /s)	Faible	12 - 94	273	33,3	7 - 20	365	33,2
	Moyen	94 - 205	274	33,5	20 - 42	365	33,2
	Fort	205 - 1465	272	33,2	42 - 913	368	33,5
	total		819	100		1098	100

Tableau 5.4 Définition des bornes des variables catégoriques concernant le vent

Variables	Classe	Bornes	Fréquence Printemps	Fréquence Été
Vitesse du vent (km/h)	Nulle ou faible	0 - 10	176	413
	Moy. à forte	11 et plus	283	376
Direction du vent	N-E	0 - 100	146	127
	S-O	180 - 280	169	413
	N-O	autres	144	249

Note: les catégories de taux de croissance des macrophytes sont celles données au tableau 5.2.



Gamme d'événements possibles En considérant les variables catégoriques des tableaux 5.3 et 5.4, la gamme d'événements possibles pour la période estivale, tout comme pour la période printanière, est de 486 combinaisons distinctes de facteurs. Ce grand nombre d'événements possibles, typique d'une explosion combinatoire, peut causer quelques problèmes lors de l'estimation des probabilités d'occurrence. En effet, la méthode risque d'attribuer aux différents événements des probabilités presque égales et qui tendent vers zéro. Il serait alors difficile de dégager de cet ensemble les événements de référence. De plus, il en résulterait une multiplication inconsidérée du nombre d'événements devant faire l'objet de simulations hydrodynamiques.

Pour pallier à ce problème, une réduction du nombre de variables s'impose en tenant compte de la corrélation entre celles-ci. Pour l'été, 63 % des observations des débits de la Yamaska et de la Saint-François se retrouvent simultanément dans la même classe. La variable débit de la rivière Yamaska qui est corrélée significativement avec la variable débit de la rivière Saint-François (0,66 pour la saison estivale) a donc été éliminée de cette analyse. Cette bonne corrélation signifie que ces deux affluents admettent des débits proportionnels (en général appartenant à la même classe), ce qui justifie le retrait de cette analyse de la rivière Yamaska. Toutefois, il est à noter que la variable continue d'être prise en compte pour les simulations; la valeur choisie dépend alors de celle retenue pour la rivière Saint-François puisque les deux appartiendront à la même classe.

L'ensemble est donc réduit à 162 événements possibles résultant du croisement des variables catégoriques: débit du Saint-Laurent, débit du Richelieu, débit du Saint-François, vitesse du vent et direction du vent (Tableaux 5.3 et 5.4). Pour la saison estivale, il faut toutefois ajouter le facteur de croissance des macrophytes. De façon à ne pas augmenter le nombre d'événements possibles pour la saison estivale, nous avons décidé d'estimer les probabilités d'occurrence en divisant la période étudiée selon le taux de croissance des macrophytes. Ainsi, trois probabilités sont attribuées aux 162 événements, chacune d'elle correspondant à une des classes de la variable taux de croissance des macrophytes définie à la section précédente (Tableau 5.2).

5.2.3 Estimation des probabilités d'occurrence des événements

Les résultats obtenus par la méthode des tableaux de fréquences sont présentés dans cette section. Les probabilités d'occurrence estimées des événements observés parmi les 162 possibles pour la saison estivale sont données aux tableaux 5.5, 5.6 et 5.7 pour les trois classes de taux de croissance



des macrophytes. Les probabilités observées pour la période printanière sont données au tableau 5.8. Les événements d'été ayant fait l'objet d'une simulation sont signalés par un x sont cartographiés dans l'Atlas de courants.

Tableau 5.5 Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 0 à 20%

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FORT	SUD-OUEST	FORT	FORT	25 x	15,43
FORT	FAIBLE	FORT	FORT	14 x	8,64
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	11 x	6,79
FORT	FAIBLE	FORT	MOYEN	9 x	5,56
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FORT	8 x	4,94
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	7 x	4,32
MOYEN	FAIBLE	FORT	MOYEN	6	3,70
FORT	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	6	3,70
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	6 x	3,70
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	5	3,09
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	5	3,09
FORT	NORD-OUEST	FORT	FORT	4	2,47
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FORT	4 x	2,47
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	4	2,47
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	FORT	4	2,47
FORT	NORD-EST	FORT	FORT	3	1,85
FAIBLE	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	3	1,85
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	FORT	3	1,85
FORT	NORD-EST	FORT	MOYEN	2	1,23
FORT	FAIBLE	MOYEN	FORT	2	1,23



Tableau 5.5 (suite) Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 0 à 20%

FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	2	1,23
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	2	1,23
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	FORT	2	1,23
MOYEN	FAIBLE	FORT	FORT	2	1,23
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	2	1,23
FAIBLE	SUD-OUEST	FORT	FAIBLE	2	1,23
FORT	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	2	1,23
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	2	1,23
MOYEN	NORD-EST	FORT	MOYEN	1	0,62
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,62
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	FORT	1	0,62
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FORT	1	0,62
FAIBLE	FAIBLE	FORT	FAIBLE	1	0,62
FAIBLE	NORD-EST	FORT	FAIBLE	1	0,62
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,62
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	MOYEN	1	0,62
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1	0,62
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	FORT	1	0,62
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	1	0,62
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1	0,62
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	1	0,62
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,62
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	1	0,62

¹ Estimation à partir des 162 observations retenues pour la période de croissance 0 à 20 %.



Tableau 5.6 Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 21 à 80%

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FORT	FAIBLE	FORT	FORT	22 x	6,73
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	18 x	5,50
FORT	SUD-OUEST	FORT	FORT	17 x	5,20
FORT	FAIBLE	FORT	MOYEN	16 x	4,89
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	15 x	4,59
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	14 x	4,28
FORT	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	13 x	3,98
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	11 x	3,36
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	11 x	3,36
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	10	3,06
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	10	3,06
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FORT	9	2,75
MOYEN	FAIBLE	FORT	FORT	9	2,75
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FORT	7	2,14
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	FORT	7	2,14
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	7	2,14
FORT	NORD-OUEST	FORT	FORT	6 x	1,83
FAIBLE	SUD-OUEST	FORT	FAIBLE	6	1,83
FORT	NORD-EST	FORT	FORT	6 x	1,83
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	6	1,83
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	5	1,53
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	5	1,53
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	4	1,22
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	4	1,22
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	4	1,22
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FORT	4	1,22
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	4	1,22
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	4	1,22
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	4	1,22
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	3	0,92
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	3	0,92
FORT	FAIBLE	MOYEN	FORT	3	0,92
FAIBLE	FAIBLE	FORT	MOYEN	3	0,92
FORT	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	3	0,92
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	3	0,92
FORT	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	3	0,92
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	FORT	3	0,92
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	3	0,92
MOYEN	NORD-EST	FAIBLE	FAIBLE	2	0,61
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	FAIBLE	2	0,61



Tableau 5.6 (suite) Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 21 à 80%

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	2	0,61
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	FORT	2	0,61
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	2	0,61
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	MOYEN	2	0,61
MOYEN	NORD-EST	FORT	MOYEN	2	0,61
FORT	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	2	0,61
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	FORT	2	0,61
MOYEN	FAIBLE	FORT	MOYEN	2	0,61
FAIBLE	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	2	0,61
FAIBLE	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	2	0,61
FORT	NORD-EST	FORT	MOYEN	1	0,61
FAIBLE	NORD-EST	MOYEN	MOYEN	1	0,31
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	1	0,31
FORT	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	1	0,31
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1	0,31
FORT	NORD-EST	FORT	FAIBLE	1	0,31
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1	0,31
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1	0,31
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	FORT	1	0,31
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	1	0,31
MOYEN	NORD-EST	FORT	FORT	1	0,31
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	MOYEN	1	0,31
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	1	0,31
FAIBLE	FAIBLE	FORT	FAIBLE	1	0,31
FORT	FAIBLE	FORT	FAIBLE	1	0,31
FORT	NORD-EST	MOYEN	FORT	1	0,31
FAIBLE	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1	0,31
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,31

¹ Estimation à partir des 327 observations retenues pour la période de croissance 21 à 80 %.



Tableau 5.7 Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 81 à 100 %

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	34 x	11,33
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	24 x	8
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	21 x	7
FORT	FAIBLE	MOYEN	FORT	18 x	6
FORT	FAIBLE	FORT	FORT	16 x	5,33
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	15 x	5
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	14 x	4,67
FORT	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	13 x	4,33
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	11	3,67
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	9	3
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	8	2,67
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	8	2,67
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	7	2,33
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	7	2,33
MOYEN	FAIBLE	FORT	FORT	6	2
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	6	2
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FORT	5	1,67
FORT	SUD-OUEST	FORT	FORT	5	1,67
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	4	1,33
FORT	FAIBLE	FORT	FAIBLE	4	1,33
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FORT	4 x	1,33
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	4	1,33
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	4	1,33
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	FORT	3	1
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	3	1
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	3	1
FORT	FAIBLE	FORT	MOYEN	3	1
FORT	NORD-OUEST	FORT	FORT	2	0,67
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	2	0,67
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	FORT	2	0,67
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	FORT	2	0,67
MOYEN	FAIBLE	FORT	MOYEN	2	0,67
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	2	0,67
FORT	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	2	0,67
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FORT	2	0,67
FORT	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	2	0,67
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	2	0,67
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	FORT	2	0,67



Tableau 5.7 (suite) Occurrence observée des événements estivaux pour un taux de croissance des macrophytes de 81 à 100%

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1	0,33
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,33
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1	0,33
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1	0,33
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	1	0,33
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	FORT	1	0,33
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	MOYEN	1	0,33
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	MOYEN	1	0,33
FORT	SUD-OUEST	FORT	FAIBLE	1	0,33
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	FAIBLE	1	0,33
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	FORT	1	0,33
FORT	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	1	0,33
FORT	NORD-EST	MOYEN	FORT	1	0,33
FAIBLE	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1	0,33
FORT	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	1	0,33
MOYEN	NORD-EST	FORT	FORT	1	0,33
FORT	NORD-EST	FORT	FORT	1	0,33
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1	0,33
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	FORT	1	0,33

¹ Estimation à partir des 300 observations retenues pour la période de croissance 81 à 100 %



Tableau 5.8 Occurrence observée des événements printaniers

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	37,0 x	8,1
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	36,0 x	7,8
MOYEN	FAIBLE	FORT	FORT	26,0 x	5,7
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	FAIBLE	25,0 x	5,4
MOYEN	FAIBLE	FORT	MOYEN	20,0 x	4,4
FORT	FAIBLE	FORT	FORT	18,0 x	3,9
FORT	SUD-OUEST	FORT	FORT	17,0 x	3,7
FORT	NORD-EST	FORT	FORT	17,0 x	3,7
FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	16,0 x	3,5
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	16,0 x	3,5
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	FORT	11,0 x	2,4
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	FORT	11,0	2,4
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	FORT	11,0	2,4
FAIBLE	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	10,0	2,2
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	FAIBLE	10,0 x	2,2
FORT	NORD-OUEST	FORT	FORT	10,0	2,2
FORT	FAIBLE	MOYEN	FORT	8,0	1,7
FAIBLE	NORD-EST	FAIBLE	MOYEN	8,0	1,7
MOYEN	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	8,0	1,7
FORT	FAIBLE	FORT	MOYEN	7,0	1,5
MOYEN	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	7,0	1,5
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	FORT	7,0	1,5
MOYEN	NORD-EST	FORT	MOYEN	7,0	1,5
FAIBLE	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	7,0	1,5
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	6,0	1,3
FORT	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	6,0	1,3
MOYEN	FAIBLE	FORT	FAIBLE	6,0	1,3
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	6,0	1,3
FORT	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	6,0	1,3
MOYEN	NORD-EST	FORT	FORT	6,0	1,3
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	5,0	1,1
MOYEN	SUD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	4,0	0,9
FORT	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	4,0	0,9
FORT	SUD-OUEST	FORT	MOYEN	4,0	0,9
MOYEN	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	4,0	0,9
FAIBLE	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	4,0	0,9
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	3,0	0,7
FAIBLE	SUD-OUEST	MOYEN	MOYEN	3,0	0,7
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	MOYEN	3,0	0,7
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FORT	3,0	0,7



Tableau 5.8 (Suite) Occurrence observée des événements printaniers

Débit St-Laurent (m ³ /s)	Vent (intensité et direction)	Débit Richelieu (m ³ /s)	Débit St-François- Yamaska (m ³ /s)	Fréquence d'observation	Probabilité estimée ¹
FORT	NORD-OUEST	FORT	MOYEN	3,0	0,7
FAIBLE	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	3,0	0,7
FORT	NORD-EST	MOYEN	FORT	2,0	0,4
MOYEN	FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	2,0	0,4
FAIBLE	NORD-EST	FORT	FAIBLE	2,0	0,4
FORT	NORD-EST	FORT	MOYEN	2,0	0,4
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	MOYEN	2,0	0,4
MOYEN	NORD-OUEST	FORT	FAIBLE	2,0	0,4
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	2,0	0,4
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	FORT	2,0	0,4
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	2,0	0,4
FAIBLE	FAIBLE	FORT	FAIBLE	1,0	0,2
MOYEN	NORD-EST	FORT	FAIBLE	1,0	0,2
FAIBLE	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1,0	0,2
FAIBLE	SUD-OUEST	FORT	FAIBLE	1,0	0,2
MOYEN	NORD-OUEST	MOYEN	MOYEN	1,0	0,2
FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FAIBLE	1,0	0,2
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	MOYEN	1,0	0,2
FORT	NORD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1,0	0,2
FORT	SUD-OUEST	MOYEN	FAIBLE	1,0	0,2
MOYEN	NORD-EST	MOYEN	FAIBLE	1,0	0,2
MOYEN	NORD-EST	FAIBLE	FORT	1,0	0,2
MOYEN	NORD-OUEST	FAIBLE	FAIBLE	1,0	0,2

¹ Estimation à partir des 459 observations retenues pour la période printanière.



5.2.4 Choix des événements

Critères Il faut noter que le choix des événements de référence vise à représenter à la fois les événements les plus fréquents et les événements les plus rares mais qui présentent un intérêt majeur considérant l'effet anticipé de cet événement dans la problématique de contamination. Ainsi, deux critères ont présidé au choix des événements de référence pour fins de simulation: 1) la représentativité des événements basée sur la probabilité d'occurrence et, 2) les besoins d'interprétation en fonction de la problématique de contamination.

Dans un premier temps, un ensemble d'événements a été retenu dans le but de représenter environ 50% des situations observées pour la période estivale sur le lac Saint-Pierre. Le gain de représentativité est de plus en plus faible à mesure qu'on ajoute des événements. Dans les faibles probabilités, les événements représentés ne constituent souvent que des situations transitoires entre deux états plus stables. C'est pourquoi, à partir de ce seuil de 50%, il est préférable de faire intervenir d'autres critères pour continuer la sélection d'événements.

Pour les besoins d'interprétation, l'analyse de la contamination est le principal élément à considérer. C'est pourquoi, les conditions d'étiage ont été retenues en raison de la contamination qu'elles provoquent d'autant plus que ces événements possèdent une grande représentativité. Par ailleurs, en fixant toutes les variables sauf une, certaines interprétations de type "*analyse de sensibilité*" peuvent être menées pour montrer l'effet relatif des différentes variables. Le débit du fleuve et des tributaires ainsi que le vent et l'état des macrophytes en font partie.

Paramètres de simulation Le tableau 5.9 montre les valeurs retenues pour définir les variables des événements pour les simulations. La valeur de chaque débit utilisé pour les simulations est la médiane correspondante à chacune des classes, donc celle qui départage en deux parties égales la probabilité des événements. Le débit de la rivière Nicolet utilisé pour l'ensemble des simulations est un débit moyen typique. Les valeurs retenues pour le vent et les macrophytes ont été choisies par les spécialistes de l'INRS-eau (sections 5.2.1: Données utilisées et 5.2.2: Définition de la gamme d'événements possibles).

Les conditions aux limites sont de même type que celles utilisées pour la calibration et la validation du modèle (section 4.3.2: Conditions aux limites). Les niveaux d'eau en amont en aval ont été imposés pour obtenir le débit voulu pour le fleuve Saint-Laurent tout en respectant les dénivellations définies à la section 3.6.6 (Relations niveau-débit aux extrémités du modèle). Les débits qui



transitent sur les revoirs et dans le Chenal du Nord étaient établis en fonction du niveau d'eau imposé à l'amont en utilisant les relations définies aux sections 3.4.2 (Relations niveau-débit sur les revoirs) et 3.5 (Chenal du Nord)

La viscosité turbulente, les coefficients de Manning des macrophytes et du substrat utilisés sont évidemment ceux définis dans la calibration et la validation (sections 4.4.1: Coefficient de Manning du substrat (n_p), 4.4.2: Coefficient de Manning des macrophytes (n_m) et 4.4.3: Viscosité turbulente).

Les simulations ont été effectuées sur une station de travail de type SUN SPARK/2 équipée d'une mémoire vive de 64 mégaoctets et de trois disques rigides (100, 200 et 600 mégaoctets). La station offre des performances de l'ordre de 28,5 mips et de 4,2 Mégaflops. Il faut compter environ 12 minutes de temps machine, soit l'équivalent de 20 minutes environ de temps réel, par itération lorsqu'il n'y pas d'autres applications activées dans la machine. Il faut 5 ou 6 itérations, soit l'équivalent de 2 heures en temps réel, pour obtenir une solution convergée. Les travaux de préparation des fichiers en vue d'une utilisation par le logiciel *PANACHE* et du calcul de la fonction-courant nécessitent environ 6 minutes supplémentaires.

Plusieurs simulations ont été nécessaires pour établir les conditions aux limites qui ont permis d'obtenir le débit recherché pour le fleuve Saint-Laurent.



Tableau 5.9 Valeurs des variables catégoriques pour définir les événements de référence

Variable	Classe	Valeur simulée	
		Printemps	Été
Débit Saint-Laurent (m³/s)	Faible	10 100	9 240
	Moyen	12 500	10 700
	Fort	15 200	12 000
Débit Richelieu (m³/s)	Faible	488	172
	Moyen	799	315
	Fort	1 037	613
Débit Saint-François (m³/s)	Faible	173	59
	Moyen	373	120
	Fort	888	250
Débit Yamaska (m³/s)	Faible	60	15
	Moyen	137	28
	Fort	367	82
Débit Nicolet (m³/s)		30	30
Vitesse du vent (km/h)	Nulle ou faible	0	0
	Moy. à forte	21.6 (6 m/s)	21.6 (6 m/s)
Direction du vent	Nord-Est	45°	45°
	Sud-Ouest	225°	225°
	Nord-Ouest	315°	315°
Macrophytes c(t)	Printemps	0%	-
	Minimum	-	10%
	Moyen	-	50%
	Maximum	-	90%

Codification des événements Nous avons attribué aux événements simulés un code de désignation qui a été utilisé dans les planches de l'annexe et dans l'Atlas des courants (document annexe). Le code a également servi à définir le nom des fichiers de résultats livrés au CSL. Le code est formé de cinq champs de la façon suivante:



NNN_A_A_N_AA

où,

N: un caractère numérique;

A: un caractère alphabétique.

Les champs désignent respectivement le débit du fleuve, ceux des rivières Richelieu, Yamaska et Saint-François (classe unique pour représenter simultanément ces deux dernières), l'état des macrophytes et la valeur du vent. Le tableau 5.10 montre les codes utilisés pour chacun des champs ainsi que leur signification.

Tableau 5.10 Codification utilisée dans l'attribution des noms des événements

	Champ	Code utilisé	Valeur ou classe simulée
•1	<i>NNN</i>	<i>092</i>	9 240
	Débit	<i>107</i>	10 700
	Saint-Laurent	<i>120</i>	12 000
	(comprenant le Richelieu)	<i>***</i>	<i>*** 00</i> (Débit quelconque)
•2	<i>A</i>	<i>P</i>	petit (faible)
	Débit Richelieu	<i>M</i>	moyen
		<i>G</i>	grand (fort)
•3	<i>A</i>	<i>P</i>	petit (faible)
	Débit Yamaska - Saint-François	<i>M</i>	moyen
		<i>G</i>	grand (fort)
•4	<i>N(A)</i>	<i>0</i>	0%
	Macrophytes	<i>1</i>	10%
		<i>5</i>	50%
		<i>9</i>	90%
		<i>M(aximum)</i>	100%
•5	<i>AA</i>	<i>V(ent) N(ul, faible)</i>	0 km/h
	Vent	<i>SO</i>	S.-O. à 21.6 km/h
		<i>NE</i>	N.-E. à 21.6 km/h
		<i>NO</i>	N.-O. à 21.6 km/h



Exemple A titre d'exemple, l'événement *092_M_M_5_VN* représente un débit du fleuve faible, des débits moyens des tributaires, des macrophytes à mi-croissance et un vent nul ou faible.

Représentativité globale des événements retenus Le tableau 5.11 regroupe toutes les simulations effectuées pour les périodes printanière et estivale, et donne la probabilité d'occurrence observée et cumulée, calculée sur la période complète (214 jours). Les tableaux 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 et 5.16 présentent, de façon séparée, la liste des événements qui ont fait l'objet de simulations pour la période printanière ainsi que pour les trois périodes de croissance de macrophytes en été. La probabilité de chaque événement a été calculée sur la période représentative de la simulation puis sur la période complète combinant celles du printemps et de l'été en fonction du nombre d'observations et du nombre de jours que compte la période représentative de la simulation. Les tableaux présentent ces probabilités ainsi que leur valeurs cumulées. Comme il peut être constaté, les derniers événements ajoutent une faible contribution à la représentativité globale. Un code de désignation a été attribué à chacun des événements pour fin d'archivage et de cartographie (section 5.2.4: Codification des événements).

La plupart des événements ont été retenus pour leur représentativité. Certains événements ont été simulés en dépit de leur faible représentativité pour compléter les ensembles des simulations nécessaires pour montrer l'effet relatif de certaines variables. Ainsi, les événements 120GG5NO, 120GG5NE, malgré leur représentativité relativement faible, ont été choisis afin de vérifier l'influence du vent. L'événement 092PG9VN a été choisi en vue de vérifier l'influence des débits des rivières Saint-François et Yamaska.



Tableau 5.11 Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (périodes estivale et printanière combinées, 214 jours)

Événement	Nombre d'observations	Probabilité observée Probabilité cumulée	
		sur toute la période en % (214 jours)	
101PP0VN	37	3,43	3,43
101PP0SO	36	3,34	6,76
092PP9VN	34	2,54	9,31
125GG0VN	26	2,41	11,71
101PP0NE	25	2,32	14,03
125GM0VN	20	1,85	15,88
092PP9S0	24	1,79	17,68
120GG1S0	25	1,73	19,41
152GG0VN	18	1,67	21,08
120GG5VN	22	1,60	22,68
152GG0SO	17	1,57	24,25
152GG0NE	17	1,57	25,83
107MM9VN	21	1,57	27,40
101PM0VN	16	1,48	28,88
101PP0NO	16	1,48	30,36
120MG9VN	18	1,35	31,71
107PP5VN	18	1,31	33,02
120GG5SO	17	1,24	34,26
120GG9VN	16	1,20	35,46
120GM5VN	16	1,17	36,62
107MM9SO	15	1,12	37,74
092PP5VN	15	1,09	38,84
107MP9VN	14	1,05	39,88
092MP5SO	14	1,02	40,90
125GG0SO	11	1,02	41,92
120MM9VN	13	0,97	42,90
120GG1VN	14	0,97	43,86
120GM5SO	13	0,95	44,81
125GP0SO	10	0,93	45,74
107MP5VN	11	0,80	46,54
092MP5VN	11	0,80	47,34
092PM1VN	11	0,76	48,10
120GM1VN	9	0,62	48,73
092PG1VN	8	0,55	49,28
092PP1VN	7	0,48	49,76
120GG5NO	6	0,44	50,20
120GG5NE	6	0,44	50,64
107PP1VN	6	0,42	51,05
092PG9VN	4	0,30	51,35
107MG1VN	4	0,28	51,63
101GG0VN	0	0,00	51,63

Note: la définition du code d'événement est donnée à la section 5.2.4 (Choix des événements).



Tableau 5.12 Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (période estivale avec facteur de croissance $c(t) = 0.1$)

Événement	Nombre d'observations	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)
		sur la période représentative (24 jours)		sur toute la période (214 jours)	
120GG1S0	25	15,43	15,43	1,73	1,73
120GG1VN	14	8,64	24,07	0,97	2,70
092PM1VN	11	6,79	30,86	0,76	3,46
120GM1VN	9	5,56	36,42	0,62	4,08
092PG1VN	8	4,94	41,36	0,55	4,64
092PP1VN	7	4,32	45,68	0,48	5,12
107PP1VN	6	3,70	49,38	0,42	5,54
107MG1VN	4	2,47	51,85	0,28	5,82

Tableau 5.13 Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (période estivale avec facteur de croissance $c(t) = 0.5$)

Événement	Nombre d'observations	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)
		sur la période représentative (51 jours)		sur toute la période (214 jours)	
120GG5VN	22	6,73	6,73	1,60	1,60
107PP5VN	18	5,50	12,23	1,31	2,92
120GG5SO	17	5,20	17,43	1,24	4,15
120GM5VN	16	4,89	22,32	1,17	5,32
092PP5VN	15	4,59	26,91	1,09	6,41
092MP5SO	14	4,28	31,19	1,02	7,43
120GM5SO	13	3,98	35,17	0,95	8,38
107MP5VN	11	3,36	38,53	0,80	9,18
092MP5VN	11	3,36	41,90	0,80	9,98
120GG5NO	6	1,83	43,73	0,44	10,42
120GG5NE	6	1,83	45,57	0,44	10,86



Tableau 5.14 Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (période estivale avec facteur de croissance $c(t) = 0.9$)

Événement	Nombre d'observations	sur la période représentative (48 jours)		sur toute la période (214 jours)	
		Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)
092PP9VN	34	11,33	11,33	2,54	2,54
092PP9S0	24	8,00	19,33	1,79	4,34
107MM9VN	21	7,00	26,33	1,57	5,91
120MG9VN	18	6,00	32,33	1,35	7,25
120GG9VN	16	5,33	37,67	1,20	8,45
107MM9S0	15	5,00	42,67	1,12	9,57
107MP9VN	14	4,67	47,33	1,05	10,62
120MM9VN	13	4,33	51,67	0,97	11,59
092PG9VN	4	1,33	53,00	0,30	11,89

Tableau 5.15 Liste des événements sélectionnés avec leur probabilité d'occurrence (période printanière)

Événement	Nombre d'observations	sur la période représentative (91 jours)		sur toute la période (214 jours)	
		Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)	Probabilité observée (%)	Probabilité cumulée (%)
101PP0VN	37	8,06	8,06	3,43	3,43
101PP0S0	36	7,84	15,90	3,34	6,76
125GG0VN	26	5,66	21,57	2,41	9,17
101PP0NE	25	5,45	27,02	2,32	11,49
125GM0VN	20	4,36	31,37	1,85	13,34
152GG0VN	18	3,92	35,29	1,67	15,01
152GG0NE	17	3,70	39,00	1,57	16,58
152GG0S0	17	3,70	42,70	1,57	18,16
101PM0VN	16	3,49	46,19	1,48	19,64
101PP0NO	16	3,49	49,67	1,48	21,12
125GG0S0	11	2,40	52,07	1,02	22,14
125GP0S0	10	2,18	54,25	0,93	23,07
101GG0VN	0	0,00	54,25	0,00	23,07



5.3 Résultats hydrodynamiques

La modélisation hydrodynamique permet de connaître, partout sur le domaine, le niveau d'eau et la vitesse des courants qui sont les inconnus du problème. D'autres résultats tels la profondeur, la fonction-courant et la diffusivité peuvent être obtenus, comme nous l'avons vu, par post-traitement. Les contraintes de fond peuvent également être extraites pour des fins sédimentologiques, mais un tel traitement sortirait de notre mandat présent.

Pour des raisons de commodités et pour rendre l'interprétation des résultats plus indépendante de l'*Atlas des courants*, qui est produit dans le format 29,7 x 42 cm, une sélection des résultats les plus significatifs est présentée dans les 32 planches de l'annexe I. Pour une analyse plus approfondie, le lecteur pourra se référer à l'*Atlas* lui-même, où tous les événements de la période estivale simulés ont été regroupés. Comme mentionné au début du rapport, l'annexe I a été produite en grande partie avec les ressources de visualisation de *PANACHE*, alors que l'*Atlas des courants* l'a été avec *SPANS*. Les données *SPANS* sont sous le format *Quadtree*, donc accessibles à d'autres formes de modélisation utilisant ce Système d'Information Géographique (*SIG*).

5.3.1 Profondeurs et niveaux d'eau

La profondeur est obtenue en calculant localement la différence entre le niveau de la surface de l'eau et la cote du fond (bathymétrie). Les mises en garde données pour la bathymétrie à la section 4.2.2 (Bathymétrie discrétisée) s'appliquent également à la profondeur. Compte tenu de la précision de la bathymétrie utilisée pour caractériser les battures, les zones de découverture obtenues par le modèle se doivent d'être considérées comme une simple indication du phénomène. On note qu'en observant les profondeurs du lac Saint-Pierre, il n'est pas possible de localiser précisément le Passage Nord et le Passage Sud. L'amorce de ces passages peut être observée à l'entrée du lac Saint-Pierre, mais dans le lac lui-même, il n'y a pas de découpage très net des profondeurs d'eau pour les chenaux secondaires comme le démontrent les planches No 11 et No 12 de l'annexe. Un exemple a aussi été présenté pour un événement dans l'*Atlas des courants*.

Le niveau d'eau représente la ligne d'énergie au sein du domaine. Elle est donnée par rapport au système de référence RIGL. La planche No 13 de l'annexe I illustre le niveau de surface. Comme on peut l'observer, des ruptures de niveau apparaissent dans le delta de Sorel à la hauteur des réservoirs No 1, No 2 et No 3. Ces discontinuités sont tout-à-fait normales puisqu'il y a une perte



de charge locale importante au niveau de ces seuils et que ceux-ci ont été modélisés en utilisant des impositions du type débit de part et d'autre de l'ouvrage. Tout comme pour la profondeur, le logiciel *PANACHE* permet de visualiser ce résultat.

5.3.2 Courants - Vecteurs

Sur la planche No 14, les vitesses de courants sont représentées par des vecteurs. Cette représentation est la plus classique des approches utilisées pour visualiser les courants. La longueur d'un vecteur ainsi que sa couleur représente la vitesse du courant, et son orientation est conforme à la direction de l'écoulement. Les vecteurs-courants permettent de visualiser la trajectoire empruntée par l'eau sur l'ensemble du domaine. Ce résultat peut être visualisé tel quel à l'aide du logiciel *PANACHE*; de plus, celui-ci permet d'ajuster l'échelle des couleurs de même que l'échelle des flèches. Les couloirs de débit représentent une alternative plus efficace pour apprécier la direction des courants. Par contre les vecteurs-courants ont le mérite d'indiquer en plus la force du courant.

Les vitesses calculées par le modèle est une valeur moyenne sur la verticale. Dans les zones occupées par les macrophytes, les vitesses calculées peuvent être sous-estimées par rapport aux vitesses réelles parce qu'une partie de la colonne d'eau peut ne pas contribuer à l'écoulement. C'est la responsabilité de l'utilisateur d'interpréter les résultats dans les zones de macrophytes. Actuellement, les connaissances acquises sur les macrophytes du lac Saint-Pierre ne permettent pas d'appliquer un facteur de correction sur les vitesses calculées dans les zones de macrophytes.

5.3.3 Courants - Module de la vitesse

Le module de la vitesse représente la force des courants sans la direction. Cette variable forme un champ continu contrairement aux vecteurs qui sont des informations nodales. Les cartes montrant le module de la vitesse permettent d'apprécier les régions où les courants sont les plus forts. Des discontinuités causées par les impositions en débit peuvent apparaître dans le champ de vitesse au niveau des réservoirs. En considérant les incertitudes quant aux relations niveaux-débits sur les réservoirs ainsi que les imprécisions entourant la bathymétrie discrétisée dans les différents bras secondaires du delta de Sorel, l'incertitude sur les vitesses obtenues dans ces régions est plus grande qu'ailleurs.



Le module de la vitesse a été tracé pour la plupart des événements et se retrouve dans l'*Atlas des courants*. Les planches 15 à 29 de l'annexe illustrent le module de la vitesse pour différents événements. Une mise en garde doit être apportée sur la validité des vitesses à l'embouchure de la Yamaska et de la Saint-François obtenue pour un événement de printemps avec ces deux rivières en crues (événement 101GG0VN). Pour des débits de cette importance, la plaine d'inondation est mise à contribution pour transiter le débit de ces rivières. Le maillage n'ayant pas été conçu pour tenir compte de la plaine d'inondation, la section utile pour transiter le débit s'en trouve diminuée. Les vitesses calculées sont alors forcément plus élevées qu'en réalité. La zone affectée est strictement localisée à l'embouchure des rivières Yamaska et Saint-François et n'affecte en rien le reste de la simulation.

5.3.4 Fonction-courant - Couloirs de débit - Masses d'eau

La fonction-courant a été imposée sur la rive sud du domaine en fonction des débits des tributaires pour les diverses simulations. Tel que mentionné à la section 2.6.2 (Fonction-courant), le noeud le plus en aval sur la rive sud du domaine s'est vu imposer la valeur zéro.

La plupart des événements simulés ont vu leur fonction-courant reproduite dans l'*Atlas des courants*. La classification des masses d'eau utilisée dans l'Atlas a été choisie afin de mettre en évidence la zone d'influence de chaque tributaire. Les petits trous existant dans le couloir de la rivière St-François dans l'Atlas des courants sont le résultat de légers contre-courants en rive sud ou de la procédure de lissage de la fonction-courant. Le vent du nord-est favorise les contre-courants et amplifie ces trous.

A part les couloirs représentant les différents tributaires, les classes de débit du fleuve ont été partagées en intervalles égaux. Il est alors facile d'interpréter l'importance du débit à un endroit en fonction de l'emprise de chaque bande. Ainsi, les bandes sont beaucoup plus étroites dans le chenal maritime signe que le débit transité à cet endroit est plus important qu'ailleurs.

La largeur occupée par la masse d'eau provenant d'un tributaire dépend en grande partie du débit de celui-ci. Plus le débit du tributaire est important, plus l'espace occupé à partir de la rive sera grand, repoussant ainsi les eaux provenant du cours d'eau récepteur vers le centre. L'étude de la distribution des masses d'eau permet de connaître la provenance de l'eau à tout point du domaine



en supposant qu'il n'y ait aucun mélange des eaux. Un exemple de la fonction-courant est donné à la planche No 30. La fonction-courant peut également être consultée par l'entremise du logiciel *PANACHE*.

5.3.5 Diffusivité

De façon générale, les fortes diffusivités se retrouvent dans le chenal maritime en raison des grandes profondeurs et des fortes vitesses présentes à cet endroit. L'indice de diffusivité augmente légèrement dans les méandres et en bordure des différents chenaux d'écoulement parce que ces endroits présentent des gradients de vitesse importants. Dans le lac Saint-Pierre, le milieu est faiblement diffusif si on exclut le chenal maritime et, dans une moindre mesure, les passages secondaires. Pour ce qui est du delta de Sorel, la diffusion y est importante dans le chenal maritime et un peu moins dans les bras secondaires. Les confluents ou l'embouchure des tributaires peuvent causer des augmentations locales de diffusivités. Les deux composantes de la diffusivité, fond et cisaillements latéraux, peuvent être visualisées à l'aide du logiciel *PANACHE*. L'indice de diffusivité est donné aux planches No 31 et No 32 pour l'événement 107MP5VN.

5.4 Analyse des résultats

Dans ce qui suit, nous allons mettre en évidence l'influence de certains facteurs tels les macrophytes, le vent, les tributaires et les reversoirs du delta sur l'écoulement dans le tronçon étudié et ce après avoir présenté les structures courantométriques majeures du tronçon.

5.4.1 Structures courantométriques

Dans tout le domaine étudié et quel que soit l'événement, les vitesses les plus élevées sont associées aux grandes profondeurs lesquelles se retrouvent dans le chenal maritime. Ces vitesses varient autour de 1 m/s selon les événements simulés. Les vitesses dans le chenal maritime sont légèrement plus grandes dans la partie amont du tronçon (delta de Sorel) que dans le lac Saint-Pierre. Au centre du lac Saint-Pierre, une légère diminution des vitesses est observée conjointement avec un agrandissement du couloir des vitesses élevées associé au chenal maritime. Ce phénomène est attribuable à la présence d'une aire d'ancrage pour les navires. Cette aire d'ancrage est bien visible sur les cartes bathymétriques ou sur la carte des profondeurs de l'*Atlas des courants*.



Quatres voies préférentielles d'écoulement sont présentes à l'entrée du lac Saint-Pierre. Celle située au nord-ouest est due au Chenal du Nord qui rejoint le lac à cet endroit. Elle se poursuit à l'intérieur du lac pour former ce qui a été appelé le Passage Nord. A l'entrée sud-ouest du lac, deux voies préférentielles d'écoulement se détachent du chenal maritime provenant du delta de Sorel. Une profondeur plus grande à ces endroits mais qui ne persiste pas très loin (2 à 3 km) à l'intérieur du lac explique ce phénomène. De ces deux voies, celle qui est plus au sud se poursuit plus ou moins clairement dépendant de l'état de croissance des macrophytes pour former le Passage Sud. L'autre se termine graduellement avec la diminution des profondeurs. La dernière voie préférentielle, la plus importante, est évidemment celle du chenal maritime.

Sur le lac Saint-Pierre, en dehors du chenal maritime et des chenaux secondaires, les vitesses obtenues par le modèle hydrodynamique sont presque toujours inférieures à 0,3 m/s. Les planches No 15 à No 29 présentent le module de la vitesse sur le lac Saint-Pierre obtenu pour différentes simulations à l'exception des planches No 17, No 22, No 27 et No 29 qui portent sur le tronçon Traçy - Delta de Sorel.

5.4.2 Influence des macrophytes

La présence des macrophytes entraîne obligatoirement un rehaussement du niveau d'eau pour transiter le même débit. La figure 5.1 illustre bien ce phénomène. Le débit passant par les reervoirs étant déterminé par le niveau d'eau, un rehaussement du niveau d'eau dû aux macrophytes fait transiter une fraction plus importante du débit par les reervoirs. Le bras du delta contenant le chenal maritime équilibre ce phénomène en diminuant le débit, pour un niveau d'eau plus élevé, avec une modification de la ligne d'énergie. Cette situation est illustrée à la figure 5.2.

Lorsqu'ils ont atteint une certaine degré de croissance, les champs de macrophytes entravent considérablement l'écoulement des eaux. Le Passage Nord et le Passage Sud, qui ne sont pas colonisés par les macrophytes, deviennent alors des voies préférentielles d'écoulement et se révèlent très visibles par l'entremise du champ de vitesses. Les résultats de la modélisation démontrent que les vitesses dans ces passages secondaires, pour un débit du fleuve comparable, augmentent de 20 à 30% lorsque le coefficient $c(,)$ passe de 0,1 à 0,9. En fonction du débit du fleuve, les vitesses calculées dans les passages secondaires, à mi-chemin du lac Saint-Pierre, varient typiquement de 0,3 à 0,4 m/s lorsque le coefficient $c(,)$ est à 0,1 et de 0,4 à 0,5 m/s pour un coefficient $c(,)$ fixé à 0,9. Les planches No 15, No 16, No 18 et No 19 de l'annexe illustrent ces propos.

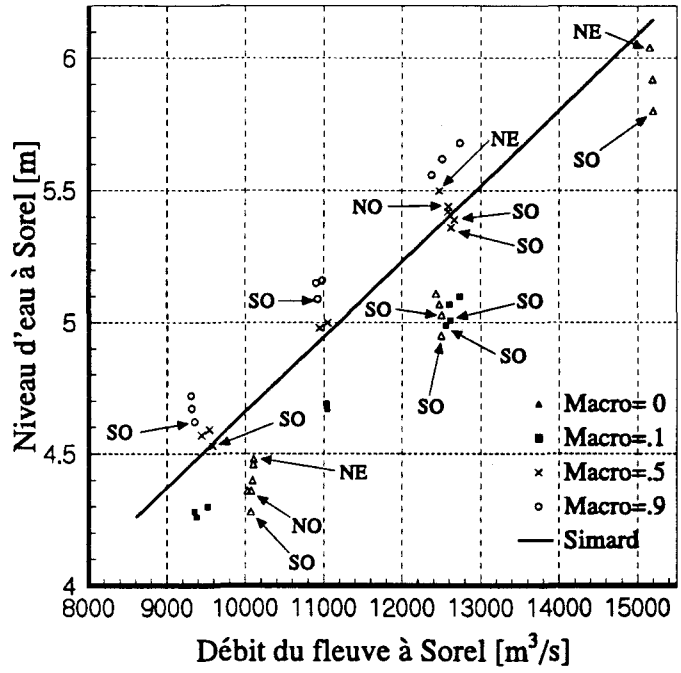


Figure 5.1
Niveaux d'eau à Sorel obtenus pour les différentes simulations

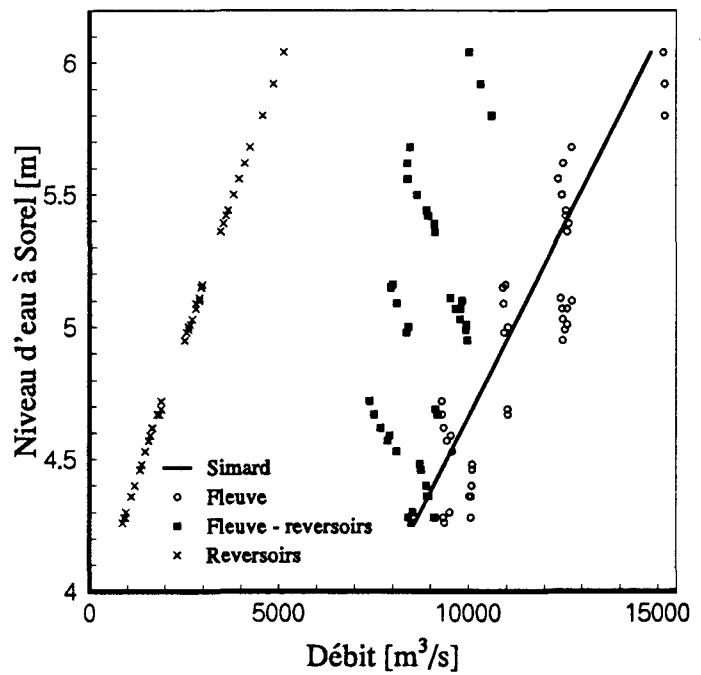


Figure 5.2
Influence des macrophytes sur les débits des reversoirs et du fleuve Saint-Laurent à Sorel (Richelieu inclus)



5.4.3 Influence des tributaires

Les tributaires ont une influence sur le niveau d'eau requis pour transiter un débit sur le Saint-Laurent. Les tributaires peuvent également avoir une influence sur la diffusivité. Les embouchures des tributaires ou les sites de confluence des cours d'eau sont des lieux pouvant présenter de forts gradients de vitesse et par le fait même de fortes diffusivités. Ceci est particulièrement vrai pour la rivière Richelieu qui présente une grande profondeur ainsi que de grandes vitesses à son entrée dans le Saint-Laurent; à l'embouchure, son écoulement accomplit une rotation d'environ 90° en se fusionnant dans l'inertie du fleuve (Planches No 14, No 31 et No 32). Le confluent du Chenal des Barques et du chenal maritime ainsi que celui du Chenal aux Corbeaux et du Grand Chenal avec le chenal maritime sont les autres endroits présentant de fortes diffusivités en raison des forts gradients d'inertie des écoulements à leur rencontre.

Les rivières Yamaska et Saint-François se jettent dans le lac Saint-Pierre à un endroit où les vitesses et les profondeurs sont de beaucoup inférieures à celles observées à l'endroit où le Richelieu rejoint le fleuve. De plus, le changement de direction de l'écoulement de ces deux rivières à leur entrée dans le fleuve Saint-Laurent, se fait beaucoup plus graduellement que dans le cas de la rivière Richelieu. La diffusivité engendrée par les rivières Yamaska et Saint-François est donc très inférieure à celle produite par la rivière Richelieu.

5.4.4 Influence des reervoirs

Les reervoirs deviennent beaucoup plus actifs lorsque le débit du fleuve Saint-Laurent est important. Le débit transité par les reervoirs peut représenter de 10% à 30% du débit du fleuve lorsque le débit passe des classes faibles aux classes fortes telles que définies dans le choix des événements de référence. Le pourcentage du débit du fleuve passant par les reervoirs dépend également de l'état de croissance des macrophytes et de la sollicitation du vent.

5.4.5 Influence du substrat

L'influence du substrat sur l'écoulement de l'eau est relativement peu importante comparativement à l'influence des macrophytes. Les événements qui ont servi à la calibration et à la validation du modèle n'ont pas permis de mettre en évidence des différences importantes sur le frottement induit



par les trois groupes texturaux les plus fins. Par contre, le groupe à texture très grossière se démarque des autres. Un coefficient de Manning plus important a dû être employé afin de retrouver les vitesses mesurées dans les environs des zones de substrats très grossiers.

5.4.6 Influence du vent

Lorsqu'une sollicitation due au vent est imposée, le niveau d'eau est ajusté de façon parallèle aux conditions limites utilisées pour un événement identique sans vent de façon à obtenir le débit recherché. Un événement avec vent est simulé en utilisant une vitesse de 6 m/s (21,6 km/h). Les résultats de la modélisation indiquent qu'il faut rehausser de 6 à 12 cm le niveau d'eau pour obtenir un événement avec vent nord-est comparable en débit avec le même événement sans vent. Avec un vent sud-ouest, c'est un abaissement du niveau d'eau de 6 à 12 cm qui est requis tout dépendant des caractéristiques de l'événement simulé. En valeur relative, les deux extrêmes se distinguent donc par des différences de niveau de 12 à 24 cm. Aucune variation du niveau d'eau n'était nécessaire dans le cas d'une imposition d'un vent du nord-ouest. L'imposition de sollicitations dues au vent n'a entraîné aucun changement majeur dans les structures courantométriques obtenues (Planches No 23, No 24, No 25 et No 26).



6 CONCLUSIONS

Le modèle hydrodynamique par éléments finis *HYDREAU* a été employé avec succès sur le tronçon Tracy - lac Saint-Pierre pour représenter adéquatement les caractéristiques bidimensionnelles de l'écoulement. Des modifications ont été apportées au programme informatique pour répondre aux particularités du site et de l'étude. Un module qui tient compte de l'effet des macrophytes sur l'écoulement a été ajouté. La méthode de calcul de la fonction-courant a été améliorée et un indice de la diffusivité a été ajouté dans les résultats du modèle. La phase de calibration et de validation a permis d'ajuster les paramètres et de s'assurer de la validité des résultats hydrodynamiques obtenus.

Une procédure basée sur les tableaux de fréquences a été utilisée afin de choisir les événements de référence devant être simulés. Selon cette méthode, les événements simulés représentent environ 50% des situations possibles sur le tronçon pendant les périodes-cibles (printanières et estivales). Les événements simulés couvrent une gamme étendue de débit autant pour le fleuve que pour les principaux tributaires. Pour le fleuve Saint-Laurent, les débits simulés sont compris entre 9 240 et 15 200 m³/s. Pour les tributaires, les débits simulés varient de 172 à 1 037, de 59 à 888 et de 15 à 367 m³/s pour les rivières Richelieu, Saint-François et Yamaska respectivement. Les événements simulés tenaient compte du stade de croissance des macrophytes et de la présence de vent.

Les simulations ainsi que les mesures sur le terrain ont démontré l'influence considérable de la présence des macrophytes sur l'écoulement. Les passages secondaires du lac Saint-Pierre, qui sont pratiquement imperceptibles lorsque les macrophytes sont en phase latente, deviennent très visibles par l'intermédiaire des champs de vitesses lorsque les macrophytes ont atteint leur développement maximal. En plus de faire apparaître ces passages d'écoulement préférentiels dans le lac Saint-Pierre, la présence de macrophytes provoque un rehaussement du niveau d'eau requis pour transiter des débits semblables.

La présence de vent n'a pas modifié significativement les structures d'écoulement observées lors des simulations. Par contre, l'imposition d'un vent de 6 m/s (21,6 km/h) peut engendrer, dépendant de son orientation, une variation d'environ 10 cm sur le niveau d'eau en comparaison avec une simulation semblable mais sans vent.



La méthode utilisée dans le calcul de la diffusion a donné les résultats attendus. En effet, la formulation utilisée a permis de bien capter les variations de la diffusivité engendrées par les singularités présentes dans le milieu en se servant des gradients de vitesse obtenus à partir du modèle hydrodynamique. Les diffusivités obtenues sont conformes aux données tirées de la littérature reconnue.



7 BIBLIOGRAPHIE

- ARGUS (1990).** Cartographie des sédiments de fond du tronçon fluvial Tracy-Trois-Rivières. Rapport préliminaire. Argus Groupe-Conseil. 11 p. + annexes.
- Banks, R.B. (1975).** Some features of wind action on shallow lakes. ASCE, Journal of the Environmental Engineering Division, 101:EE5, 813.
- Boudreault, A., J.F. Bellemare, M. Leclerc et G. Shooner (1988).** Projet Sainte-Marguerite. Avant-projet - Phase 1. Etude des répercussions du détournement de la rivière Aux Pékans sur le saumon de la Moisie. Rapport sectoriel II présenté à la Direction Environnement d'Hydro-Québec par Gilles Shooner & Ass., 238 p. et annexes, (mai).
- Boudreault, A., J.F. Bellemare, M. Leclerc, L. Belzile et G. Shooner (1989).** Projet Sainte-Marguerite. Avant-projet phase I. Étude des répercussions du détournement de la rivière Aux Pékans sur les habitats Salmonicoles de la rivière Moisie. Rapport présenté à la Vice-Prés. Environnement Hydro-Québec par G. Shooner et Associés en collaboration avec INRS-Eau et TAO Simulations, 120 p. + 4 annexes.
- Boudreault, A., M. Leclerc, G. Shooner et coll. (1990).** Projet Sainte-Marguerite - Etude des répercussions du détournement de la rivière Aux Pékans sur le saumon et les utilisateurs de la rivière Moisie. Rapport synthèse à la Vice-présidence Environnement, Hydro-Québec, Octobre 1990, 149 p., 5 annexes.
- Brebbia, C.A. et P. Partridge (1976).** Finite element models for circulation studies. In: Brebbia [ed.], Mathematical models for environmental problems, Pentech Press, London.
- Carlier, M. (1980).** "Hydraulique générale et appliquée". Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France - Éd. Eyrolles, Paris.
- Cochet, J.F. (1979).** Modélisation d'écoulements stationnaires et non-stationnaires par éléments finis. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Compiègne (France).
- Connor, J.J. et J.D. Wang (1974).** Finite element modeling of hydrodynamic circulation. In: Brebbia, C.A. and J.J. Connor [eds.], Numerical methods in fluid dynamics, Pentech Press, London.
- Dhatt, G. et G. Touzot (1981).** Une présentation de la méthode des éléments finis. Maloine, Paris, Presses de l'université Laval, Québec.
- Dushenko, W.T., A. Crowder, et J. Greig. (1988).** Shoreline distribution of contaminants and submerged macrophytes in the Bay of Quinte, Ontario. In: M.J. Bardecki and N. Patterson (eds.) Proc. Conf. Wetlands: inertia or momentum. Toronto, Ontario: 377-384.



- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger et N.H. Brooks (1979).** Mixing in Inland and coastal Waters. Academic Press, Montréal. 483 p.
- Forrester, W.D. (1983).** Manuel canadien des marées. Min. des Pêches et Océans, Service hydrographique du Canada, Ottawa, Ontario.
- Fortin, G. (1990).** Cartographie des macrophytes par relevés d'échosondage et estimation de la biomasse, lac Saint-Pierre, Rapport intérimaire, Centre Saint-Laurent, 22 p.
- Fortin, G. et M. Leclerc (1991).** Distribution of Submerged Aquatic Vegetation by Echo-Sounder Tracings in Lake Saint-Pierre, Québec. Soumis au *Can. J. Aqu. Hal. Sc.* (octobre 1991).
- Grotkop, G. (1973).** Finite element analysis of long period waves. *Comp. Meth. in App. Res. and Eng.*, 2.
- Hardy, B., J. Bureau, L. Champoux et H. Sloterdijk (1989).** Caractérisation des sédiments de fond du lac Saint-Pierre - Fleuve Saint-Laurent. Division des apports toxiques, Direction écotoxicologique et écosystèmes, Centre Saint-Laurent, Conservation et protection, Environnement Canada. 58 p. et annexes.
- Hayeur, G., M. Leclerc et G. Shooner (1990).** Instream Flow Incremental Methodology: An efficient tool for the evaluation of the gain/loss of salmon habitat. Special Session of the Canadian Atlantic Fisheries Advisory Committee. Pêches et Océans Canada. Moncton, 30 avril - 4 mai 1990.
- Herrling, B. (1982).** Coupling of one and two-dimensional finite elements for the computation of tidal flow in estuaries. *Adv. Wat. Res.*, 5, Dec.
- Holtz, K.P. and G. Nitsche (1980).** Tidal wave analysis for estuaries with intertidal flats. Invited paper in: *Finite Elements in Water Resources*, Proceedings of the Third International Conference on F.E in Water Resources, University of Mississippi Press, Mississippi, USA.
- Hsu, S.A. (1975).** Wind stress and near shore and lagoonal waters of a tropical island. *Limn. and Ocean.*, 20(1):113.
- Kawahara, M. and T. Umetsu (1986).** Finite elements methods for moving boundary problems in river flows. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 6(6):365-386.
- Lapointe, D. (1983).** Zone inondables - Fleuve St-Laurent. Calcul des niveaux de récurrence 2,5,10,20,50 et 100 ans. Tronçon - Varennes - Grondines. Ministère de l'environnement, Rap. M-83-2
- Leclerc, M., J.F. Bellemare, J.L. Robert, G. Dhatt et coll. (1986).** Impacts potentiels sur le poulamon atlantique à la traversée du fleuve Saint-Laurent de la ligne Radisson/Nicolet/des Cantons: modélisation du milieu physique - Rapport complémentaire sur le recul de 50 m de l'extrémité de la jetée nord. Complément du rapport no TAO/HYD-86-02, INRS-Eau, rapport scientifique no 210.



- Leclerc, M., G. Dhatt, J.L. Robert, J.C. Tessier, A. Soulaïmani, P. Dupuis et Y. Matte (1987).** Modélisation des écoulements de l'Archipel de Montréal par éléments finis: aspects divers de l'application. *Rev. Int. Sc. Eau*, 3(2): 41-56.
- Leclerc, M., J.F. Bellemare, L. Desjardins, P. Dupuis et F. Parrot (1989).** Modélisation numérique des champs de vitesse d'écoulement en eau libre du tronçon aval de La Grande Rivière. Rapport TAO Simulation no 88-03. Pour la SEBJ, un rapport principal de 164 p. et 4 annexes, un volume de données complémentaires et un atlas de courants en 4 volumes.
- Leclerc, M., P. Boudreau et L. Belzile (1990a).** Etude d'impact d'avant-projet, phase 1, projet Ashuapmushuan - Modélisation numérique des habitats à ouananiche d'un tronçon représentatif (km68) de la rivière Ashuapmushuan. Pour le consultant principal Groupe Environnement Shooner Inc. et la Vice-présidence Environnement d'Hydro-Québec. Rapport scientifique INRS-Eau No RS-316. 65 p., 4 annexes.
- Leclerc, M., J.F. Bellemare et S. Trussard (1990b).** Simulation hydrodynamique de l'estuaire supérieur du fleuve Saint-Laurent (Canada) avec un modèle aux éléments finis couvrant-découvrant. *Rev. Can. Gén. Civ.* 17(5):739-751.
- Leclerc, M., G. Dumas, J.F. Bellemare et G. Dhatt (1990c).** A finite element model of estuarian and river flows with moving boundaries. *Advances in Water Resources*. 4(13):158-168.
- Leclerc, M., A. Boudreault, G. Corfa et B. Bobée (1991).** Instream flow incremental methodology and 2-D hydrodynamic modeling: efficient tools to determine guaranteed minimum flow for biological purposes. 2nd International Conference on Computer Methods and Water Resources - CMWR 91, Rabbat, Morocco, octobre 1991
- Lynch, D.R., and W.G. Gray (1978).** Finite element simulation of shallow water problems with moving boundaries. In: Proc. of the Second Int. Conf. on Fin. Elem. in Wat. Res., Pentech Press, London, July.
- Ottesen-Hansen, N.E. (1975).** Effect of wind stress on stratified deep lakes. *ASCE, J. Hyd. Div.*, 101(HY8), Aug.
- Ouellet, Y., P. Dupuis et A. Soulaïmani (1986).** Modélisation d'un écoulement tourbillonnaire en régime permanent. *J. Can. Gén. Civ.* (13):310-318
- Pêches et Océans Canada (1990, édition annuelle).** Table des marées et courants du Canada. Vol. 3: Fleuve Saint-Laurent et rivière Saguenay.
- Roche (1990).** Caractérisation de la diffusivité de l'écoulement pour deux sites du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre. Par le Groupe-Conseil ROCHE Ltée pour le compte de l'INRS-Eau et du Centre Saint-Laurent. No de projet ROCHE 10844, mai 1991. 27 p. et une annexe cartographique.
- Rodi, Wolfgang (1980).** Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review. Ed. AIRH-IAHR, Delft, The Netherlands. 104 p.



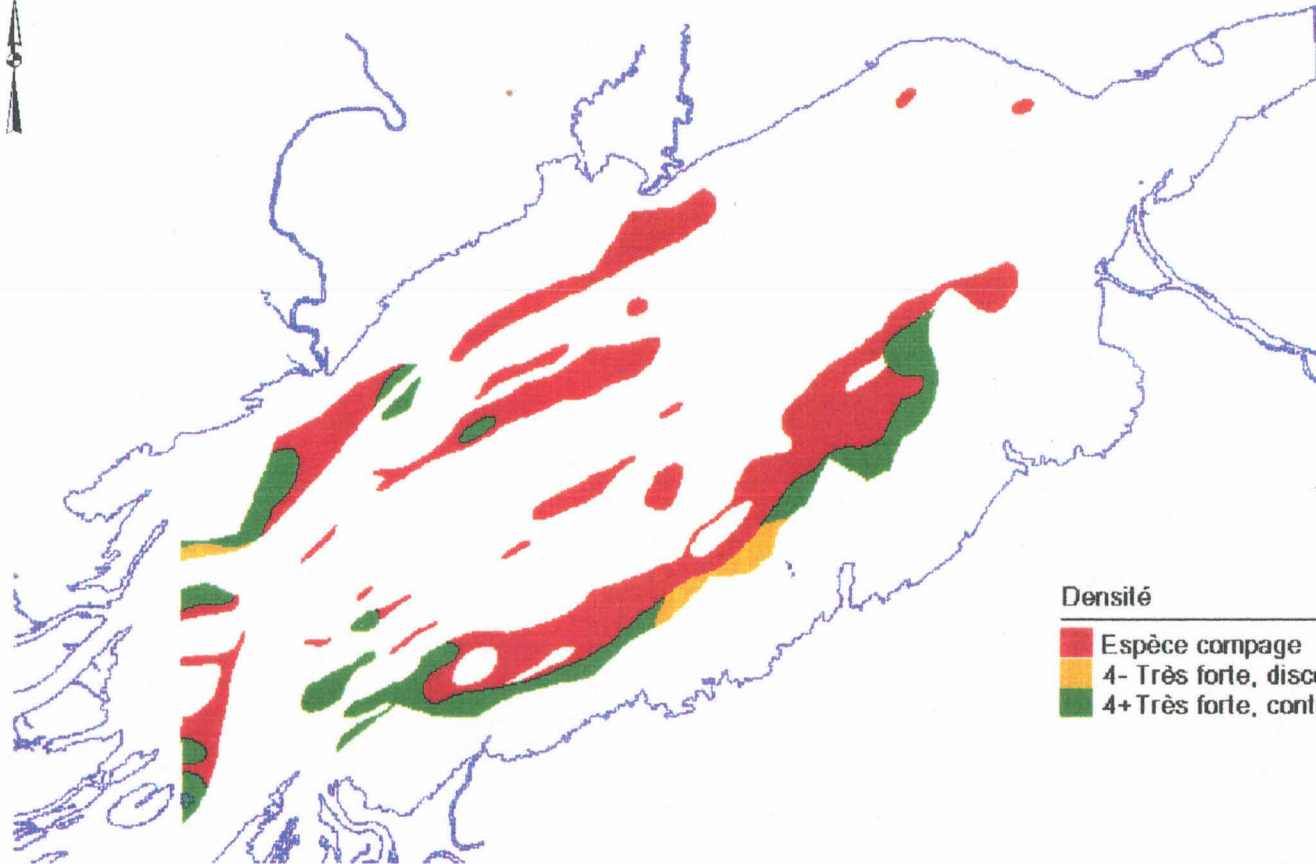
- Ruggles, K.W. (1970).** The vertical mean wind profile over the ocean from light to moderate winds. *J. Appl. Met.*, 9(3):389 June 1970.
- Saucet, J.F., G. K. Holder et R. Boivin (1988).** Evaluation des reervoirs de Sorel, Observations, relevés bathymétriques et modélisation numérique. Laboratoire d'hydraulique Lasalle. Rapport LHL-1018 présenté à Travaux Publics Canada.
- Sérodes, J.B. (1978).** Qualité des sédiments de fond du fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Montmagny. Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent. Direction régionale des eaux intérieures. Rapport technique No 15. 39 p. + annexes.
- Shanahan, P. et D.R.F. Harleman (1982).** Linked hydrodynamic and biogeochemical models of water quality in shallow lakes. Rep. No 268. Ralph Parson Laboratory, MIT, Boston. 279p.
- Simard, J. (1971).** Relevé des caractéristiques des roches et dépôts meubles de la vallée du Saint-Laurent. Ministère des Transports, Division du chenal maritime du Saint-Laurent. Montréal, Vol. I et II.
- Simard, L. (1982).** Etude du profil du Lac Saint-Pierre. Garde Côtière Canadienne. Région des Laurentides. Etudes hydrauliques. Montréal.
- Simard, L. (1987).** Perte d'élévation d'eau à Sorel due à l'usure des reervoirs. Garde Côtière Canadienne. Région des Laurentides. Etudes hydrauliques. Montréal.
- Soulaimani, A. (1985).** Nouveaux aspects de l'application de la méthode des éléments finis en hydrodynamique. Thèse de maîtrise, Dépt. de génie civil, Université Laval, Québec, Canada.
- Saint-Cyr et P.G.C. Campbell (1990).** Résultats de biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent, obtenus lors de l'échantillonnage du mois d'août 1990. Rapport d'étape No 1. INRS-Eau. Pour le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 78 p.
- Streeter, V.L. (1981).** Fluid Mechanics, McGraw-Hill Ryerson Limited, Canada, 562 p.
- Sydor, M. (1978).** Study of the two-Dimensional model of the Saint Lawrence River. Rapport Techn No 16 soumis au Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent par Water Planning and Management Branch, Environment Canada. Présenté dans: Oil Spill Modelling, Proceedings of a Workshop held in Toronto, Canada, Nov., 7-8, 1978. Published by: Inst. for Env. Stud., Univ. of Toronto, Pub. No EE-12, 199 p.
- Taylor, C. and J.M. Davis (1975).** Tidal and long wave propagation: a finite element approach. *Computer and Fluids*, 3.
- Thomson, R.E. (1984).** Océanographie de la côte de la Colombie-Britannique. Min. Pêches et Océans et Min. App. et Serv. Canada. Publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques, No 56:317p.
- Van Dorn, W.G. (1953).** Wind stress on artificial pond. *J. of Mar. Res.*, 12(3):249.



-
- Vigent, G. (1984).** Cartes Climatologiques du Saint-Laurent. (Fleuve et Golf) Environnement Canada. Service de l'environnement atmosphérique.
- Walters, R.A. and R.T. Cheng (1980).** Accuracy of an estuarine hydrodynamic model using smooth elements. *Wat. Res. Res.* **16**(1):187-195. Feb.
- Wilson, B.W. (1960).** Note on surface wind stress over water at low and high wind speeds. *J. Geoph. Res.*, 65(10):3377.
- Wu, J.(1969).** Wind stresses and surface roughness at air-sea interface. *J. of Geoph. Res.*, 74(2), jan.



ANNEXE I - PLANCHES



Densité




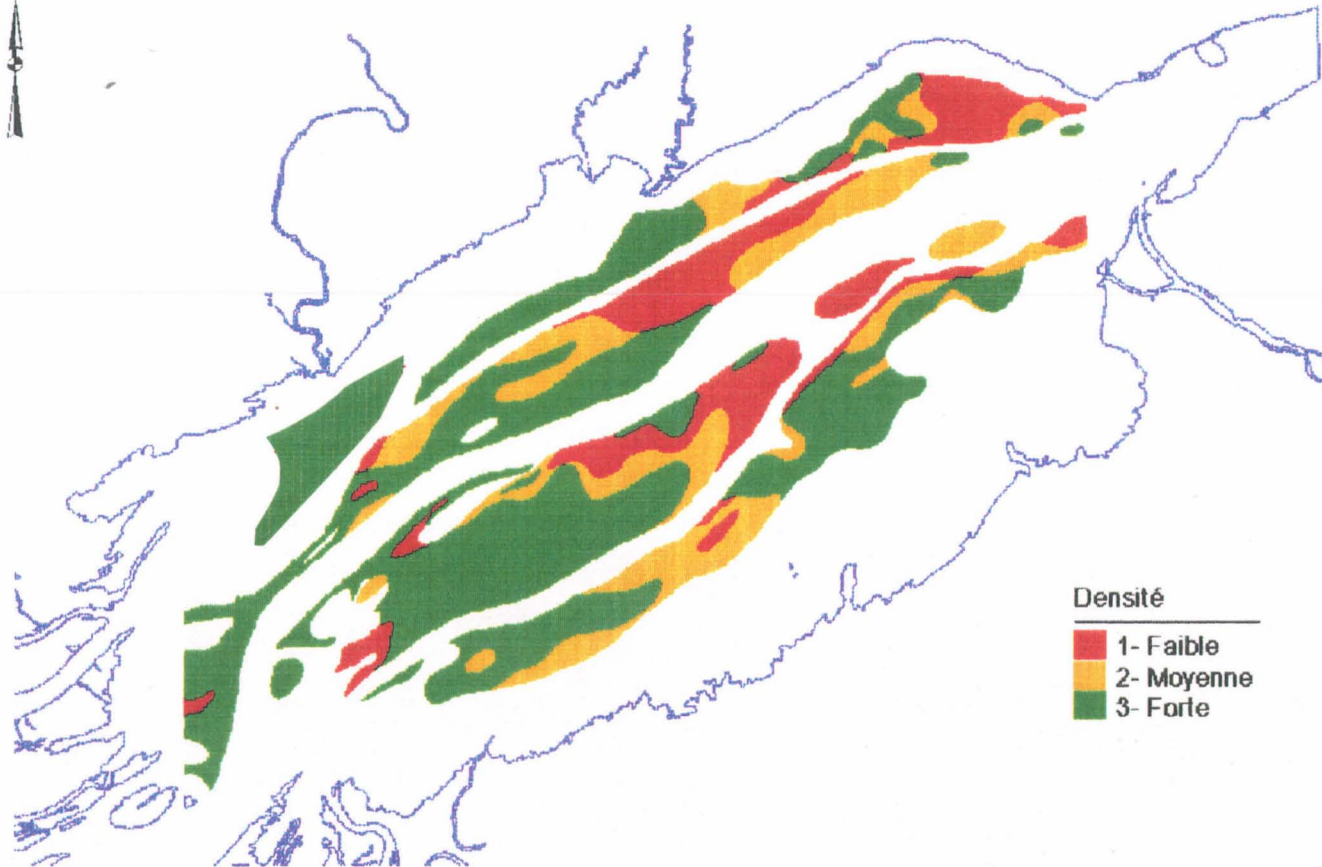
-  Espèce compage
-  4- Très forte, discontinue
-  4+ Très forte, continue



Planche #1 Distribution des macrophytes de densité 4+ et 4- principalement *Potamogeton*



Densité

- 1- Faible
- 2- Moyenne
- 3- Forte



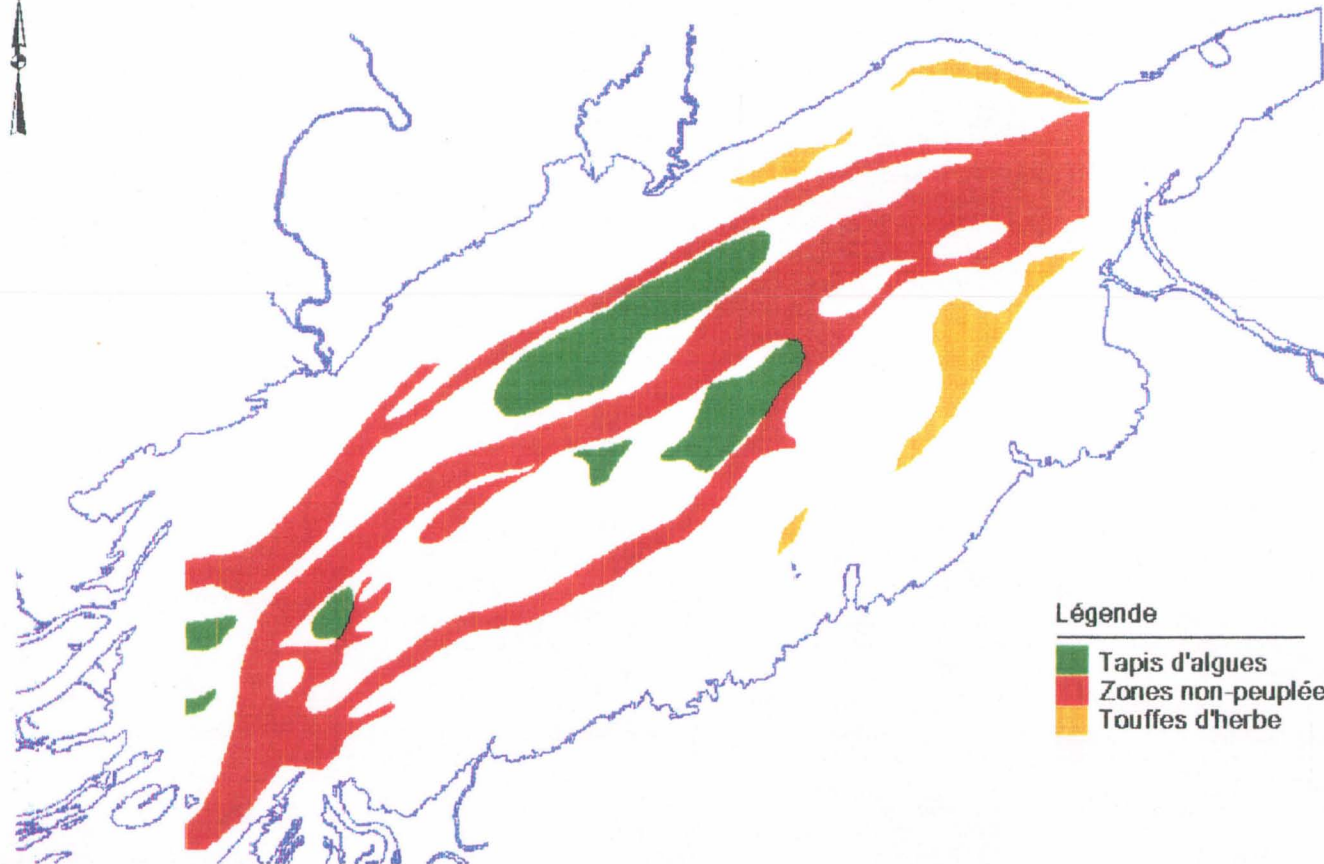
INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Planche #2 Distribution des macrophytes de densité 1,2 et 3 principalement *Vallisneria*






CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

147



Légende

-  Tapis d'algues
-  Zones non-peuplées
-  Touffes d'herbe

a/eau

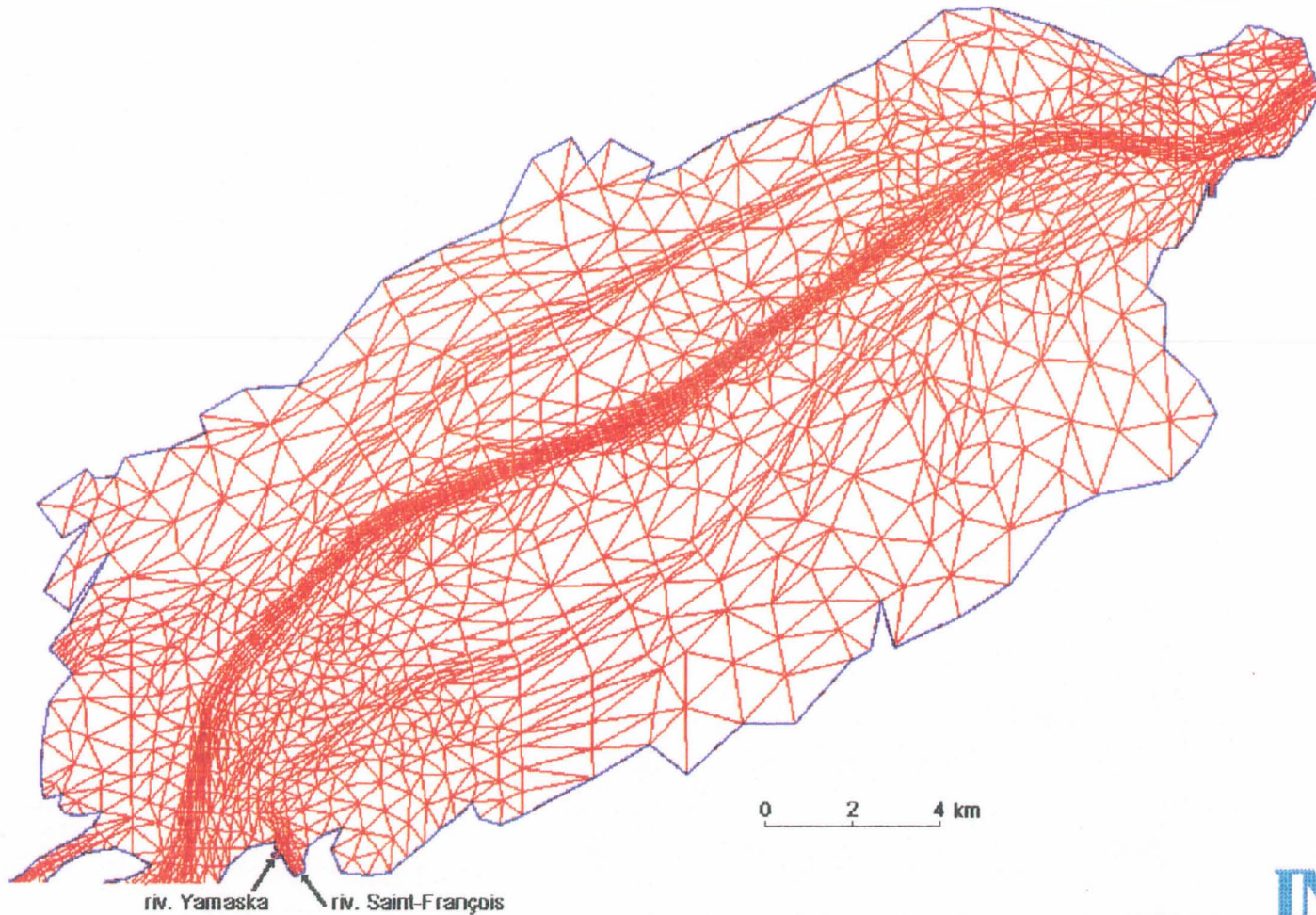
INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Planche #3 Distribution des macrophytes de fond (*Nitella*), zones non-peuplées et touffes d'herbes



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

148



AVEAU

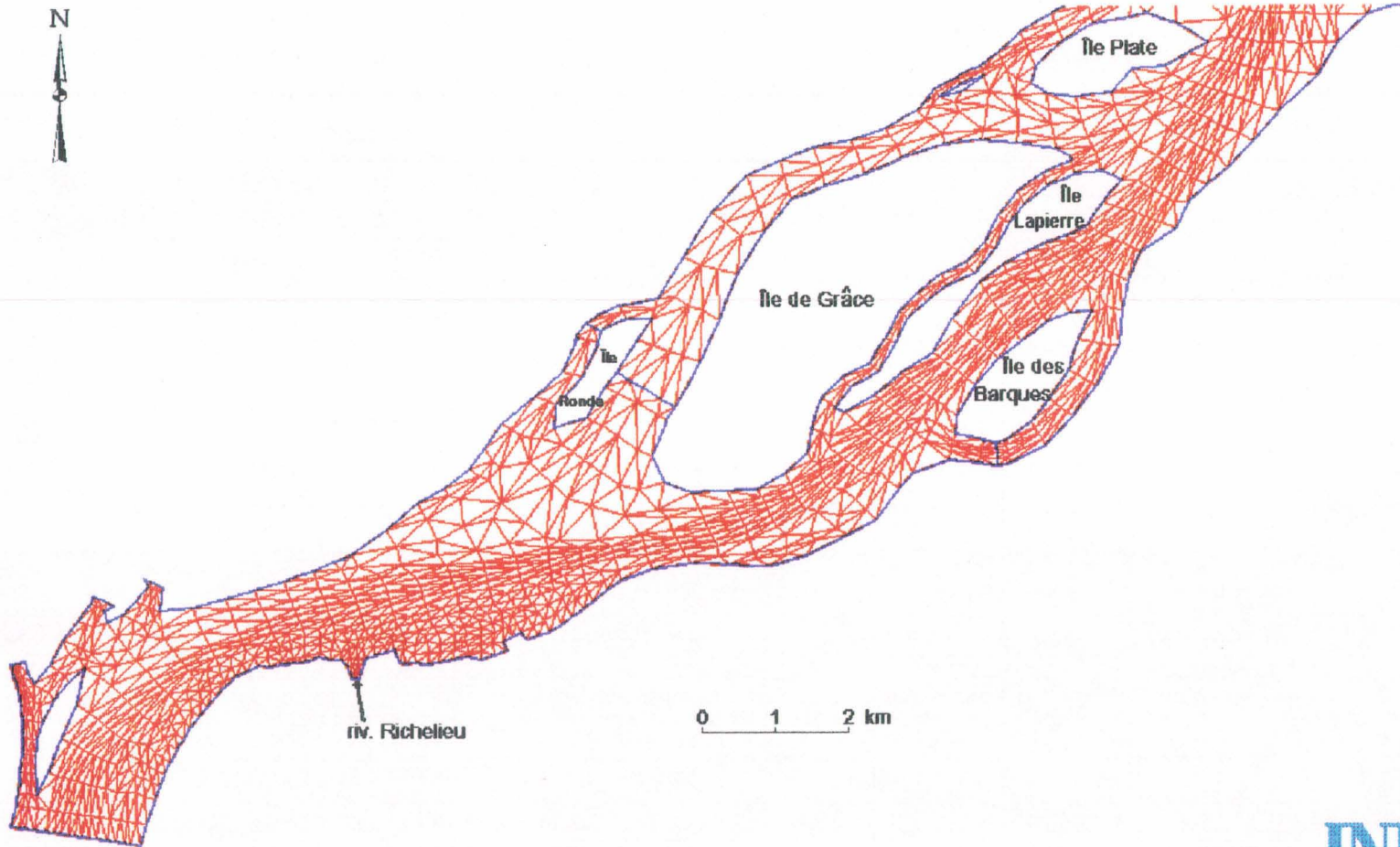
INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Planche #4 Maillage du lac Saint-Pierre



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

149



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

Planche #5 Maillage du tronçon Tracy - Delta de Sorel

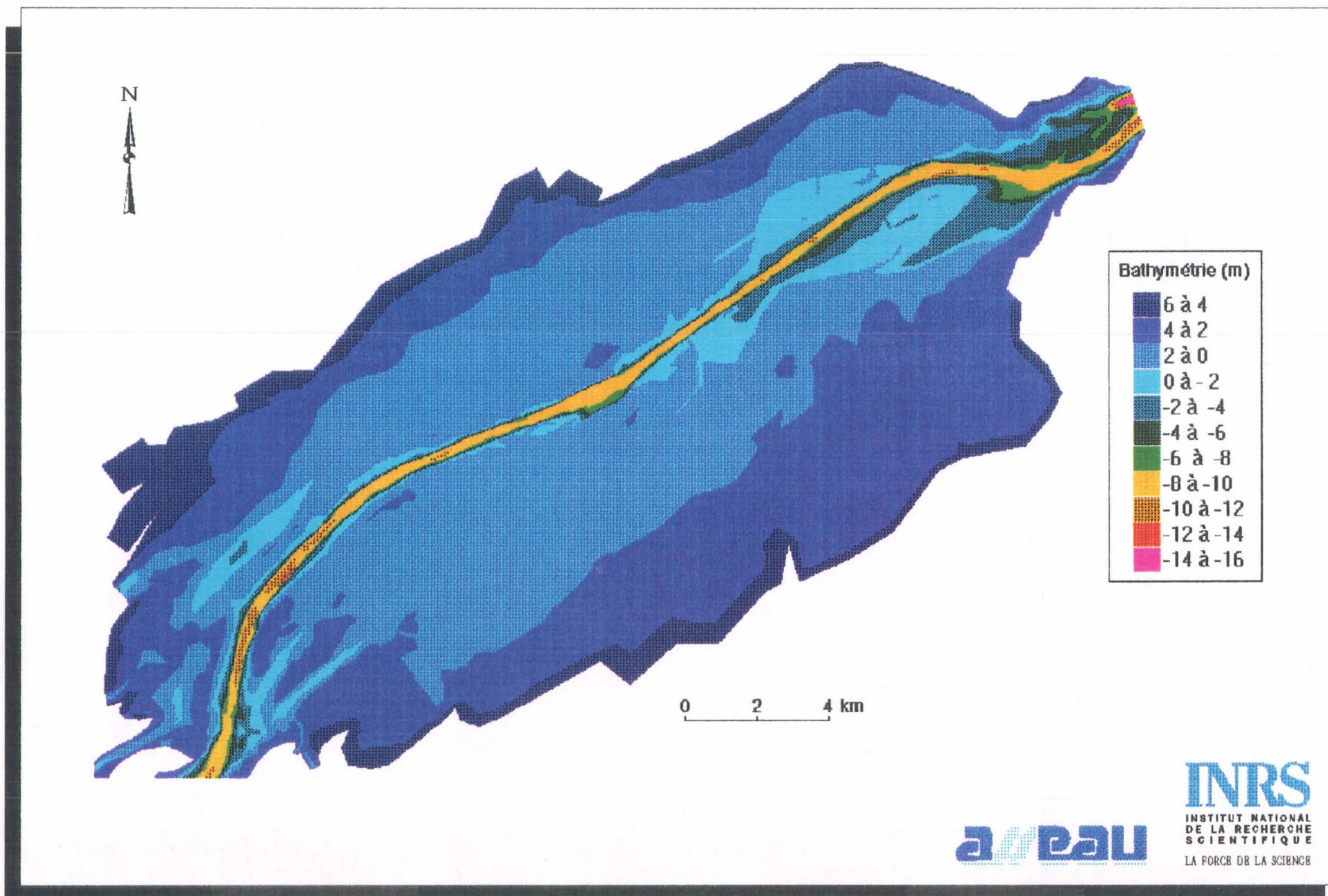
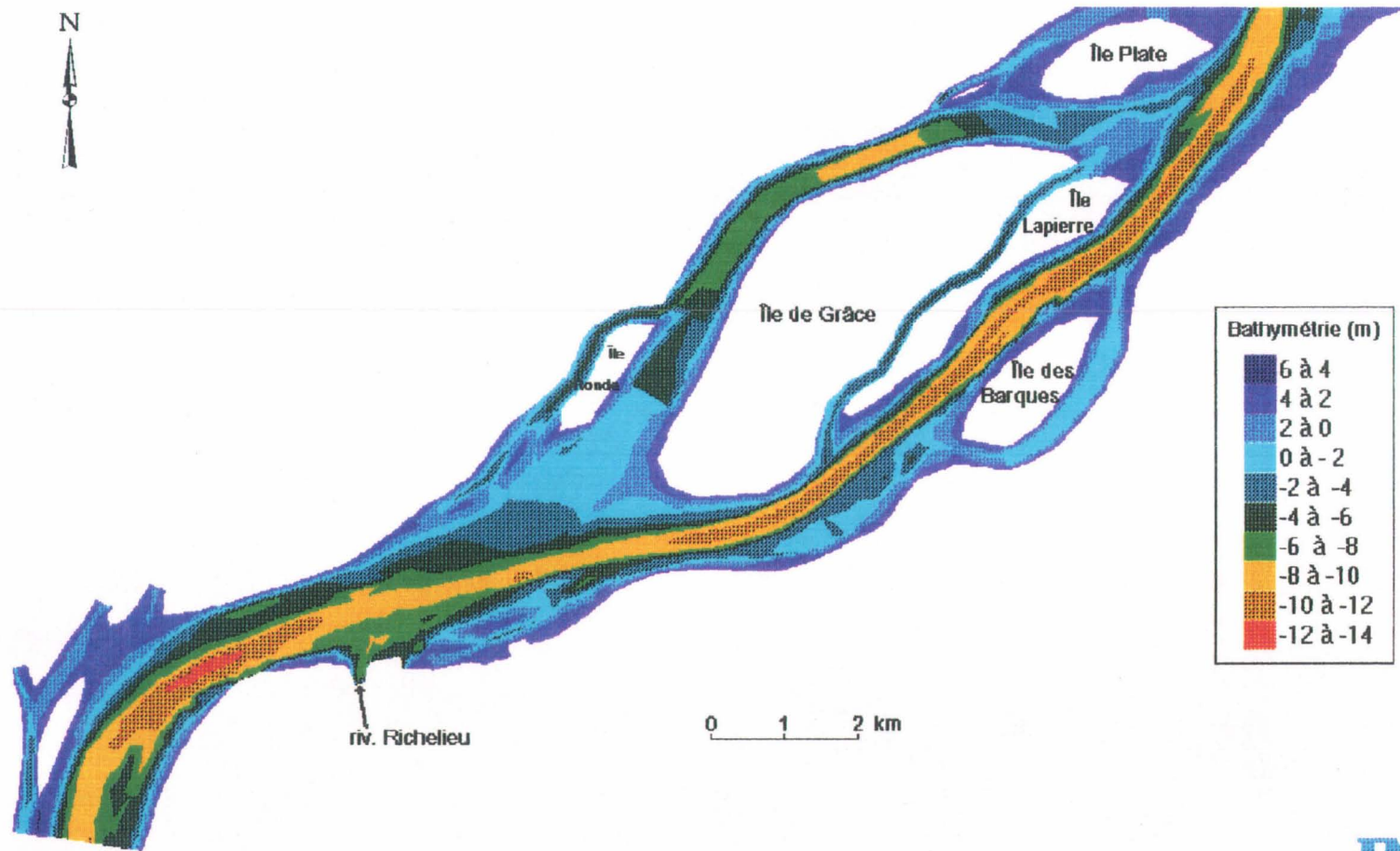


Planche #6 Bathymétrie discrétisée du lac Saint-Pierre (RIGL)



Bathymétrie (m)

6 à 4
4 à 2
2 à 0
0 à -2
-2 à -4
-4 à -6
-6 à -8
-8 à -10
-10 à -12
-12 à -14



Planche #7 Bathymétrie discrétisée du tronçon Tracy - Delta de Sorel (RIGL)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

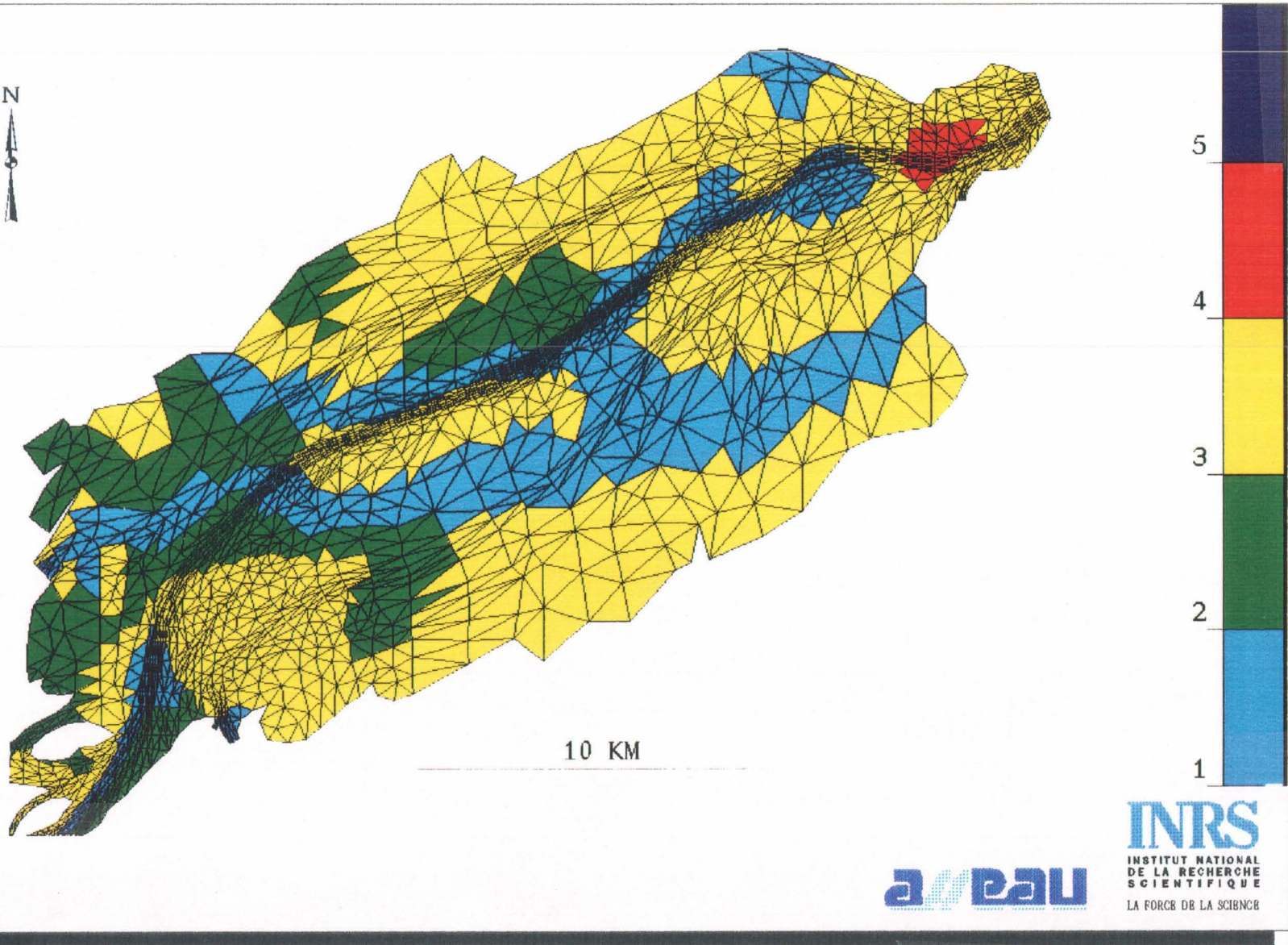
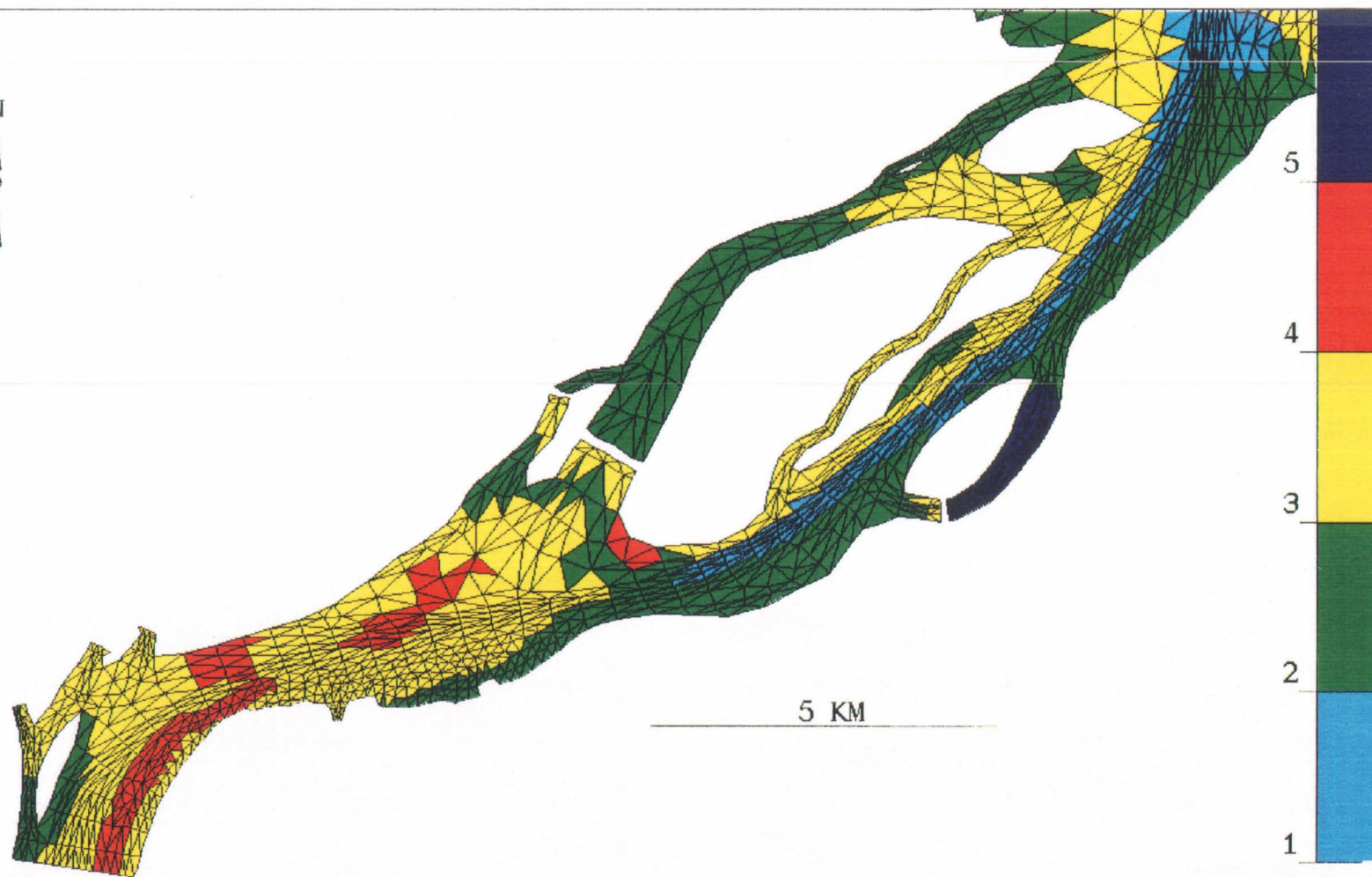


Planche #8 Substrat discrétisé du lac Saint-Pierre selon les groupes définis au tableau 4.1



CENTRE SAINT-LAURENT
PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



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

Planche #9 Substrat discrétisé du tronçon Tracy - Delta de Sorel selon les groupes définis au tableau 4.1

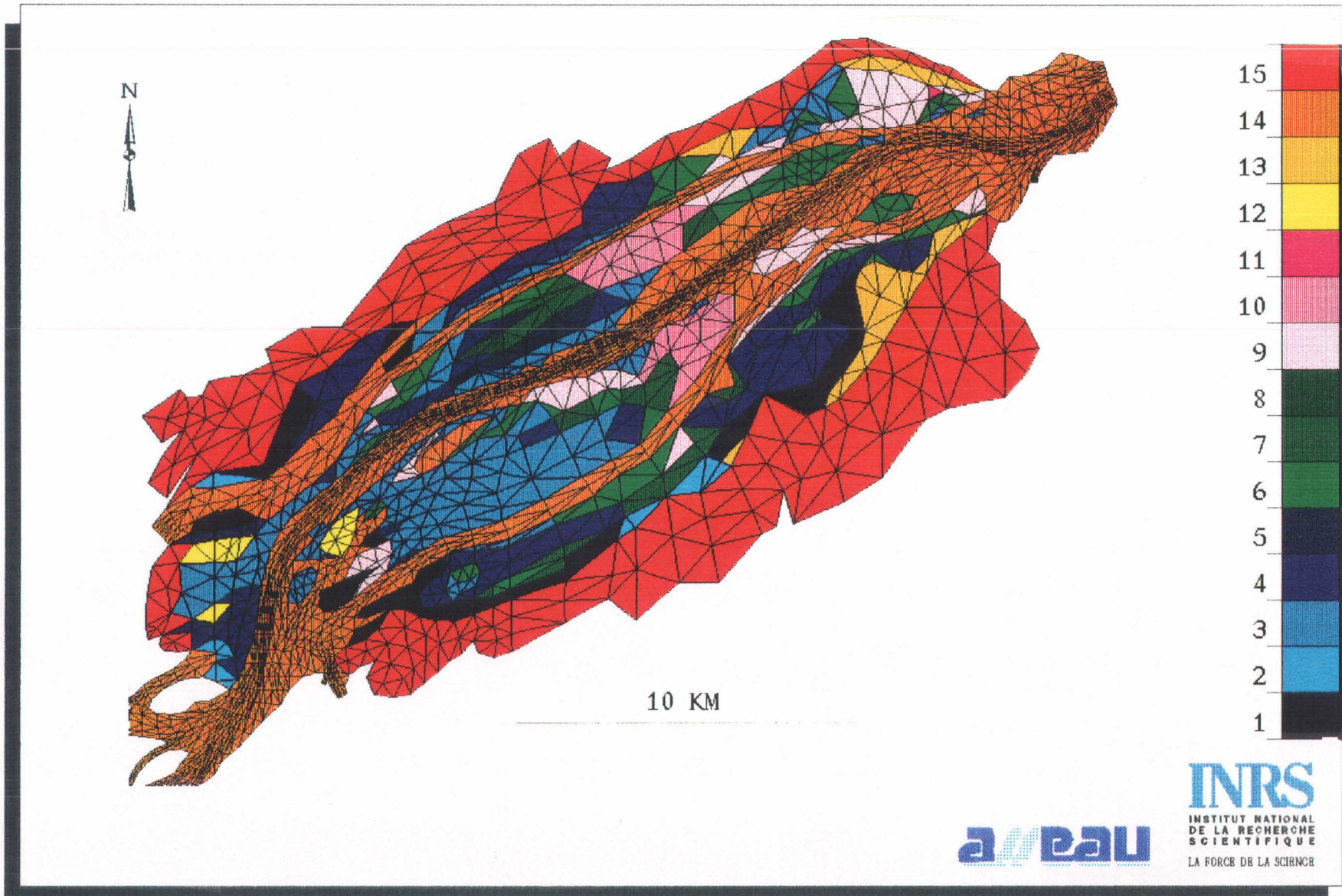


Planche #10 Macrophytes discrétisés du lac Saint-Pierre selon les unités définies au tableau 4.2





CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

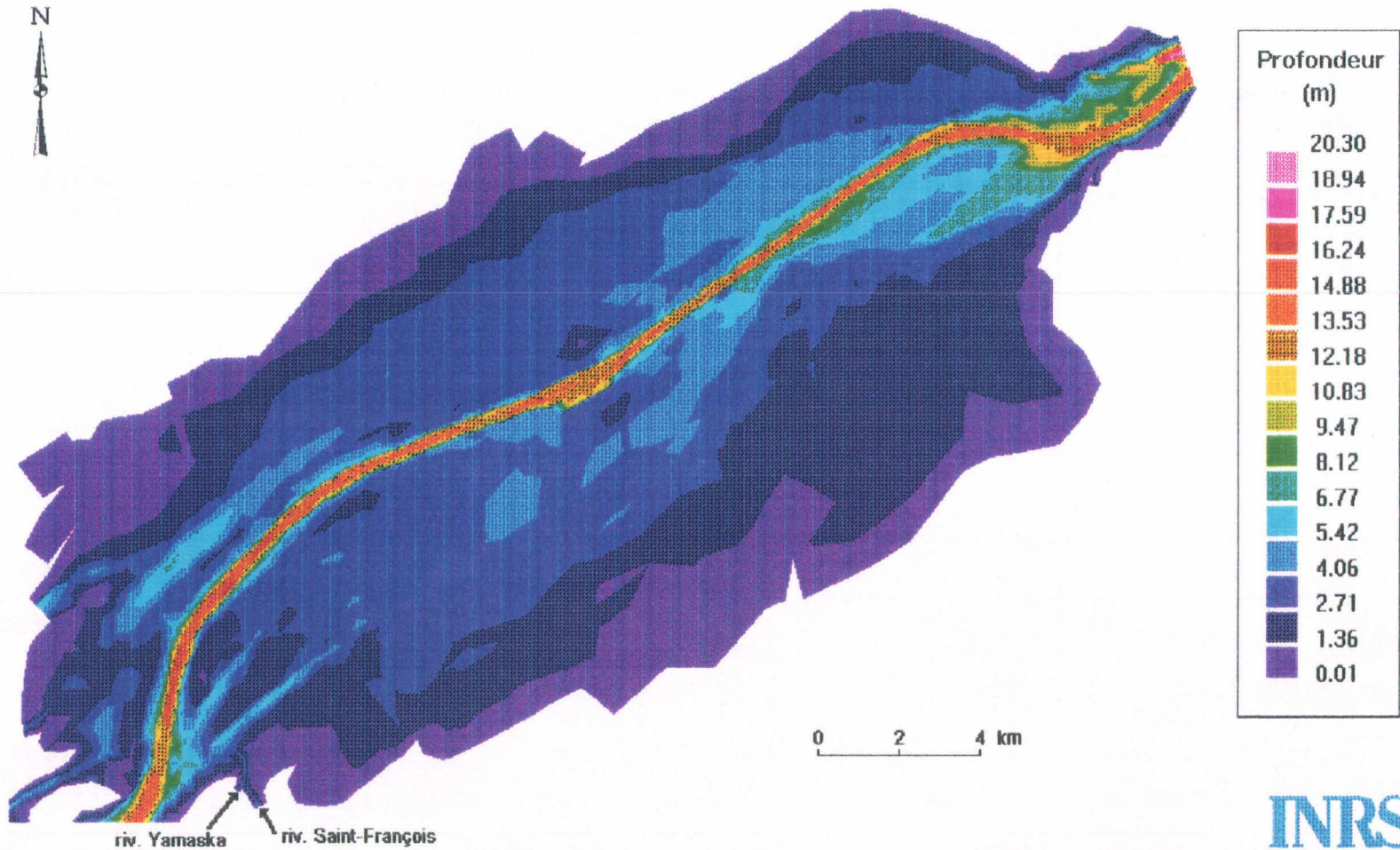


Planche #11 Profondeur du lac Saint-Pierre (107MP5VN)

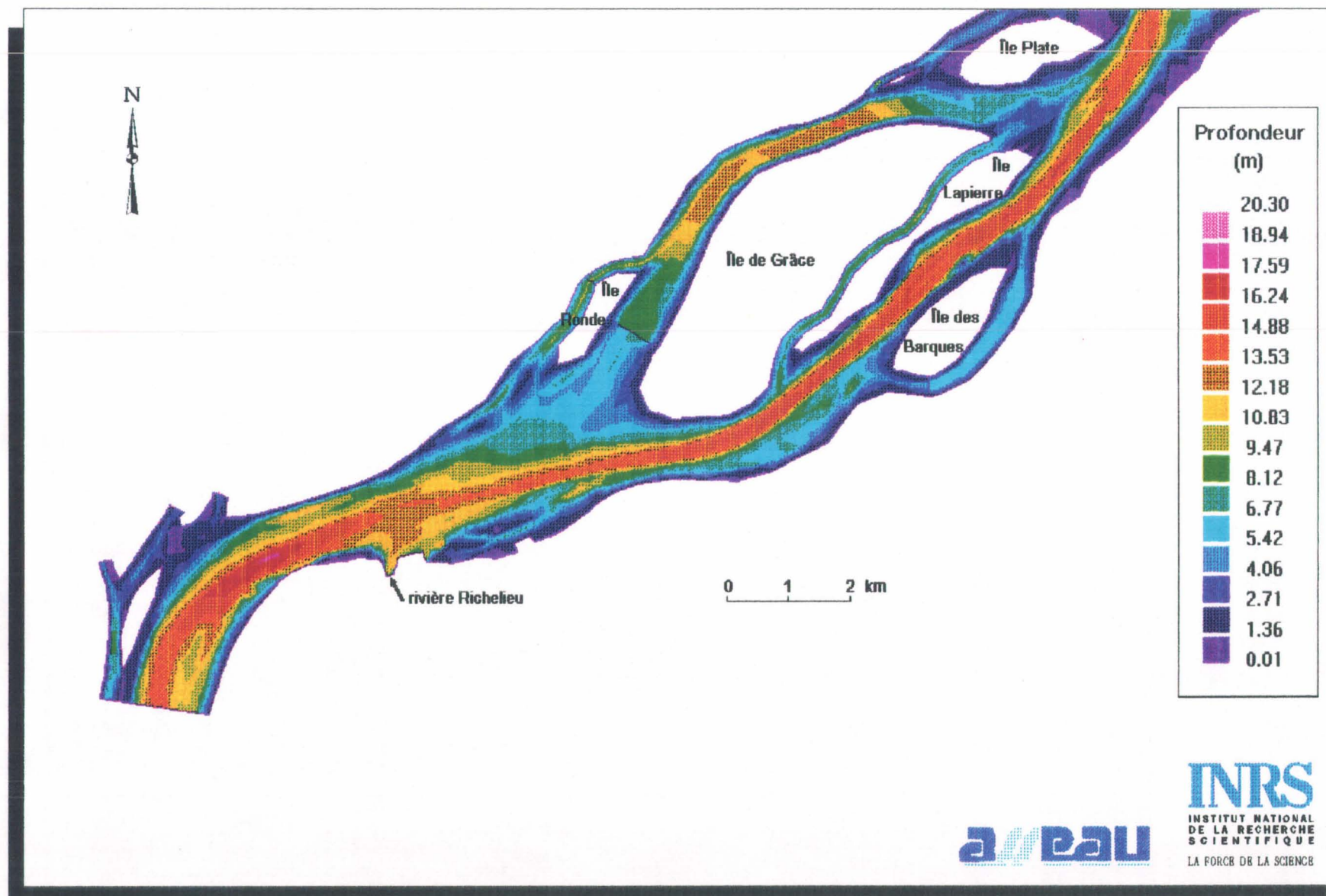
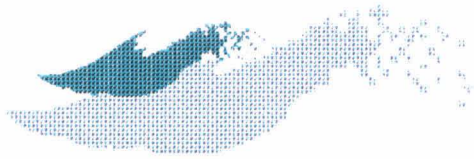
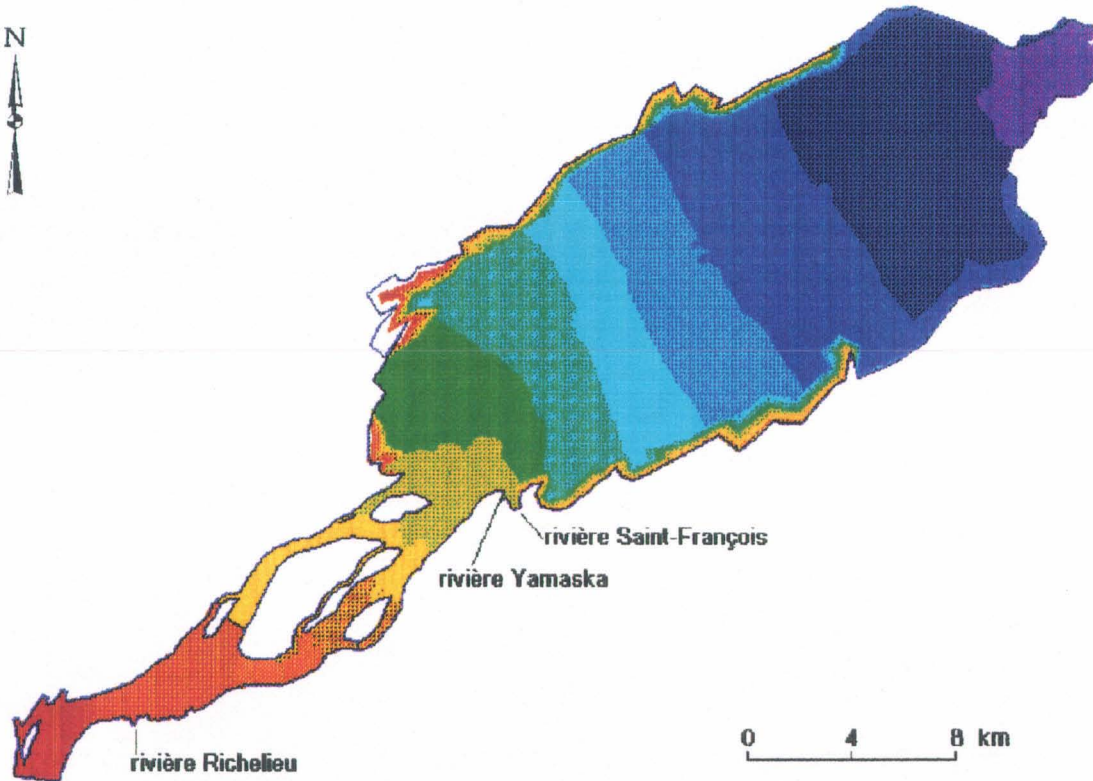


Planche #12 Profondeur du tronçon Tracy - Delta de Sorel (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



Niveau de surface (m)

- 5.10
- 5.02
- 4.95
- 4.89
- 4.83
- 4.75
- 4.70
- 4.62
- 4.56
- 4.49
- 4.43
- 4.35
- 4.29
- 4.22

0 4 8 km



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

Planche #13 Niveau d'eau (RIGL) du tronçon Tracy - Port Saint-François (107MP5VN)

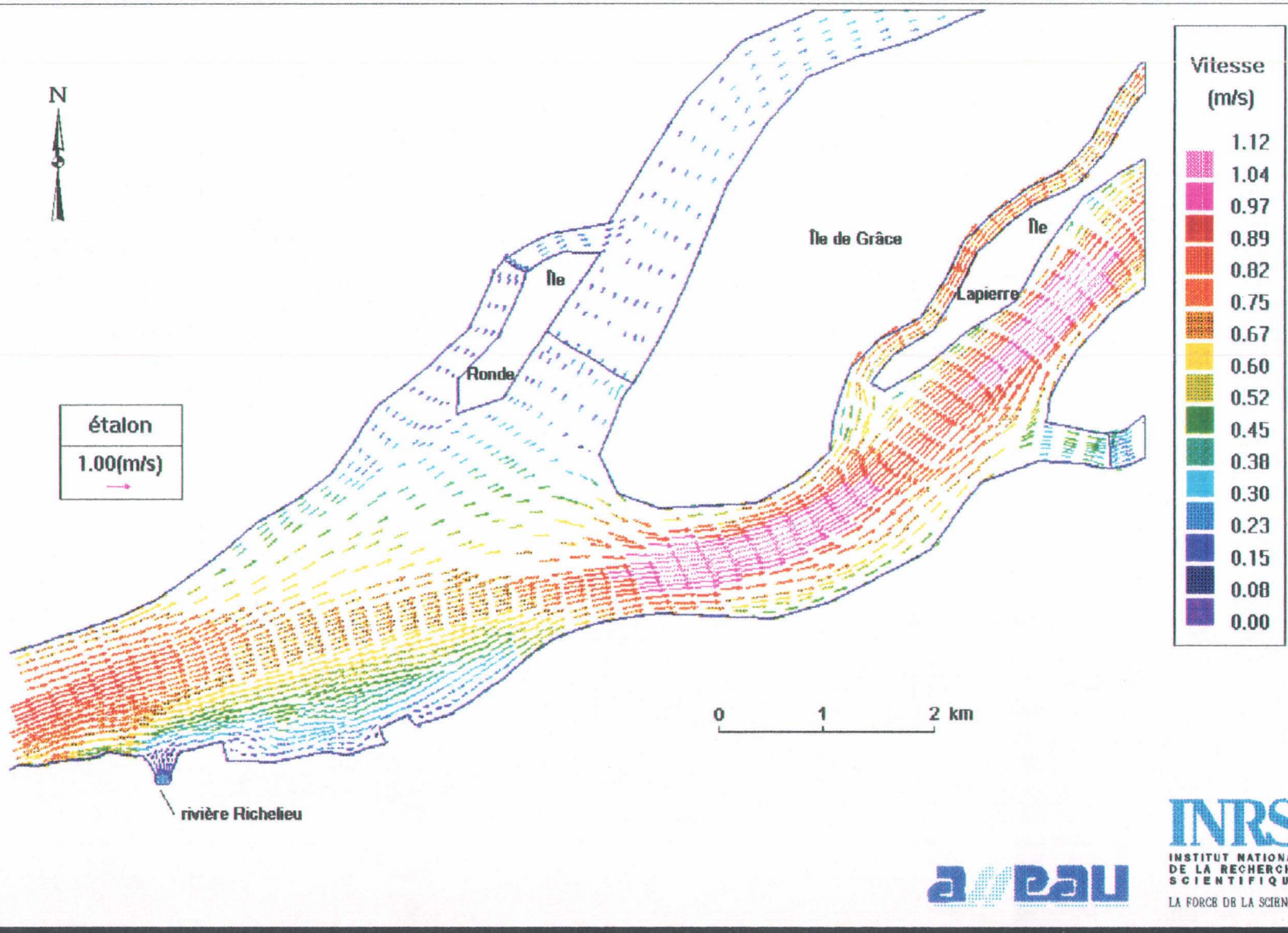
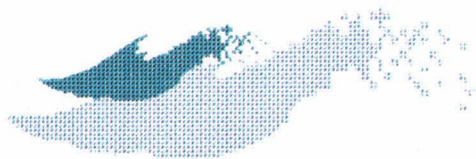


Planche #14 Vecteur vitesse à l'embouchure du Richelieu (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

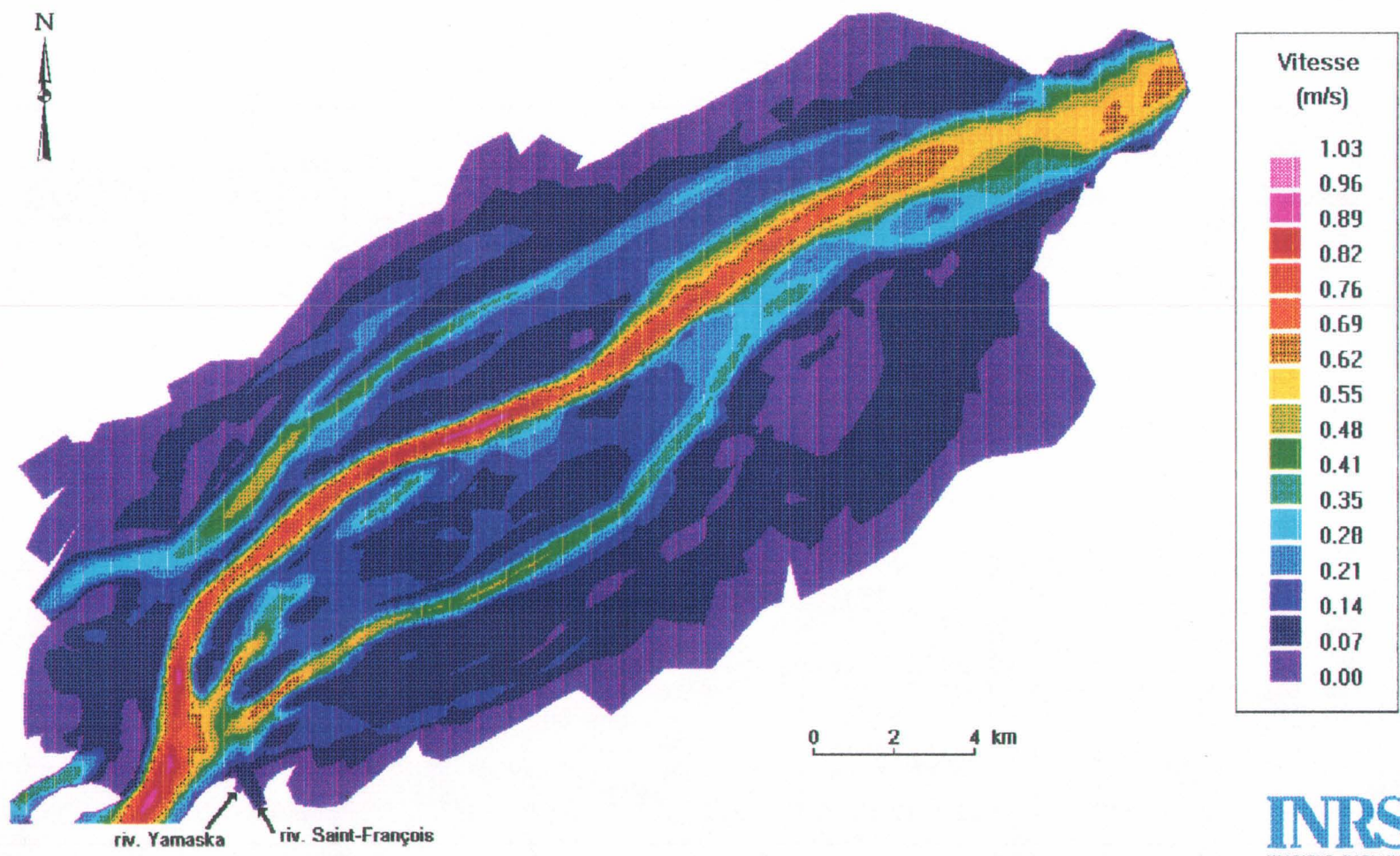
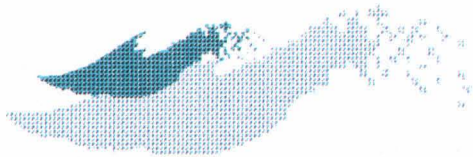
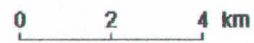
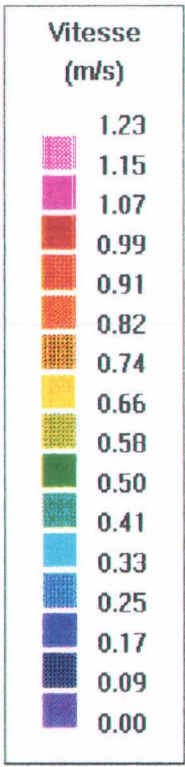
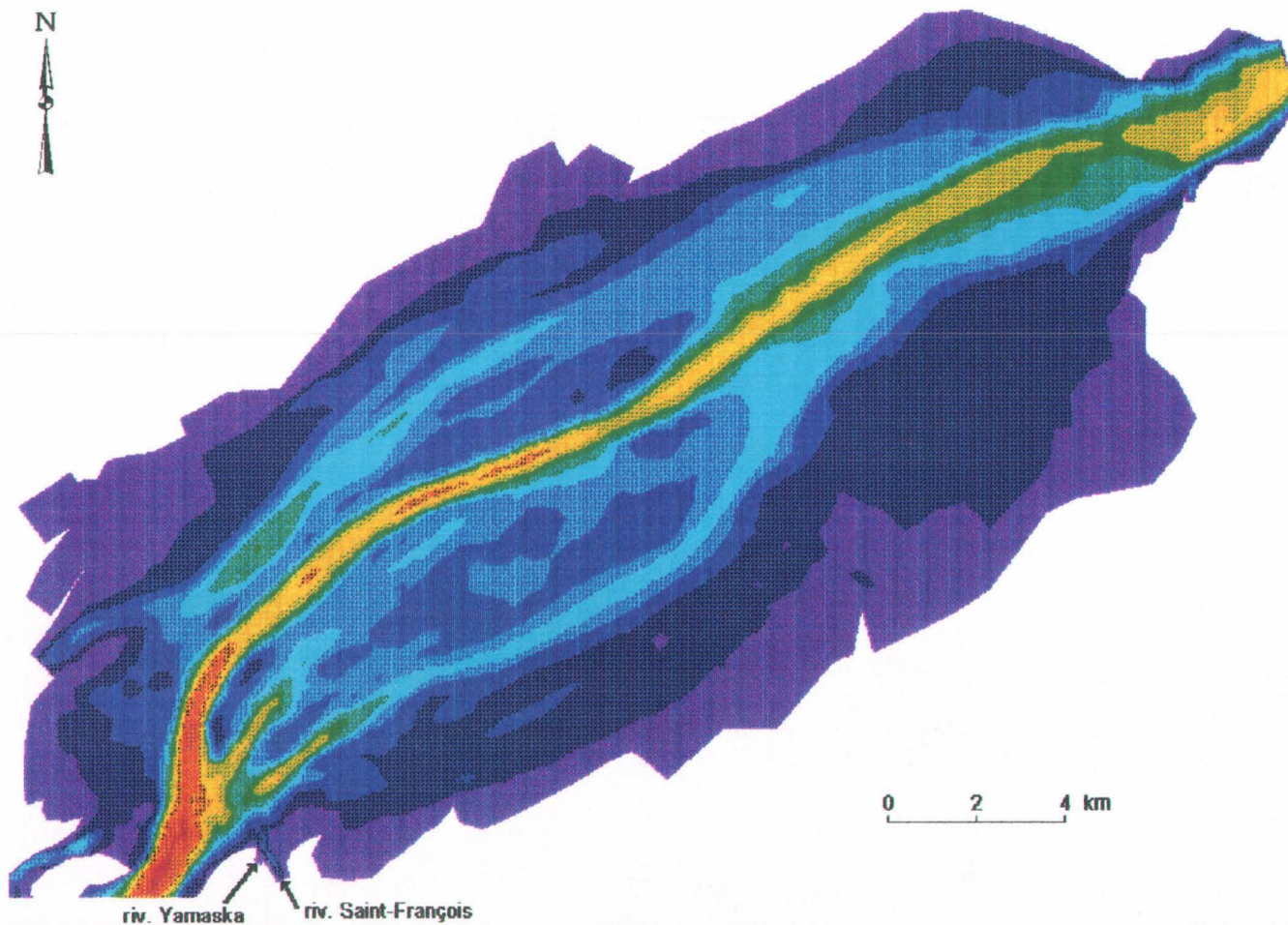


Planche #15 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (092PP9VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



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

Planche #16 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (092PP1VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

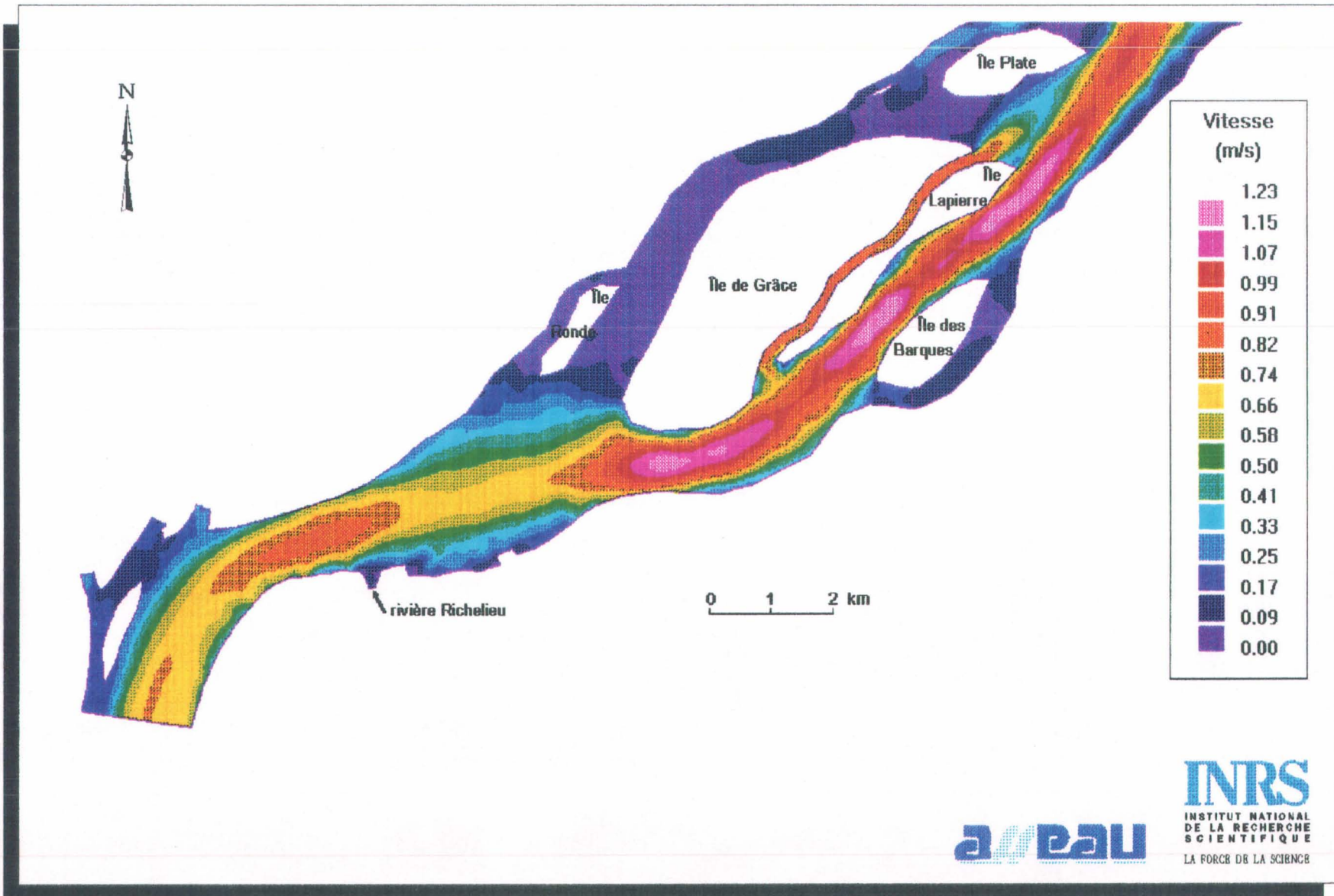
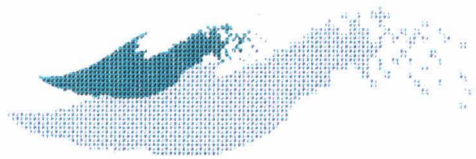
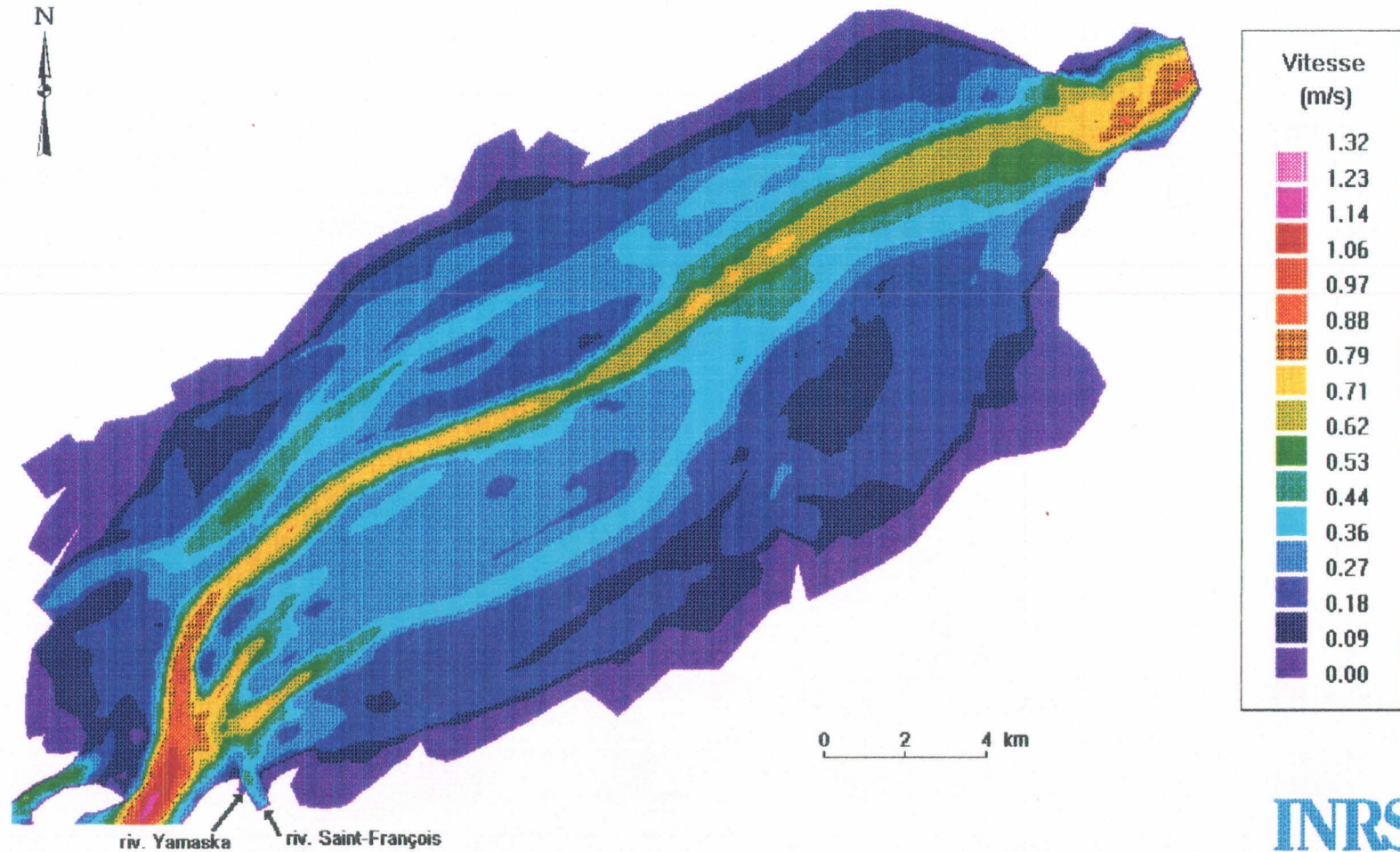


Planche #17 Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (092PP1VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



riv. Yamaska riv. Saint-François



Planche #18 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG1SO)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

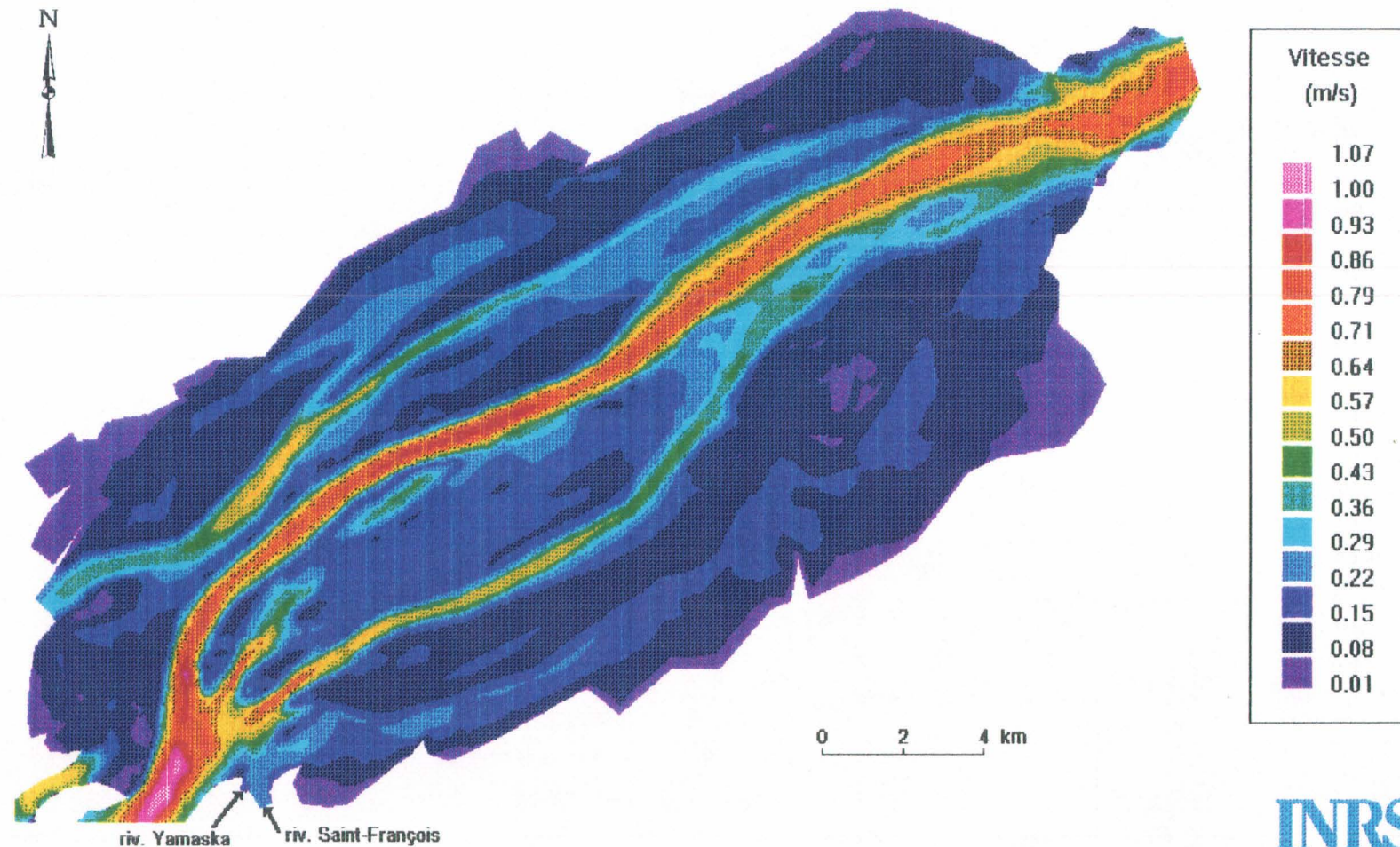
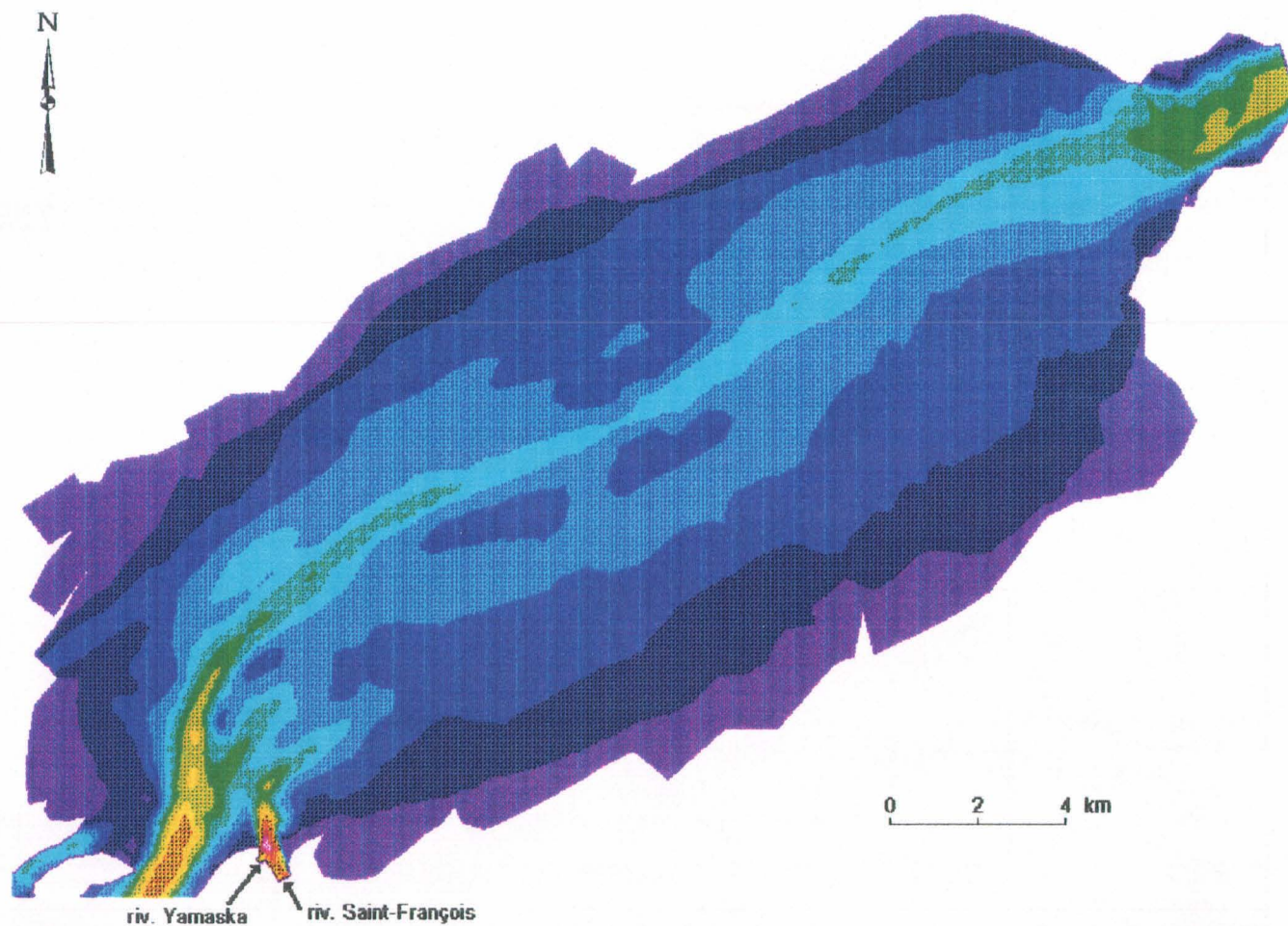


Planche #19 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG9VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



Vitesse
(m/s)

1.72
1.61
1.49
1.38
1.26
1.15
1.03
0.92
0.81
0.69
0.58
0.46
0.35
0.23
0.12
0.00

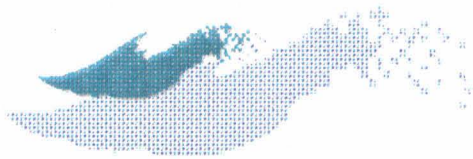
0 2 4 km

riv. Yamaska riv. Saint-François

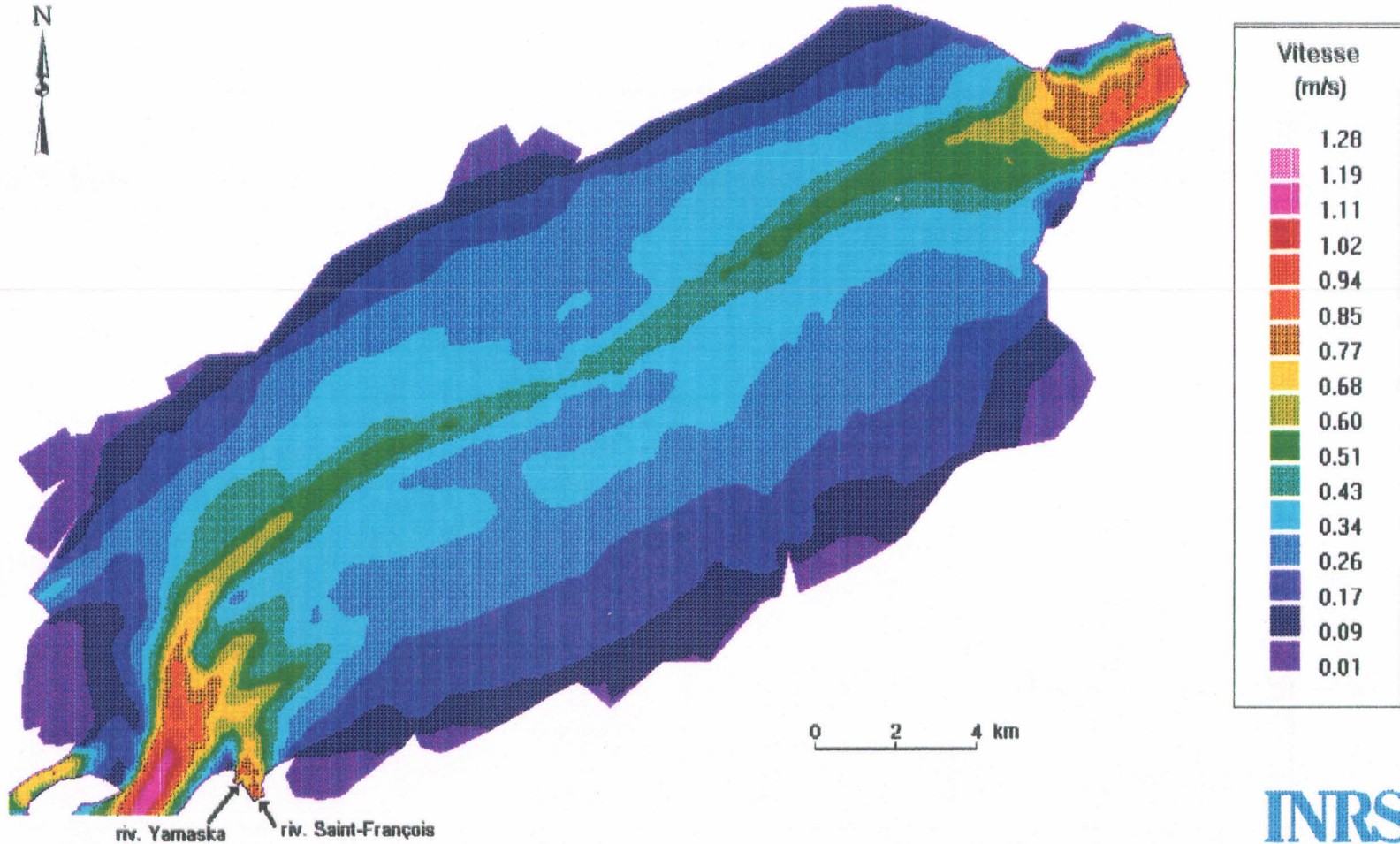


INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Planche #20 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (125GG0VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

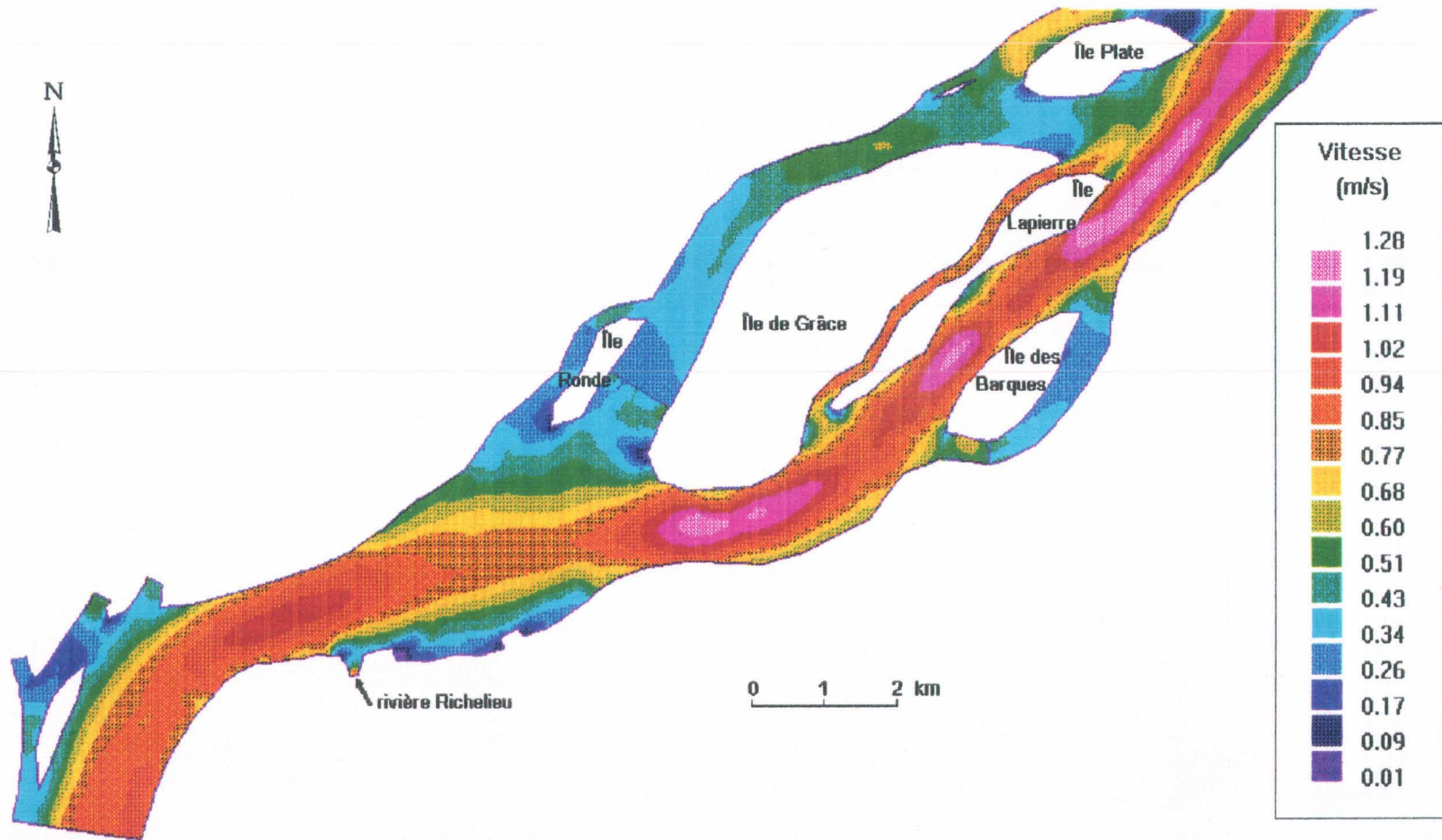


INRS
INSTITUT NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
LA FORCE DE LA SCIENCE

Planche #21 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (152GG0VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



Vitesse (m/s)	
1.28	
1.19	
1.11	
1.02	
0.94	
0.85	
0.77	
0.68	
0.60	
0.51	
0.43	
0.34	
0.26	
0.17	
0.09	
0.01	



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

Planche #22 Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (152GG0VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

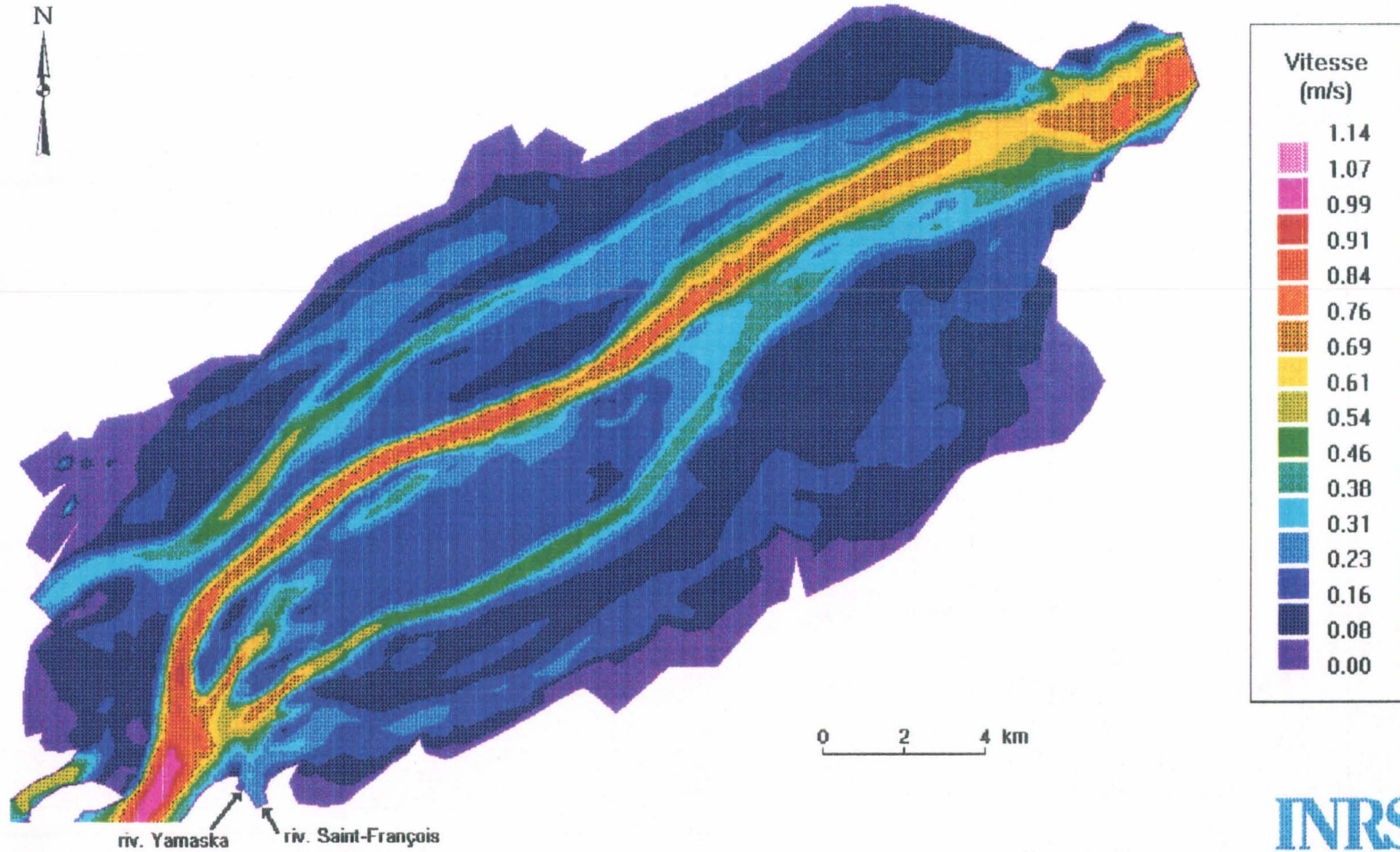
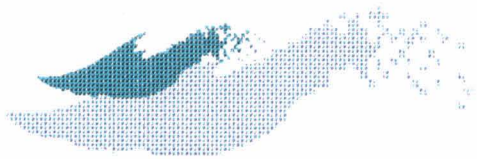
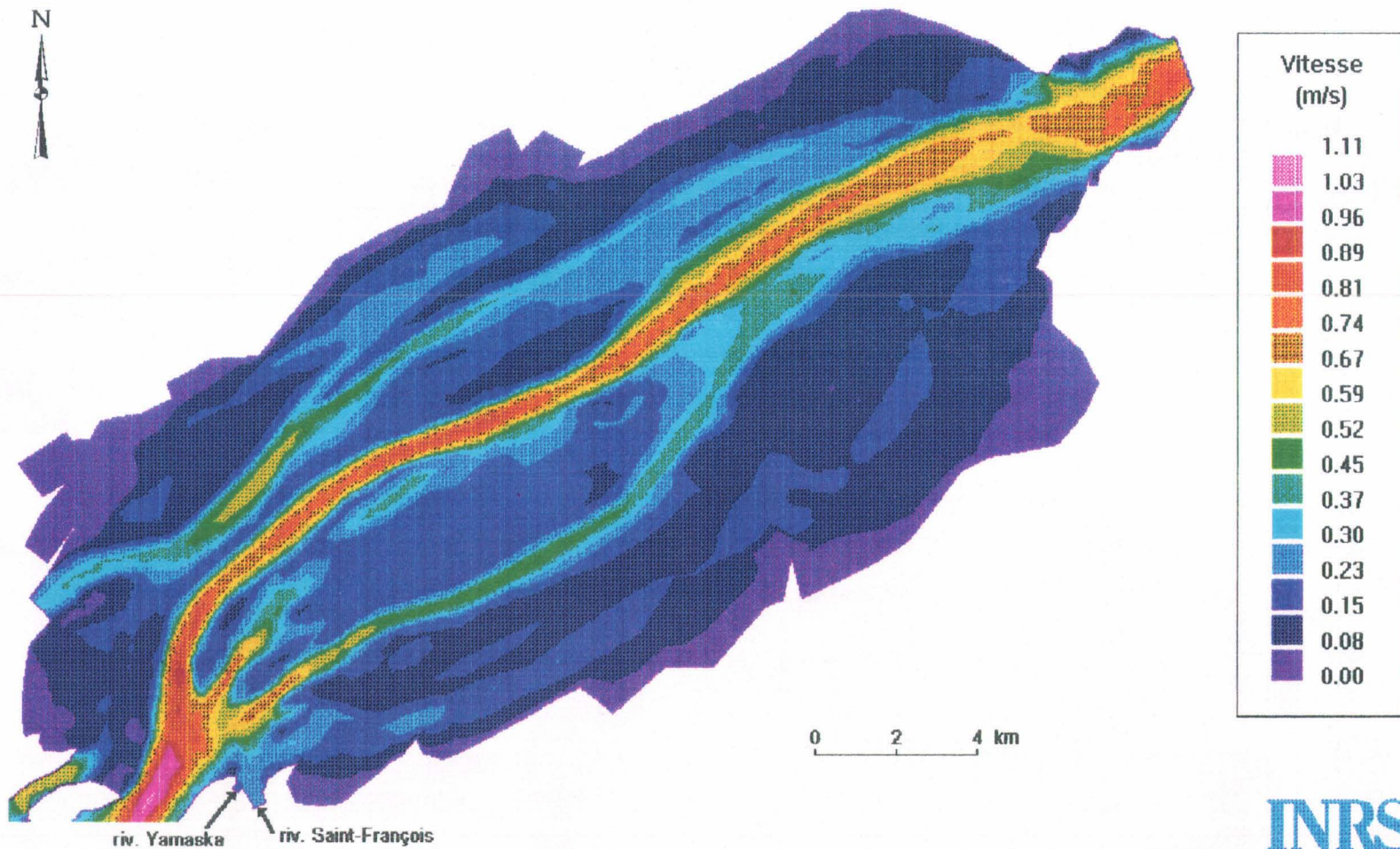


Planche #23 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5NO)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

168



AWPAU

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

Planche #24 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5NE)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

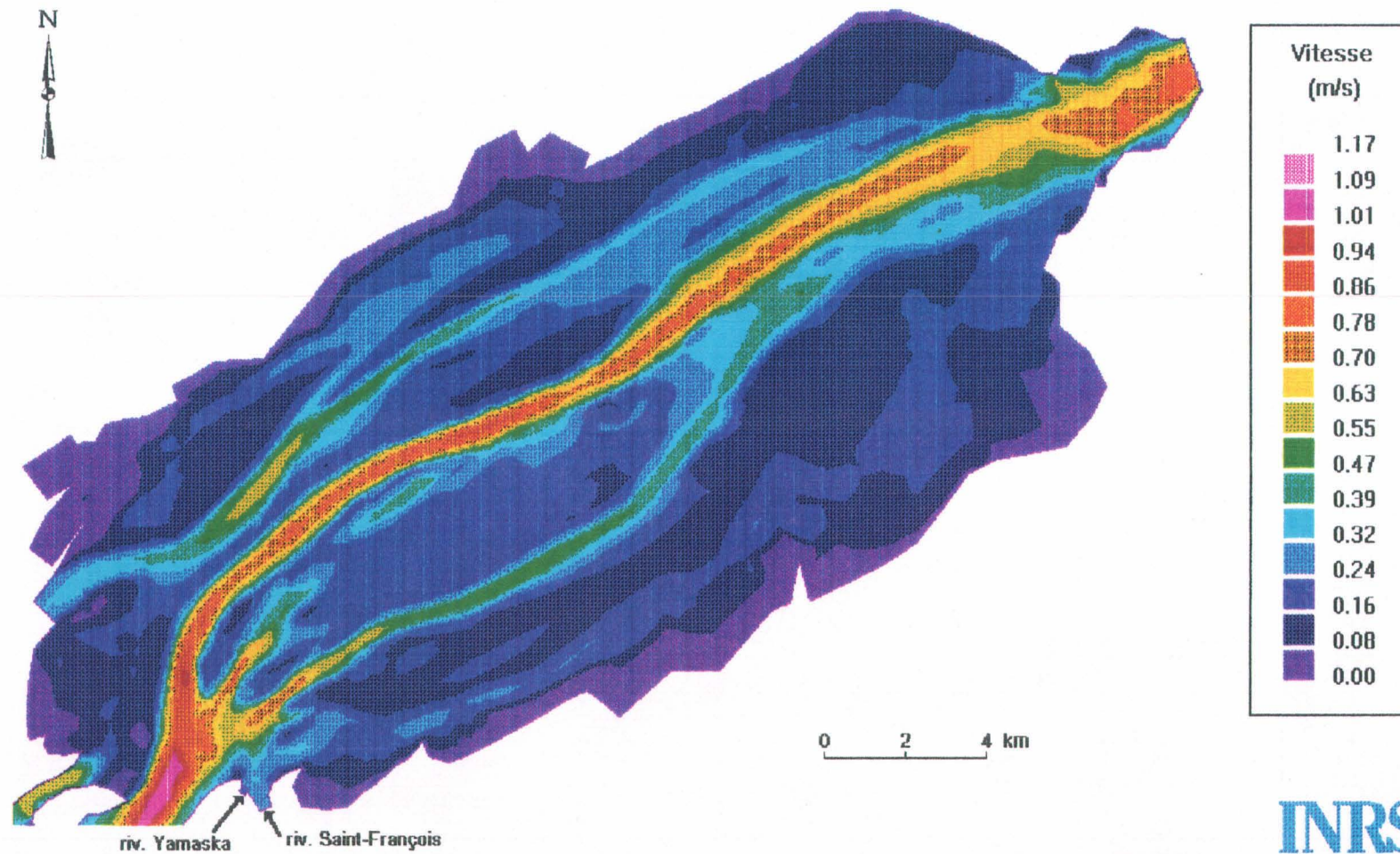
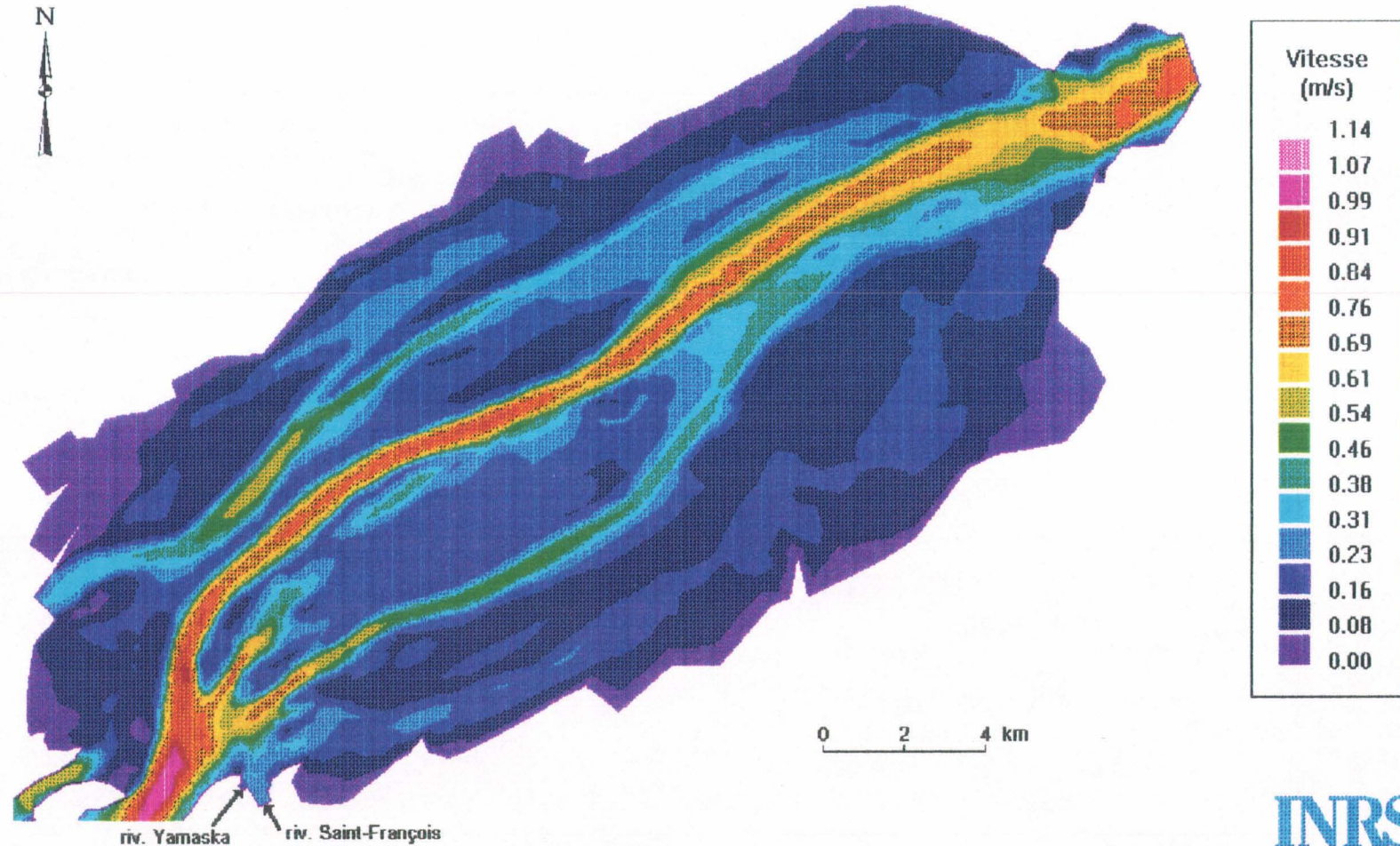


Planche #25 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5SO)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



riv. Yamaska riv. Saint-François

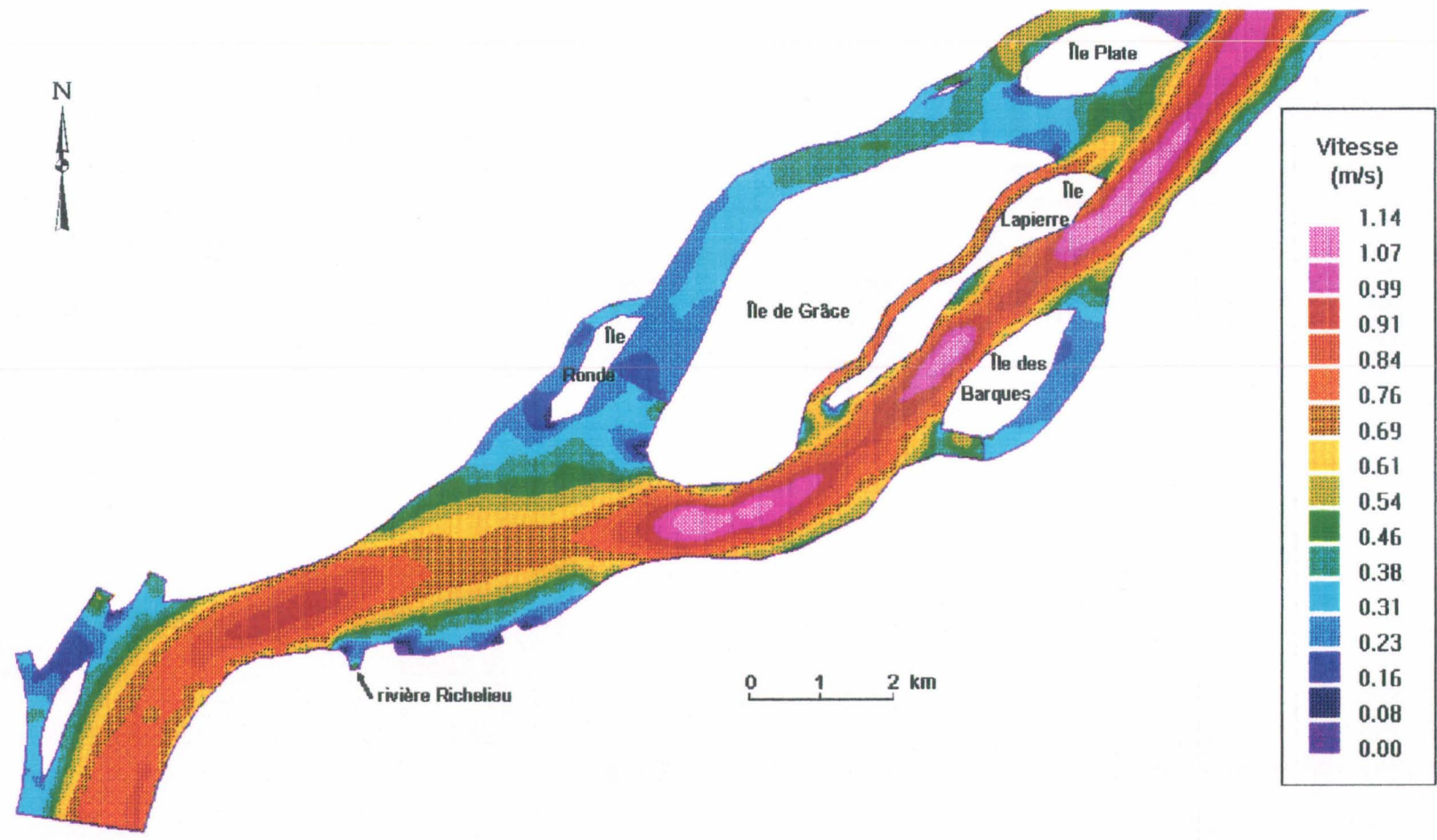
0 2 4 km



Planche #26 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (120GG5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



Vitesse (m/s)	
[Pink]	1.14
[Magenta]	1.07
[Red]	0.99
[Orange-Red]	0.91
[Orange]	0.84
[Light Orange]	0.76
[Yellow-Orange]	0.69
[Yellow]	0.61
[Light Green]	0.54
[Green]	0.46
[Light Blue-Green]	0.38
[Light Blue]	0.31
[Blue]	0.23
[Dark Blue]	0.16
[Dark Blue-Black]	0.08
[Black]	0.00



Planche #27 Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (120GG5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

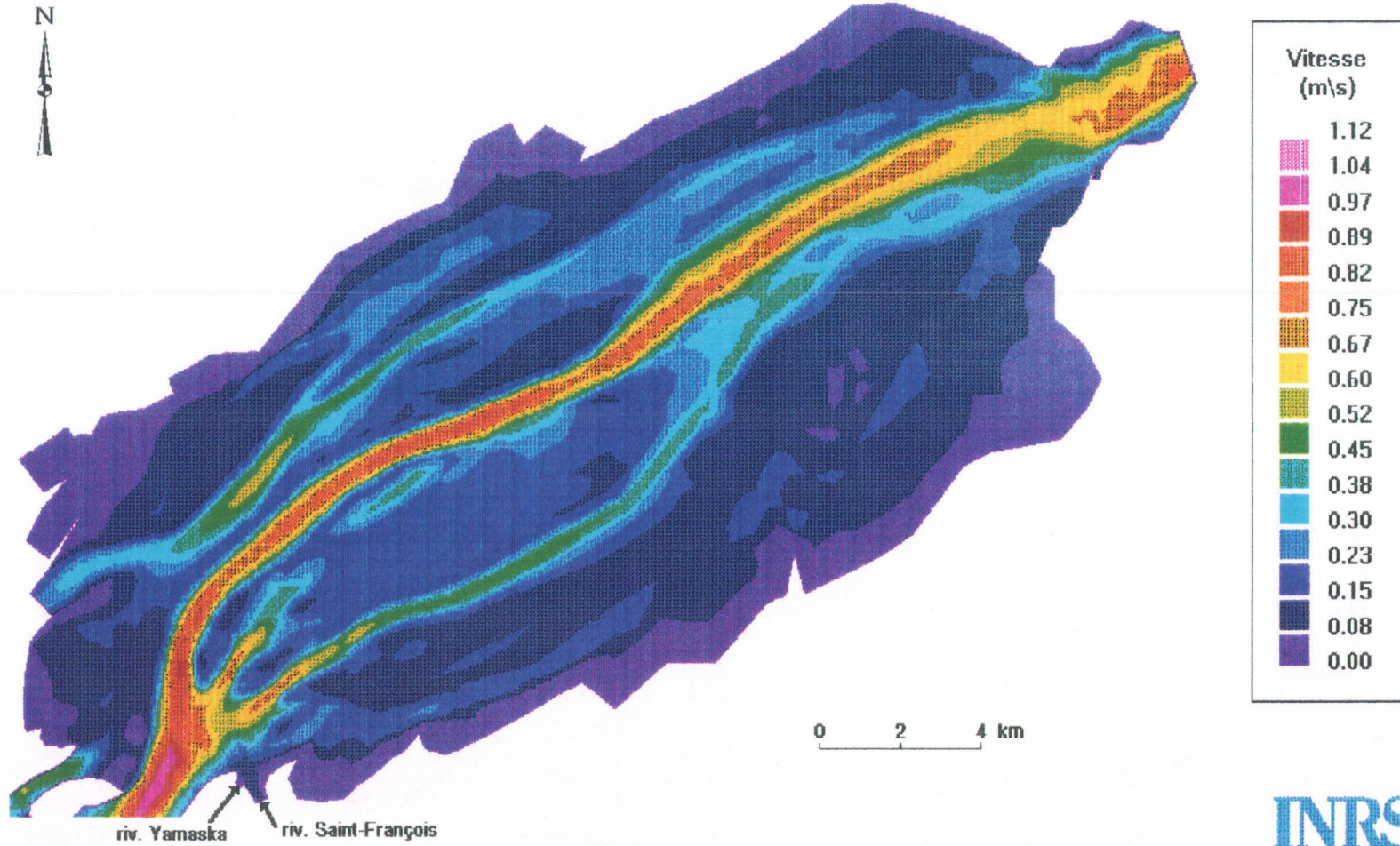


Planche #28 Module de la vitesse lac Saint-Pierre (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

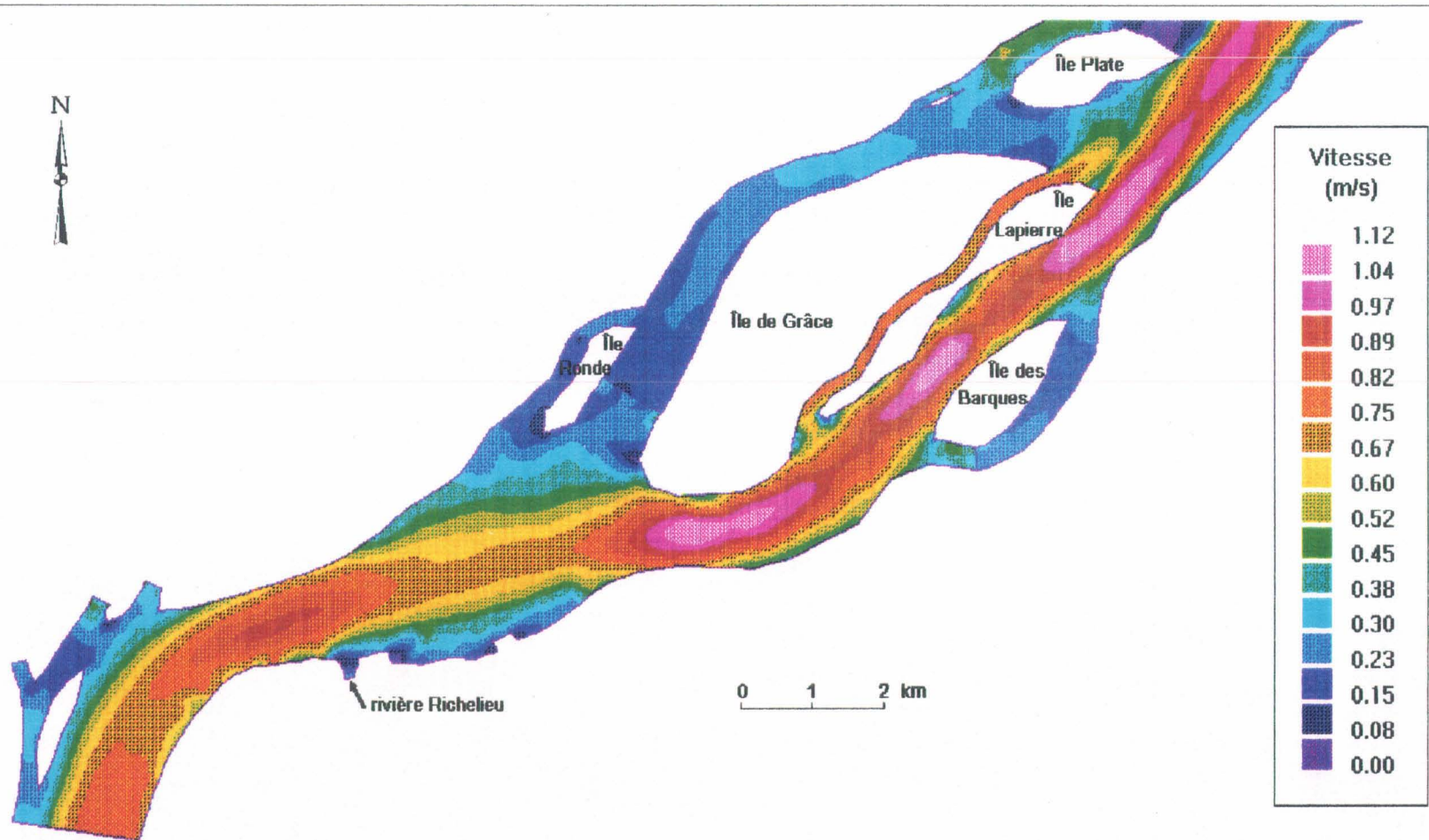


Planche #29 Module de la vitesse Tracy - Delta de Sorel (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

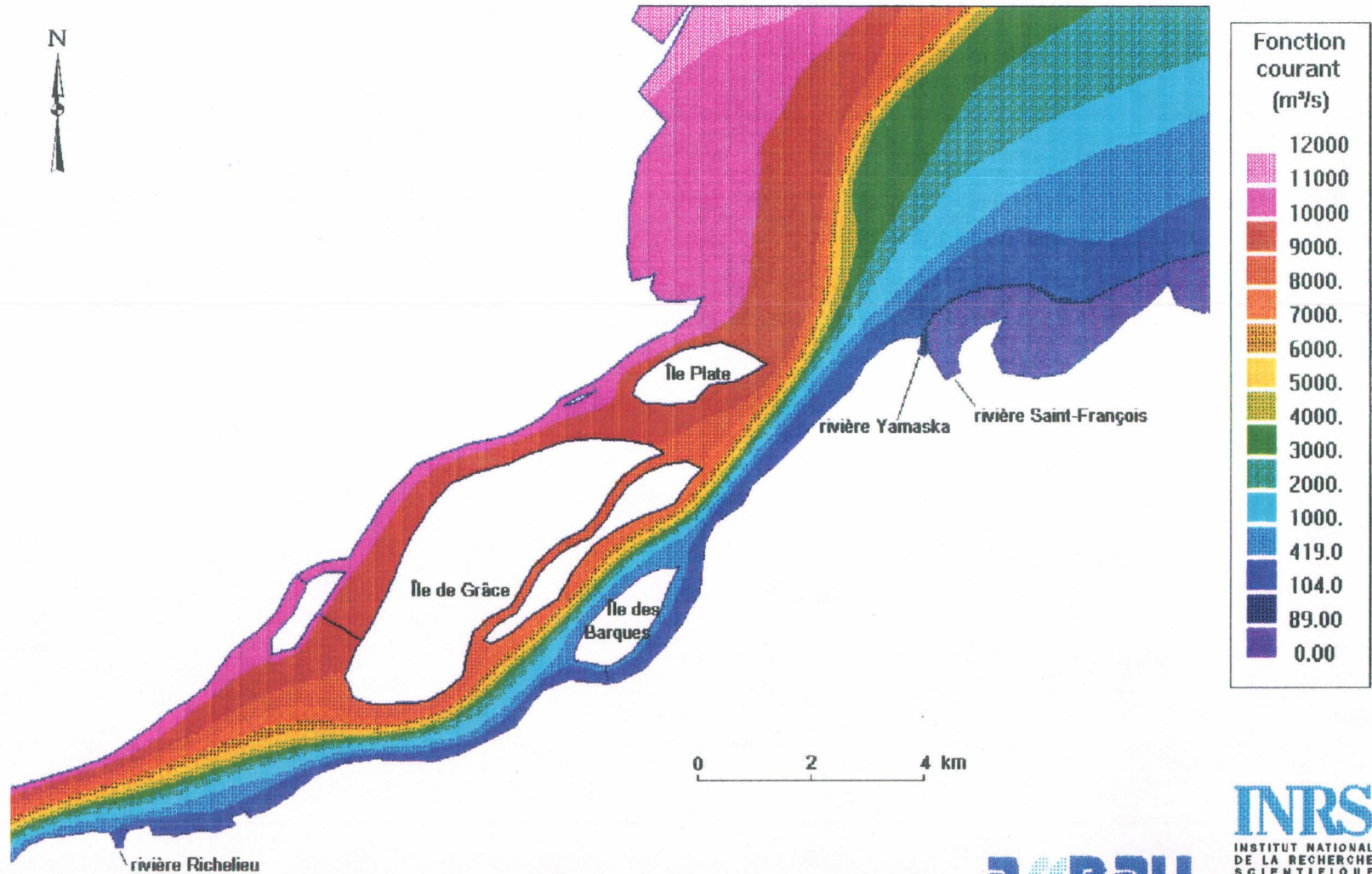


Planche #30 Fonction courant de la rivière Richelieu à la rivière Saint-François (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

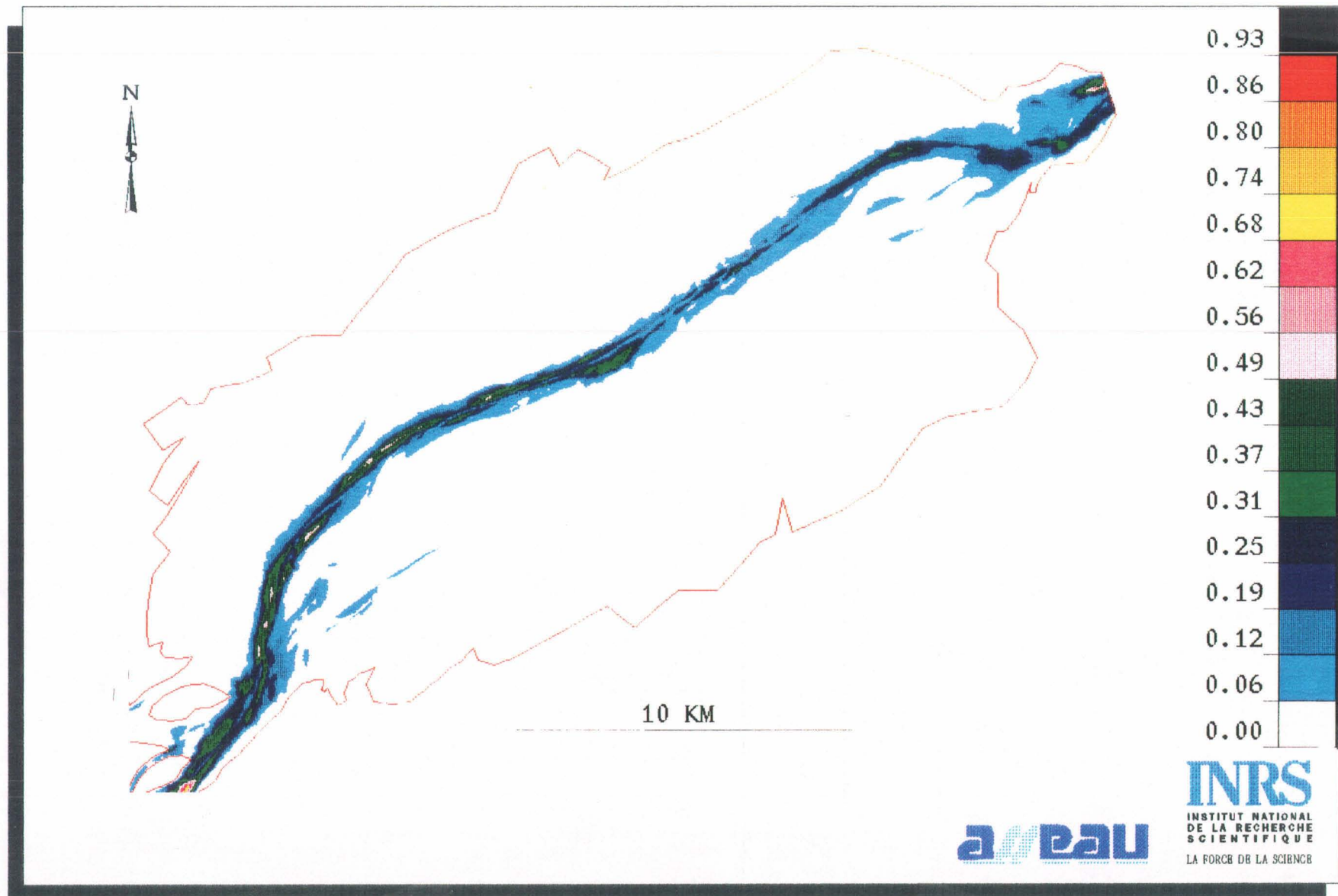
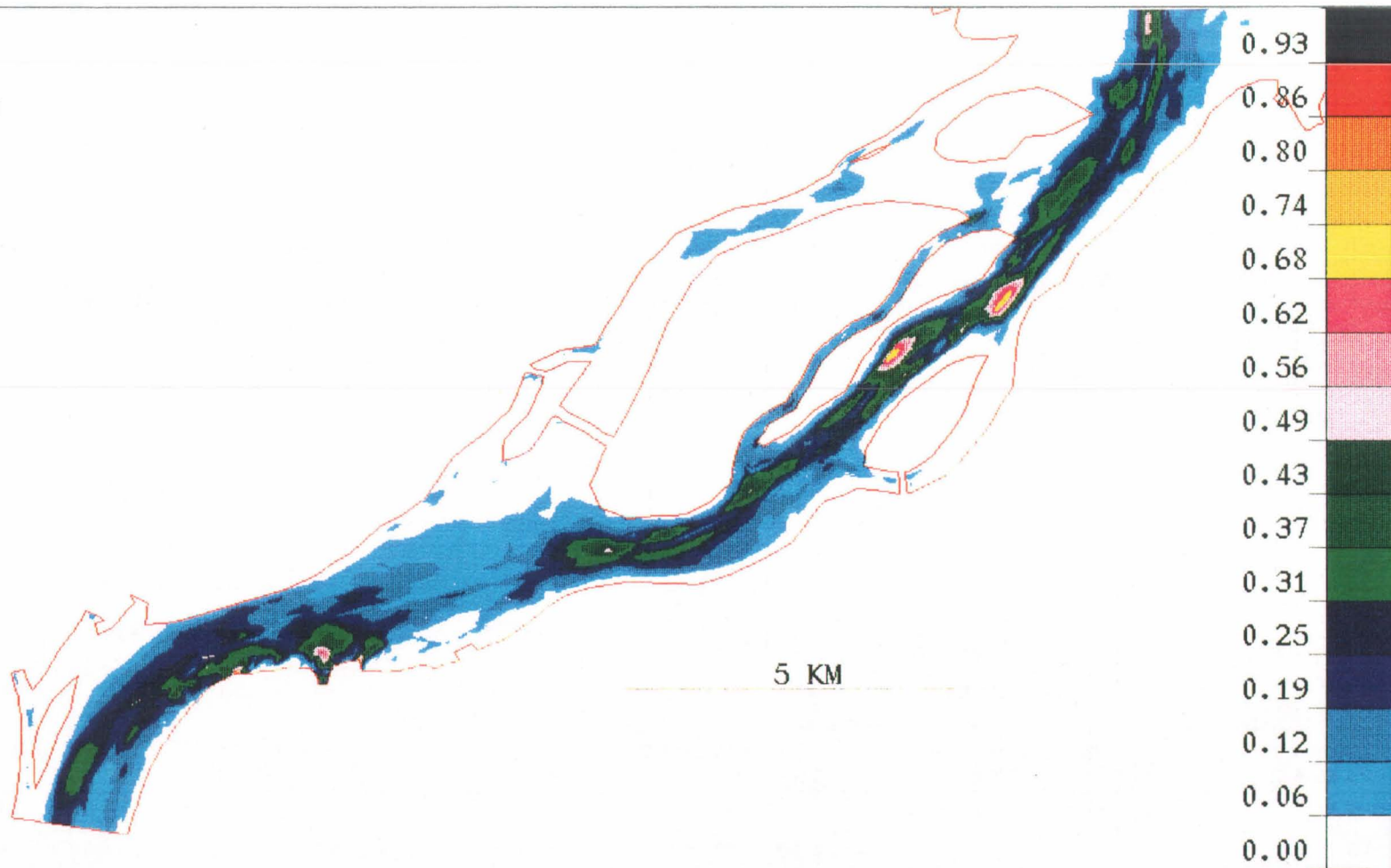


Planche #31 Diffusivité lac Saint-Pierre (107MP5VN)



CENTRE SAINT-LAURENT PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT



5 KM



Planche #32 Diffusivité Tracy - Delta de Sorel (107MP5VN)