

Rapport Scientifique RS-101

**Atlas des courants du fleuve
Saint-Laurent.**

Lac Saint-François

Jean Morin, Patrice Fortin, Paul Boudreau,
Yves Secretan et Michel Leclerc

Septembre 2001

Pour fin de citation :

Morin, J., P. Fortin, P. Boudreau, Y. Secretan et M. Leclerc (2001). Atlas des courants du Saint-Laurent. Lac Saint-François. Rapport conjoint INRS-Eau / Environnement Canada - SMC. Enregistré à Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Rapport scientifique RS-101, Sainte-Foy ; enregistré à l'INRS-Eau comme Rapport No. R-581. 30 pages + 14 planches.

© Approvisionnement et Services Canada 2001
Catalogue N° En56-162/2000F
ISBN : 2-89146-448-6

Liste des Participants

Service météorologique du Canada :

Directeur de projet :

Richard LAURENCE

Chargé de projet :

Jean-François CANTIN

Spécialiste :

Patrice FORTIN

Techniciens de terrain:

Guy MORIN

Jacques LAROCHE

Paul-Émile BERGERON

INRS-Eau :

Directeur de projet :

Michel LECLERC

Chargé de projet :

Jean MORIN

Spécialistes :

Paul BOUDREAU

Yves SECRETAN

Préface

Le lac Saint-François comme la plupart des hydrosystèmes des régions développées du globe a subi des transformations physiques importantes depuis l'arrivée de l'âge industriel. La production d'hydroélectricité, la navigation, les nombreux ouvrages de génie, l'aménagement des rives, la gestion des débits et niveaux d'eau et les changements physico-chimiques sont les principaux facteurs qui y ont contribué. Ce document témoigne de plusieurs de ces changements sur la dynamique des courants.

Ce document s'adresse à l'ensemble des intervenants qui agissent ou s'intéressent au fleuve Saint-Laurent, plus particulièrement au lac Saint-François. Conçu dans un esprit multidisciplinaire, il représente une synthèse de l'information physique sur le système, qu'elle ait été obtenue par des mesures sur le terrain, ou par modélisation numérique. Le lecteur intéressé à en connaître plus sur les résultats ou l'approche utilisée est invité à consulter la bibliographie à la fin de ce document. De plus, afin d'alléger la consultation, les auteurs ont choisi de ne pas mentionner les références au fur et à mesure de la progression du propos comme c'est souvent le cas pour les rapports scientifiques.

En plus de rendre accessible la connaissance des courants du lac Saint-François et les données de base sous-jacentes, ce document désire promouvoir les nombreuses applications possibles de ces informations en vue de la protection et de la restauration, quand cela s'avère possible, de l'écosystème Saint-Laurent. Il est notamment possible de répondre aux besoins d'urgences maritimes, d'améliorer les plans de gestion des débits et niveaux d'eau, de soutenir les efforts d'aménagement faunique, voire même d'optimiser les utilisations industrielles actuelles du fleuve en tenant compte du volet environnemental.

Ce document ainsi que le modèle numérique qui le sous-tend est le fruit d'un partenariat entre le Ministère de l'Environnement du Canada – Service météorologique du Canada (EC-SMC) et l'Institut national de la recherche scientifique - Eau (INRS-Eau). Développé « par tronçon », le modèle du fleuve Saint-Laurent est subdivisé en tenant compte des frontières naturelles de l'hydrosystème. Celui du lac Saint-François constitue donc le premier volume d'une série d'atlas qui couvriront éventuellement toute la partie fluviale du Saint-Laurent. Il n'est évidemment pas possible de rendre compte de l'ensemble de la complexité du lac Saint-François

dans un seul document. C'est pourquoi nous avons procédé par *événements de référence* considérés comme représentatifs, en première approximation, des principaux états du système en période libre de glace.

Cet atlas présente un bilan de l'état, encore en évolution, de la modélisation abiotique du lac Saint-François, initiative qui ouvre la voie vers la modélisation des habitats, de la propagation et la dispersion des panaches d'effluents, ainsi que vers la gestion optimale et écologique des niveaux et des débits. Dans le cadre du PASL-SLV2000-Phase III, d'autres travaux de modélisation du Saint-Laurent notamment autour de l'archipel de Montréal, entre Montréal et Sorel ainsi qu'au lac Saint-Pierre) sont présentement en cours.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Le lac fluvial	1
Le contexte économique et politique	1
Les habitats	1
La connaissance des courants : une nécessité	2
La modélisation hydrodynamique	2
L'atlas des courants	3
Hydrologie du système : les débits	4
Les variations saisonnières	4
Les variations à long terme du débit	5
Le débit à l'exutoire	6
Tributaires	8
Hydrologie du système : les niveaux d'eau	10
Le niveau d'eau à Coteau-Landing	10
La pente du plan d'eau	10
Modèle numérique de terrain	12
Topographie	12
Les données	12
Classification morphologique	12
Substrat	13
Les données	13
Le terrain	13
Plantes aquatiques	14
Les données	14
Le terrain	15
Modèle hydrodynamique	16
Grille éléments finis	16
La discrétisation	17
Le maillage du lac Saint-François	17
Concept d'événements de référence	18
Le choix des événements de référence	18
Validation	19
La validation des niveaux	19
La validation des vitesses	20
Présentation des résultats	23
Résultats (planches)	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géopolitique du lac Saint-François.	2
Figure 2 : Distribution des débits du fleuve Saint-Laurent au lac Saint-François ; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.	5
Figure 3 : Évolution à long terme des débits du lac Saint-François	6
Figure 4 : Distribution des débits à la sortie du canal de Beauharnois; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.	7
Figure 5 : Distribution des débits hivernaux du lac Saint-François aux ouvrages de Coteau; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.	7
Figure 6 : Bassins de drainage des tributaires secondaires du lac Saint-François.	9
Figure 7 : Variation de la pente du plan d'eau entre Summerstown et Coteau-Landing durant l'année, moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.	11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Événements de référence représentés dans cet atlas.	19
Tableau 2 : Résultats de la validation des niveaux d'eau (RIGL55).	20

Introduction

Le lac fluvial

Le lac Saint-François (Figure 1) est un élargissement majeur du fleuve Saint-Laurent : le premier élargissement naturel en aval des Grands-Lacs. On le qualifie de « *lac fluvial* » car il présente les caractéristiques d'un lac par sa superficie et d'un fleuve par l'importance du débit qui y transite et la nature gravitationnelle de ses écoulements. Sa superficie est de 254,2 km², son volume total est de 1.45 km³ pour une profondeur maximale est de 26.0 m. La profondeur moyenne est de 5.7 m et le débit moyen interannuel est d'environ 7 500 m³/s. Un tel débit en milieu peu profond engendre des courants gravitationnels forts, qui expliquent la quasi-absence de stratification thermique.

Le contexte économique et politique

Le lac Saint-François est partagé par trois frontières politiques qui délimitent le Québec, l'Ontario et l'état de New York. De plus, la réserve amérindienne d'Akwéasné est située sur le point de jonction de ces trois frontières. La région amont du lac est industrialisée et les fonderies, les alumineries et les papetières y profitent de la présence de l'énergie hydroélectrique. Le barrage hydroélectrique Moses-Saunders délimite l'amont du lac Saint-François tandis que celui de Beauharnois en constitue l'extrémité aval. La navigation commerciale de fort tonnage y transite par la voie maritime du Saint-Laurent laquelle comprend des écluses à l'amont et à l'aval. La navigation de plaisance y est également importante.

Les habitats

Le fleuve et ses berges sont diversifiés en termes d'habitats. Ces habitats sont le milieu de vie et de reproduction de plusieurs centaines d'espèces floristiques et fauniques dont plusieurs sont menacées. Les habitats les plus en danger sont situés dans les milieux humides de l'ancienne plaine inondable puisque les fluctuations de niveau d'eau ont subi une régularisation très significative. Les facteurs abiotiques définissent une grande partie de l'habitat ; ce sont par exemple les courants, les niveaux d'eau, les vagues, la température ainsi que la qualité de l'eau. Le travail de modélisation que cet ouvrage présente permettra de connaître par le biais de simulations, la distribution de plusieurs de ces facteurs, et donc de décrire, de comprendre et éventuellement, d'améliorer les habitats les plus propices aux espèces menacées.

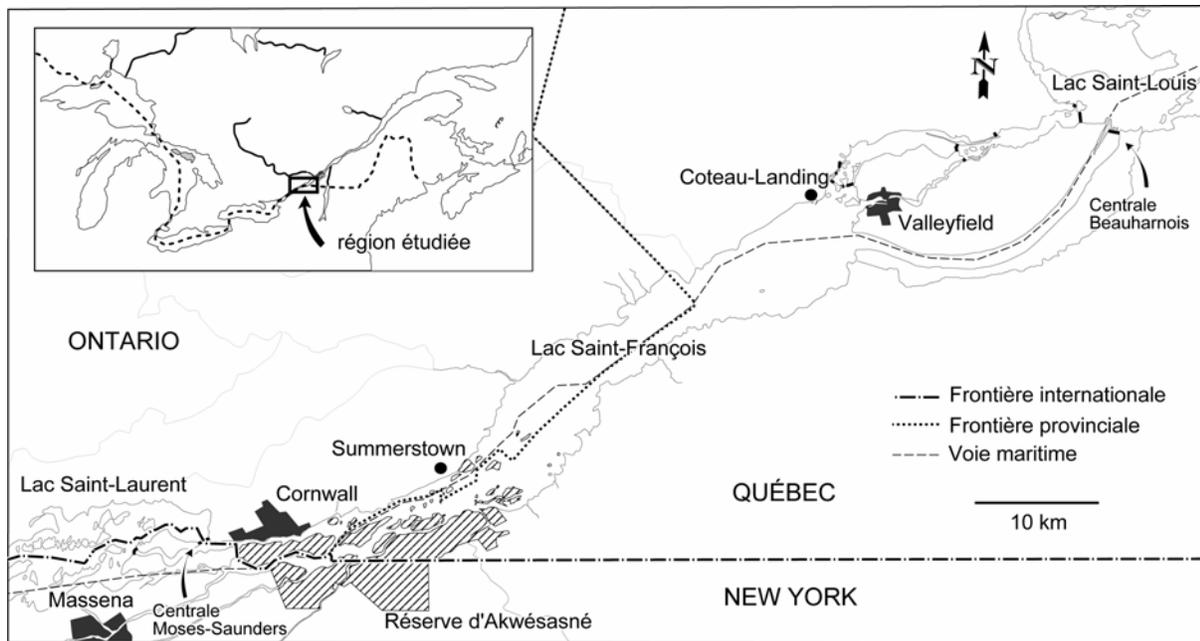


Figure 1: Carte géopolitique du lac Saint-François.

La connaissance des courants : une nécessité

La connaissance des courants est essentielle afin de simuler le transport des contaminants dans les panaches des rejets industriels et municipaux ; il en est de même pour la propagation des hydrocarbures, en cas de déversement accidentel, ainsi que pour la dynamique sédimentaire, parfois nuisible à la navigation. De plus, cette connaissance peut être intéressante pour la navigation tant de plaisance que commerciale. Enfin, elle contribue à mieux comprendre les échanges internes et la dynamique d'un hydrosystème complexe.

La modélisation hydrodynamique

Les renseignements sur les courants peuvent être obtenus soit par mesures directes dans le milieu soit, par modélisation numérique. La mesure directe a l'inconvénient d'être coûteuse et fastidieuse ; c'est une valeur ponctuelle et valide seulement pour l'événement hydrodynamique mesuré, ce qui restreint sa portée synoptique. La modélisation permet, une fois validée, de simuler des vitesses associées à une large gamme de débits et ce, sur l'ensemble du tronçon. L'impact de changements morphologiques ou d'aménagements peut également être prédit.

La modélisation hydrodynamique permet de simuler des événements récurrents survenant régulièrement ou encore, des événements rarissimes de fort ou de faible débit. On peut également simuler des événements qui ne se sont jamais produits tels que des crues maximales

probables (CMP), et d'en évaluer les impacts potentiels. Le calcul de l'écoulement incorpore de grandes quantités de données de terrain et il s'effectue en spécifiant certaines conditions d'interaction avec l'amont et l'aval (conditions aux limites). Les données de terrain comprennent principalement la topométrie et les caractéristiques de résistance du milieu à l'écoulement (ex : substrat, plantes aquatiques), tandis que les conditions aux limites sont les niveaux et débits imposés aux frontières du tronçon simulé.

L'atlas des courants

Le présent document montre la distribution des courants dans différentes conditions contrastées ainsi que la complexité de l'hydrologie du lac Saint-François et d'une partie de son écosystème. Puisque les variations de débit et de résistance des plantes aquatiques à l'écoulement sont importantes au cours de l'année, toutes ces conditions ne peuvent pas être présentées dans cet atlas. Pour représenter cette variabilité, une approche par événements de référence a été choisie. Cette méthode permet de montrer la diversité de l'écoulement par un nombre limité de simulations. Les conditions d'hiver demeurent encore exclues de l'exercice faute des modules de calcul requis pour le faire.

La méthode de modélisation retenue ici est exigeante quant à l'élaboration du modèle de terrain, à la connaissance de l'hydrologie et à la validation des résultats obtenus. Il nous est apparu utile de présenter sommairement la méthodologie utilisée pour en arriver à cette représentation de la réalité physique et abiotique du lac Saint-François: l'hydrologie, le modèle de terrain, le modèle mathématique, l'élaboration de la grille de calcul, le choix des événements de référence et la validation des résultats sont décrits de façon simple mais précise.

Hydrologie du système : les débits

La connaissance de l'hydrologie est essentielle afin de bien comprendre le comportement de ce milieu dans toutes les gammes de débits possibles. Les débits à l'entrée du lac, à l'embouchure des tributaires ainsi que la répartition des débits aux différents exutoires du lac Saint-François ont donc été analysés. Les niveaux du lac Saint-François sont contrôlés à son embouchure. Toutefois, l'effet des plantes aquatiques et de la glace est important sur les variations de niveau à l'amont de cette frontière; nous reviendrons un peu plus loin sur la question des niveaux d'eau. L'analyse des niveaux et des débits sert à établir les conditions qui doivent être imposées aux limites du modèle et permet partiellement d'en contrôler le bon fonctionnement notamment, durant la phase de validation.

Les eaux qui alimentent le lac Saint-François à sa limite amont près de Cornwall, proviennent essentiellement du lac Ontario. Le niveau du lac Ontario et le débit qui en sort sont contrôlés par le barrage hydroélectrique de Moses-Saunders. La gestion de ces débits et niveaux est sous la responsabilité de la Commission mixte internationale (CMI). Divers critères entrent en ligne de compte dans la gestion du débit sortant du lac Ontario : ils représentent les intérêts principaux que sont le contrôle des inondations, la navigation commerciale et la production hydroélectrique.

Les variations saisonnières

Les Grands-Lacs agissent comme un puissant régulateur sur le débit du Saint-Laurent, étant donné leur immense superficie et leur capacité d'emmagasinement considérable. Durant une année moyenne, le débit du fleuve est à son minimum en janvier et à son maximum en juillet. Le débit annuel moyen est de 7500 m³/s, tandis que les débits maximums et minimums mensuels moyens sont respectivement d'environ 7900 m³/s au mois de juillet, et de 6500 m³/s au mois de janvier. La Figure 2 montre que le débit est relativement constant entre la mi-avril et le mois de novembre, qu'il diminue rapidement entre décembre et le début de janvier, atteignant un plancher durant ce mois, puis qu'il augmente graduellement jusqu'à la mi-avril. La fin du mois de décembre est caractérisée par une diminution brusque du débit, une réduction artificielle imposée aux ouvrages de Moses-Saunders afin de favoriser la formation d'un couvert de glace stable en amont des barrages, suivie rapidement d'un rétablissement à la normale. Le lac Saint-

François n'ajoute pas d'effet régulateur au débit du fleuve Saint-Laurent, son niveau étant très étroitement contrôlé à Beauharnois afin de reconduire exactement le débit reçu de Moses-Saunders vers l'aval.

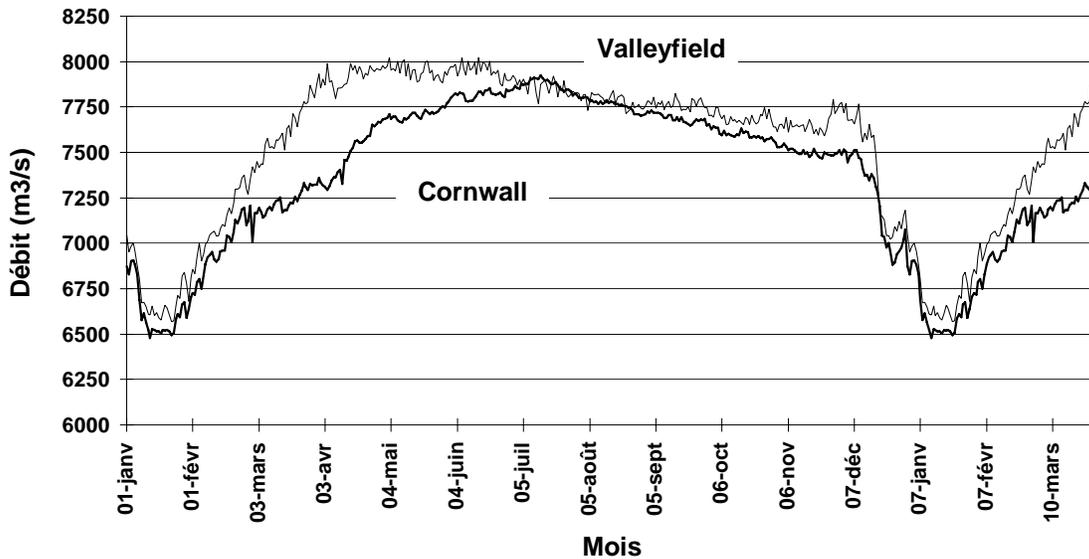


Figure 2 : Distribution des débits du fleuve Saint-Laurent au lac Saint-François ; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.

Les variations à long terme du débit

Les variations à long terme du débit du fleuve Saint-Laurent montrent de grandes fluctuations qui sont directement reliées aux variations dans les précipitations sur le bassin versant. Les fluctuations semblent former des cycles variant de 10 à 30 ans qui sont souvent qualifiés de périodes de faible et forte hydraulité. La Figure 3 montre l'évolution des moyennes mensuelles du débit du fleuve à l'amont du lac Saint-François et la succession de périodes de forte et de faible hydraulité depuis 1860. Les débits mensuels extrêmes qui ont été enregistrés sont de 4500 m³/s en janvier 1935 et de 10 012 m³/s en mai 1993.

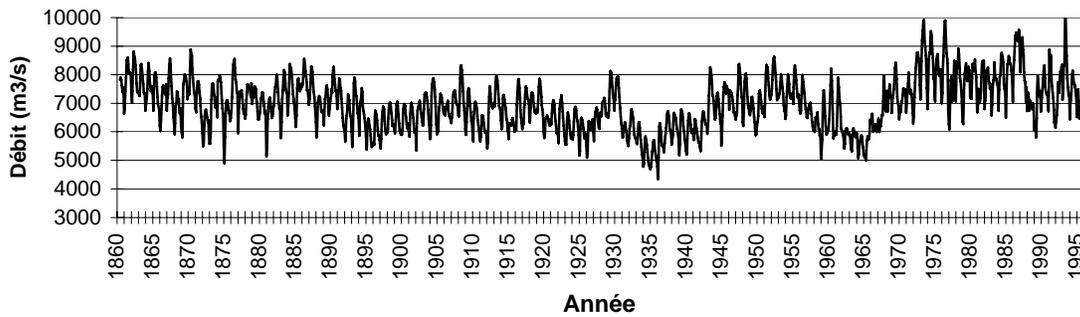


Figure 3 : Évolution à long terme des débits du lac Saint-François

Le débit à l'exutoire

L'exutoire du lac Saint-François se compose de deux sorties : le canal de Beauharnois et les ouvrages de contrôle de Coteau. Le canal de Beauharnois, un ouvrage de dérivation vers le barrage hydroélectrique du même nom, détourne la plus grande partie du débit du Saint-Laurent, soit 87%, tandis que seulement 13% emprunte le chenal naturel ; les débits respectifs résultant de cette gestion sont d'environ 6500 m³/s et de 1000 m³/s. De façon générale, le régime du canal de Beauharnois est relativement stable et déterminé par la capacité installée de la centrale hydroélectrique qu'il alimente directement. Le chenal naturel sert donc de trop-plein pour les débits en provenance des Grands Lacs car, comme nous l'avons mentionné, le faible marnage imposé au lac Saint-François n'induit aucune régulation de son débit à l'exutoire.

Le débit passant par le canal de Beauharnois est utilisé pour la génération d'hydroélectricité. Cette production s'effectue habituellement à la capacité installée de l'ouvrage, sauf en certaines périodes où il est nécessaire de tenir compte de la contrainte de formation du couvert de glace. La courbe des débits journaliers moyens interannuels sur 30 ans (Figure 4), montre un débit moyen variant entre 5600 m³/s en hiver, durant la période de formation de la glace, et 6800 m³/s en automne. Le débit est stable entre le début de mai jusqu'au début de décembre, à 6700 m³/s (Figure 4). On l'abaisse brusquement à la mi-décembre, afin de favoriser la formation du couvert de glace. Le débit augmente progressivement jusqu'au début de mars, puis diminue jusqu'au début d'avril.

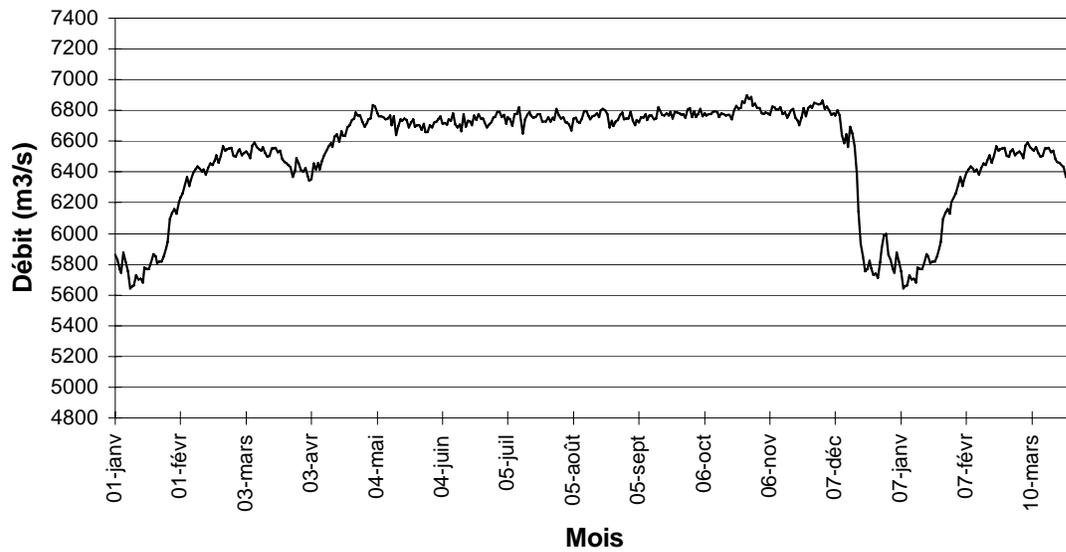


Figure 4 : Distribution des débits à la sortie du canal de Beauharnois; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.

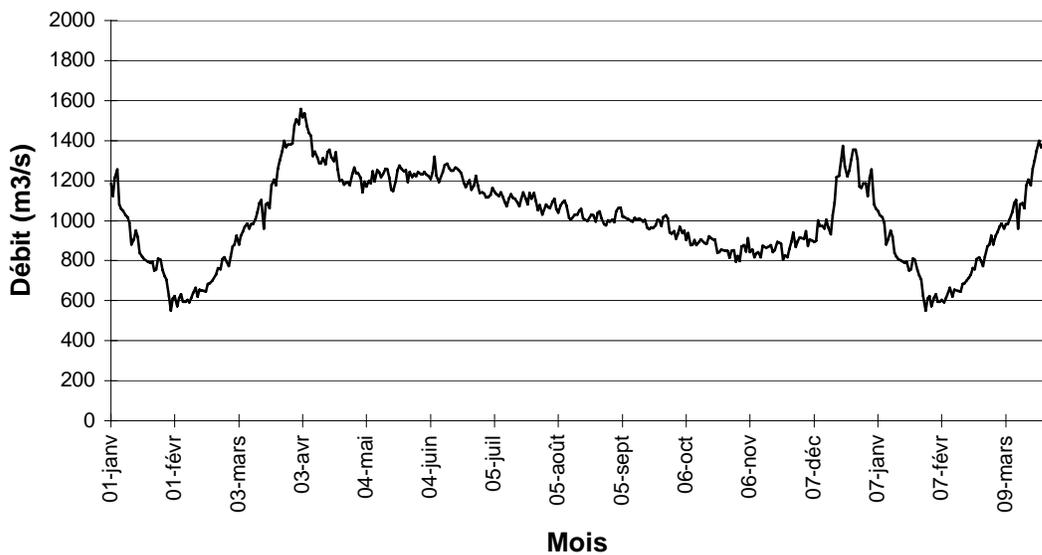


Figure 5 : Distribution des débits hivernaux du lac Saint-François aux ouvrages de Coteau; moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.

La courbe des débits passant aux ouvrages de Coteau (Figure 5) laisse voir un débit maximum de près de 1600 m³/s au début de mai, valeur qui diminue progressivement jusqu'au début de décembre. Cet abaissement graduel est suivi d'un second sommet au début de l'hiver, puis d'un minimum en février. Le débit qui est déversé à Coteau constitue l'excédent qui n'est pas turbiné à Beauharnois. Durant la période « à l'eau libre » (sans glace), le débit diminue graduellement,

condition nécessaire pour maintenir un débit régulier à Beauharnois. Pendant la période de formation de la glace, le débit est diminué dans le canal de Beauharnois et augmenté aux ouvrages de Coteau; c'est l'inverse lorsque le couvert de glace est stable. Vers le début d'avril, à la fonte des glaces, le débit est diminué temporairement dans le canal afin de réduire les vitesses de courant, et ainsi faciliter la manœuvre des navires à travers les glaces flottantes.

Tributaires

Les débits sortant du lac Saint-François sont plus forts que les débits qui y entrent en provenance des Grands-Lacs au barrage de Moses-Saunders, la différence atteignant un maximum moyen d'environ 700 m³/s au printemps et 300 m³/s en automne. Cet écart est bien sûr dû aux apports des tributaires entrant dans le fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Valleyfield.

Mis à part l'apport des Grands Lacs, la contribution des tributaires les plus importants du lac Saint-François s'effectue du côté sud, à la tête du lac, à partir des territoires américain et québécois (Figure 6). D'ouest en est, ce sont les rivières Grasse, Raquette, Saint-Régis et aux Saumons qui ont respectivement des débits annuels moyens de 32 m³/s, 67 m³/s, 31 m³/s et 19 m³/s à leur embouchure. Les rivières Beaudette, Raisin et à la Guerre ont des débits moyens de moins de 5 m³/s. De façon générale, le débit de ces tributaires est plus fort au printemps avec une autre pointe de moindre importance à la fin novembre. Les conditions d'étiage se manifestent aux mois de juillet et d'août. La rivière Raquette, le plus important tributaire, a un débit journalier maximum (moyenne interannuelle) de 120 m³/s au printemps et un minimum de 40 m³/s en été. Les rivières Raisin, Beaudette et à la Guerre drainent des zones essentiellement agricoles tandis, que les rivières Grasse, Raquette, Saint-Régis et aux Saumons prennent leur source dans les zones forestières des monts Adirondacks et drainent également des zones agricoles plus au nord.

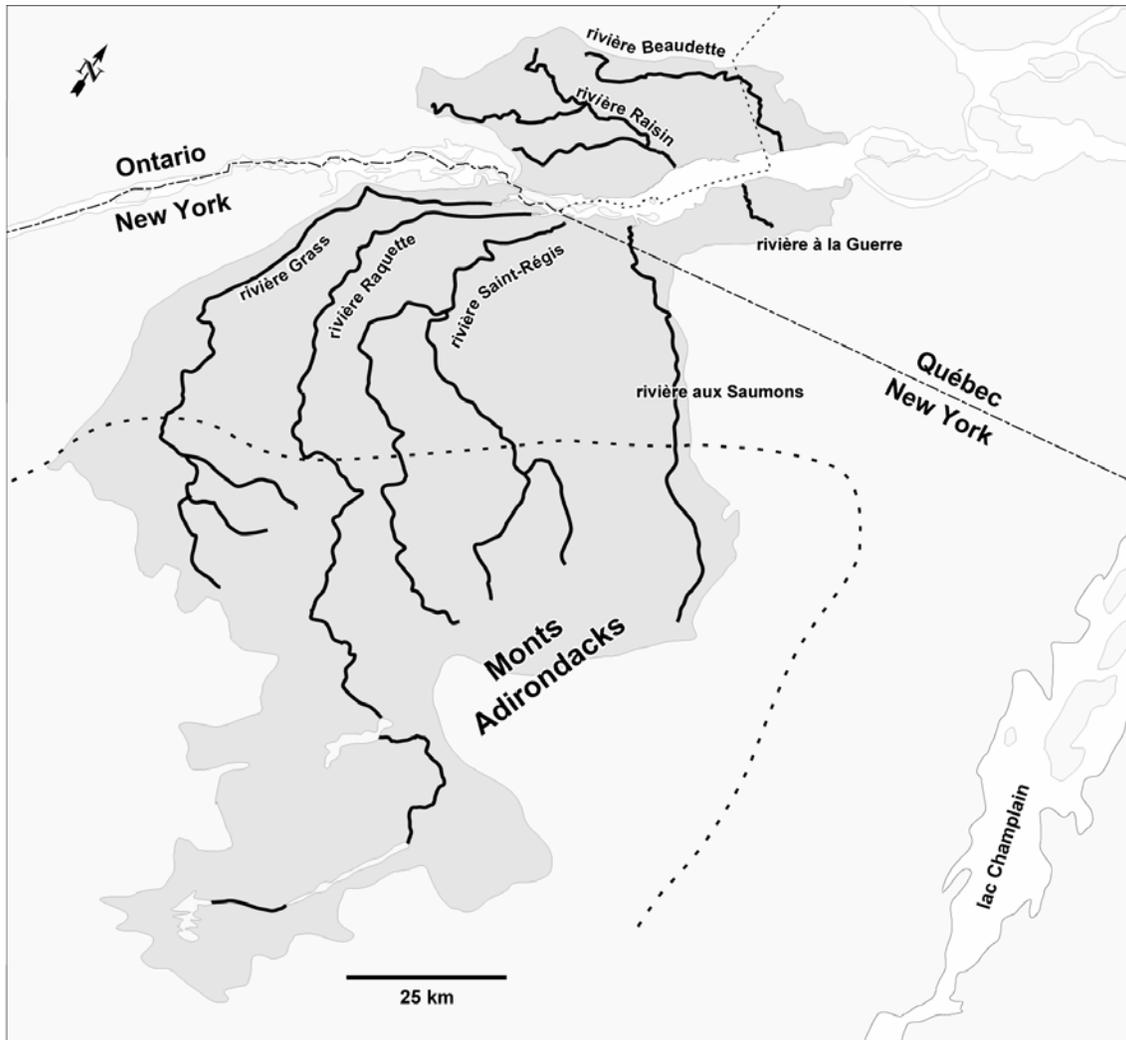


Figure 6 : Bassins de drainage des tributaires secondaires du lac Saint-François.

Hydrologie du système : les niveaux d'eau

De façon générale dans le fleuve Saint-Laurent, les niveaux varient directement en fonction du débit qui y transite. Comme nous l'avons évoqué précédemment, le lac Saint-François fait exception puisque les niveaux sont étroitement stabilisés à l'aval par les ouvrages de Coteau et par le barrage de Beauharnois. En effet, le débit sortant du lac Saint-François est ajusté rigoureusement au débit entrant, permettant ainsi une stabilisation du niveau. La gestion des niveaux est sous la responsabilité d'Hydro-Québec. Le but d'une telle gestion est de maximiser le tirant d'eau (tonnage) des navires dans la voie maritime du Saint-Laurent tout en minimisant les risques d'inondation.

Le niveau d'eau à Coteau-Landing

La gestion du niveau à Coteau-Landing a varié énormément depuis la construction du canal de Beauharnois en 1932. Brièvement, les niveaux fluctuaient en fonction du débit avec un niveau moyen maintenu de plus en plus haut jusqu'en 1960. Depuis la construction de la voie maritime du Saint-Laurent (vers 1960), la variation des niveaux a été stabilisée à moins de 30 cm d'écart, soit entre 46.33 m et 46.63 m. Actuellement, les navires transitant par la voie maritime peuvent compter sur un tirant d'eau minimum de 8.0 m. Puisqu'un tel tirant d'eau exige un niveau stable et élevé, les niveaux actuels sont maintenus à près de 46.58 m à Coteau durant la période sans glace. En hiver, le niveau est augmenté d'environ 0.08 m.

La pente du plan d'eau

La pente du plan d'eau est représentée par l'écart du niveau d'eau entre l'amont et l'aval sur la longueur du lac. Elle varie en fonction du débit, de la résistance à l'écoulement exercée par la glace en surface et par les plantes aquatiques au fond et dans la colonne d'eau. Les quatre stations de mesures limnimétriques disponibles, Beauharnois (centrale), Coteau-Landing, Summerstown et Cornwall, ont été utilisées pour les fins de ce type d'analyse.

Les variations annuelles moyennes de niveau au lac Saint-François sont d'environ 10 cm à Coteau-Landing et de 20 cm à Cornwall. De façon générale, les pentes dans le lac sont plus fortes en présence de glace en hiver, plus faibles au printemps et en automne, et sont moyennes en présence de plantes aquatiques durant l'été. La Figure 7 montre en détail la variation de la pente au cours de l'année. Entre Summerstown et Coteau-Landing, l'influence des plantes

aquatiques et de la glace sur la pente sont du même ordre de grandeur. Les effets de la glace en hiver et des plantes aquatiques en été y sont marqués; la pente est forte à la fin du mois d'août, et est sensiblement plus forte en présence de glace durant le mois de mars.

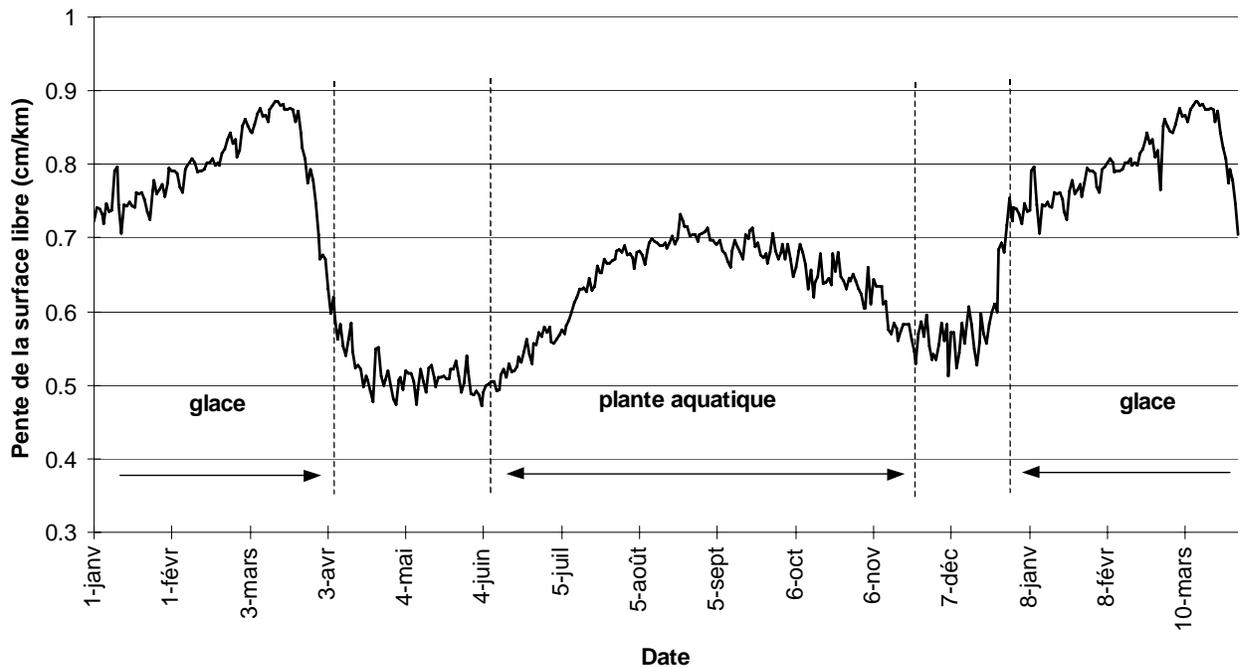


Figure 7 : Variation de la pente du plan d'eau entre Summerstown et Coteau-Landing durant l'année, moyenne journalière interannuelle entre 1963 et 1992.

Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain comprend les données géoréférencées provenant des nombreuses mesures du milieu étudié ; il s'agit principalement de la description numérique de la topométrie du fond du fleuve, de la nature du substrat et des plantes aquatiques. Toutes ces informations sont variables dans l'espace et doivent donc être connues sur l'ensemble du tronçon pour obtenir des simulations hydrodynamiques représentatives de la réalité des courants. En plus de procurer des simulations fiables, un modèle de terrain de qualité permet aux experts de mieux comprendre les modes de fonctionnement du milieu naturel.

Topographie

La topographie est la description de l'élévation du terrain, il s'agit de la variable la plus importante dans le calcul de l'hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent. Elle sert à décrire la morphologie du cours d'eau pour le modèle hydrodynamique. En général pour la modélisation hydrodynamique, les informations sur la topographie du fond du cours d'eau et sur l'élévation des plaines inondables sont intégrées dans le modèle de terrain. Étant donnée la stabilisation des niveaux au lac Saint-François, seuls la description du lit du fleuve demeure pertinente aujourd'hui.

Les données

Ces données proviennent d'une caractérisation du terrain par le Service hydrographique du Canada (SHC) effectuée entre 1986 et 1988. Les sondages du SHC sont rassemblés sur 14 cartes appelées « minutes hydrographiques » dont l'échelle varie de 1:5 000 à 1:10 000. La majorité des sondages étaient disponibles en format numérique mais quelque 70 000 points additionnels ont dû être numérisés. Un total de 292 270 points de sondage à une précision verticale de ± 10 cm, a été assemblé dans le modèle de topométrie. Un sous-ensemble de la base de donnée de topographie décrivant bien la complexité du fond est présenté à la planche 2.

Classification morphologique

Selon la morphologie des fonds, le lac Saint-François peut être subdivisé en trois parties distinctes : *fluviale*, *chenalisée* et *lacustre*. La partie fluviale s'étend entre le barrage de Moses-Saunders et Summerstown; cette zone est caractérisée par un petit nombre de chenaux larges et

profonds, entrecoupés par des îles de grande taille (Planche 2). La partie chenalisée, au centre du lac, est caractérisée par des zones peu profondes (0 à 10 m) traversées par un réseau complexe de chenaux anastomosés sous-fluviaux relativement profonds (jusqu'à 26 m). Les zones peu profondes comprennent des îles et des hauts-fonds de moins de 1.5 m de profondeur. La partie lacustre occupe l'est du lac Saint-François, elle comporte un fond régulier de moins de 10 m de profondeur, coupé par un chenal central profond de plus de 21 m.

Substrat

La distribution spatiale du substrat doit être connue sur tout le tronçon puisque ce facteur, en plus de contribuer à la résistance à l'écoulement. Le frottement par le substrat est introduit localement dans le calcul de l'hydrodynamique à l'aide d'un coefficient (le « n » de Manning) qui varie ici, en fonction de la granulométrie (Planche 3). Pour connaître la distribution spatiale des sédiments, la caractérisation directe sur le terrain est la seule méthode fiable disponible. La réponse en terme de résistance à l'écoulement peut nécessiter des ajustements additionnels lors de la calibration des simulations.

Les données

La carte du substrat utilisée au lac Saint-François a été constituée à l'aide de données provenant de diverses sources. Environ 1300 observations qualitatives ont été colligées par le SHC et intégrées aux minutes hydrographiques. Ces observations, bien que très grossières et d'un intérêt variable, ont été ajoutées aux 234 sondages granulométriques disponibles dans la littérature scientifique. Chacun de ces derniers procurait le % de gravier, de sable, de silt et d'argile. Par ailleurs, environ 300 observations qualitatives ont été effectuées lors de nos propres campagnes de caractérisation. Ces observations ont été effectuées à l'aide d'une caméra sous-marine et/ou d'une benne à sédiment. Toutes ces données ont été assemblées sur une carte au 1:15 000 et superposées sur la topographie du lac. Puisque localement, la distribution du substrat est fortement corrélée avec la profondeur, l'interpolation des points de sondage de substrat s'est faite en partie à l'aide des courbes de niveau. Un modèle d'interprétation basé sur la stratigraphie des dépôts quaternaires a également été mis à contribution.

Le terrain

La granulométrie varie en fonction de l'énergie du milieu telle que conditionnée par les courants

et les vagues, mais également en fonction des sources de sédiment et de la composition du sous-sol. Au lac Saint-François, la distribution du substrat est fortement influencée par la présence des dépôts quaternaires et des roches sous-jacentes. Le lac est limité à l'amont et à l'aval par des affleurements rocheux résistants, à l'origine des zones de rapides qui étaient présentes autrefois à l'état naturel. De l'amont à l'aval, la granulométrie du chenal central obéit à la diminution graduelle des vitesses. Le substrat est très grossier autour de l'île de Cornwall, passe ensuite à du gravier, puis du sable graveleux, du sable et finalement du silt. Les sédiments sont très fins dans la partie lacustre où les vitesses de courant sont relativement faibles. Des sédiments fins (boue) sont également présents dans les bassins fermés que l'on retrouve dans la partie chenalisée au centre du lac. Par les fortes expositions au vent (fetchs) qui la caractérise, toute la rive sud offre une très forte emprise au vent dominant d'ouest sur et l'effet des vagues sur le substrat y est donc important et déterminant. Ainsi, on y retrouve des plages de sable dans des baies fermées par des pointes composées de matériaux grossiers et résistants à l'érosion (till). On peut également noter la présence de forts pourcentages de sable à l'embouchure de tous les tributaires, ce qui s'explique par les apports sédimentaires des rivières alluvionnaires en période de crue.

Plantes aquatiques

Les plantes aquatiques jouent un rôle déterminant sur l'écoulement dans le lac Saint-François, particulièrement l'été et l'automne et ce, tant sur le niveau d'eau que sur la distribution spatiale des courants et des masses d'eau. Les éléments ayant le plus d'influence sont les plantes submergées de grande taille (macrophytes submergés). Leur effet sur l'écoulement est introduit dans le calcul hydrodynamique d'une façon similaire au substrat (Planche 4), par un coefficient de frottement local de type «*n* de Manning ». La valeur locale de ce coefficient est fonction du type, de la taille, et de la concentration relative des espèces ainsi que de la phase de croissance annuelle.

Les données

Les données sur la distribution spatiale des macrophytes submergés ont été acquises lors d'une campagne de terrain réalisée à la fin de l'été 1995 (24 septembre au 3 octobre). Une technique de cartographie impliquant un échosondeur, une caméra vidéo sous-marine et un système de positionnement dGPS (GPS différentiel) a été utilisée pour réaliser 35 transects répartis sur

l'ensemble du lac Saint-François. Les lectures d'échosondages ainsi que leur calibration avec la caméra vidéo ont permis de distinguer 12 assemblages d'espèces de macrophytes avec diverses variations quantitatives sur les hauteurs et les densités. Ces dernières variables sont celles utilisées pour le calcul du coefficient de frottement local de chaque *faciès* macrophytique.

Le terrain

Ces travaux de terrain ont contribué à comprendre la distribution générale des macrophytes dans le lac Saint-François. Les facteurs influençant cette distribution sont principalement des facteurs abiotiques tels que les vagues, les courants, la pénétration de la lumière et le type de substrat. La planche 3 montre la distribution spatiale des assemblages de plantes au lac Saint-François. On peut y noter plusieurs particularités résumant l'adaptation des espèces face aux facteurs abiotiques dominant leurs habitats.

Le *potamot pectiné* est présent principalement en bordure des chenaux principaux et des hauts fonds où l'on trouve de forts courants. Cette plante est particulièrement bien adaptée aux courants avec des tissus longs et flexibles. La *vallisnérie* se retrouve en colonie pure dans les zones où l'action des vagues est relativement forte, principalement dans la partie est du lac. L'association de la *vallisnérie* et du *potamot de Richardson* est présente lorsque l'énergie des vagues est moins importante. Le *cératophylle* est abondant dans les zones protégées des courants et des vagues. Le *myriophylle* avec des formes de croissance en canopé est abondant dans la partie chenalisée, dans les zones où les sédiments fins riches en nutriments ont tendance à se déposer. L'algue *Nitella* est présente dans les zones les plus profondes à la limite de la pénétration de la lumière. Les zones où l'on ne retrouve aucune plante s'expliquent soit, parce qu'elles sont trop profondes, sont soumises à de trop forts courants ou de trop fortes vagues, ou encore parce qu'elles sont composées de matériaux résistants à la pénétration des racines. En effet, les racines ne peuvent pénétrer la roche mère ni l'argile cohésive présente dans les dépôts quaternaires.

Modèle hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique est effectuée à l'aide du modèle HYDROSIM, développé à l'INRS-Eau. Cet simulateur est couplé à MODELEUR, un outil de type SIG (Système d'information géographique) dédié à l'hydraulique fluviale qui permet de pré- et post-traiter les données en plus de piloter les simulations. L'approche utilisée est basée sur une modélisation numérique bidimensionnelle (2D) des équations d'ondes longues aussi appelées « équations des eaux peu profondes » qui sont résolues par la méthode des éléments finis. Ce modèle utilise la forme conservative des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement des équations de Saint-Venant et prend en compte localement les paramètres de frottement dus aux substrats, aux plantes aquatiques et à la glace. Il procure en sortie les composantes (x , y) de la vitesse moyenne (intégrée dans la verticale) sur tous les nœuds de calcul. Tout le domaine de simulation est ainsi décrit soit directement aux nœuds de calcul, ou encore par interpolation entre ces nœuds. Le modèle prend en compte le recouvrement et le découverture des berges en fonction du débit et du niveau d'eau. Le modèle mathématique est représenté par le système d'équation de la figure 8. Le simulateur peut être opéré en régime transitoire mais les conditions d'écoulement quasi-permanentes dans le lac Saint-François permettent une résolution stationnaire (régime permanent).

Grille éléments finis

Le tronçon simulé est subdivisé en de nombreux éléments triangulaires qui forment le « maillage » ou la « grille d'éléments finis ». La forme et la taille de ces éléments peuvent être adaptées pour représenter la forme et la complexité du terrain, du substrat, des plantes aquatiques ou de toute autre variable. Plus le terrain est complexe, plus le maillage est raffiné, et plus le nombre d'éléments est important. Cependant, un maillage avec un trop grand nombre d'éléments peut se traduire en des temps de calcul excessifs. Un des objectifs du modélisateur est d'optimiser le maillage en tenant compte des besoins de précision et du temps de calcul sur les ordinateurs disponibles.

Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy}) - \tau_x^b - \tau_x^s \right) - f_c q_y = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) - \tau_y^b - \tau_y^s \right) + f_c q_x = 0$$

$x(x,y)$	= Coordonnées (x vers l'est et y vers le nord)	f_c	= force de Coriolis ($f_c=2\omega\sin\phi$) (s^{-1})
q_x, q_y	= débit spécifique selon x et y (m^2/s)	τ_{ij}	= contraintes de Reynolds (kg/s^2m)
h	= hauteur d'eau (niveau)	τ_x^b, τ_y^b	= friction au fond en x et en y (kg/s^2m)
H	= profondeur de la colonne d'eau ($=h-z_f$) (m)	τ_x^s, τ_y^s	= friction en surface en x et en y (kg/s^2m)
c	= célérité des vagues ($c = \sqrt{gH}$) (m/s) ₃		
ρ	= masse spécifique de l'eau ($10^3 kg/m^3$)		
$u(u,v)$	= composant de la vitesse (m/s) où;		
	$u = q_x/H$ (m/s)		
	$v = q_y/H$ (m/s)		

Figure 8 : Équation des ondes longues (forme conservative) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Modèle de Saint-Venant).

La discrétisation

Les données du modèle de terrain sont rendues accessibles au modèle de calcul hydrodynamique par la méthode des éléments finis. Les éléments utilisés sont des triangles à six noeuds (interpolation P1-isoP2) qui sont tous impliqués dans le calcul des vitesses moyennes (Planche 1). Ces noeuds portent les informations sur le frottement et la topographie. La topographie et le niveau d'eau sont portés par les 3 noeuds sommets, une interpolation linéaire permet de connaître ces variables sur tout l'élément.

Le maillage du lac Saint-François

Le maillage du lac Saint-François utilisé pour cet atlas, est composé de 27 618 éléments et de 57 468 noeuds. La taille des éléments varie de 10 m à 400 m de côté (Planche 1). Une attention particulière a été apportée à la construction du maillage. La forme du terrain dans la partie fluviale et chenalisée est très accidentée ; les éléments dans ces deux parties sont de petite taille et épousent très bien le contour des chenaux. Cette précision permet d'obtenir des vitesses simulées réalistes même dans les petits chenaux.

Le maillage a été construit à l'aide du MODELEUR ; cet outil est au cœur de la gestion des données du modèle de terrain, de la préparation des données à la simulation et de la visualisation des résultats. Le MODELEUR a été conçu pour construire de façon semi-automatique les éléments du maillage. L'utilisateur a la possibilité de choisir la dimension des mailles et la limite du maillage. Une fois la grille de calcul construite, les données de terrain sont interpolées sur les nœuds de calcul (projetées). Cette même grille, ou un autre maillage de représentation, peuvent être utilisés pour consulter graphiquement les résultats sous forme d'isosurfaces, d'isolignes ou de vecteurs. Dans le cas du présent atlas, le même maillage a été utilisé pour la représentation graphique et les calculs hydrodynamiques.

Concept d'événements de référence

En période à l'eau libre (sans glace), la variation temporelle des courants au lac Saint-François est principalement fonction des débits du fleuve et des tributaires, ainsi que de la présence de plantes. Toute variation de l'influence de chacune de ces variables crée autant d'ensembles de conditions différentes qui peuvent être simulées. Toutefois, puisque toutes ces conditions représentent une masse d'information importante et souvent très redondante, des événements dit, « de référence », ont été choisis pour montrer la diversité des courants dans le cadre de cet Atlas. Ces événements de référence ont été sélectionnés pour représenter des conditions moyennes et fixer les bornes extrêmes ; la plupart des autres conditions possibles sont donc comprises quelque part parmi ces événements. Parmi les événements de référence, on compte aussi ceux utilisés pour vérifier les résultats du simulateur et qui ont fait l'objet de mesures. Le vent et la glace peuvent avoir une influence significative sur l'écoulement ; toutefois, seulement les variations dans les conditions de débits et de plantes aquatiques sont prises en considération dans le cadre de cet atlas.

Le choix des événements de référence

Les chroniques historiques de débit montrent que la gamme des débits mensuels au lac Saint-François varie entre des extrêmes qui vont de 4500 m³/s à 10 000 m³/s avec une moyenne d'environ 7500 m³/s. La diversité des courants est montrée à l'aide des événements extrêmes ainsi qu'avec la moyenne des événements possibles par tranche de 2500 m³/s, soit de 5000, 7500 et 10 000 m³/s (Tableau 1). Ces événements sont simulés en absence de plantes et de glace et au maximum de croissance des plantes. La période d'absence des plantes et de la glace correspond

au printemps, entre la fonte des glaces jusqu'au début juin, ou encore à l'automne, entre la fin de novembre et la prise des glaces (période printemps-automne). La période de croissance des macrophytes aquatiques débute au mois de juin et se poursuit jusqu'à la mi-octobre (période été).

Tableau 1 : Événements de référence représentés dans cet atlas.

Événement	Débit du fleuve	Débit des tributaires	Résistance des plantes	Période représentée
Planche 5	5000 m ³ /s	150 m ³ /s	maximum	fin de l'été (août-oct.)
Planche 6	5000 m ³ /s	750 m ³ /s	absence	printemps et fin de l'automne
Planche 7	7500 m ³ /s	150 m ³ /s	maximum	fin de l'été (août-oct.)
Planche 8	7500 m ³ /s	750 m ³ /s	absence	printemps et fin de l'automne
Planche 9	10 000 m ³ /s	150 m ³ /s	maximum	fin de l'été (août-oct.)
Planche 10	10 000 m ³ /s	750 m ³ /s	absence	printemps et fin de l'automne

Les tributaires ont une influence réduite sur le patron d'écoulement puisque leur débit moyen reste généralement faible en comparaison avec le débit du fleuve ; les débits moyens des tributaires ont été utilisés pour définir les événements de référence. Le débit total des tributaires utilisé est de 150 m³/s pour les simulations de l'été et de 750 m³/s pour les simulations du printemps et de l'automne.

Validation

Afin d'établir le degré de confiance qui peut être accordé aux résultats de simulations, il est nécessaire de valider. La validation du modèle hydrodynamique du lac Saint-François a été effectuée en deux étapes, d'abord avec les niveaux d'eau historiques mesurés aux trois stations du lac et avec deux séries de mesures de courants prises en deux périodes distinctes. Dans tous les cas, la vérification du débit simulé aux frontières du modèle et de sa conservation globale dans l'ensemble du domaine de simulation est une condition essentielle à la validation d'une simulation.

La validation des niveaux

La validation par les niveaux d'eau est relativement grossière et permet d'évaluer rapidement la qualité d'une simulation. Étant donné l'importance des plantes aquatiques dans les processus d'écoulement du système, la validation se devait de recouper toute la gamme de résistances

reliées à ce facteur. C'est pourquoi des observations du niveau d'eau réalisées avec des niveaux de croissance des plantes aquatiques de 0% (25-28 avril 1996), 50% (4-7 juillet 1996) et 80% (25-29 juillet 1994) ont été retenues pour vérifier le modèle. Pour chacun de ces événements, le débit du fleuve était respectivement de 6887 m³/s, 7685 m³/s et 8410 m³/s, tandis que les débits totaux des tributaires étaient respectivement de 620 m³/s, 73 m³/s et 200 m³/s. Le tableau 2 permet de comparer les niveaux mesurés lors de différents événements avec les niveaux simulés par le modèle hydrodynamique ; la correspondance est excellente.

Tableau 2 : Résultats de la validation des niveaux d'eau (RIGL55).

	Cornwall		Summerstown		Coteau-Landing	
	Mesuré	simulé	mesuré	simulé	mesuré	simulé
0% de croissance 25-28 avril 1996	46.80 m	46.796 m	46.61 m	46.613 m	46.47 m	46.472 m
50% de croissance 4-7 juillet 1994	46.99 m	46.995 m	46.72 m	46.719 m	46.45 m	46.452 m
80% de croissance 25-29 juillet 1996	46.94 m	46.939 m	47.70 m	46.701 m	45.45 m	46.449 m

La validation des vitesses

La validation du modèle par les mesures des vitesses est plus exigeante que celle réalisée pour les niveaux d'eau. D'abord à cause de la variabilité locale du phénomène qui requiert un effort de caractérisation très étendu sur le terrain, et ensuite à cause des problèmes d'hétérogénéité des ensembles de données que l'on veut comparer. Ce type de validation permet de s'assurer que la résistance à l'écoulement telle que paramétrisée dans le modèle à l'aide des coefficients de Manning reproduit efficacement non-seulement l'inclinaison du plan d'eau dans son ensemble mais aussi la distribution des masses d'eau tributaire des courants.

La méthode de caractérisation retenue est basée sur l'utilisation d'un courantomètre profileur à effet Doppler (ADCP) sur des transects localisés en des sites jugés représentatifs des grands patrons hydrodynamiques du domaine dans son ensemble ou des conditions particulières typiques comme les transitions abruptes de profondeurs, les contours des îles ou des baies et l'effet des plantes aquatiques. Deux événements de débit distincts ont été utilisés pour la validation : le premier a une faible densité de plantes (4-7 juillet 1996) et le second représente la période près de la croissance maximale (25-29 juillet 1994). La base de donnée se compose d'environ 15 000 points de mesure de vitesses répartis sur le lac Saint-François, appartenant à 22

sections mesurés en 1994 et à 14 en 1996.

La validation des résultats des simulations exige que les ensembles de données puissent être comparables en nature, c'est-à-dire, homogènes. Les données simulées représentent la vitesse moyenne sur la colonne d'eau tandis que les mesures représentent la vitesse instantanée au point d'échantillonnage. Le courantomètre à effet Doppler, mesure la vitesse à tous les 25 cm d'intervalle dans la verticale sur toute la colonne d'eau. Toutefois, cet instrument ne peut mesurer la vitesse près de la surface ni près du fond ; de plus, il ne peut mesurer la portion de la colonne d'eau densément occupée par les plantes. Par ailleurs, l'instrument permet d'obtenir la vitesse instantanée du courant dans les trois directions; par le fait même, les effets aléatoires de la turbulence (tous les mouvements périodiques de fréquence supérieure à quelques secondes comme les tourbillons de Von Karman) ne sont pas filtrés et les mesures peuvent dévier significativement de la direction moyenne. De son côté, le modèle génère la composante moyenne des vitesses donc une valeur exempte de fluctuations turbulentes, et sur une certaine superficie qui est fonction de la taille de la maille de calcul locale. Bref, il est nécessaire de traiter les données mesurées de telle sorte qu'elles puissent être comparées de façon homogène avec les résultats des simulations.

Pour ce faire, les mesures sont intégrées dans la verticale et dans l'espace. La taille de la maille de calcul fixe la dimension de l'intégration spatiale. Par exemple, dans la partie aval du lac où les mailles sont d'environ 100 m de diamètre, les données mesurées sont intégrées sur une distance d'environ 100 m.

Deux événements ont, rappelons-le, , été utilisés pour la validation du modèle à l'aide des mesures de courants. Ce sont ceux qui ont également servi à la validation des niveaux d'eau avec des coefficients de croissance des macrophytes de 50% et de 80% (4-7 juillet 1996 et 25-29 juillet 1994). Les champs de vitesse correspondants se distinguent à maints égards, notamment dans les régions peu profondes où les plantes sont présentes.

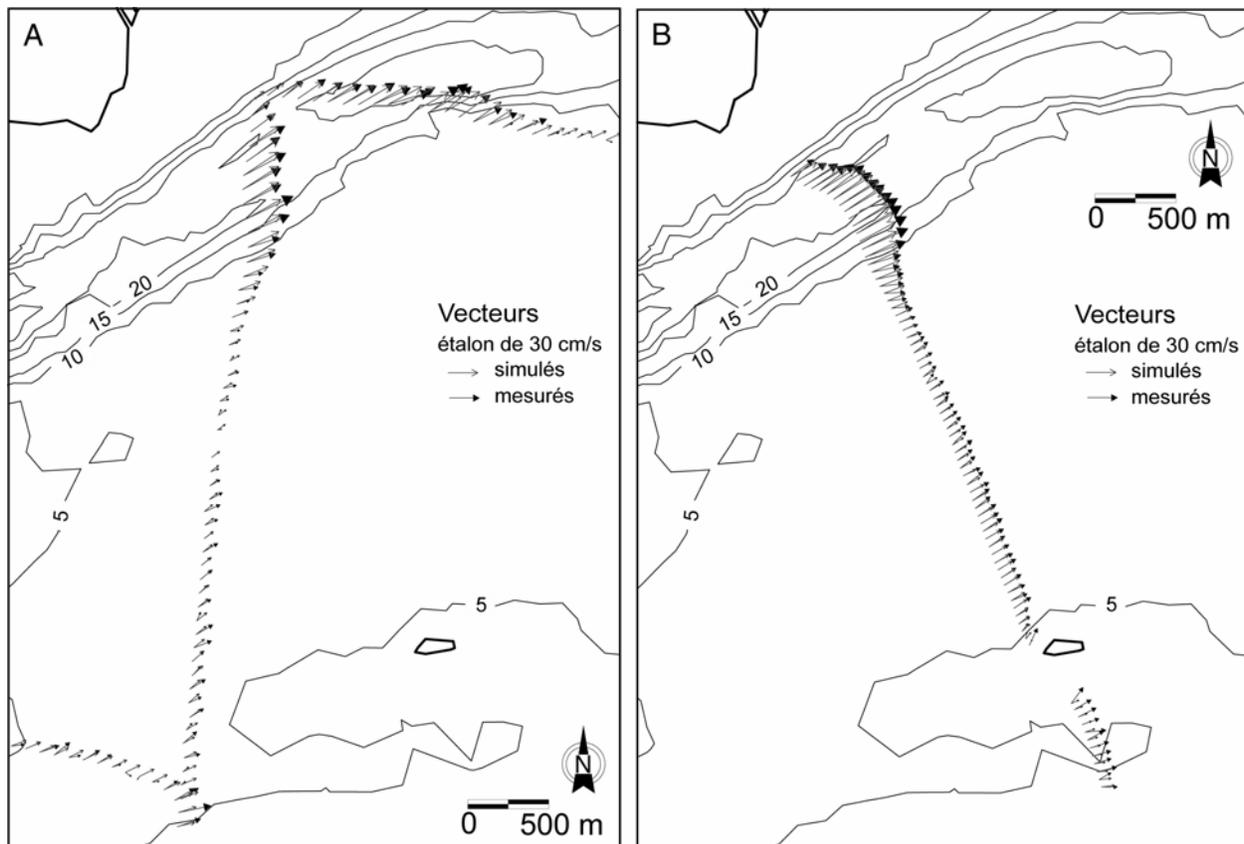


Figure 9 : Exemples de validation des vitesses à l'aide de deux événements différents. A : événement du 4-7 juillet 1996 avec $8410 \text{ m}^3/\text{s}$ et 50% de croissance des plantes. B : événement du 25-29 juillet 1994 avec $7685 \text{ m}^3/\text{s}$ et 80% de croissance des plantes.

La figure 9A permet de comparer quelques résultats de la simulation à 50% de macrophytes avec les mesures, tandis que la figure 9B présente une comparaison équivalente pendant la phase de croissance à 80%. Graphiquement, la comparaison utilise des vecteurs dont la longueur est proportionnelle au courant et la direction consistante avec l'orientation du courant. On peut constater la bonne qualité des simulations notamment dans les transitions rapides de profondeurs observables en périphérie de la voie navigable.

Présentation des résultats

La plupart des résultats illustrés ci-après sous forme de planches découlent de l'exercice de modélisation de terrain ou encore, des simulations hydrodynamiques. La signification exacte des variables traitées a été introduite dans la première partie du document sauf la fonction-courant qui nécessite d'être définie. Nous y revenons un peu plus bas. La vitesse du courant représentée sur les planches est obtenue en divisant localement le débit spécifique des simulations - la variable primitive du simulateur laquelle représente le courant - par la profondeur. Le module du débit spécifique est obtenu à partir des composantes vectorielles selon x et y de cette variable. La direction du courant n'est donc pas représentée

Il a été décidé de ne pas commenter en détails ni de discuter les résultats présentés et de laisser, comme c'est la plupart du temps le cas avec les atlas, les images parler d'elles-mêmes. Seul un bref commentaire est fourni avec la légende afin de rappeler quelques éléments de compréhension.

La fonction-courant est un des multiples résultats (planches 13 et 14) qui peuvent être obtenus par un simple post-traitement des variables de base de la modélisation de terrain et/ou hydrodynamique, comme par exemple, la diffusivité due à la turbulence, le régime d'écoulement représenté par le nombre de Froude, la vitesse de cisaillement, pour ne nommer que celles-là. Seule la fonction-courant a été illustrée ici car cette variable permet de se faire une idée très rapide quoique simplifiée de la provenance et de la destination moyennes des masses d'eau dans le système. Le lecteur devra se souvenir que la principale simplification tient à l'absence de la diffusion turbulente comme facteur participant à la propagation des masses d'eau. Il faut donc interpréter ce résultat à titre indicatif seulement.

Mathématiquement, la fonction-courant est obtenue par l'intégration numérique du débit spécifique sur l'ensemble du domaine de simulation. Le débit spécifique est le produit local de la vitesse moyenne du courant (module) par la profondeur. Ses unités sont des m^2/s . Pour obtenir un débit en m^3/s transitant par une section donnée, il faut intégrer transversalement au courant sur la largeur considérée. C'est un peu ce que fait la fonction-courant mais en utilisant une approche spatialisée sur l'ensemble du domaine. Pour l'interpréter, on n'a qu'à considérer les isosurfaces comme des couloirs où transite un certain débit égal à l'incrément de l'intervalle de

classe. Ainsi, en partant d'une berge, les couloirs de débit s'additionnent les uns aux autres jusqu'à la berge opposée où l'on retrouve alors le débit total du fleuve.

Résultats (planches)

Planche 1 : Grille de calcul de type éléments finis

Cette planche représente l'ensemble du maillage d'éléments finis utilisé pour les fins du calcul hydrodynamique ainsi que trois agrandissements correspondant aux parties fluviale, chenalisée et lacustre. La dimension des éléments utilisés est dictée par la nécessité d'un temps de calcul informatique raisonnable ainsi que par une représentation acceptable des facteurs de résistance à l'écoulement et de la topographie. Les parties fluviale et chenalisée comportent des éléments plus petits en raison d'une topographie beaucoup plus complexe à ces endroits que dans la partie lacustre. Les éléments du maillage peuvent être raffinés pour des applications particulières.

Planche 2 : Topographie

Cette planche montre la topographie de l'ensemble du lac Saint-François. Pour les fins de l'atlas, la topographie est délimitée par les berges correspondant au niveau du lac tel que stabilisé artificiellement. Autrement dit, elle n'inclut pas les anciennes plaines de débordement. Les agrandissements dans les parties fluviale, chenalisée et lacustre montrent bien les différents types de physiographie rencontrés dans le lac. La topographie est particulièrement complexe (anastomosée) dans la partie médiane du lac.

Planche 3 : Substrat et plantes aquatiques

Cette planche illustre la distribution du substrat et des plantes. Les macrophytes sont absents de la partie fluviale (amont) sauf à proximité des berges. La partie chenalisée (centre) est nettement plus colonisée par les macrophytes en particulier par le myriophylle (*Myriophyllum spicatum*). La partie lacustre (aval) est également couverte de plantes aquatiques ; l'espèce la plus abondante est la vallisnérie (*Vallisneria americana*).

La taille caractéristique des sédiments est généralement faible. Seul la blocaille (till délavé) située principalement à l'amont et la roche mère à l'aval sont des substrats de dimension plus importante. De façon générale, la dimension du substrat diminue de l'amont vers l'aval, en relation directe avec la diminution des vitesses de courant.

Planche 4 : Frottement des plantes aquatiques et du substrat

Cette planche montre les coefficients de frottement (sous la forme d'un « n » de Manning) liés au substrat et aux plantes aquatiques. Ces coefficients sont ceux utilisés par le modèle hydrodynamique. Les valeurs du coefficient de Manning liées au substrat sont généralement entre 0.016 et 0.027. Les valeurs sont un peu plus élevées dans la partie amont (fluviale) puisque le substrat y est plus grossier. Des valeurs de coefficient élevées ont également été utilisées sur le seuil près des ouvrages de Coteau.

Les valeurs liées aux plantes aquatiques varient énormément et atteignent des valeurs extrêmement élevées (0.180) quant on les compare à celles du substrat. Ces fortes valeurs se retrouvent à des endroits où la densité de plante est telle que l'écoulement est pratiquement nul.

Planche 5 : Vitesses de courant (module) simulées pour un débit de 5000 m³/s, plantes au maximum de croissance

L'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende principale est valable pour la vue générale du lac (figure A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (figures C et D). La direction des courants n'est pas représentée ici.

Les vitesses les plus grandes se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval, soit au fur et à mesure que s'élargit la section d'écoulement. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le canal de Beauharnois. La présence de plantes aquatiques au stade maximum de leur croissance accentue le contraste entre les vitesses rapides des chenaux et les vitesses plus lentes associées aux parties moins profondes du lac.

Planche 6 : Vitesses de courant simulées pour un débit de 5000 m³/s, plantes au minimum de croissance

Comme pour la précédente planche, l'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende principale est valable pour la vue globale du lac (partie A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (parties C et D).

Les vitesses les plus grandes se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le Canal de Beauharnois. Généralement, les vitesses les plus rapides se retrouvent dans les chenaux tandis que les vitesses les plus lentes sont associées aux parties moins profondes du lac. Les contrastes de vitesses entre les différentes parties de la section d'écoulement sont moins accentués que dans la planche précédente laquelle montrait le maximum de la résistance des plantes et une structuration plus prononcée des courants.

Planche 7 : Vitesses de courant (module) simulées pour un débit de 7500 m³/s, plantes au maximum de croissance

L'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende principale est valable pour la vue globale du lac (partie A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (parties C et D).

Les vitesses les plus grandes se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le Canal de Beauharnois. La présence de plantes aquatiques au stade maximum de leur croissance accentue le contraste entre les vitesses rapides des chenaux et les vitesses plus lentes associées aux parties moins profondes du lac.

Planche 8 : Vitesses de courant (module) simulées pour un débit de 7500 m³/s, plantes au minimum de croissance

L'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende générale est valable pour la vue globale du lac (partie A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (parties C et D).

Les vitesses les plus grandes se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le Canal de Beauharnois. Généralement, les vitesses les plus rapides se retrouvent dans les chenaux tandis que les vitesses les plus lentes sont associées aux parties moins profondes du lac. Les contrastes de vitesses entre les différentes parties de la section d'écoulement sont moins

accentués que dans la planche précédente laquelle montrait le maximum de la résistance des plantes et une structuration plus prononcée des courants.

Planche 9 : Vitesses de courant (module) simulées pour un débit de 10 000 m³/s, plantes au maximum de croissance

L'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende principale est valable pour la vue globale du lac (partie A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (parties C et D).

Les vitesses les plus grandes se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le Canal de Beauharnois ainsi qu'en approchant de Coteau I et Coteau III. La présence de plantes aquatiques au stade maximum de leur croissance accentue le contraste entre les vitesses rapides des chenaux et les vitesses plus lentes associées aux parties moins profondes du lac.

Planche 10 : Vitesses de courant (module) simulées pour un débit de 10 000 m³/s, plantes au minimum de croissance

L'agrandissement dans la partie fluviale (partie B) possède sa propre légende car les vitesses y sont beaucoup plus élevées que dans le reste du lac. La légende principale est valable pour la vue globale du lac (partie A) ainsi que pour les agrandissements des zones chenalisée et lacustre (parties C et D).

Les vitesses les plus grandes (3.5 à 4.1 m/s) se retrouvent dans la partie fluviale à l'amont du lac et diminuent graduellement en allant vers l'aval. A la sortie du lac, un accroissement des vitesses est observé dans le Canal de Beauharnois ainsi qu'en approchant de Coteau I et Coteau III. Généralement, les vitesses les plus rapides se retrouvent dans les chenaux tandis que les vitesses les plus lentes sont associées aux parties moins profondes du lac. Les contrastes de vitesses entre les différentes parties de la section d'écoulement sont moins accentués que dans la planche précédente laquelle montrait le maximum de la résistance des plantes et une structuration plus prononcée des courants.

Planche 11 : Niveaux d'eau simulés pour un débit de 7500 m³/s, plantes au maximum de

croissance

La planche 11 illustre le niveau d'eau obtenu pour un débit de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ avec les plantes aquatiques au maximum de leur croissance. Les pertes de charge associées à la résistance des plantes et du substrat sont beaucoup plus importantes à l'amont du lac et s'amenuisent au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval du lac. Les pertes de charge sont plus importantes dans les parties chenalisée et lacustre en présence de plantes aquatiques qu'en leur absence. Cela est causé par la résistance supplémentaire induite par les plantes.

Les niveaux présentés ici sont réduits au RIGL55 (repère international des Grands Lacs), dont la base est à quelques centimètres du niveau moyen des mers. Le niveau présenté ici est le niveau de la surface du lac. Pour connaître la profondeur, il suffit de soustraire la topographie du niveau d'eau.

Planche 12 : Niveaux d'eau simulés pour un débit de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, plantes au minimum de croissance

La planche 12 illustre le niveau d'eau obtenue pour un débit de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ avec les plantes aquatiques au minimum de croissance. Les pertes de charge sont beaucoup plus importantes à l'amont du lac et s'amenuisent au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval du lac.

Les niveaux présentés ici sont réduits au RIGL55 (repère international des Grands Lacs), dont la base est à quelques centimètres du niveau moyen des mers. Le niveau présenté ici est le niveau de la surface du lac. Pour connaître la profondeur, il suffit de soustraire la topographie du niveau d'eau.

Planche 13 : Fonction courant pour un débit de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, plantes au maximum de croissance

La planche 13 montre la répartition spatiale moyenne des masses d'eau à l'aide de la fonction-courant en supposant qu'il n'y a aucun mélange. Cette hypothèse limite l'interprétation à une simple valeur descriptive de la provenance et de la destination moyenne des masses d'eau. Les classes de débit permettent d'identifier la proportion du débit occupé par les tributaires ainsi que les eaux passant de part et d'autre de l'île de Cornwall. Il ne s'agit pas ici de la position réelle des masses d'eau puisqu'on ne tient pas compte des mélanges latéraux.

Planche 14 : Fonction courant pour un débit de 7500 m³/s, plantes au minimum de croissance

La planche 14 montre la répartition spatiale moyenne des masses d'eau à l'aide de la fonction-courant en supposant qu'il n'y a aucun mélange. Cette hypothèse limite l'interprétation à une simple valeur descriptive de la provenance et de la destination moyenne des masses d'eau. Les classes de débit permettent d'identifier les masses d'eau correspondant aux différents tributaires ainsi que les eaux passant de part et d'autre de l'île de Cornwall. Il ne s'agit pas ici de la position réelle des masses d'eau puisqu'on ne tient pas compte des mélanges latéraux.

Pour en savoir plus :

Environnement Canada
Service météorologique du Canada
Monitoring et Technologie
100 Alexis-Nihon, 3^{ième} étage
Saint-Laurent, Qc.
H4M 2N8
Tél : (514) 283-1629
Fax : (514) 296-1867

Documents pertinents sur la physique du lac Saint-François :

MORIN, J., Y. SECRETAN et M. LECLERC 2000. Hydrodynamic modeling of pristine Lake Saint-François, St. Lawrence river. *Journal of Great Lakes Research*. 26: 384-401.

MORIN, J., M. LECLERC, Y. SECRETAN et P. BOUDREAU 2000. Integrated two-dimensional macrophytes-hydrodynamic modeling. *Journal of Hydraulic Research*. 38: 163-172.

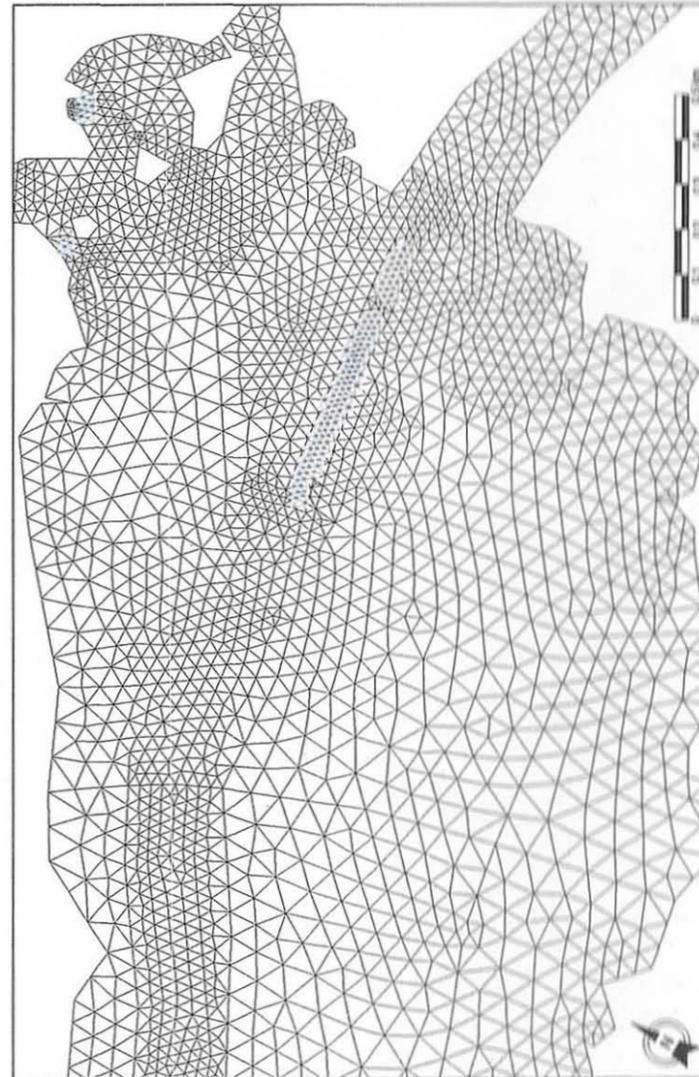
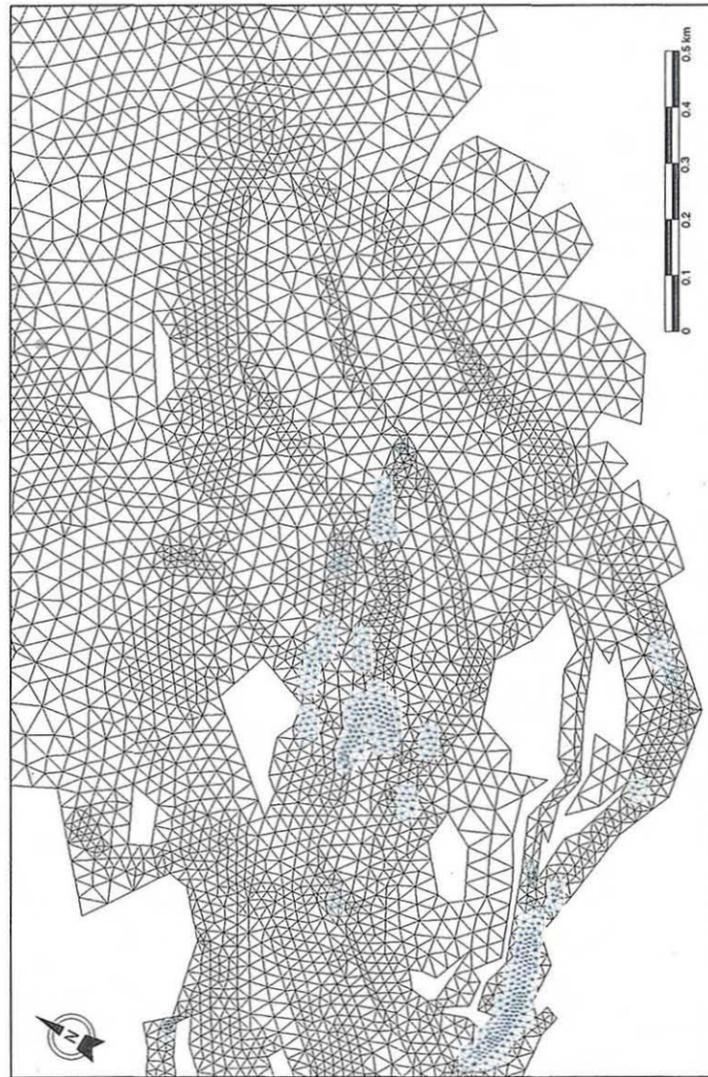
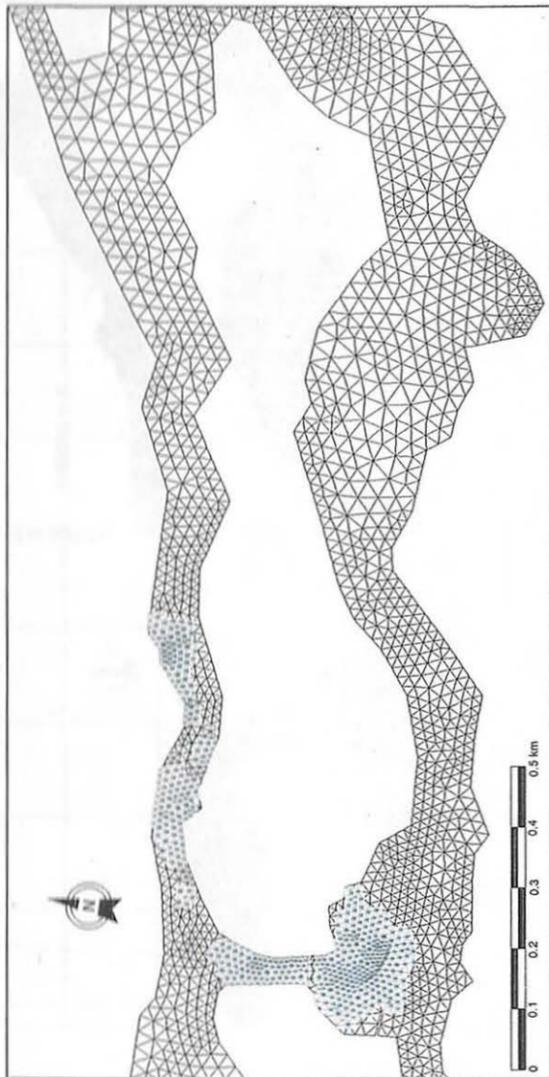
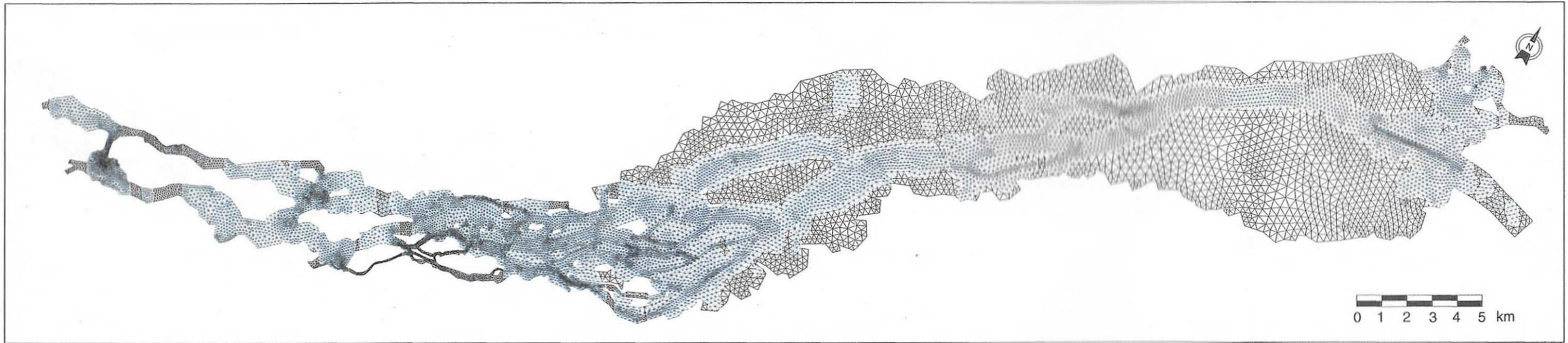
MORIN, J., et M. LECLERC 1998. From pristine to present state: hydrology evolution Lake Saint-François, St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 25 :864-879.

MORIN, J., P. BOUDREAU et M. LECLERC 1994 Lac Saint-François: les bases de la modélisation hydrodynamique. Report No R-412. Institut national de la Recherche Scientifique, INRS-Eau. 68 p.

FORTIN, G., D. LECLAIR et A. SYLVESTRE 1994. Synthèse des connaissances sur les aspects physiques et chimiques du lac Saint-François. Rapport technique - ZIP 1 et 2. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada.

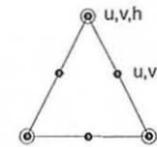
LORRAIN, S., V. JARRY et K. GUERTIN 1993. Répartition spatiale et évolution temporelle des biphényles polychlorés et du mercure dans les sédiments du lac Saint-François; 1979-1989. Environnement Canada, Centre Saint-Laurent. 64 p.

SLOTEDIJK, H. 1985. Substances toxiques dans les sédiments du lac Saint-François, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Région du Québec. 75 p.



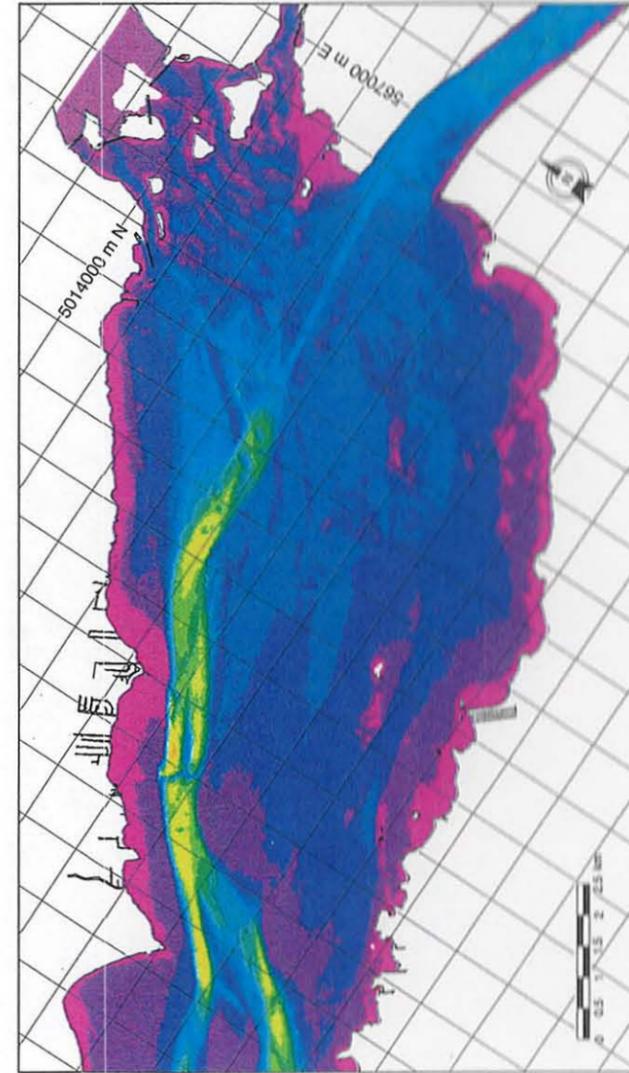
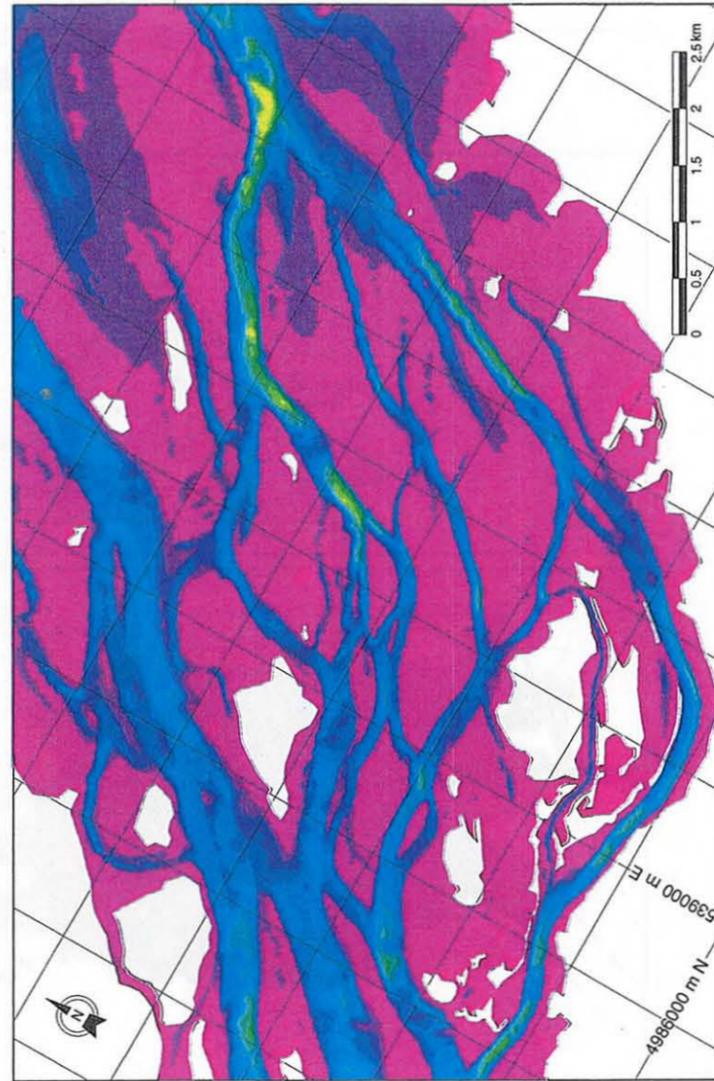
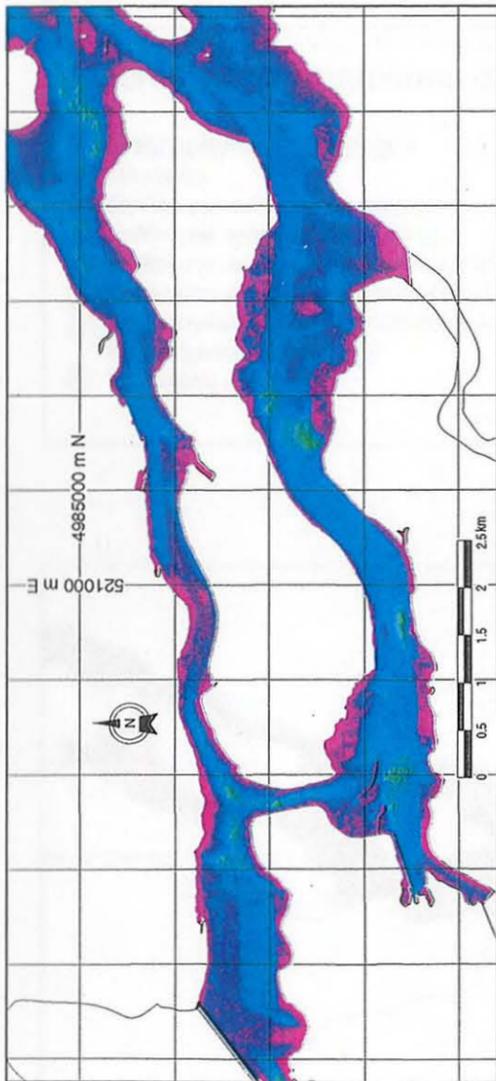
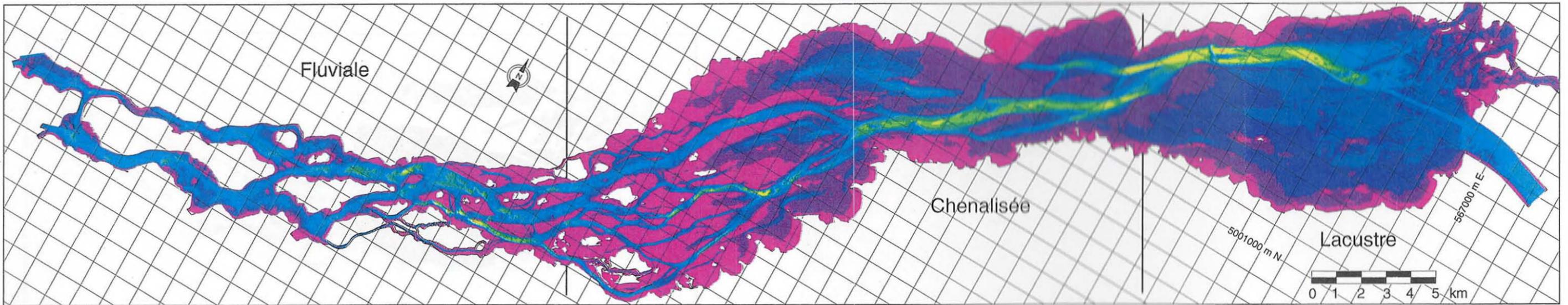
Maillage éléments finis

57 468 noeuds
27 618 éléments
129 842 degrés de liberté



Triangle à 6 noeuds à interpolation linéaire (T6L)

Dimension maximum: 400 m
Dimension minimum: 10 m

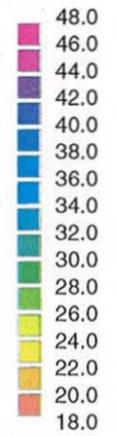


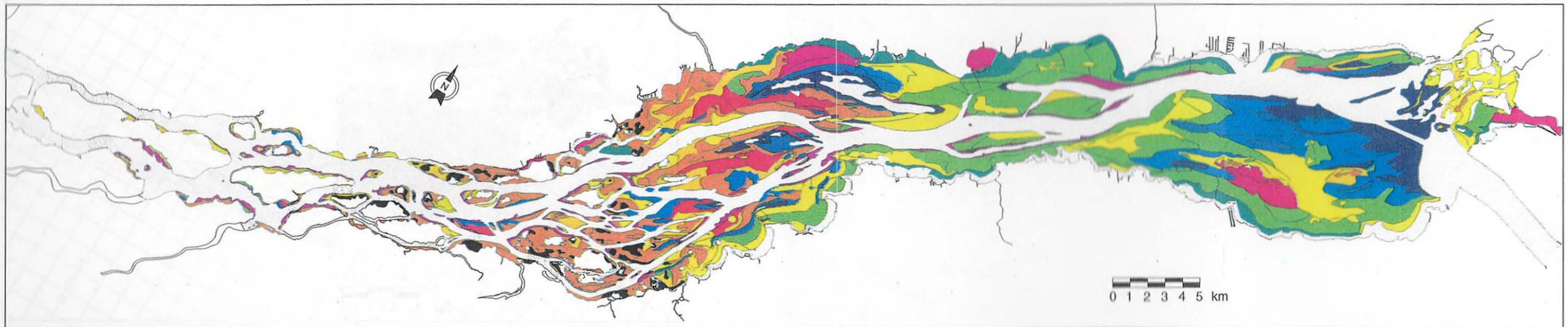
Topométrie

292 270 points de sondage
du Service Hydrographique
du Canada (1989) à une
précision verticale de 0,15 m

Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Topométrie (m, RIGL 55)





Macrophytes aquatiques du lac Saint-François

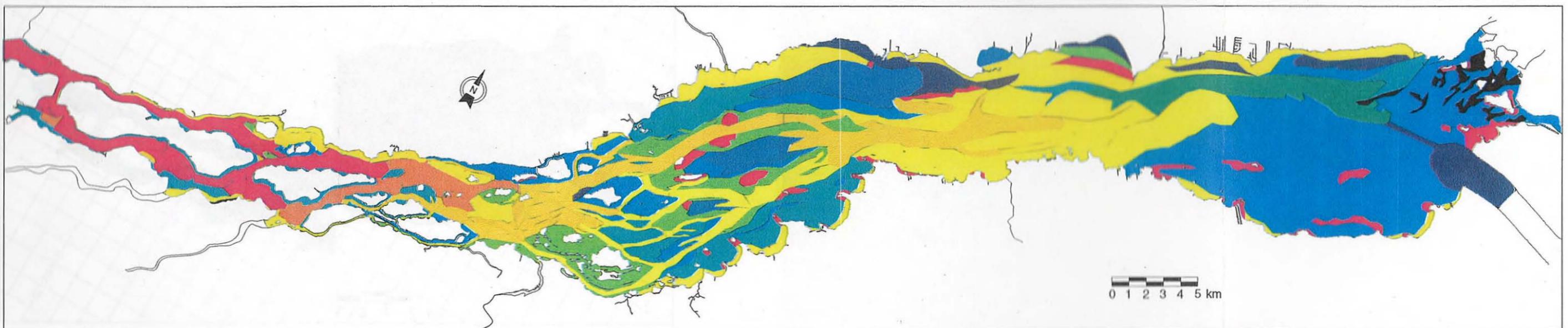
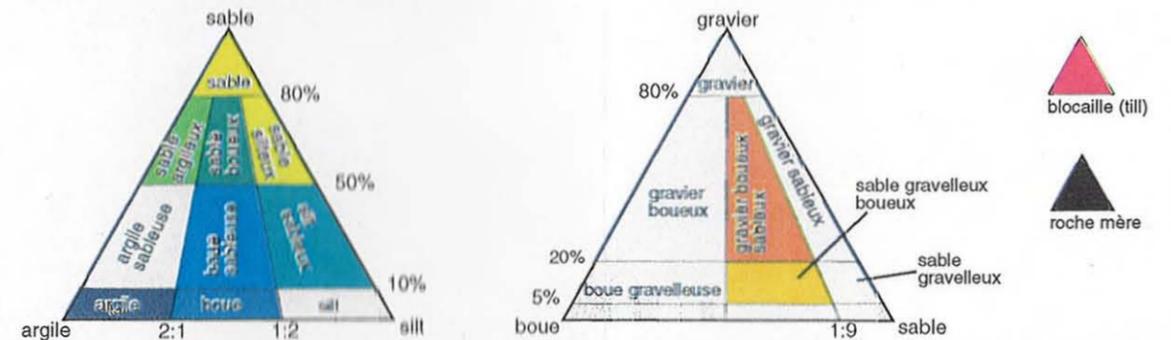
Macrophytes submergés

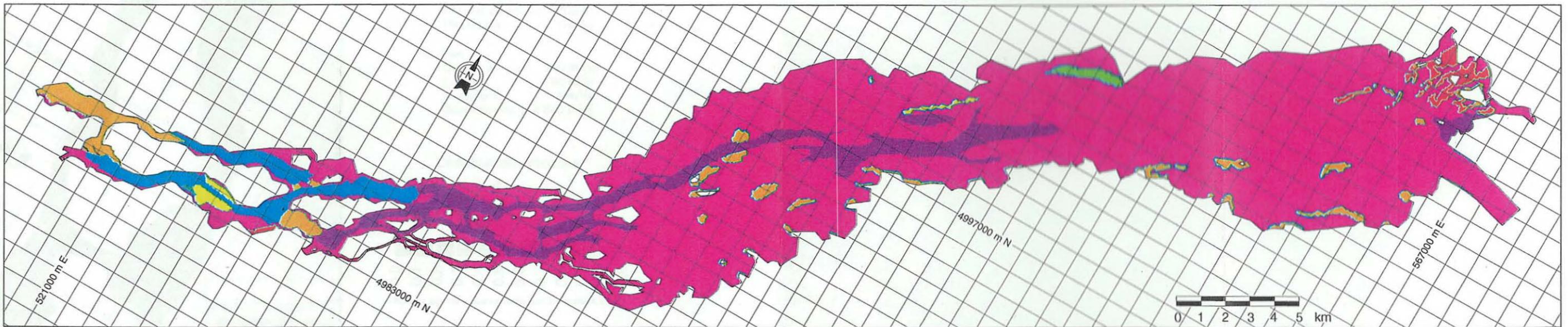
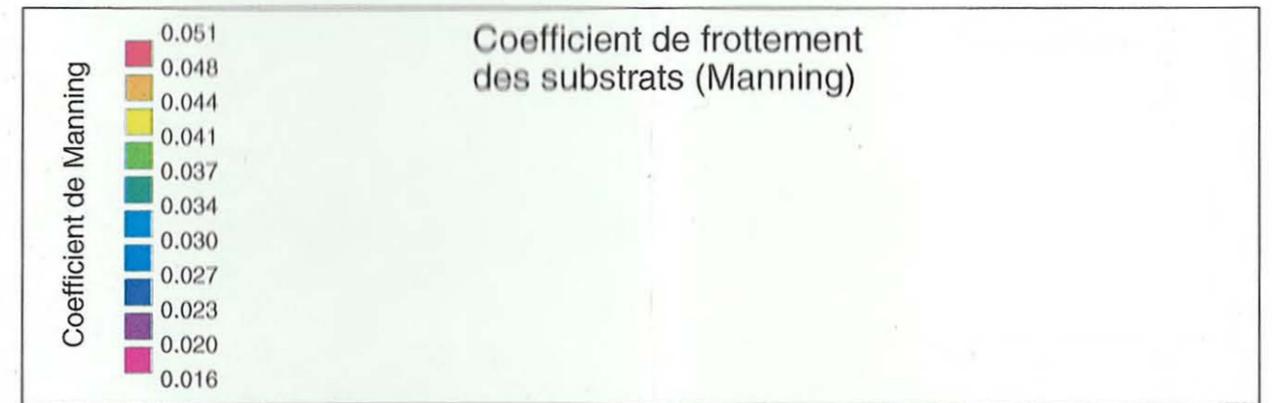
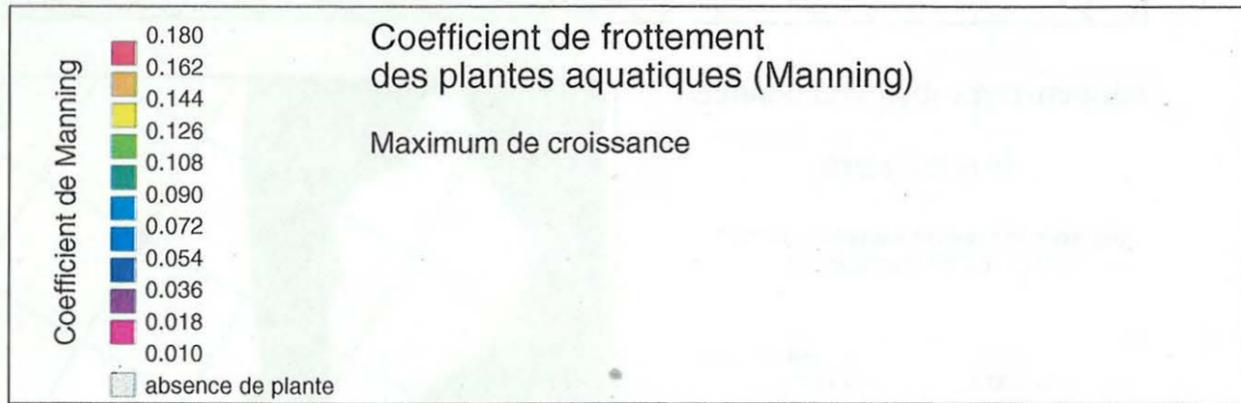
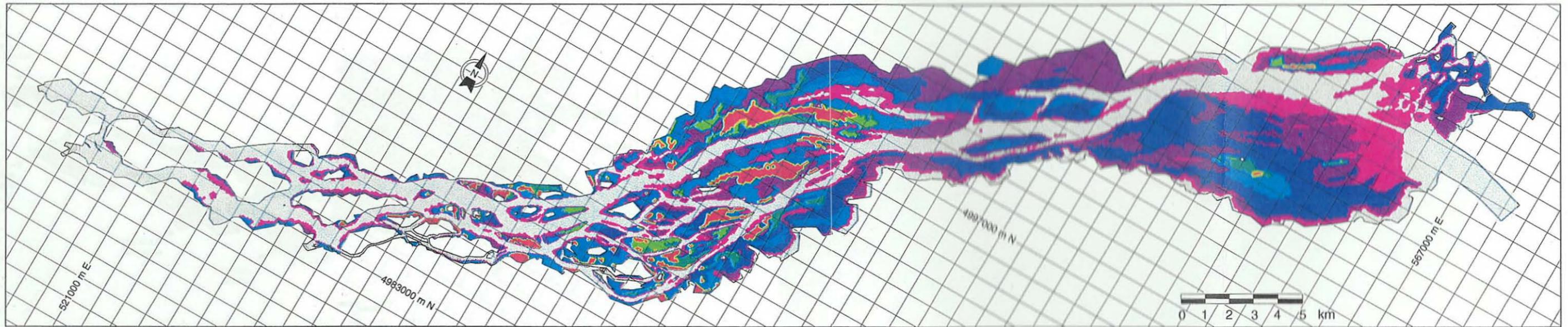
- *Nitella* sp.
- *Elodea canadensis*/ *Ceratophyllum demersum*
- *Vallisneria americana*/*Nitella* sp.
- *Vallisneria americana*/*Alisma gramineus*
- *Vallisneria americana*/*Potamogeton richarsonii*
- *Myriophyllum spicatum*/*Vallisneria americana*/*Potamogeton richarsonii*
- *Vallisneria americana*

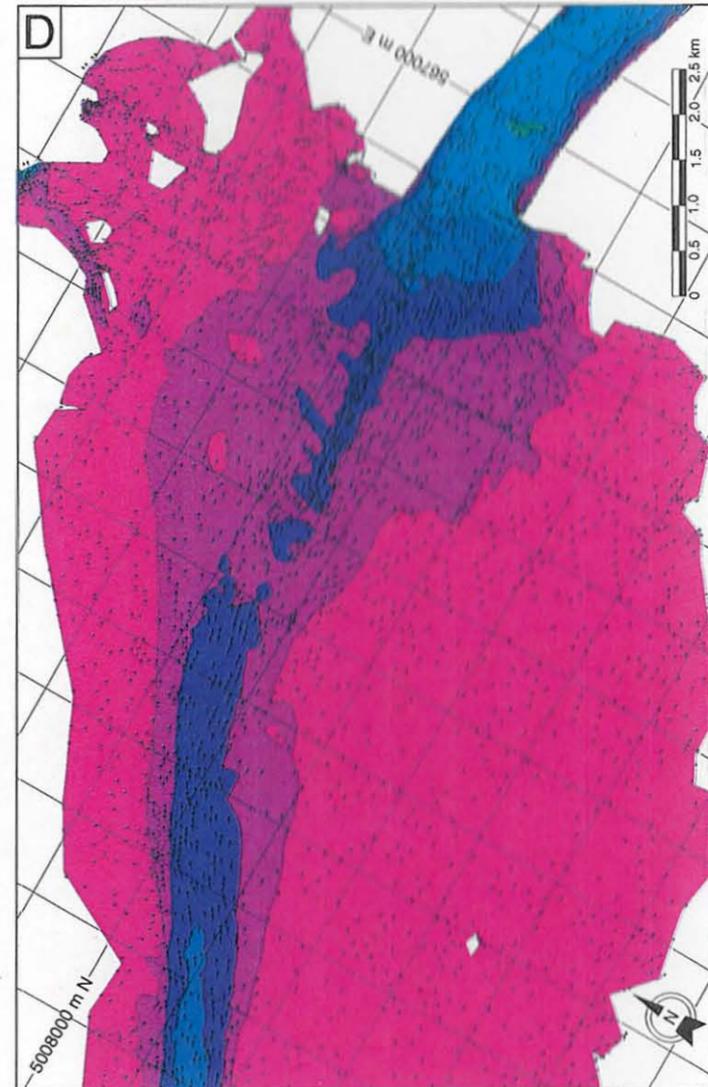
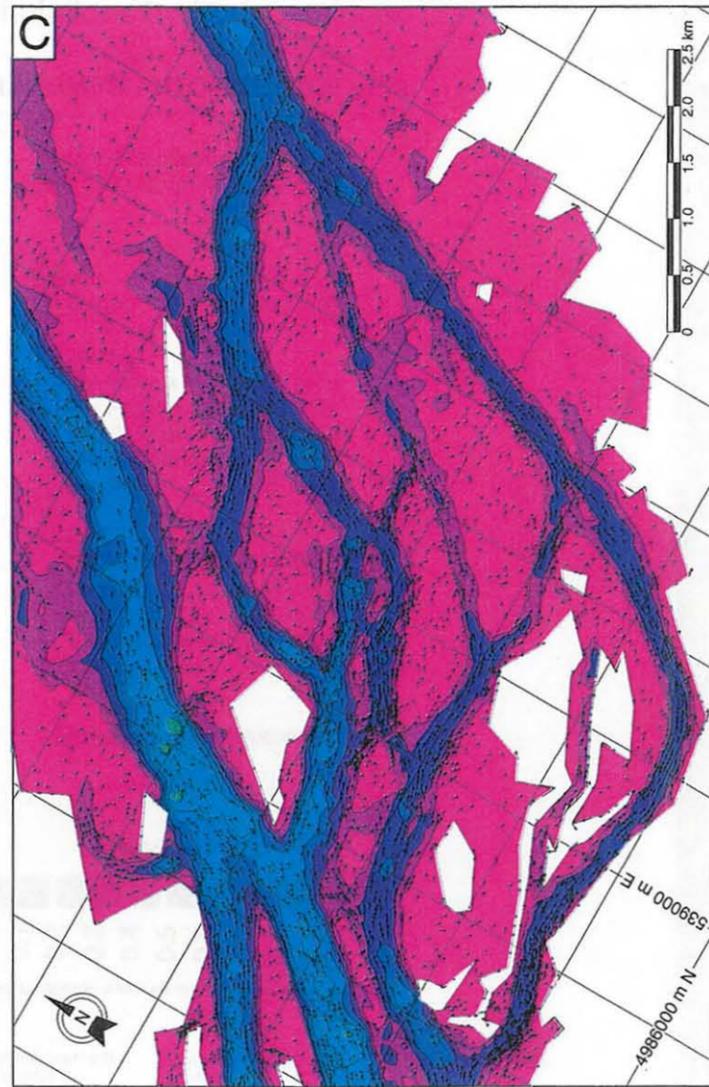
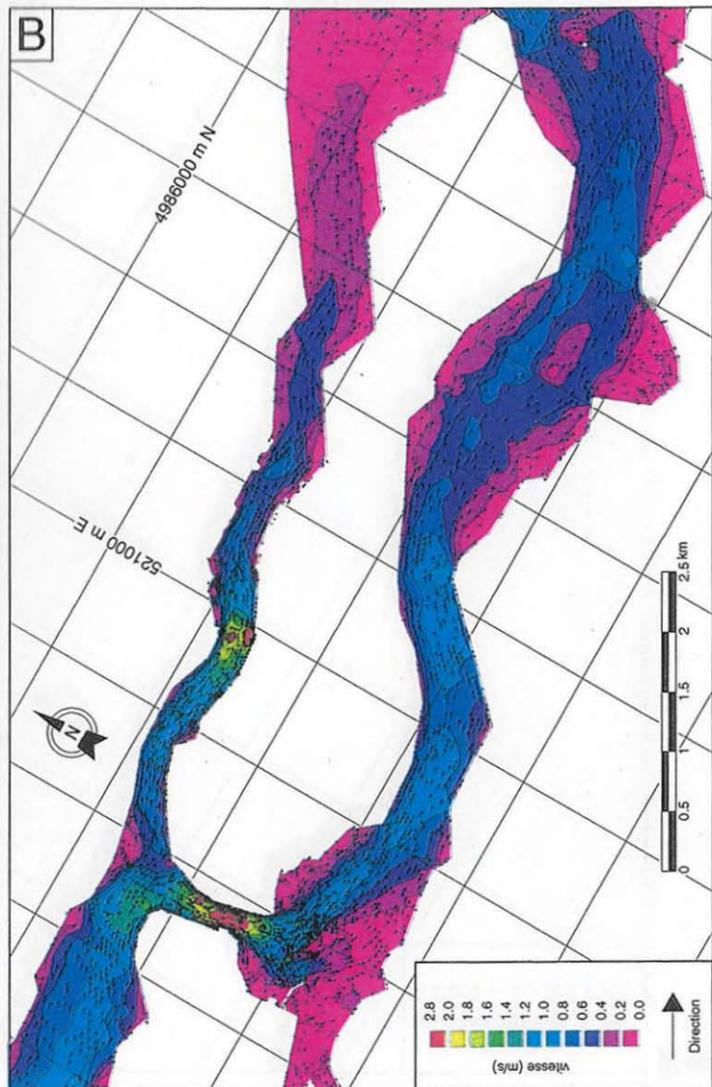
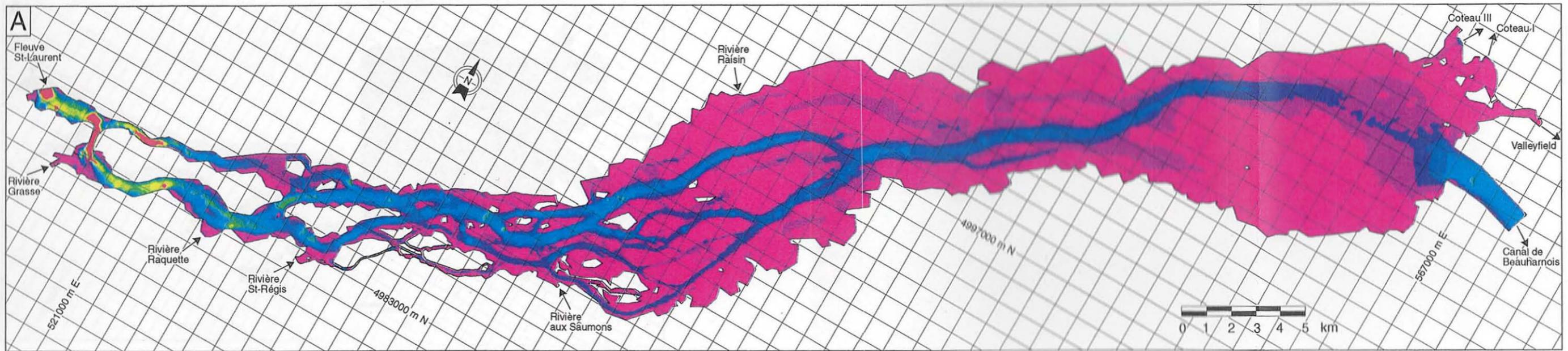
- *Myriophyllum spicatum*/*Vallisneria americana*
- *Myriophyllum spicatum*
- *Myriophyllum spicatum* (formes en canopé)
- *Potamogeton pectinatus*
- *Heteranthera dubia*/ *Ceratophyllum demersum*/*Potamogeton pectinatus*/*Potamogeton richarsonii*/*Myriophyllum spicatum*/*Elodea canadensis*

- Macrophytes émergents

Substrat du lac Saint-François







Simulations hydrodynamiques

ÉTÉ 5 000 m³/s

Plantes aquatiques: Croissance maximum
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 5 000 m³/s

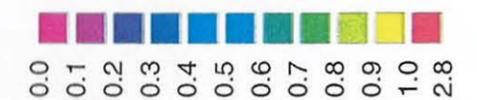
Tributaires:
Riv. Grasse 20 m³/s
Riv. Raquette 70 m³/s
Riv. St-Régis 30 m³/s
Riv. aux Saumons 10 m³/s
Riv. Raisin 5 m³/s

Sorties:
Coteau III 200 m³/s
Coteau I 90 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 4 840 m³/s

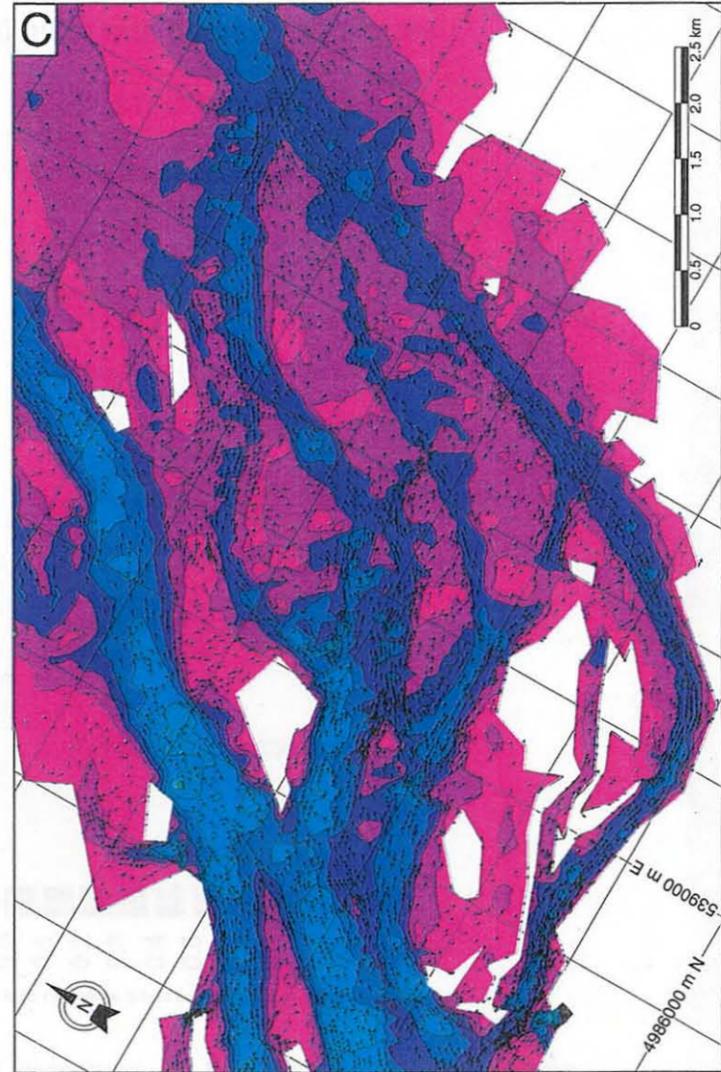
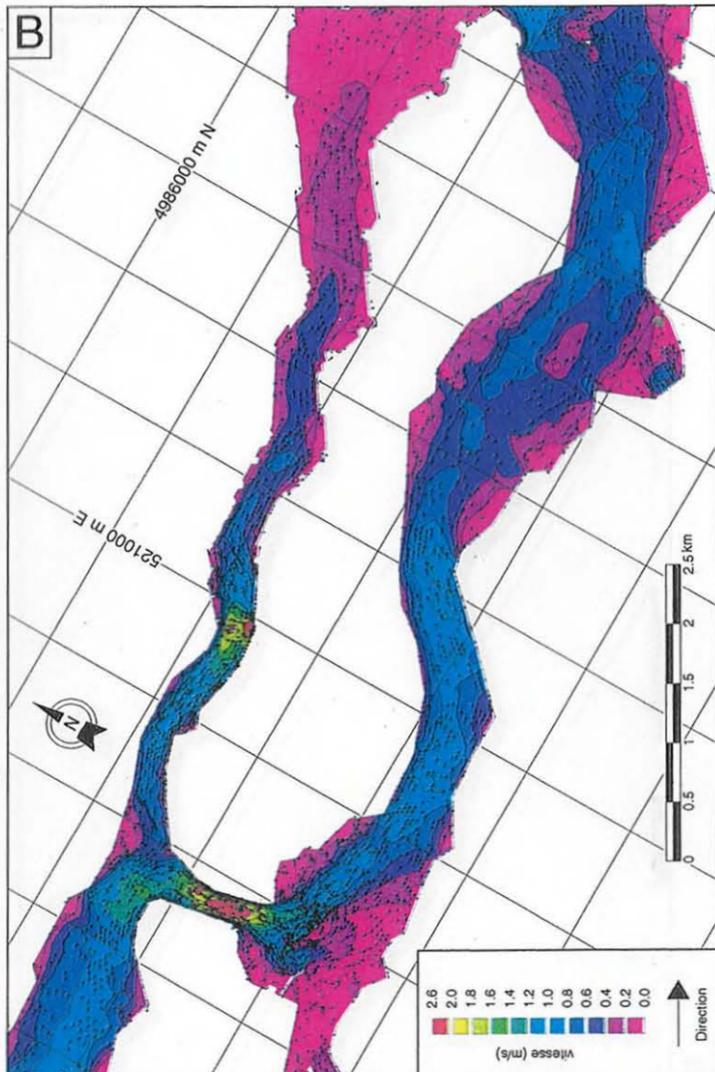
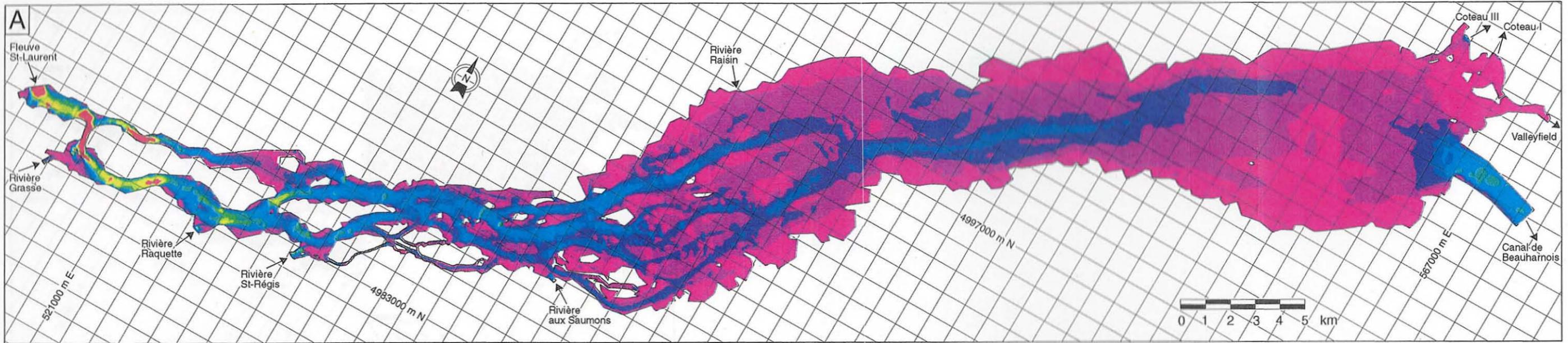
Direction des vitesses



Vitesse (m/s)



Note: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.



Simulations hydrodynamiques

PRINTEMPS-AUTOMNE 5 000 m³/s

Absence de plantes aquatiques
Grid 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 5 000 m³/s

Tributaires:
Riv. Grasse 150 m³/s
Riv. Raquette 280 m³/s
Riv. St-Régis 195 m³/s
Riv. aux Saumons 90 m³/s
Riv. Raisin 35 m³/s

Sorties:
Coteau III 300 m³/s
Coteau I 140 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 5 305 m³/s

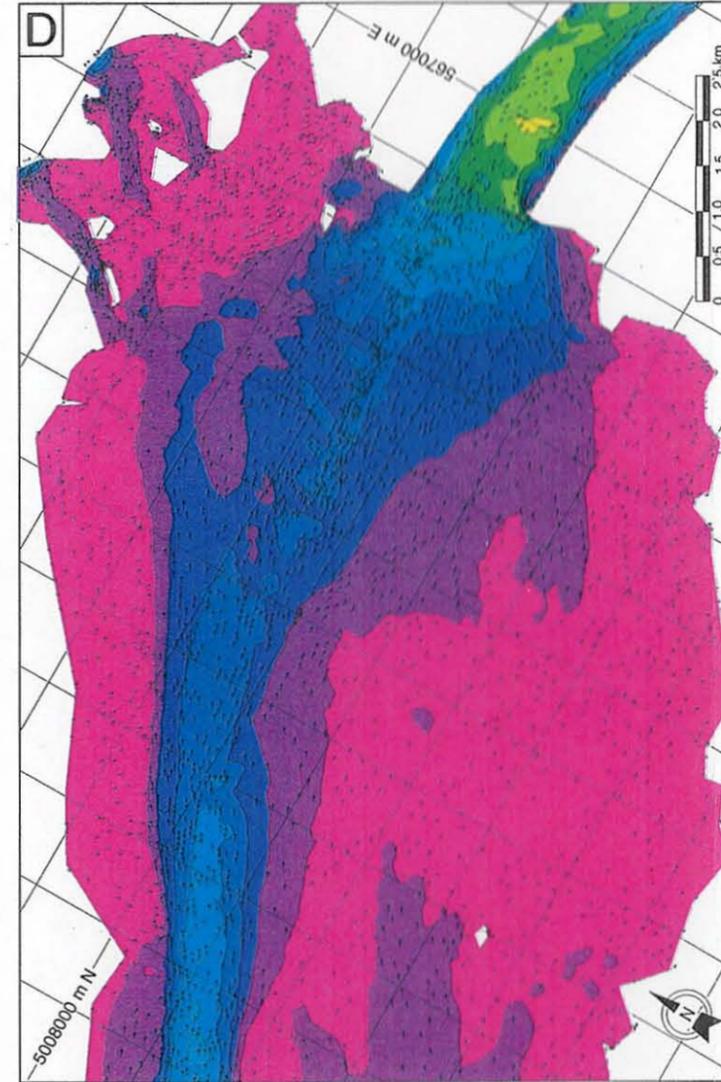
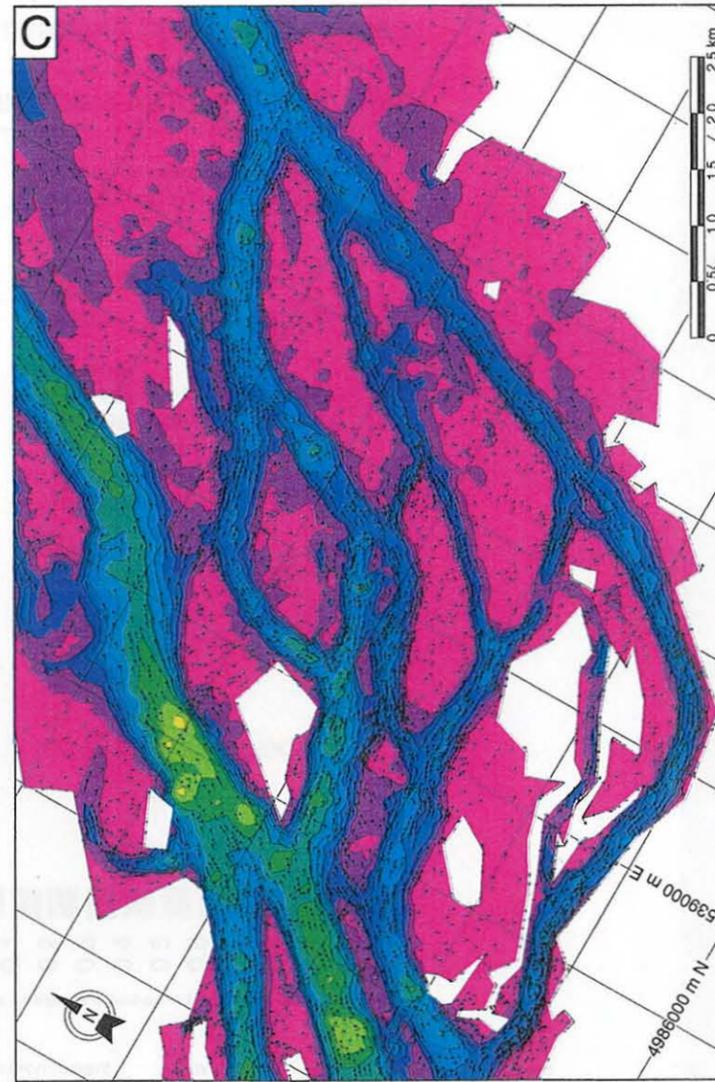
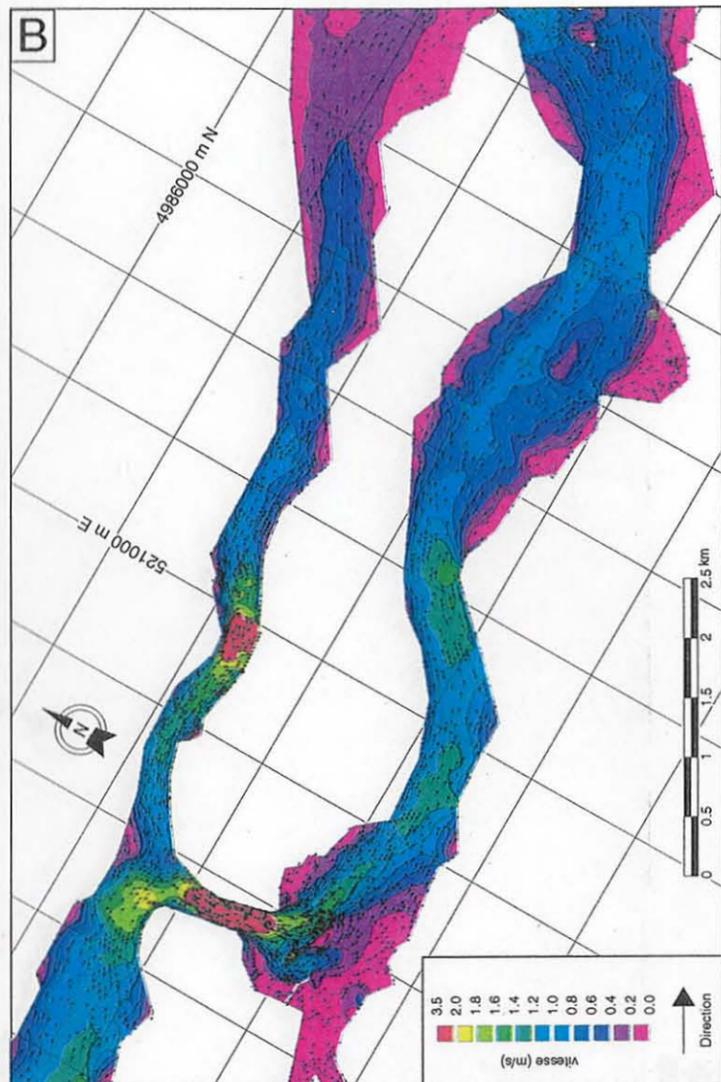
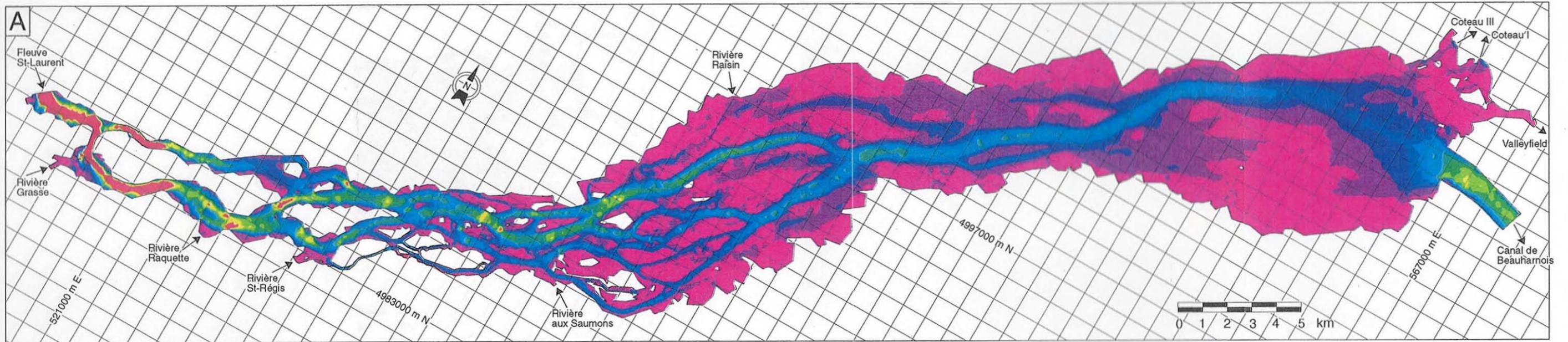
Direction des vitesses



Vitesse (m/s)



Note: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.



Simulations hydrodynamiques

ÉTÉ 7 500 m³/s

Plantes aquatiques: Croissance maximum
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 7 500 m³/s

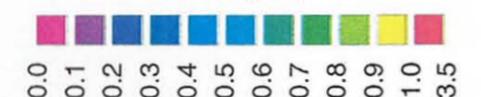
Tributaires:
Riv. Grasse 20 m³/s
Riv. Raquette 70 m³/s
Riv. St-Régis 30 m³/s
Riv. aux Saumons 10 m³/s
Riv. Raisin 5 m³/s

Sorties:
Coteau III 200 m³/s
Coteau I 350 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 7 080 m³/s

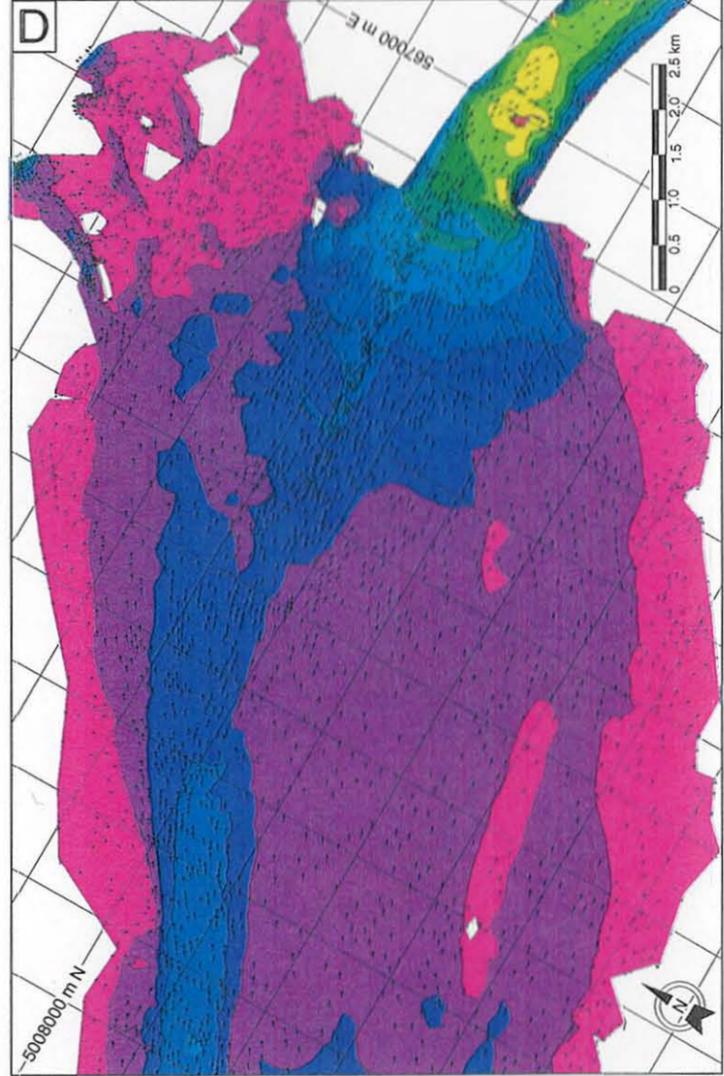
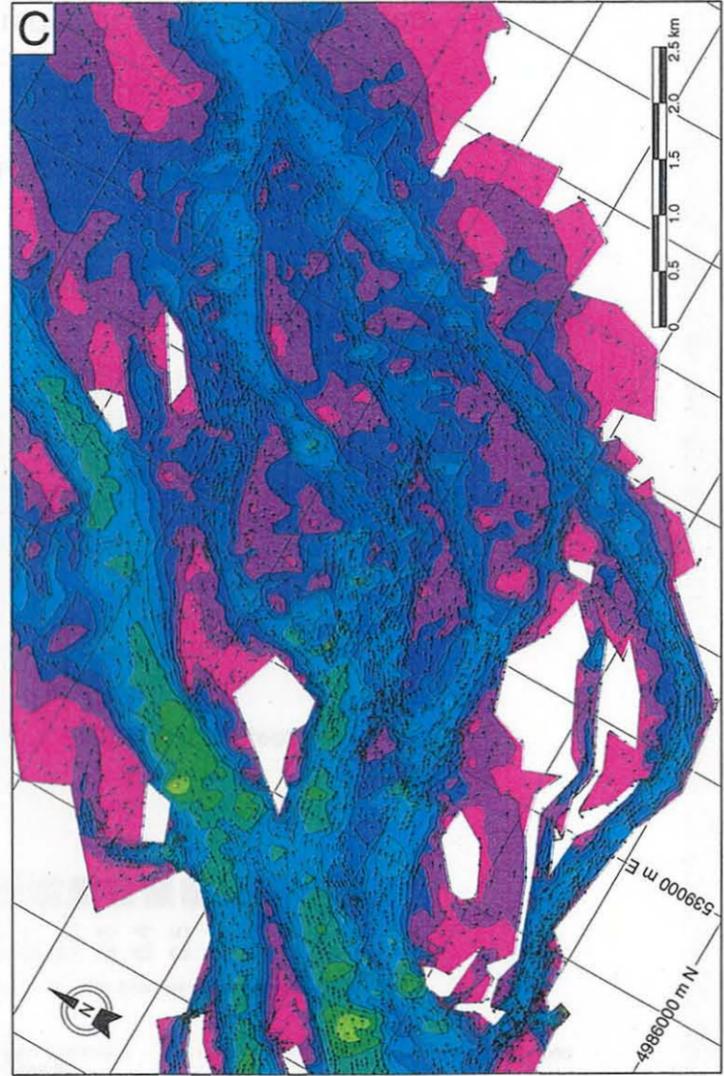
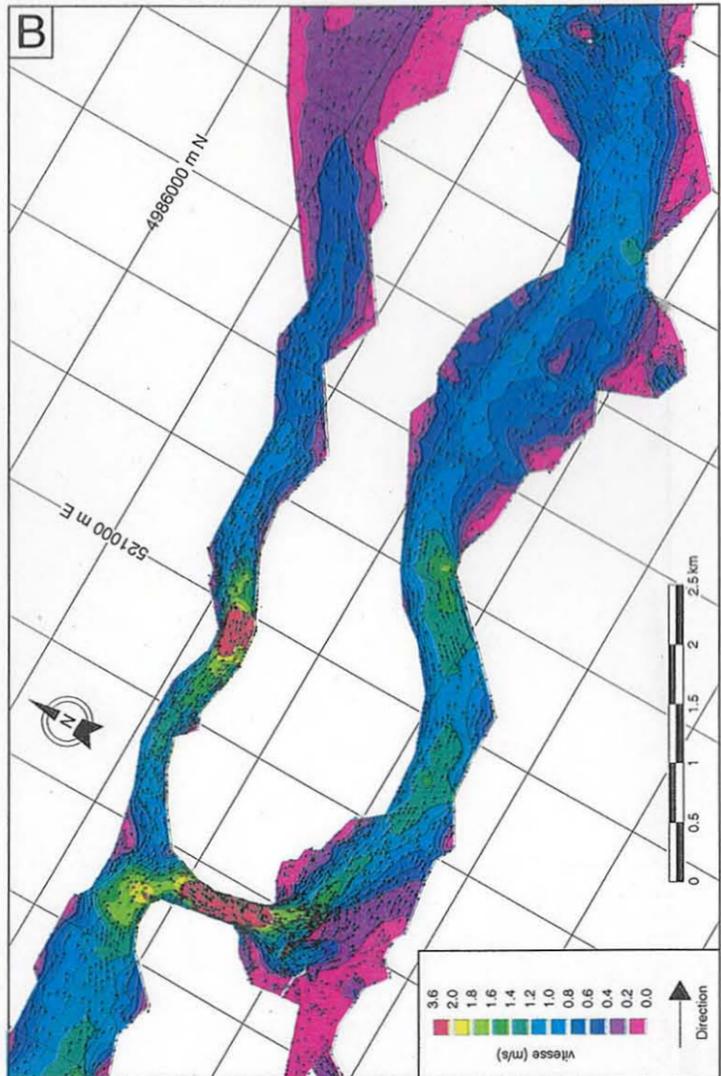
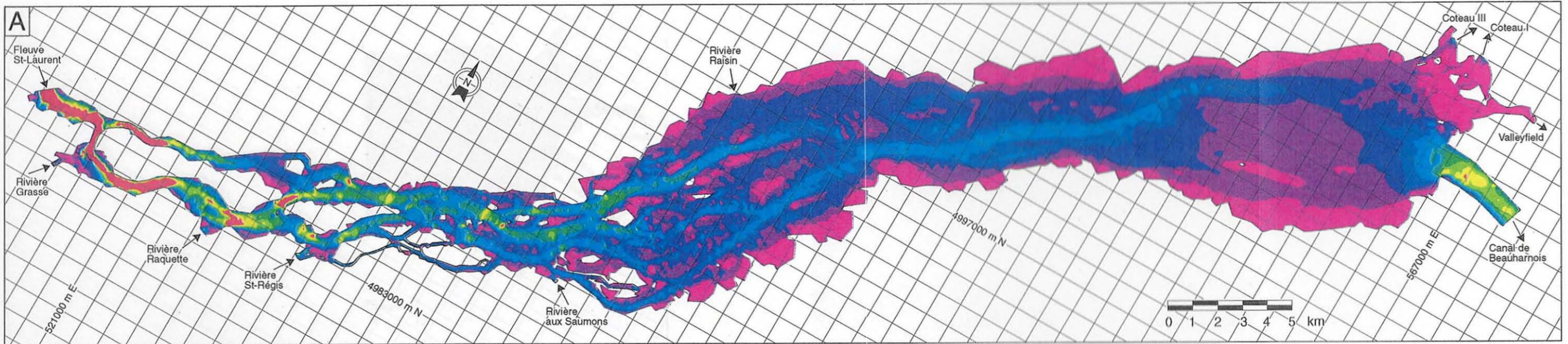
Direction des vitesses



Vitesse (m/s)



Nota: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.



Simulations hydrodynamiques

PRINTEMPS-AUTOMNE 7 500 m³/s

Absence de plantes aquatiques
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 7 500 m³/s

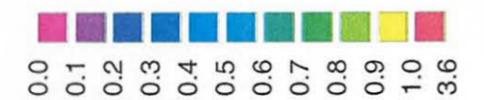
Tributaires:
Riv. Grasse 150 m³/s
Riv. Raquette 280 m³/s
Riv. St-Régis 195 m³/s
Riv. aux Saumons 90 m³/s
Riv. Raisin 35 m³/s

Sorties:
Coteau III 300 m³/s
Coteau I 250 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 7 695 m³/s

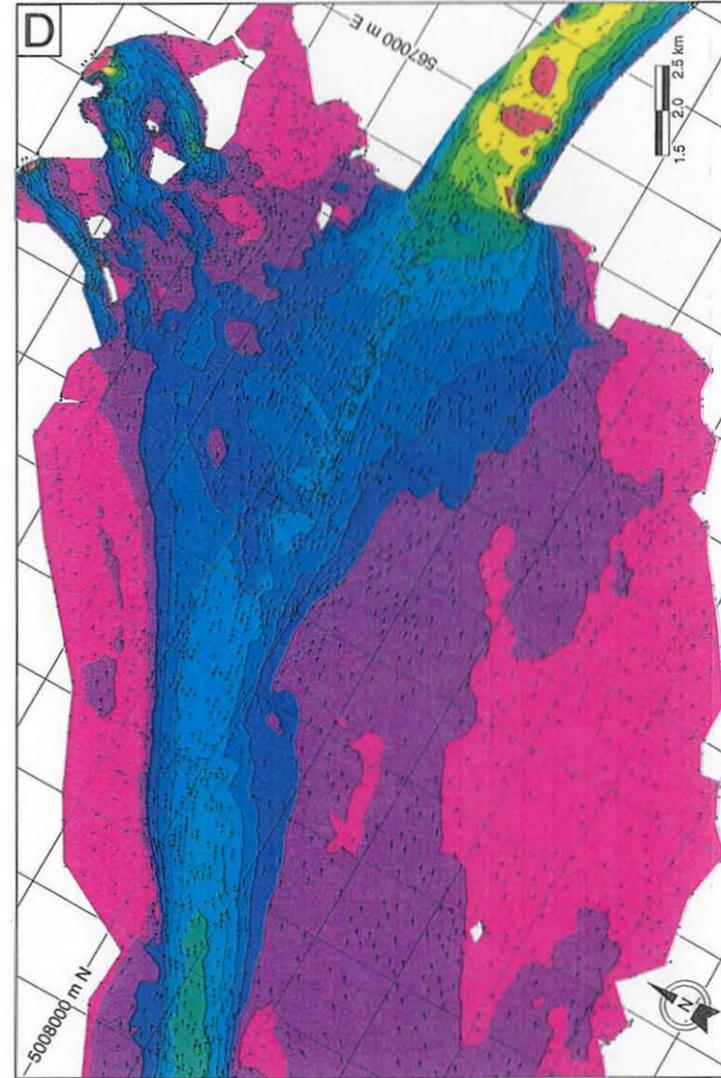
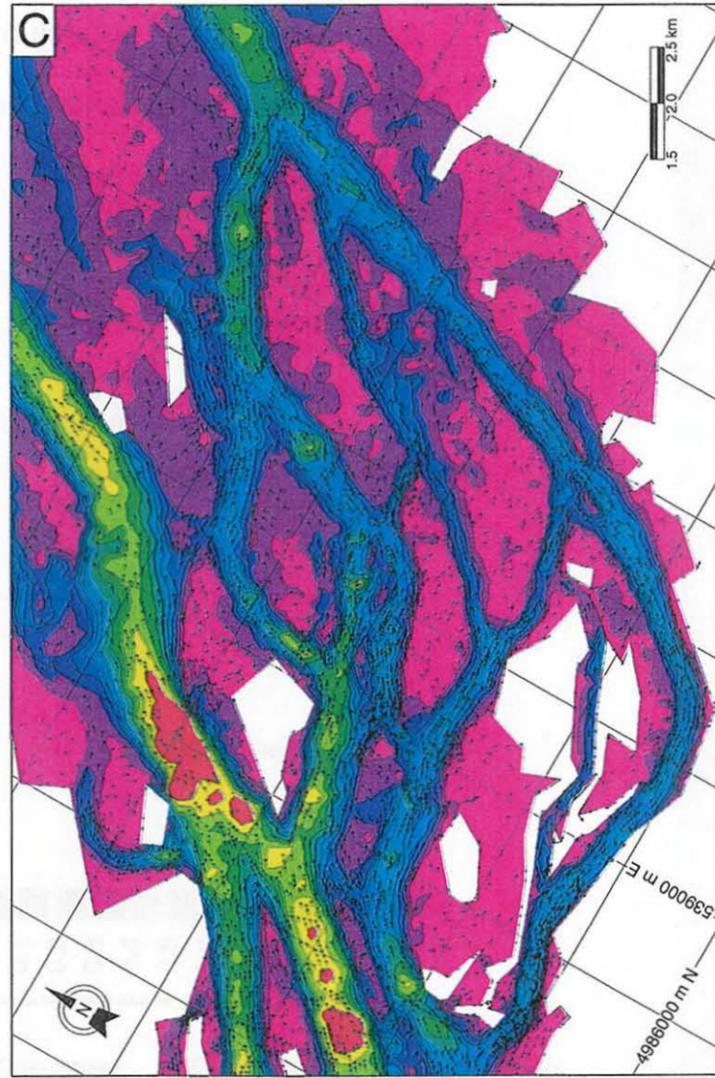
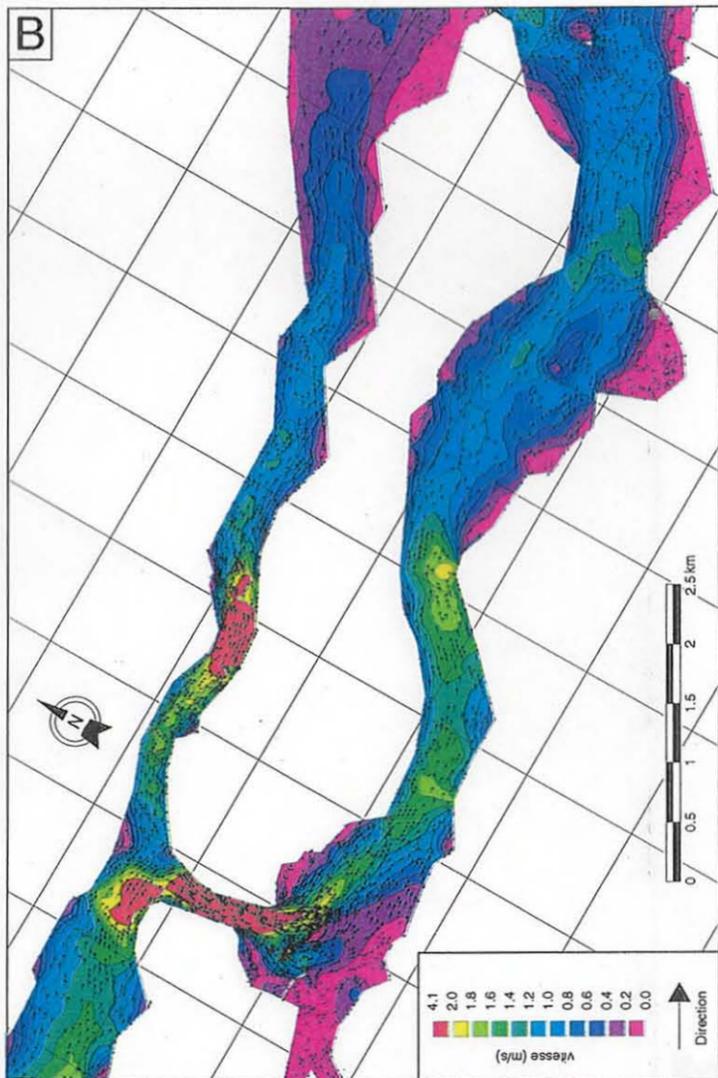
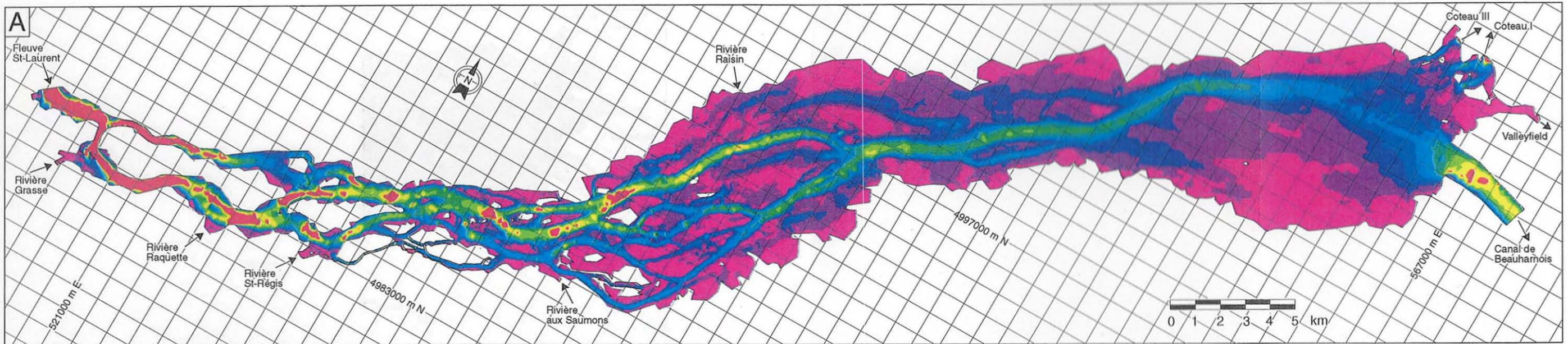
Direction des vitesses



Vitesse (m/s)



Note: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.



Simulations hydrodynamiques

ÉTÉ 10 000 m³/s

Plantes aquatiques: Croissance maximum
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 10 000 m³/s

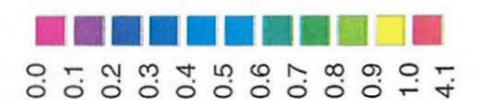
Tributaires:
Riv. Grasse 20 m³/s
Riv. Raquette 70 m³/s
Riv. St-Régis 30 m³/s
Riv. aux Saumons 10 m³/s
Riv. Raisin 5 m³/s

Sorties:
Coteau III 555 m³/s
Coteau I 1445 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 8 130 m³/s

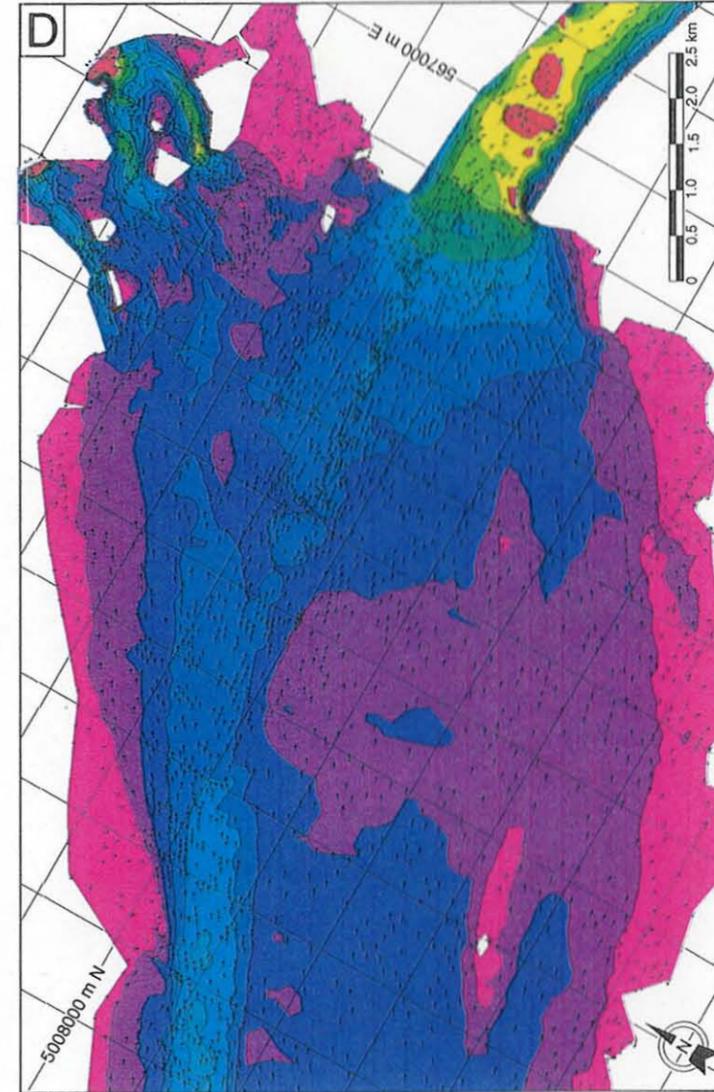
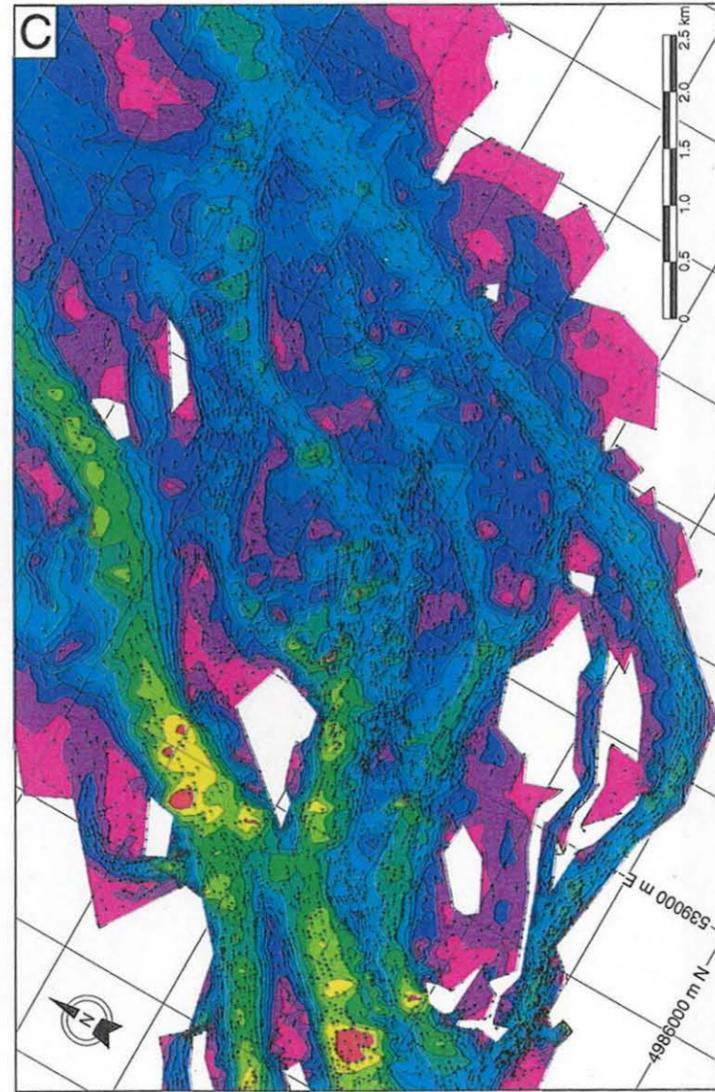
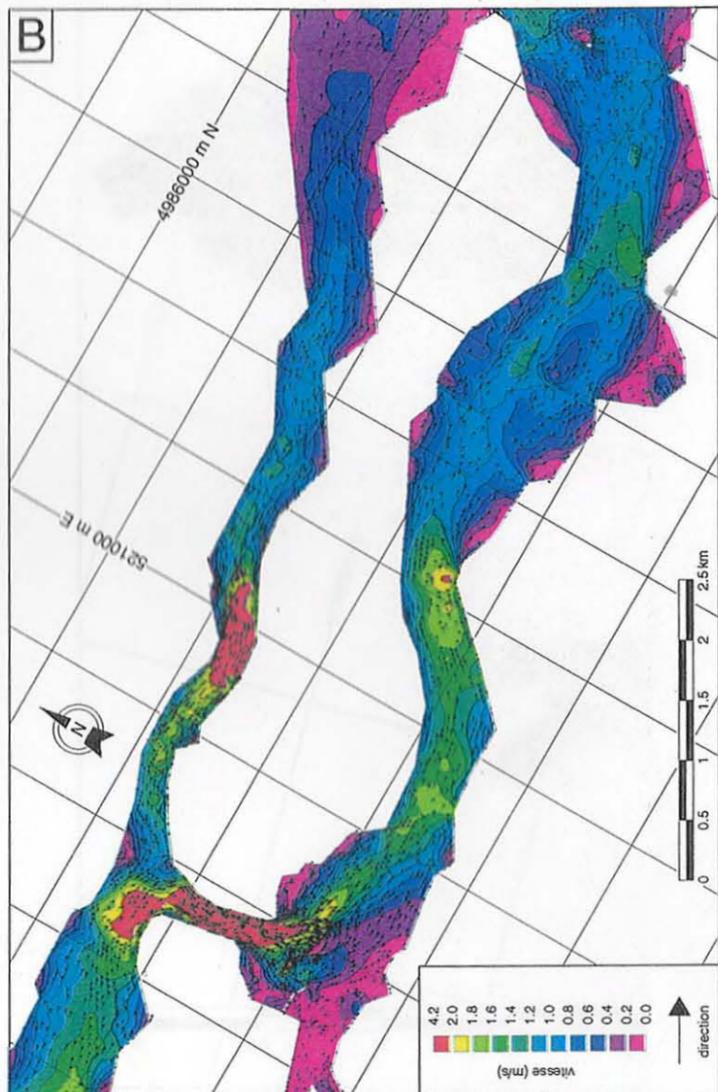
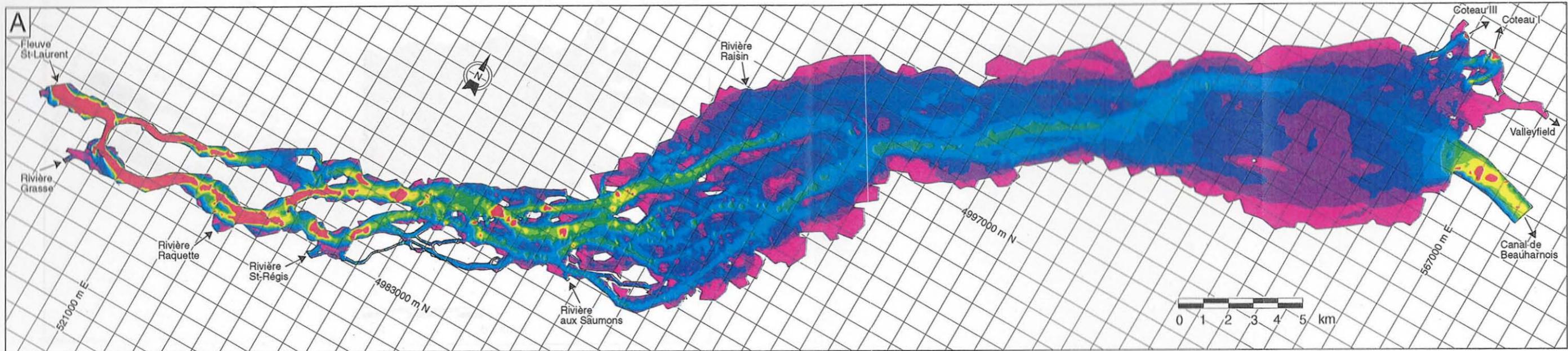
Direction des vitesses



Vitesse (m/s)



Note: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.



Simulations hydrodynamiques

PRINTEMPS-AUTOMNE 10 000 m³/s

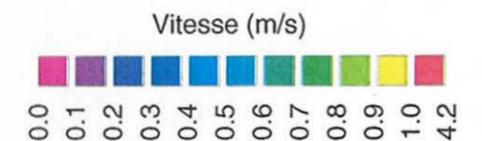
Absence de plantes aquatiques
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Entrée:
Fleuve 10 000 m³/s

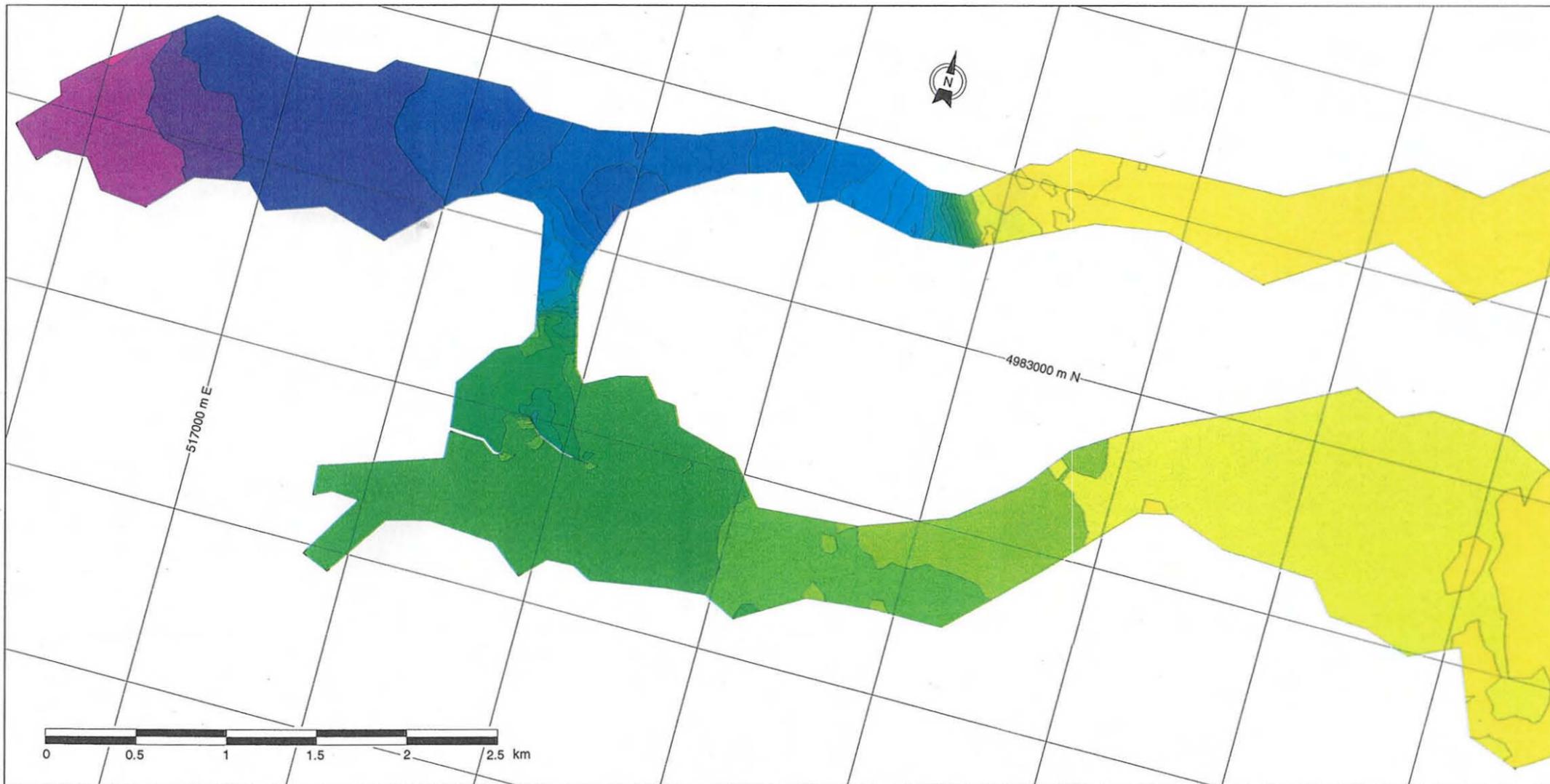
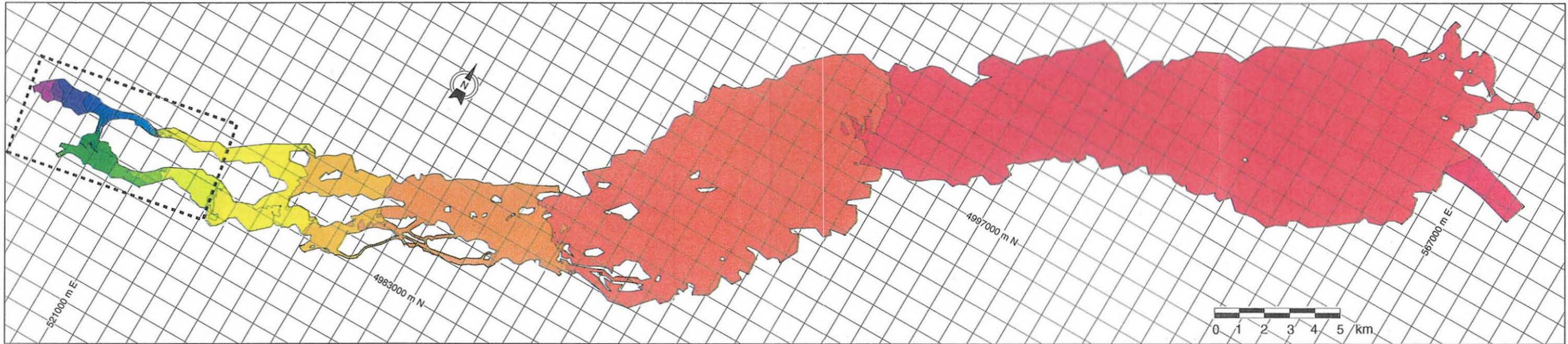
Tributaires:
Riv. Grasse 150 m³/s
Riv. Raquette 280 m³/s
Riv. St-Régis 195 m³/s
Riv. aux Saumons 90 m³/s
Riv. Raisin 35 m³/s

Sorties:
Coteau III 880 m³/s
Coteau I 1 720 m³/s
Valleyfield 5 m³/s
Beauharnois 8 145 m³/s

Direction des vitesses



Note: La légende ci-haut est valide pour les figures A, C et D.

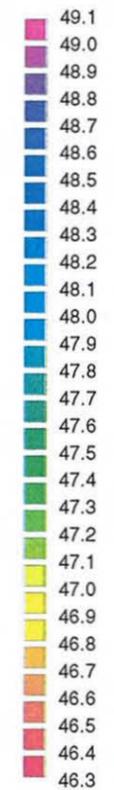


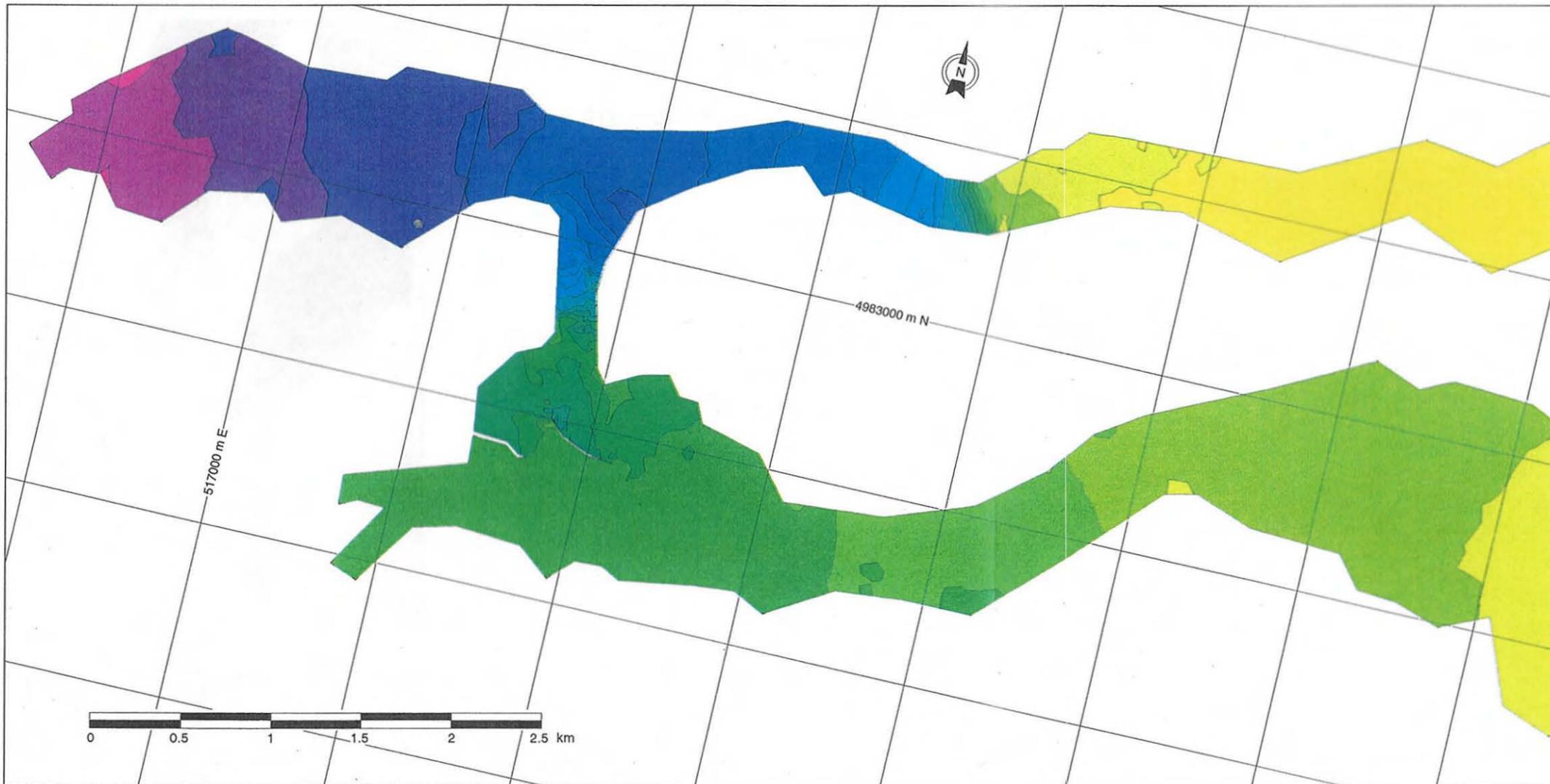
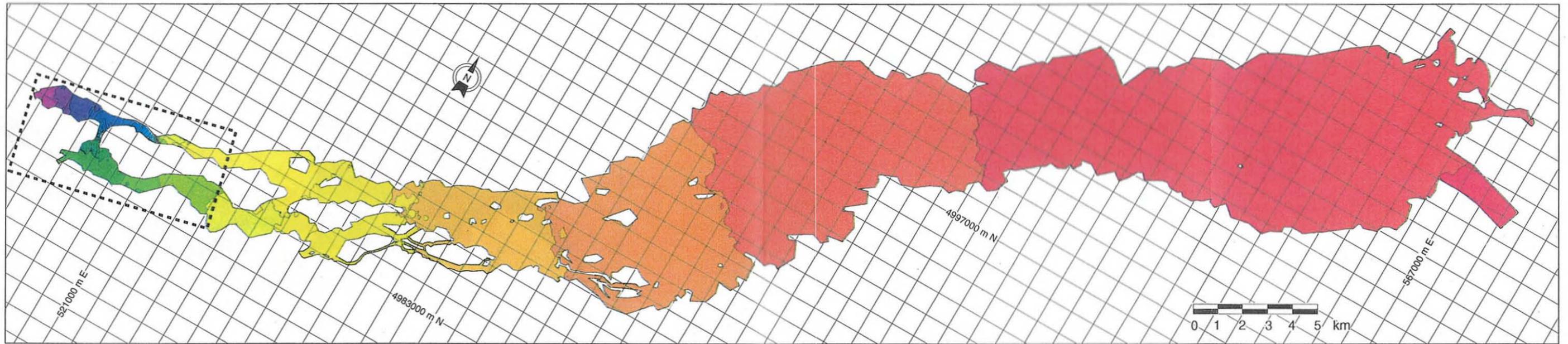
Niveaux simulés

ÉTÉ 7 500 m³/s

Plantes aquatiques: Croissance maximum
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Niveaux d'eau (m, RIGL 55)
Isosurfaces de 0,1 m



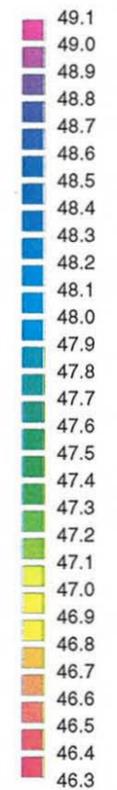


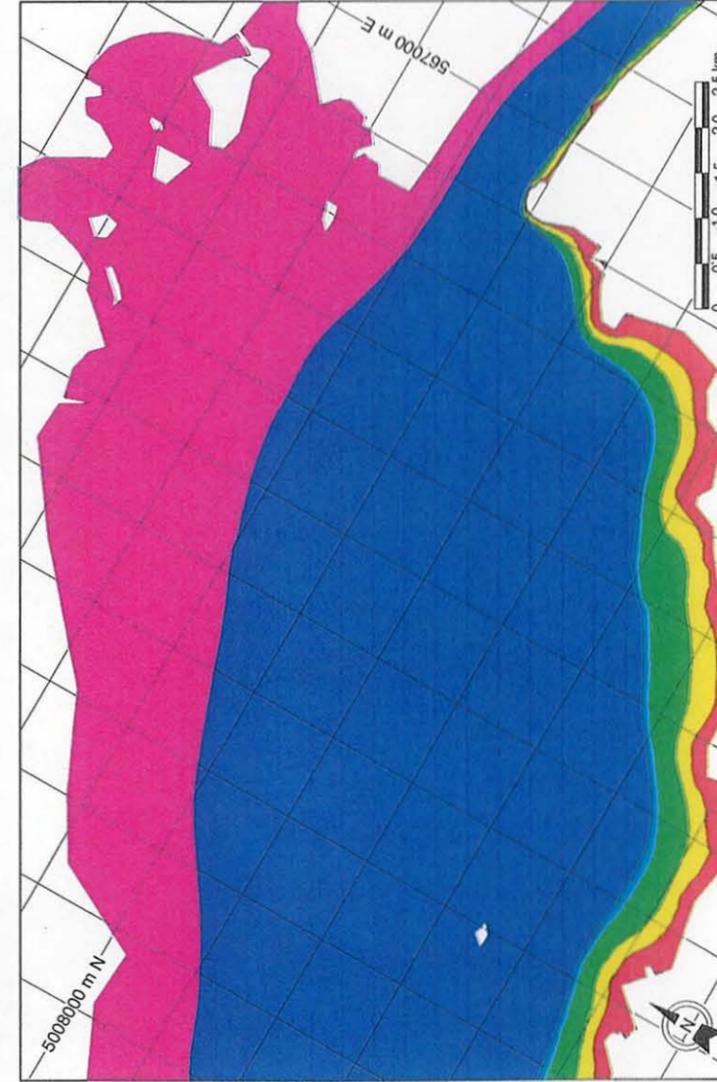
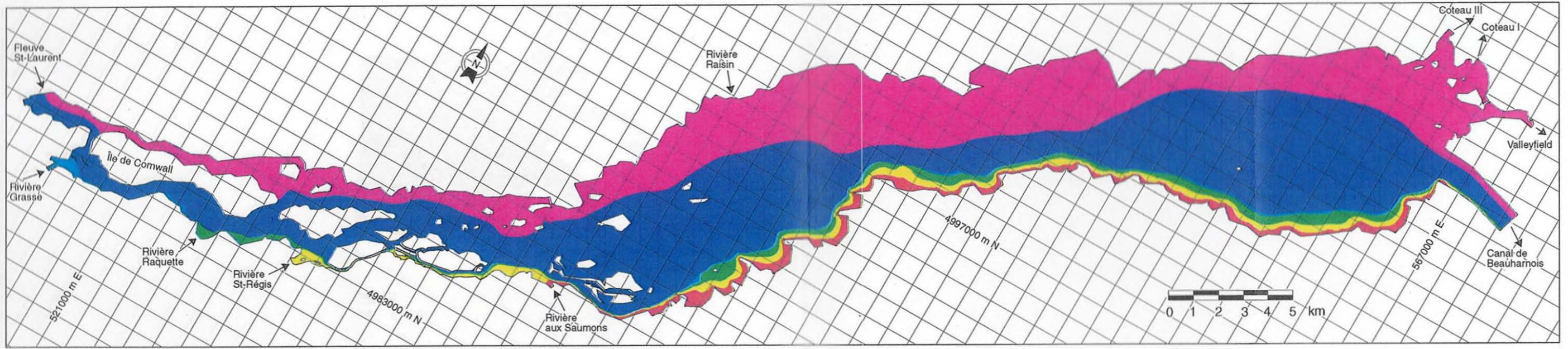
Niveaux simulés

PRINTEMPS-AUTOMNE 7 500 m³/s

Absence de plantes aquatiques
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

Niveaux d'eau (m, RIGL 55)
Isosurfaces de 0,1 m





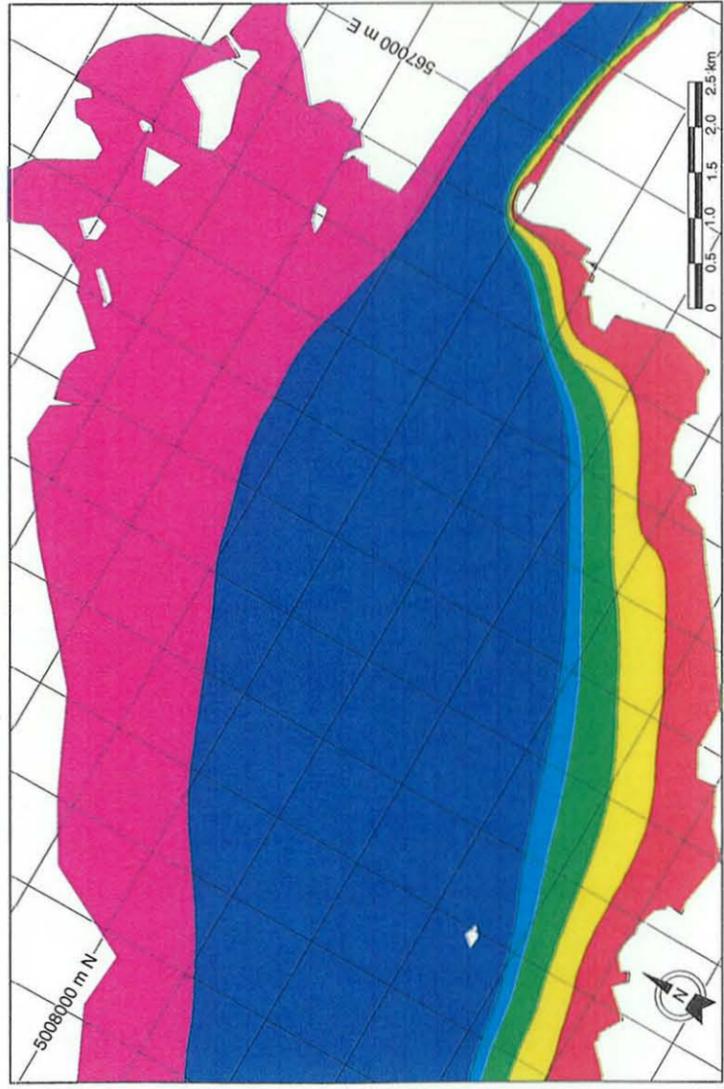
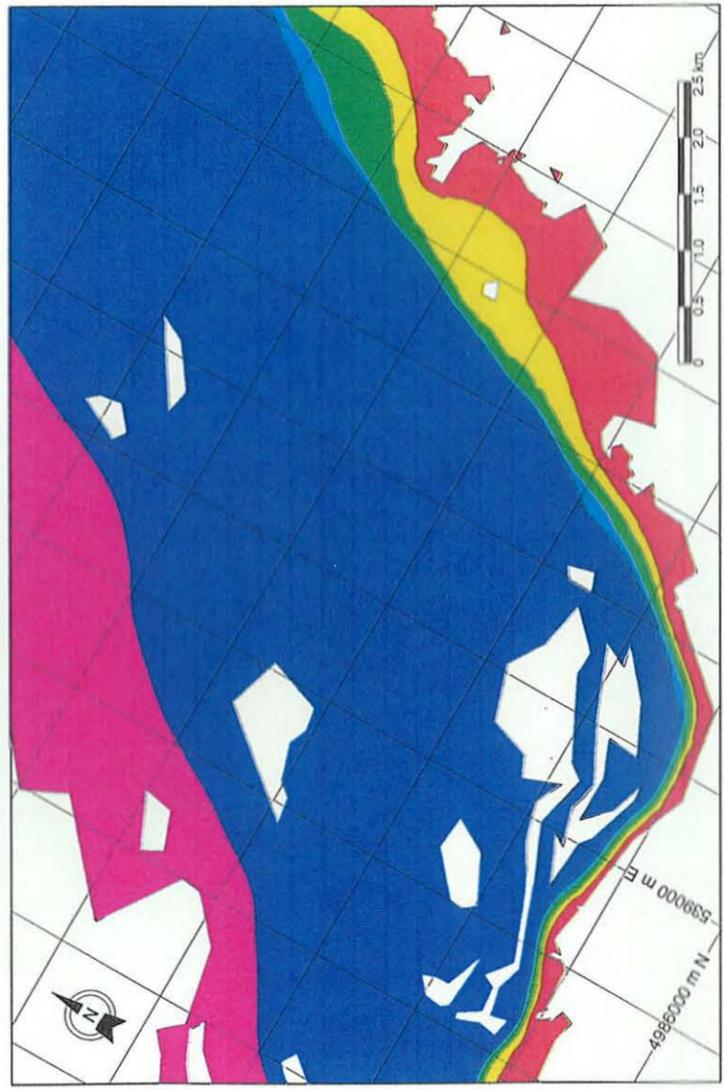
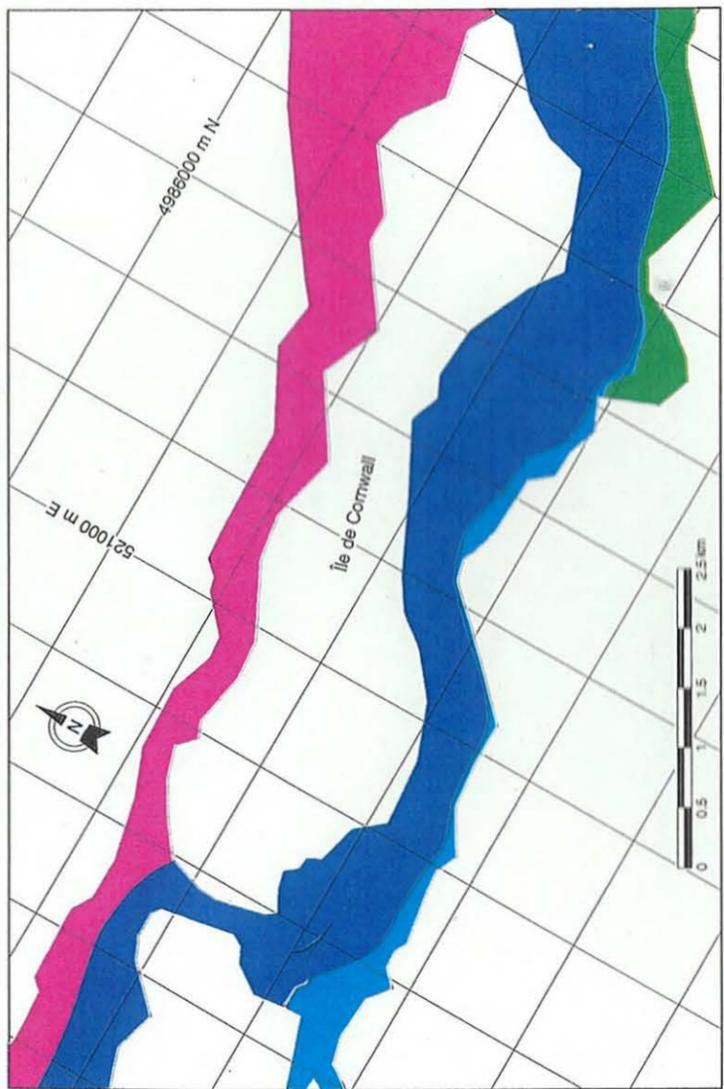
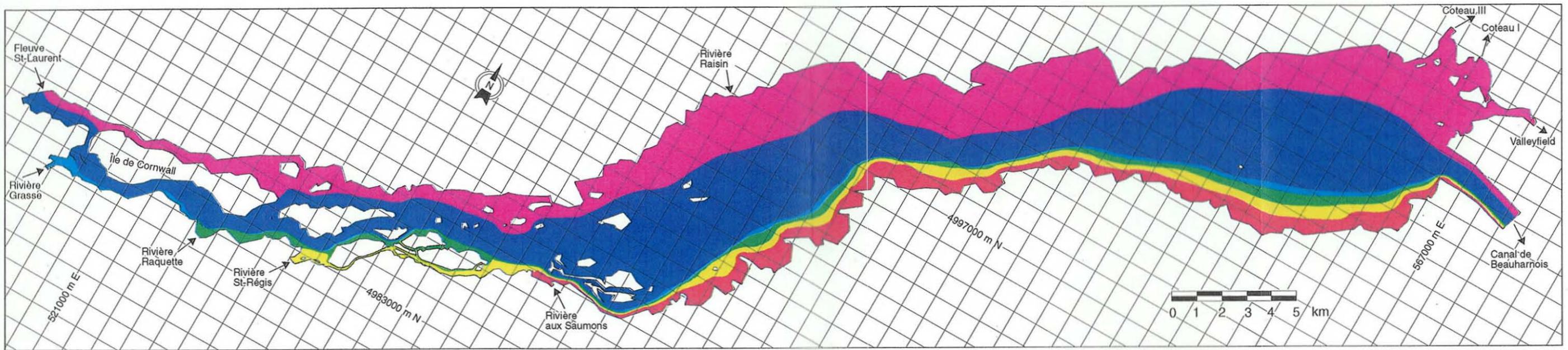
Fonction courant
(masses d'eau, sans mélange)

ÉTÉ 7 500 m³/s

Plantes aquatiques: Croissance maximum
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

ISODÉBIT

- Rivière aux Saumons 10 m³/s
- Rivière St-Régis 30 m³/s
- Rivière Raquette 70 m³/s
- Rivière Grasse 20 m³/s
- Île de Cornwall (SUD) 5 300 m³/s
- Île de Cornwall (NORD) 2 200 m³/s



Fonction courant
(masses d'eau, sans mélange)

PRINTEMPS-AUTOMNE 7 500 m³/s

Absence de plantes aquatiques
Grille 1000 m, UTM 18, NAD 27

ISODÉBIT

- Rivière aux Saumons 90 m³/s
- Rivière St-Régis 195 m³/s
- Rivière Raquette 280 m³/s
- Rivière Grasse 150 m³/s
- Île de Cornwall (SUD) 5 300 m³/s
- Île de Cornwall (NORD) 2 200 m³/s