

PROJET MÉTRIQUE

RAPPORT SYNTHÈSE

Mars 1999

**SYSTÈME DE MODÉLISATION HYDROÉCOLOGIQUE
À L'ÉCHELLE DE TRONÇONS DE RIVIÈRE
POUR LA GESTION INTÉGRÉE DE LA QUALITÉ DE L'EAU,
DES USAGES ET DE L'ÉCOSYSTÈME AQUATIQUE**

Projet MÉTRIQUE

Rapport synthèse

Présenté au

Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec

**Fonds de recherche et de développement
technologique en environnement**

DOCUMENT PRÉLIMINAIRE

Rapport INRS-Eau No 482-S

Mars 1999

ISBN : 978-2-89146-792-6

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Institut National de la Recherche Scientifique - Eau

Développeurs

Yves Secretan	Professeur, PhD
Michel Leclerc	Professeur, PhD
Mourad Heniche	Numéricien, PhD
Yves Roy	Analyste en informatique, BSc
Yves Granger	Informaticien, BSc
Francisco Padilla	Associé de recherche, PhD
Sophie Bédard	Étudiante à la maîtrise
Julie Lafleur	Étudiante à la maîtrise
Éric Chamberland	Assistant de recherche
André Gagné	Informaticien, BSc
Jean-François Lagacé	Informaticien, BSc
Éric Paquet	Informaticien, MSc
Serge Dufour	Technicien en informatique

Utilisateurs internes pour validation (en ordre alphabétique)

Paul Boudreau	Agent de recherche, hydraulicien numéricien (Tous les projets)
Steve Côté	Étudiant à la maîtrise (Projet Saint-Laurent)
Bernard Doyon	Étudiant au doctorat (Transport lagrangien de glace)
Steve Driscoll	Professionnel (Projet Crue du Saguenay)
Sophie Duchesne	Étudiante à la maîtrise (Projet Crue du Saguenay)
Patrice Fortin	Prêté par Environnement Canada (Projet Saint-Laurent)
Yves Gauthier	Agent de recherche (Projet Crue du Saguenay)
Joëlle Marion	Agente de recherche (Plusieurs projets)
Jean Morin	Étudiant au doctorat (Projet Saint-Laurent)

Daniel Rioux Étudiant à la maîtrise (Programme du CIRSA)
Christine Vaillancourt Prêtée par la Commission Nicolet (Crues du Saguenay)

Utilisateurs externes (par ordre alphabétique)

Normand Bergeron Professeur, PhD, INRS-Géoressources
Paula Bergeron Ingénieure, Ministère de l'Environnement et de la Faune
Jose Bechara Professeur, biologie, Université nationale du Nord-Est (Argentine)
André Bérubé INRS-Géoressources
Pierre Bérubé Biologiste, Ministère de l'Environnement et de la Faune
Gilles Bourgeois Génivar
Valérie Breault Ingénieure, Hydro-Québec
Roger Dumont Ingénieur, Ministère de l'Environnement et de la Faune
Lisa Gauthier RSA-Consultants (Saguenay)
François Godin Ingénieur, Ministère de l'Environnement et de la Faune
Jean-Christophe Guay Étudiant à la maîtrise, Université de Montréal
Van Diem Hoang Ingénieur, Ministère de l'Environnement et de la Faune
Christian Latulippe Étudiant à la maîtrise, Université Mc Gill
Michel Lapointe Professeur, PhD, Université Mc Gill
Hélène Lewis Informaticienne, HMS-Énergie
Christian Lord Géomaticien, MEF
Jean-François Mercier Génivar
Tonino Nzakimuena Hydro-Québec

Pour les fins de citation :

Secretan Y., Leclerc M., Heniche M. et Yves Roy (1999).

Projet MÉTRIQUE. Rapport d'étape #5 : Synthèse. Pour le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Fonds de recherche et de développement technologique en environnement (FRDTE). Rapport INRS-Eau 482-F. 62 pages.

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. LA COQUILLE MÉTRIQUE - UN COFFRE D'OUTILS	4
2.1 Présentation des outils	4
2.2 Les bases scientifiques	4
2.3 Le gestionnaire de données	5
2.4 La géoréférence	6
2.5 La CALCULATRICE	6
2.6 La projection des données	8
2.7 La visualisation et l'édition	8
2.8 Les profils en long	9
2.9 La SONDE	9
2.10 L'édition d'écran	10
3. LE MODELEUR – MODÉLISER ET MODELER LE TERRAIN	11
3.1 Les contextes visés	12
3.2 Les principes	13
3.2.1 Les éléments finis : une représentation souple des données	13
3.2.2 L'accès constant au données de terrain originales	13
3.2.3 Un environnement totalement géoréférencé	14
3.2.4 Un système ouvert	14
3.2.5 Un système économique et accessible	14
3.2.6 Le maillage adaptatif : <i>assisté vs automatisé</i>	14
3.3 Exemples d'applications distinctes du MODELEUR	15
3.3.1 Bilan sédimentaire rivière des HA !HA !	15
3.3.2 Reconstitution dynamique des avulsions-Rivière Chicoutimi	16
3.3.3 Dommages Saguenay	16
3.3.4 Impacts cumulatifs - Lac Saint-François (fleuve Saint-Laurent)	17
3.3.5 Autres exemples d'utilisation	18
4. HYDROSIM - SIMULER LES COURANTS FLUVIAUX	19

4.1	Les contextes visés	19
4.2	Les principes	20
4.3	Les bases scientifiques	21
4.3.1	Modèle 2D horizontal - Ondes longues	21
4.3.2	Bancs couvrant-découvrant	22
4.3.3	Résolution non-linéaire	23
4.4	Validations théoriques	23
4.4.1	Canal droit – Écoulements uniformes et graduellement variés	24
4.4.2	Écoulements rapidement variés	24
4.4.3	Stabilité et convergence de l'algorithme de découvrant-recouvrant	24
4.4.4	Test du canal recourbé de Rozovskii et de l'épi de Nwachukwu et Rajaratnam	25
4.5	Validations terrain	25
4.5.1	Risques d'inondations - Rivière Montmorency	26
4.5.2	Crues du Saguenay	26
4.5.3	Modèle du fleuve Saint-Laurent	27
5.	HABIOSIM - QUANTIFIER ET AMÉNAGER LES HABITATS	29
5.1	Les contextes visés	29
5.2	Les principes	30
5.3	Les bases scientifiques	31
5.4	Le modèle théorique	32
5.4.1	Les indices de base	32
5.4.2	Indices globaux classiques et nouvelles avenues	33
5.4.3	La disponibilité d'habitats	33
5.5	Analyses comparatives et validation terrain	34
5.5.1	Comparaison PHABSIM HABIOSIM	34
5.5.2	Le saumon de la rivière Moisie	35
5.5.3	Validation des modèles d'habitats sur la rivière Sainte-Marguerite : les régressions logistiques	36
5.5.4	Les plantes aquatiques du fleuve Saint-Laurent	36
5.6	Recherches complémentaires : les débits réservés	37
6.	DISPERSIM - «TRACER» LES CONTAMINANTS ET LES MASSES D'EAU	39
6.1	Les contextes visés	39
6.2	Les principes	41

6.3	Les bases scientifiques	42
6.3.1	Le modèle eulérien de transport-diffusion	43
6.3.2	Les lois de comportement incluses	43
6.3.3	Résolution numérique	45
6.4	Validations théoriques	46
6.4.1	Tests de contrôle de la programmation	46
6.4.2	Tests de propagation de fronts de concentration	46
6.4.3	Tests en régime transitoire	47
6.5	Validations terrain	47
6.5.1	Rivière des Prairies : validation à la rhodamine	48
6.5.2	Lac Saint François : validation des sources et puits	48
6.6	Potentiels complémentaires	49
6.7	Pourquoi pas un logiciel ?	49
7.	LES ACQUIS COMPLÉMENTAIRES - LE GÉNIE LOGICIEL	51
7.1	Environnement de développement	51
7.2	Écriture de code - Outils de développement	52
7.3	Gérer le développement logiciel - Organisation de groupe	53
7.4	Outils développés	54
7.4.1	WEB ⁺⁺	54
7.4.2	DEPEND	54
7.4.3	GENTEST	55
7.4.4	METRIX	55
7.5	Tests	55
7.5.1	Test unitaire	56
7.5.2	Révision formelle de code	57
7.5.3	Test d'intégration	57
7.5.4	Automatisation des tests	57
8.	COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS PRODUITES	59
8.1	Sites web	59
8.2	Documents écrits	59

1. Introduction

Ce rapport représente l'aboutissement d'un cycle de développement qui a duré près de six ans dont trois supportées par le FRDTE.

Nous sommes tous très fiers de présenter ici le fruit de nos travaux à la communauté des modélisateurs et des utilisateurs actuels et potentiels le système de modélisation fluvial MÉTRIQUE dont le but est de :

- *Supporter efficacement la planification, l'évaluation, l'analyse, la mise en œuvre et/ou le contrôle d'interventions ciblées sur l'environnement aquatique à l'échelle des tronçons de rivière, fleuves et estuaires;*
- *Aider à la résolution de conflits d'usages, actuels ou potentiels.*

L'appellation MÉTRIQUE a été retenue pour désigner le système car en plus de référer à la notion de mesure, de quantification, elle recoupe les intentions de l'équipe de développement formulées dès le départ, soit : *un système de Modélisation hydroécologique à l'Échelle des Tronçons de Rivière pour la gestion Intégrée de la Qualité de l'eau, des Usages et des Écosystèmes aquatiques*. Vu la nature du projet axée sur la modélisation, la gestion Intégrée est également Informatisée.

Cette approche est complémentaire de GIBSI (un autre projet de l'INRS-Eau portant sur la gestion intégrée par bassins versants à l'aide de systèmes informatisés) car elle apporte une résolution d'information que ne peuvent fournir les modèles construits à l'échelle du réseau hydrographique (bassin). Contrairement à l'approche par bassin qui prend appui sur le régime hydrologique, l'intérêt de l'approche par tronçon tient à l'omniprésence de l'hydraulique fluviale à deux dimensions comme source de données de base. Cette connaissance est en effet essentielle pour retracer l'évolution des contaminants dès le départ à partir du point d'émission afin d'évaluer leur impact sur les usages et l'écosystème en aval. La compréhension des habitats aquatiques et leur quantification demandent également une telle prise en compte. De même, la notion de risques associées aux dommages d'inondation exige en plus des données hydrauliques, une perspective très étendue et très précise sur la hauteur du terrain en zone inondable. Et on pourrait ainsi allonger la liste des contextes d'analyse et d'interventions qui nécessitent la prise en compte des courants : sédimentologie, dragages, déversement accidentels dans le milieu, conception d'ouvrages de génie civil, protection de berges pour ne mentionner que ceux-là.

Ce document vise donc à faire un bilan synthétique de l'ensemble des travaux réalisés qu'ils soient directement inclus dans le projet MÉTRIQUE ou qu'il s'agisse d'applications directes des outils développés nous ayant servi en cours de route à camper les besoins de fonctionnalités et à valider les outils. En effet, la stratégie de développement adoptée est typique de la recherche-

action. Elle a été caractérisée par notre implication simultanée dans le développement des outils et au niveau de la recherche de base et des applications. Cette stratégie permettait ainsi à l'équipe de développeurs de définir précisément et au fur et à mesure les besoins et les priorités et donc d'optimiser le rendement de l'investissement. Pour ce faire, deux groupes complémentaires ont fonctionné en étroite collaboration : le premier formé de numériciens et d'informaticiens s'est consacré à l'analyse et à la mise en place des outils, l'autre formé de scientifiques de toutes provenances disciplinaires s'est consacré aux aspects thématiques de la recherche. Par ailleurs, une collaboration poussée a été recherchée avec des usagers externes, surtout du monde académique mais également dans le privé (consultants), les gouvernements et agences afin de tester l'adéquation de nos produits avec les besoins des divers marchés.

Avant d'introduire les chapitres successifs qui composent le document, nous avons jugé utile de souligner l'importance qu'a eu le projet MÉTRIQUE pour la formation de jeunes chercheurs, d'informaticiens et de praticiens de l'hydraulique fluviale. Le contexte multidisciplinaire, les valeurs environnementales véhiculées par la direction, la haute technologie informatique et numérique, l'atmosphère de défi et l'omniprésence des applications ont permis à plusieurs dizaines de personnes de faire leurs premières classes dans leur domaine avant de trouver des débouchés stimulants sur le marché du travail.

Comme en témoigne la liste partielle des contributeurs fournie au début du document, nous avons ainsi permis à 5 professeurs sous octrois ou chercheurs associés, 7 informaticiens-numériciens, 1 technicien en informatique, 4 assistants de recherche, 10 étudiants en maîtrise et au doctorat, 5 chercheurs post-doctoraux et près d'une vingtaine de stagiaires qui, de participer au développement des outils, qui, de contribuer à la validation de ceux-ci par la réalisation d'applications primeurs, ou encore, de se familiariser avec eux. Parmi ceux qui nous ont quittés, la plupart occupent des emplois enviables dans leur domaine (informatique et hydraulique) ce qui démontre la pertinence d'un tel projet pour le développement de l'infrastructure technologique et scientifique de la région et du Québec. Depuis quelques temps, s'ajoutent à ce noyau des utilisateurs externes qui viennent participer à des sessions de formation et avec lesquels nous sommes appelés à collaborer de plus en plus dans la réalisation d'étude et/ou le support à l'utilisation des outils mis à leur disposition. Ce rayonnement s'étend jusqu'à l'étranger puisqu'un projet est sur le point d'être entrepris avec la modélisation du Rio Paraná en Argentine en collaboration avec l'Entidad Binational de Yaciretá (EBY) une utilité hydroélectrique de la région.

La suite de ce document comporte d'abord deux chapitres qui permettent d'introduire les composantes génériques du système développé. Le premier porte sur la COQUILLE informatique qui sous-tend l'ensemble des outils développés. Cette COQUILLE comprend plusieurs fonctionnalités qu'on pourra retrouver dans les modules de simulation (gestion des données, visualisation, calculatrice, sonde, etc.). Le chapitre suivant porte sur le MODELEUR qui représente une composante stratégique du système de modélisation puisqu'il représente le premier simulateur permettant de prendre possession des données de terrain (topographie, substrats, etc.) à la manière d'un système d'information hydro-géographique et de les véhiculer efficacement dans l'ensemble des tâches de modélisation accomplies dans les autres modules.

Le chapitre 4 présente le modèle HYDROSIM dont le pilotage s'effectue directement à l'intérieur du MODELEUR. Ce modèle permet de simuler les courants fluviaux sur de petits ou

de très grands cours d'eau même si la ressource informatique disponible n'est qu'un ordinateur personnel. Il présente également les qualités essentielles pour prendre en compte la complexité des courants fluviaux : capacités de découvrment-recouvrement liées au débit, prise en compte des plantes aquatiques et de la glace, et surtout l'excellente représentation de la topographie que lui procure la méthode des éléments finis supportée par le MODELEUR. En plus des contextes d'utilisation ciblés et des bases théoriques qui le sous-tendent, nous faisons état dans ce chapitre des applications primeurs réalisées avec l'outil ainsi que des validations réalisées.

Les chapitres 5 et 6 présentent respectivement HABIOSIM et DISPERSIM deux modules de simulation consacrés respectivement à la modélisation des microhabitats aquatiques et à la simulation du transport de contaminants. Comme pour HYDROSIM, les contextes d'utilisation et les bases théoriques sont mentionnées ainsi que les applications qui ont permis de progresser dans la validation des outils.

Le dernier chapitre porte sur les différents instruments de génie logiciel et le savoir-faire polyvalent qui ont été mis en œuvre pour former une méthodologie de développement innovatrice qui sert de modèle dans la région de Québec. Il est notable en effet que le projet MÉTRIQUE a nécessité l'élaboration de plusieurs outils informatiques très innovateurs afin d'optimiser les ressources importantes (mais limitées devant l'ambition du projet) mises à notre disposition, tout en procurant un maximum de qualité et de robustesse aux produits livrés. Une philosophie orientée-objet, un haut niveau d'automatisation des procédures, un contrôle constant de qualité grâce à la multiplication des tests implantés dans les programmes, une extrême souplesse dans l'accessibilité aux programmes-sources (navigabilité de type page WEB) ont ainsi graduellement été mis en place en cours de projet ce qui a permis d'en arriver aux produits que nous sommes si fiers en cette fin de cycle de présenter à la communauté d'utilisateurs actuels et potentiels., ainsi qu'aux autres équipes de développement informatiques de la région.

Nous avons jugé utile de compléter ce document par une bibliographie complète des travaux réalisés par l'équipe au cours des quatre dernières années en relation avec le développement des logiciels et modèles MÉTRIQUE, avec les outils de développement, avec les applications primeurs de ces produits, ou encore avec les nombreuses opérations de diffusion de ce savoir-faire.

2. La coquille MÉTRIQUE - Un coffre d'outils

2.1 Présentation des outils

Les applications considérées dans la suite de cette analyse ne sont pas limitatives à long terme. Elles visent à répondre à court terme à des besoins d'intervention précis en évitant autant que possible de limiter la portée des instruments. Ainsi, HABIOSIM est conçu pour répondre aux besoins des projets de débits réservés pour les habitats piscicoles. Mais l'utilisateur pourra s'en servir pour appliquer le formalisme de MMH (modélisation du micro-habitat) à toute situation étrangère à cette problématique (design de modèles de macrophytes).

Parmi les applications futures qui pourraient être avantageusement servies par le système de logiciels MÉTRIQUE, on compte entre autres le transport lagrangien de glace (embâcles), la sédimentologie fluviale et la propagation d'hydrocarbures après un déversement accidentel. Pour l'instant, nous avons restreint nos développements aux contextes suivants:

- HABIOSIM: micro-habitats, débits réservés
- DISPERSIM: qualité de l'eau, dispersion de masses d'eau, débordement de réseaux d'égout unitaires, panaches de tributaires

2.2 Les bases scientifiques

Parallèlement à la poursuite des travaux sur HYDROSIM, nous avons mis des efforts considérables pour consolider le code informatique des logiciels fonctionnant dans un environnement graphique.

Rappelons que tous les logiciels sont livrés sur la plate-forme WindowsNT / Windows95 et ils sont développés en C++ en appliquant les méthodologies orientées objets pour la modélisation de données.

Dans les derniers mois, la plus grande part de nos efforts a été investie dans le développement de fonctionnalités génériques qui serviront à tous les logiciels, i.e. les fonctionnalités de la COQUILLE. Mentionnons entre autres, l'élaboration d'un modèle de données cohérent, sa mise en oeuvre à l'aide d'une base de données maison, la spécification du flux de données lors de l'importation et de l'exportation des données avec l'extérieur, et notamment avec le simulateur HYDROSIM.

Des efforts considérables ont été investis dans le remaniement de la COQUILLE en vue d'offrir des services généraux à toutes les applications du projet MÉTRIQUE. La COQUILLE est l'ensemble des fonctionnalités communes à tous les logiciels. Mentionnons entre autres, les services de la base de données, de l'affichage et de la traduction des messages, la gestion des projets de simulation ainsi que l'importation/exportation de données, la visualisation des résultats et des données spatiales, une géoréférentiation universelle. La COQUILLE offre aussi différents outils d'aide à la modélisation, tels que la calculatrice programmable, la sonde spatiale et le contrôle de l'affichage graphique. La plupart des développements inhérents à ces fonctionnalités sont décrits ci-après.

2.3 Le gestionnaire de données

Nous avons conçu la base de données pour valider sa composition, ses mécanismes internes et s'assurer d'une sécurité à toute épreuve lors de la manipulation des données.

Nous avons développé le concept de cette base de données afin de gérer de façon cohérente la multitude et la diversité des données de projet que l'utilisateur importe, crée et modifie ou détruit. Par exemple, la complexité d'un projet comme celui de la modélisation du fleuve Saint-Laurent occupe plusieurs gigaoctets d'espace disque et nécessite la manipulation de plusieurs centaines de fichiers interreliés. Nous offrons une vue de haut niveau de ces données en terme d'entités et de relations entre elles. L'utilisateur n'a jamais à manipuler les fichiers directement. Pour cette raison, il est primordial que la base de données gère de façon sûre les mises à jour des fichiers de telle sorte que les données ne puissent être corrompues d'aucune façon.

C'est pourquoi nous avons élaboré un mécanisme de *transaction* qui permet à la base de données de faire des mises à jour aux données, seulement lorsque tout le processus s'exécute sans erreur et lorsqu'une erreur se produit, la base de données n'est pas modifiée.

Un autre aspect important qu'il a fallu développer a été d'offrir une vue des données et de leurs interrelations afin que l'utilisateur puisse voir et comprendre le contenu et l'état des données de son projet. Une mécanique particulière a été implantée permettant de faire des requêtes complexes sur les données. L'utilisateur de la base de données peut maintenant utiliser un mécanisme standard de requêtes lui permettant d'obtenir les données répondant à des critères spécifiques.

Simultanément au développement des fonctionnalités de la base de données, nous avons mis à jour et documenté le modèle de données supporté par celle-ci. Nous avons déterminé les entités dont l'utilisateur a besoin pour mener à bien son travail ainsi que les entités nécessaires à la construction des données de simulation. Les entités doivent précisément définir leurs contraintes en terme de constance, de persistance, de visibilité et elles doivent de plus clairement définir les liens obligatoires et optionnels qu'elles ont avec d'autres entités du système. La base de données possède maintenant toutes les fonctionnalités permettant de supporter le modèle de données.

Nous avons complété le travail de définition d'une interface minimale de la base de données en terme de fonctionnalités les plus unitaires possible. Nous appelons cette interface en terme technique, le « *guichet* » de la base de données. C'est par ce *guichet* que tous les logiciels passent

pour interagir avec la base de données. Ce travail d'organisation a permis de clarifier considérablement le mode de fonctionnement de tous les logiciels.

Notons finalement que la base de données constitue un modèle hybride, à cheval entre une base de données relationnelle et une base de données orientée objets. En effet, nous avons dans ce système une vue d'entités et de relations proche du modèle relationnel. Tous les liens entre les entités et leurs manipulations sont gérés de façon relationnelle. Par contre, beaucoup de données représentées par ces entités sont des données complexes qui ne se laissent pas facilement réduire à un modèle relationnel et nous avons donc choisi d'appliquer un modèle orienté objets en ce qui a trait à la sauvegarde et à la récupération de ces objets. Le modèle de la base de données fonctionne très bien et devrait répondre aux besoins actuels et futurs.

2.4 La géoréférence

Afin de prendre en compte adéquatement les données mesurées sur le terrain, les logiciels doivent être en mesure de gérer de manière cohérente des projets et des données géoréférencés.

Nous avons fait le lien avec la librairie **PROJ** développée et distribuée par le USGS qui fournit quelques 120 projections cartographiques sur 47 ellipsoïdes terrestres. Il nous a fallu interfacier **PROJ** et y ajouter les transformations entre les différents ellipsoïdes. Ainsi, les transformations de coordonnées sont faites à l'interne ce qui permet de conserver les données dans leur forme originale. Il est par exemple possible dans un même projet d'avoir des données en coordonnées géographiques (longitude/latitude), des données dans une projection UTM et encore d'autres dans une projection MTM, que ce soit sur le datum NAD-27 ou le datum NAD-83.

Cette fonctionnalité de la coquille fait de **MODELEUR** et d'**HABIOSIM** de vrais systèmes d'information et de modélisation géographique dédiés aux milieux fluviaux.

2.5 La CALCULATRICE

Dès nos premières réflexions sur les fonctionnalités à inclure dans les logiciels, il nous est apparu essentiel d'avoir à disposition des outils souples et performants pour interagir avec les données, et réaliser des calculs de base ou post-traitements.

Plutôt que de limiter ces calculs à quelques opérations fermées et prédéfinies, nous avons privilégié une approche ouverte qui met à disposition des utilisateurs un véritable langage de programmation qui leur permet d'écrire et sauvegarder des fonctions adaptées à leurs besoins.

La **CALCULATRICE** implante un langage de programmation interprété, proche du BASIC, particulièrement adapté à des calculs sur les champs. Ce langage permet autant de faire des calculs tant sur des variables simples que sur les champs scalaires ou vectoriels d'un projet. Dernièrement, le langage de la **CALCULATRICE** a été considérablement validé et augmenté. Le langage est plus robuste et plus flexible.

Les instructions d'un programme sont écrites une par ligne et elles sont interprétées dans l'ordre d'écriture. Des commentaires peuvent être ajoutés à un programme, ils n'influencent en rien l'exécution et les résultats.

Les types de données supportés par la CALCULATRICE sont :

- *scalar* : représente une valeur simple en point flottant ;
- *scalarfield* : représente un champ de *scalar* comme une champ de profondeur, de niveau d'eau, de topographie ou de valeur d'habitat ;
- *vector* : représente un vecteur de dimension 2 comme la vitesse en un point, la contrainte tractrice en un point sur le lit du cours d'eau ou la force locale du vent ;
- *vectorfield* : représente un champ de *vector* comme un champ de vitesse ;
- *logical* : représente une valeur logique *true* ou *false* ;
- *integer* : représente une valeur entière ;
- *string* : représente une chaîne de caractères.

Les opérations algébriques usuelles sur ces types de données sont toutes implantées. Il est ainsi possible d'additionner deux champs, de calculer la norme d'un champ vectoriel, etc.

Des structures de contrôle permettent de diriger le flux d'exécution des instructions d'un programme. La langage de programmation de la calculatrice offre les structures de contrôles suivantes :

- *if - else if - else - end if*
- *for - end for*
- *while - end while*
- *with - end with*

Le langage comporte également un certain nombre de fonctions de base qui peuvent être divisées en catégories :

- les fonctions générales : *abs, fix, int, sqrt*
- les fonctions statistiques : *min, max*
- les fonctions trigonométriques : *sin, cos, tan, asin, acos, atan*
- les fonctions transcendantes : *log, ln, exp*
- les fonctions de dérivation et d'intégration : *ddx, ddy, intg*
- les fonctions de lecture/écriture : *savefield*

En plus de ces fonctions prédéfinies, des fonctions utilisateurs peuvent être écrites et sauvegardées pour remplir des besoins particuliers.

La CALCULATRICE offre une interface graphique pour associer une variable avec des données, réaliser des calculs sur avec ces variables et éventuellement d'enregistrer les données modifiées.

Ainsi les données nouvellement enregistrées deviennent disponibles pour d'autres traitements comme la visualisation et l'analyse avec la sonde.

2.6 La projection des données

L'outil de projection permet de transférer un champ scalaire ou vectoriel généré sur un maillage donné vers un autre maillage créant ainsi un nouveau champ du même type. Les supports de types éléments finis n'étant pas homogènes entre eux à cause la position et du nombre variable de nœuds de données, les couches d'information produites sur des maillages distincts ne sont pas *a priori* compatibles.

Cette fonctionnalité très générique est donc indispensable pour comparer et faire interagir des couches de données portées par des supports différents. En effet, les données doivent obligatoirement être homogénéisées, donc rapportées sur le même maillage, pour permettre des traitements subséquents comme des calculs avec la calculatrice. Pour ce faire, le domaine du maillage destination, i.e. la surface couverte par celui-ci doit être compatible (incluse dans) avec le maillage source.

Avec cet outil, il est ainsi possible de transposer les profondeurs de submersion dans une zone inondable sur un maillage formé des positions des résidences. On obtient alors un champ de valeurs nodales résidentielles qui permet à l'aide de la CALCULATRICE de réaliser des études de dommages d'inondation. La même fonctionnalité permet aussi de réaliser à volonté des coupes transversales et longitudinales, rectilignes ou curvilignes, à travers les champs de résultats disponibles afin de les porter en graphique.

2.7 La visualisation et l'édition

Pour valider et interpréter les différentes données, les logiciels mettent à disposition un ensemble de fonctionnalités de visualisation. Ainsi on peut afficher les données dans les fenêtres de visualisation et faciliter leur interprétation en les habillant de texte, légendes, barre d'échelle, etc.

Les données peuvent être affichées sous différentes formes dépendant du type de données à représenter. Les éléments graphiques ainsi créés sont dits statiques en ce sens qu'ils ne peuvent être modifiés, c'est pourquoi le module du logiciel offrant ces fonctionnalités s'appelle la visualisation statique.

La visualisation statique permet de représenter graphiquement les données sous différentes formes appropriées au type de données à visualiser. Les choix de représentations disponibles sont :

- *l'affichage d'un maillage* qui permet de constater visuellement la distribution de ses éléments ;
- le tracé des *isolignes d'un champ scalaire*, c'est-à-dire les lignes reliant entre eux tous les points ayant la même valeur ;

- le tracé des *isosurfaces* représentant un champ scalaire : une isosurface est une surface représentant l'ensemble des valeurs comprises dans un intervalle donné ;
- le tracé de *vecteurs* qui permet de représenter graphiquement les données des champs vectoriels. Dans un tel tracé, le sens et la direction du vecteur indiquent le sens et la direction des valeurs du champ ;
- le tracé des *noeuds d'un maillage* ou d'une peau de maillage. Un tel affichage fournit de l'information quant à la densité relative des noeuds.

Le point de vue sur la représentation des données peut être changé à loisir. On peut zoomer, centrer, changer l'ordre d'affichage etc.

Il est également possible dans l'environnement multi-fenêtres de la COQUILLE, de suivre le curseur de la souris dans toutes les fenêtres simultanément quelle que soit l'échelle individuelle et le positionnement du point de vue de chacune.

La gestion de liste d'affichage est un instrument très précieux pour gérer les éléments divers formant l'image affichée dans une fenêtre. Ainsi, il est possible de regrouper ou séparer des éléments, les activer ou les masquer, les retirer ou en ajouter, les transférer d'une fenêtre à l'autre, en changer l'ordre de préséance, et ainsi de suite

2.8 Les profils en long

Les profils en long sont des outils puissants et largement utilisés pour analyser les données, visualiser l'évolution d'une quantité le long d'un parcours. Cette fonctionnalité, bien qu'identifiée comme importante, n'a été implantée que récemment dans les logiciels. Comme nous l'avons mentionné précédemment, elle a profité d'une autre fonctionnalité, la projection des données.

La construction d'un profil en long, s'effectue en deux phases distinctes. Dans la première, il faut dessiner la géométrie du profil. Cette partie, très interactive, fait appel à une approche très semblable à celle des partitions de maillage. L'utilisateur peut éditer un profil, déplacer les points, ajouter ou supprimer des segments et associer à ce profil des paramètres de densité de la représentation (1 point/x mètres). Dans un deuxième temps, cette géométrie est associée à des données qui y seront projetées et l'évolution le long du profil est tracée à l'écran dans un graphique.

Le graphique est entièrement configurable ; il comprend des axes gradués, des légendes d'axes, les couleurs sont ajustables.

2.9 La SONDE

La SONDE est un outil extrêmement utile pour afficher interactivement des valeurs de champs scalaires et vectoriels. La SONDE offre la possibilité de voir non seulement les coordonnées en

fonction de la position de la souris dans une fenêtre de visualisation, mais également les valeurs des données comme la profondeur, la vitesse ou de toute autre variable en ce point quel que soit le maillage utilisé.

Lorsque l'on déplace la souris au-dessus d'une fenêtre de visualisation, la position correspondante est affichée dans le repère cartographique ou géographique choisi. Les données affichées peuvent en tout temps être ajoutées ou retirées.

2.10 L'édition d'écran

Dans le cadre des logiciels du projet MÉTRIQUE, l'édition d'écran peut être définie en deux volets :

1. L'habillage aide à interpréter l'image représentée à l'écran en terme de situation géographique. En affichant à l'écran des éléments graphiques et/ou du texte, on arrivera à identifier le nord, les lieux représentés, des objets spécifiques sur le tronçon. On arrivera aussi à constater la géoréférenciation de la représentation ainsi que le rapport des distances avec la réalité.
2. L'habillage aide aussi à interpréter la simulation ou le modèle affiché. On pourra afficher des informations sur un maillage, le nom du projet en cours et tous les résultats d'affichage possible. Cela sera aussi fait à l'aide d'éléments graphiques et/ou de texte.

L'habillage d'un écran comprend donc tous les éléments susceptibles de préciser, d'identifier, de situer le dessin. Il est un outil de travail faisant partie des fonctionnalités génériques de la plateforme logicielle supportant les simulateurs.

Les objets d'habillage offerts et complètement configurables via une boîte de dialogue sont :

- du *texte*
- des *barres d'échelle*
- des *flèches du nord*
- des *légendes* liées à la classification d'une donnée
- des *grilles de repérage*

Les utilisateurs n'ont pas nécessairement à utiliser un autre logiciel d'illustration pour habiller leurs dessins. En fait, beaucoup d'informations se trouvent déjà dans le logiciel. Il est donc logique que l'utilisateur n'ait pas à sortir du logiciel pour habiller une carte.

3. Le MODELEUR – Modéliser et modeler le terrain

Dans cette section, nous allons exposer une synthèse aussi complète que possible des fonctionnalités du simulateur MODELEUR à la base de toutes les applications issues du projet MÉTRIQUE pour l'analyse du milieu fluvial. Ce logiciel met en oeuvre toute notre expertise en hydraulique fluviale et plus spécifiquement l'expertise dans le domaine du traitement des données géographiques au moyen de la méthode des éléments finis.

Ci-après, nous allons identifier les contextes d'utilisation visés par l'outil, les bases théoriques qui le sous-tendent ainsi que les fonctionnalités essentielles qui le caractérisent. Nous compléterons la présentation par un rappel de quelques applications réalisées avec l'outil.

Le MODELEUR est en soi un simulateur qui se trouve intégré avec le modèle hydrodynamique HYDROSIM qu'il permet de piloter efficacement. Premier instrument à être mis en oeuvre dans une étude de simulation, il se situe au coeur et à l'origine des toutes les structures spatiales d'éléments finis utilisées par les autres simulateurs. Pour cette raison, nous lui accordons ici un traitement distinct. Dans la mesure où le MODELEUR a la possibilité de traiter avec une très grande efficacité les données de terrain et de permettre de faire interagir entre elles de nombreuses couches de données incluant des simulations hydrodynamiques, il s'érige au niveau de la classe d'outils spatiaux qu'on appelle Système d'Information Géographique (SIG). Il s'en démarque cependant par le fait qu'il est dédié aux écoulements fluviaux. C'est pourquoi nous croyons que le couple MODELEUR-HYDROSIM peut être qualifié de Système d'Information et de Simulation Hydrofluvial (SISH) ce qui en fait un outil hybride.

Le MODELEUR désigne donc le logiciel destiné à la préparation des données numériques de terrain en vue de les soumettre au moteur de calcul en l'occurrence HYDROSIM. Pour ce faire, MODELEUR se devait de permettre la construction interactive et graphique des maillages d'éléments finis nécessaires à la modélisation hydrodynamique. L'utilisateur peut ainsi, à loisir, effectuer des raffinements locaux permettant d'augmenter la précision aux endroits désirés du domaine d'étude. Les données de terrain telles que la topographie et la morphométrie ainsi que les résultats de simulation sont systématiquement projetées sur l'un ou l'autre des maillages d'éléments finis nouvellement créés pour produire des modèles numériques de terrain ou d'écoulement compatibles pour l'analyse.

Le MODELEUR permet à l'utilisateur de spécifier les éléments constitutifs du milieu physique tels que le substrat, les macrophytes, le vent, la glace... et de les porter sur le support commun, le maillage.

Le MODELEUR est de plus responsable de la définition et du lancement des simulations avec HYDROSIM. L'utilisateur peut à l'aide de l'interface de contrôle de la simulation spécifier

l'assemblage du maillage utilisé, de la bathymétrie portée sur celui-ci, des conditions aux limites, des différentes conditions de frottement dues aux composantes physiques du milieu. On peut de plus spécifier différents autres paramètres tels que la formulation utilisée, les conditions initiales, etc.

Le MODELEUR permet le lancement d'une simulation HYDROSIM en validant les données, les exportant dans le format désiré par l'autre simulateur, en démarrant celui-ci, en suivant son avancement et finalement, en récupérant les résultats.

Le MODELEUR utilise de plus plusieurs modules de services rassemblés dans ce qu'on appelle la COQUILLE, celle-ci contenant entre autres, une base de données, un module de visualisation des données, des services de traduction, de gestion des interfaces usagers, et des outils comme une calculatrice scientifique. Nous référons le lecteur au chapitre précédent pour une présentation plus élaborée de ces fonctionnalités.

3.1 Les contextes visés

Lors de l'analyse des besoins présentée dans notre premier rapport d'étape, nous n'avions pas vraiment perçu l'intérêt immédiat que pouvait procurer une utilisation distincte de MODELEUR dans des contextes d'analyse spatiale. Nous allons rectifier le tir ci-après en identifiant quelques situations parmi beaucoup d'autres où cet instrument peut s'avérer d'une grande utilité. Les exemples d'applications à la fin du chapitre viendront illustrer cet intérêt. Pour réaliser ces applications, il est nécessaire de mentionner que les principales fonctionnalités utilisées sont la prise en charge des données par la triangulation de Delaunay, l'éditeur de données ponctuelles, le gestionnaire de données qui assure la cohérence des ensembles disponibles, la CALCULATRICE programmable, le maillage automatisé, l'utilitaire de projection de données d'un maillage à l'autre, la sonde et les profils de données auxquels s'ajoutent bien sûr les capacités de visualisation multi-fenêtres et les fonctions d'édition.

La représentation, la visualisation et l'analyse des données disponibles dans le milieu fluvial : comme MODELEUR permet de générer automatiquement une triangulation (maillage d'éléments finis) entre des points de mesure distribués aléatoirement, il devient dès lors possible d'accéder toutes les autres fonctionnalités du système à partir de données. Les fonctions d'édition des données de base permettent de valider la base de données en soustrayant des points individuels de la base ou en ajoutant pour éviter les ambiguïtés de représentation. De son côté, la CALCULATRICE permet notamment de calculer les pentes et les gradients des variables; elle permet aussi de réaliser toute autre opération algébrique que l'utilisateur peut juger bon d'effectuer (ex : intégration spatiale, dérivation, etc.)

Le contexte des bilans sédimentaires et des évolutions morphologiques : Dans les cas où l'on désire effectuer le bilan de l'évolution morphologique d'un tronçon de rivière, soit pour évaluer les volumes de matériaux déplacés, soit pour mettre en évidence graphiquement les zones d'évolution, MODELEUR est l'outil tout désigné. Il suffit de disposer de l'état topographique initial et du final, de porter l'information sur une grille commune à l'aide des fonctions de projection, de mobiliser la CALCULATRICE et d'effectuer les opérations de soustraction des deux états. La différence peut être représentée visuellement; elle peut aussi être intégrée sur

l'ensemble du domaine d'analyse ou par zone. Il est aussi possible de limiter l'intégration aux valeurs positives (remblais, aggradation) ou négatives (déblais, dégradation). Ces situations se retrouvent par exemple lors de catastrophes naturelles (ex : crues du Saguenay) aux endroits où la rivière a changé de cours. Il est aussi possible de rencontrer de telles situations quand on veut comprendre l'évolution morphologique à long terme des cours d'eau sous l'action de la dynamique sédimentaire.

Le contexte des interventions morphologiques sur le terrain existant : Lors de la construction du modèle numérique d'élévation, il est possible d'aller au-delà de la topographie existante pour incorporer des modifications morphologiques correspondant à des interventions à analyser. Ainsi, les interventions en berges (épis, protections diverses), les dragages, les endiguements voire, les empiétements, de même que la modification de seuils en rivière sont tous des exemples d'interventions réalisables que le MODELEUR permet de représenter et d'intégrer dans des bases de données héritées des données existantes modifiées. Ainsi, on peut également considérer les problématiques de dragage comme candidates à l'utilisation de MODELEUR.

L'analyse, la gestion et l'aménagement des risques d'inondation : Les interventions visant la gestion et l'aménagement des risques d'inondation sont également des situations pouvant être considérées. Bien sûr, étant donné que MODELEUR permet de réaliser des simulations hydrodynamiques, la prise en compte des modifications topographiques dans ces simulations s'effectue naturellement.

3.2 Les principes

3.2.1 Les éléments finis : une représentation souple des données

MODELEUR crée un ensemble de maillages d'éléments finis nécessaires aux différentes phases de l'analyse du milieu fluvial allant jusqu'aux simulations hydrodynamiques, et réunit de nombreuses fonctionnalités qui permettent d'interagir graphiquement avec ce maillage. L'objet de simulation de MODELEUR est constitué notamment par la géométrie du milieu (bathymétrie, morphométrie) ainsi que par les éléments constitutifs du milieu physique (substrats, etc.). Le MODELEUR permet donc à l'utilisateur de modéliser (reproduire) les données de base du tronçon sur un support commun, le maillage. Partant de données du terrain comme la bathymétrie, le tracé des berges ou la répartition des substrats (sédiments), l'utilisateur va vouloir discrétiser en éléments finis le domaine de calcul en vue d'abord d'une modélisation hydrodynamique, puis de diverses simulations requérant à la fois le modèle de terrain et la courantométrie. L'utilisateur peut adapter un maillage à une situation particulière (design d'intervention, analyses locales, par exemple), de manière à mieux représenter les phénomènes singuliers.

3.2.2 L'accès constant aux données de terrain originales

MODELEUR permet d'accéder aux données originales par la procédure de triangulation de Delaunay laquelle permet de joindre les points de mesure par un réseau d'éléments finis spécifique à chaque ensemble. Dès le moment où ces maillages sont déclarés et portés dans la base de données du système, ils bénéficient de toutes les fonctionnalités de la COQUILLE. Bien qu'il soit souvent nécessaire de procéder à un regroupement de plusieurs sous-ensembles de données dans un ou plusieurs ensembles communs homogènes couvrant l'ensemble du domaine d'étude, il est toujours possible grâce aux fonctions de visualisation, de la SONDE, de la projection de données d'un maillage à l'autre de revenir aux données originales à n'importe quelle étape d'un projet. Cette capacité préserve le projet d'une dégradation potentielle des données sources toujours possible quand l'accès à celles-ci est rendu difficile ou supprimé.

3.2.3 Un environnement totalement géoréférencé

Les données importées dans le système ainsi que celles produites par les simulateurs sont totalement géoréférencées par le système et ce, quel que soit le système de projection utilisé partout dans le monde. Le produit est donc transparent au lieu du projet. Nous avons traité de cet aspect dans le chapitre précédent.

3.2.4 Un système ouvert

La possibilité de créer ses propres filtres d'importation et d'exportation de données, l'accès à une CALCULATRICE programmable, la possibilité de convertir lui-même la langue de l'interface, et quelques autres fonctionnalités plus secondaires ont été implantées afin de permettre à l'utilisateur de bénéficier de l'ouverture du système. Le modélisateur est en général un spécialiste actif qui désire garder le contrôle sur sa propre démarche; c'est pourquoi le principe d'ouverture a été appliqué tant qu'il était possible afin de lui offrir cet avantage.

3.2.5 Un système économique et accessible

Afin de permettre au plus grand nombre d'utilisateur possible en provenance d'une grande variété de disciplines de pouvoir accéder aux ressources du système informatisé MÉTRIQUE, la décision audacieuse de tout construire sur des plate-forme de type PC a été prise. L'accessibilité du système a été complétée par un environnement graphique et une grande interactivité de l'interface dans l'environnement multifenêtres Windows.

3.2.6 Le maillage adaptatif : *assisté vs automatisé*

Nous avons préconisé une approche par sous-domaines assistée par ordinateur par laquelle l'utilisateur définit avec la souris des portions du domaine, leur associe des paramètres

spécifiques de densité, puis génère le maillage global. Un principe a été établi: il faut respecter un compromis entre laisser le contrôle des opérations à l'utilisateur et automatiser les opérations fastidieuses. Le maillage par sous-domaine offre une grande souplesse de construction de maillage, car il permet de définir graphiquement des régions d'intérêt et de tenir compte localement des particularités du milieu. Sur chaque sous-domaine, on définit ou on édite des paramètres de maillage comme la densité de noeuds sur chaque segment de la frontière des sous-domaines ou la position de noeuds bloqués. Pour répondre aux besoins de maillages anisotropes (Mailles allongées systématiquement dans une direction donnée comme celle de l'écoulement) des possibilités de ce type ont été implantées dans le MODELEUR.

3.3 Exemples d'applications distinctes du MODELEUR

3.3.1 Bilan sédimentaire rivière des HA !HA !

Les travaux réalisés pour la Commission scientifique et technique pour la gestion des barrages (Commission Nicolet) est un bel exemple de l'intérêt du MODELEUR pour conduire des études de risque d'inondation et d'analyse des conséquences. Plusieurs problématiques ont été prises en considération avec l'outil et des conclusions ont pu être tirées avant même que des simulations hydrodynamiques soient réalisées en rapport avec ces événements. Ce mandat a aussi été une occasion exceptionnelle de procéder à une validation complète de l'outil.

Quand nous avons reçu le mandat de la Commission en 1996, des mandats complémentaires de photogrammétrie ont été donnés afin de faire ressortir les topographies antérieures et postérieures aux événements sur l'ensemble du parcours de la rivière Ha! Ha!. Nos spécifications de format, inédites pour l'époque, demandaient des semis de points aléatoires et représentatifs de la variabilité du relief. Ces ensembles de données ont été insérés très naturellement dans la base de données du MODELEUR pour ladite rivière. Dès lors il devenait possible de procéder aux analyses diverses permettant de comprendre les événements : rupture de digue au lac Ha! Ha!, érosion et déposition massives à Ferland-Boileau, avulsion à la Chute Perron suite au dépassement par la rivière du débit formateur du réseau hydrographique, déposition massive aux Eaux-Mortes, érosions jusqu'à La Baie. Ayant à notre disposition les deux états de relief, il était possible de procéder aux bilans sédimentaires sur l'ensemble du parcours. Pour ce faire, nous avons opté pour découper le trajet en tranches d'un kilomètre et d'opérer sur chacune un bilan des agradations et dégradations. Quelques résultats donnés en détail dans le rapport de la Commission, dans INRS-Eau (1997) et dans Lapointe et Coll. (1998) sont rapportés ci-après.

Lors des événements, l'insuffisance de la capacité d'évacuation du barrage du lac Ha ! Ha ! a provoqué une hausse incontrôlée du niveau de l'eau dans le lac. Il s'en est suivi la rupture d'une digue maintenant le niveau d'eau dans le lac-réservoir, ce qui a précipité 25 millions de m³/s d'eau dans la rivière des Ha ! Ha ! avec un débit de pointe de près de 1100 m³/s formant ainsi une véritable onde d'intumescence (plus de huit fois la crue centenaire). Le cours de cette rivière, très énergétique à cause de ses fortes pentes, est la plupart du temps structuré dans la roche

précambrienne avec en quelques endroits des dépôts très importants de nature fluvio-glaciaire et glacio-deltaïque. Depuis la déglaciation, ces dépôts ont résisté à l'érosion à cause de la présence de verrous rocheux qui maintiennent le profil du thalweg.

Ainsi, à la hauteur de la Chute-à-Perron située à environ 15 km en aval du lac, le seuil de la chute, assis sur le précambrien, maintenait la cote de la rivière à environ 190 m. Une vallée parallèle formée de plus de 30 m de dépôts fluvio-glaciaires jouxtait cette chute avec un point d'altitude culminant à la cote 198,5 m (creux du col de la vallée). Au maximum de l'onde d'intumescence, le niveau de l'eau a atteint puis dépassé le seuil du col et il s'en est suivi une incision massive des dépôts sous-jacents. Plus de 9 millions de m³ de dépôts ont ainsi été érodés en moins de cinq heures provoquant de ce fait le changement de cours de la rivière, un phénomène dit *d'avulsion*. Le nouveau thalweg se situe maintenant autour de la cote 170 m. soit l'altitude approximative pré-glaciaire de la rivière.

3.3.2 Reconstitution dynamique des avulsions-Rivière Chicoutimi

Lors des crues du Saguenay, nous avons aussi obtenu le mandat de réaliser les simulations hydrodynamiques et de reconstituer les scénarios de contournement des barrages sur la rivière Chicoutimi. Les données topographiques sur le lit mineur et la plaine inondable ont été acquises de diverses sources très hétérogènes (dont la photogrammétrie) qu'il a fallu réconcilier ensemble avec MODELEUR. Aux barrages de Chute-Garneau et Pont Arnaud, le niveau atteint par la rivière a occasionné le contournement des ouvrages en béton et il s'en est suivi une incision massive des dépôts fluvio-marins constituant les appuis des barrages. Ce phénomène est assimilable à une *avulsion*. À Chute Garneau, l'érosion a affecté un volume de 147 000 m³ alors qu'à Pont Arnaud, le bilan sédimentaire se chiffre à 750 000 m³.

Ces données ainsi que le scénario d'incision ont fait l'objet de la première utilisation intensive et à grande échelle de la CALCULATRICE. Toute la paramétrisation de l'incision des biefs a été exécutée comme une opération de simulation distincte de l'hydrodynamique, ce qui conférait à l'outil MODELEUR un intérêt autonome. Il est dès lors possible de reconstituer l'évolution dynamique de ces avulsions et de les représenter sous la forme de séquences animées, ce qui fut fait pour Pont Arnaud. On peut trouver cette séquence animée sur le site WEB de l'INRS-Eau : <http://www.inrs-eau.quebec.ca/saguenay>

3.3.3 Dommages Saguenay

Plus tard, nous avons reçu le mandat du ministère de l'Environnement et de la Faune d'analyser les dommages résidentiels autour du lac Kénogami, et sur les rivières Chicoutimi et aux Sables (Leclerc et coll., 1998). Encore là, nous avons pu constater l'intérêt d'un outil comme MODELEUR pour réaliser de telles études.

La reconstruction des barrages sur les rivières en aval du lac Kénogami ainsi que l'établissement de plans de gestion des débits et des niveaux d'eau sur ces plans d'eau sont des problématiques

qui requièrent la prise en compte des dommages qui pourraient résulter de la réédition de crues extrêmes comme celles de juillet 1996 au Saguenay. Le MEF a donc confié à l'INRS-Eau le mandat d'établir pour les rivières Chicoutimi et Aux Sables et le lac Kénogami une relation fonctionnelle entre les dommages résidentiels qui seraient causés par différentes crues potentielles, et le débit ou le niveau d'eau de ces événements.

L'approche appliquée a reposé sur une définition résidentielle géoréférencée des dommages d'inondation. La variable explicative est la *profondeur locale de submersion*. Selon le contexte, cette variable est définie par des mesures, ou à l'aide de la modélisation hydrodynamique 2D (modèle HYDROSIM). La topographie des régions inondables a été établie par photogrammétrie et traitée avec le logiciel MODELEUR.

Concernant les dommages, les données originales de dédommagement suite au déluge de 1996, et les données d'évaluation municipale pour chaque propriété ont servi de base (variable dépendante) pour établir des relations avec l'hydraulicité. Quatre relations ont été établies entre les dommages d'inondation et la submersion : les groupes de résidences sans et avec sous-sol et ayant une valeur inférieure ou supérieure à 50 000\$. Des courbes de dommages résidentiels cumulatifs pour les trois unités hydrographiques ont été élaborées en fonction de leur hydraulicité.

En appliquant ces relations dans la CALCULATRICE avec les profondeurs de submersion projetées sur le maillage ayant comme nœuds les positions des résidences, il devenait possible de conduire des études complètes de dommages résidentiels par zone en utilisant le MODELEUR pour l'ensemble des étapes, y compris l'intégration spatiale des dommages.

3.3.4 Impacts cumulatifs - Lac Saint-François (fleuve Saint-Laurent)

Nous allons compléter ici notre présentation circonstanciée d'exemples d'application qui ont permis de valider les fonctionnalités du MODELEUR en plus d'en démontrer le fort potentiel d'utilisation.

La topographie du fond du lac Saint-François en amont de Montréal est caractérisé systématiquement depuis que des bateaux y naviguent. Ainsi, nous disposons d'une vieille carte hydrographique (minutes de terrain) datant de l'Amirauté britannique (19^{ième} siècle). Les cartes modernes existent également. Par comparaison des deux, on peut mettre en évidence les changements morphologiques majeurs ayant affecté ce milieu : dérivation vers Beauharnois, voie maritime, dragages massifs, barrages de Beauharnois et Moses-Saunders, rehaussements du plan d'eau.

Dans ce contexte, il est intéressant de mettre en évidence les changements cumulatifs et de concrétiser enfin ce concept à l'aide d'une démarche quantitative pouvant aller jusqu'à la simulation hydrodynamique de reconstitution des états pré-industriels.

Une difficulté se présentait cependant dès le départ, la géoréférenciation déficiente des vieilles données à cause des moyens imprécis de positionnement dont on disposait à l'époque. Au sein du MODELEUR, il a été possible de mettre au point un algorithme de correction des coordonnées

originales basé sur l'identification de centaines de points de contrôle communs aux cartes anciennes et modernes (rochers émergents, clochers, pointes, etc...) et de construire un maillage ayant comme nœuds lesdits points. Par la suite, la correction à apporter aux données anciennes était estimée aux nœuds du maillage pour être ensuite interpolées sur l'ensemble des points de mesures disponibles. Cette procédure est assez semblable à une aéro-triangulation, opération qu'on effectue pour rectifier la référence spatiale des données photogrammétriques. Dans ce cas cependant, au lieu d'utiliser seulement deux ou trois points de contrôle (les coins de la photo aérienne), ce sont des centaines de points qui ont été mobilisés simultanément dans le MODELEUR.

Par la suite, il a été possible de comparer systématiquement les topographies sur l'ensemble du territoire du lac et de faire ressortir tous les changements survenus depuis le dix-neuvième siècle, y compris le sort réservé aux milieux humides et riverains. De plus, en disposant ainsi d'une topographie rectifiée, il a été possible de simuler les courants d'alors et de mettre en évidence l'évolution des conditions d'écoulement dans le milieu, notamment les niveaux d'eau, les profondeurs, les vitesses et la redistribution des masses d'eau dans le delta fluvial et sous-fluvial à l'amont du lac. La compréhension de la dynamique sédimentaire a également été grandement facilitée.

3.3.5 Autres exemples d'utilisation

Nous allons compléter notre exposé en mentionnant seulement quelques exemples d'application qui ont requis les ressources propres du MODELEUR.

1. Reconstitution détaillée de la topographie des seuils des biefs d'écoulement de Chute-Garneau et Pont Arnaud précédant la construction des barrages et les avulsion de 1996 (Hydro-Québec, Contentieux) à partir de plusieurs ensembles de données hétérogènes
2. Analyse des conditions d'écoulement correspondant à de multiples scénarios de dimensionnement d'épis à construire à l'entrée du canal de Beauharnois en vue de réhabiliter les plages de la Baie de la Faim dans le lac Saint-François (Hydro-Québec, région Maisonneuve)
3. Analyse des risques d'inondation dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency; construction d'un modèle de terrain élaboré à partir de plusieurs ensembles de données hétérogènes et modifications du relief en vue de minimiser les risques de dommages d'inondation. Analyse des dommages résidentiels selon la méthodologie citée précédemment (Ville de Beauport)

4. HYDROSIM - Simuler les courants fluviaux

Dans cette section, nous allons exposer une synthèse aussi complète que possible du simulateur HYDROSIM la base de toutes les applications hydrodynamiques issues du projet MÉTRIQUE. Rappelons qu'il est écrit en FORTRAN, conçu pour pouvoir être exploité autant sur des plates-formes économiques (PC) que sur des machines de calcul dispendieuses. Ce simulateur met en oeuvre toute notre expertise dans le domaine de l'hydraulique numérique et de la simulation hydrodynamique utilisant la méthode des éléments finis.

4.1 Les contextes visés

Les équations de Saint-Venant forment le modèle mathématique le plus souvent utilisé pour la simulation hydrodynamique dans le milieu fluvial ou estuarien. Il satisfait à deux principes de conservation: celui de la *quantité de mouvement* et celui de la *masse*. Dans le cadre de ce projet, c'est un modèle bidimensionnel où les vitesses sont moyennées sur la verticale qui est implanté. Le domaine de validité est limité aux milieux peu profonds, considérés comme bien mélangés dans la verticale, et principalement soumis à une sollicitation gravitationnelle. Ce modèle est devenu au cours de la dernière décennie un outil reconnu scientifiquement pour la simulation des écoulements dans les rivières, les fleuves et les estuaires. De nombreuses applications antérieures supportent la valeur et l'utilité de la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle comme outil d'analyse.

Parmi les résultats livrés par la modélisation hydrodynamique, on compte les vitesses de courant, les profondeurs et les diffusivités qui servent à alimenter la résolution eulérienne ou lagrangienne des équations de transport-diffusion. Les "couloirs de débit", définis en post-traitement, représentent une donnée directement utilisable dans l'analyse de la contamination d'un tronçon ou pour comprendre la distribution des masses d'eau. En effet, la valeur de la fonction courant donne le débit transitant entre un point quelconque du milieu et le littoral le plus proche, habituellement la rive droite du cours d'eau. Par exemple, dans un cours d'eau ayant un débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, la ligne de courant $50 \text{ m}^3/\text{s}$ donnerait la ligne de partage exacte de la masse d'eau en deux parties égales.

La précision du modèle est principalement liée à la taille des éléments, qui elle, influence l'effort de discrétisation: plus le maillage est fin, plus la précision est grande, mais plus le coût d'exploitation du modèle est élevé (temps de calcul, stockage des données en mémoire ...). C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'outils puissants comme le MODELEUR pour préparer le maillage, adapter la densité locale du maillage à la précision recherchée et minimiser l'erreur

commise dans le transfert des données de terrain sur la grille de calcul. Étant donnée la précision recherchée dans les applications environnementales, le modèle numérique de terrain a une importance aussi grande que les résultats hydrodynamiques.

4.2 Les principes

Le projet MÉTRIQUE est entièrement fondé sur l'hydrodynamique fluviale et estuarienne qui peut être décrite à deux dimensions (2D) dans le plan (intégrée verticalement). Ce sont les milieux dits "bien mélangés verticalement", "peu profonds", dominés par des forces. La majorité des milieux visés par les interventions ciblées par MÉTRIQUE peuvent être analysés à l'aide de cette catégorie de modèle. Les autres options possibles, non couvertes dans MÉTRIQUE, sont principalement les modèles unidimensionnels (1D) et tridimensionnels (3D).

Les premiers (1D) offrent un plus haut degré d'intégration spatiale du cours d'eau que l'option 2D. Quand l'intégration est verticale et transversale, le modèle est 1D longitudinal; il est alors tout désigné pour représenter le cours d'eau à l'échelle du réseau hydrographique ou de très longs biefs. La représentation des vitesses d'écoulement est pauvre (une vitesse moyenne dans la section, aucun gradient transversal) mais le résultat recherché à l'aide de ce type de modèle concerne surtout le niveau d'eau en vue d'analyser les problèmes de plaines inondables, ou encore, le transfert de contaminants à l'échelle du bassin. L'application de ce type de modèle est complexe à cause des problèmes de calibration qu'il pose et de la somme des données qu'il requiert à l'échelle d'un réseau hydrographique. Une autre catégorie de modèle 1D est axée sur l'intégration horizontale (transversale et longitudinale), c'est l'option 1D verticale. Ce type de modèle est appliqué aux milieux lacustres stratifiés pour en analyser le régime thermique ou géochimique dans la verticale. Ces milieux n'ont pas été ciblés dans MÉTRIQUE.

Les modèles 3D existent en différentes versions que nous n'allons pas énumérer ici. Leur degré d'intégration spatiale est minimal et on attend d'eux des résultats de vitesses dans les trois directions. Ils procurent les résultats les plus représentatifs qu'on puisse espérer d'une modélisation hydrodynamique. Dans certains cas, ce sont les seuls qui puissent être utilisés pour convenir aux caractéristiques des milieux considérés: courants de dérive dus au vent dans les lacs et réservoirs, estuaires profonds et stratifiés, géométries complexes, certains ouvrages de génie, turbines, etc... Leur mise en oeuvre requiert un savoir faire numérique très poussé en raison principalement de limitations informatiques liées aux équipements habituellement disponibles (espace mémoire, capacité et vitesse des microprocesseurs, méthodes de résolution, etc...). Cette génération d'outil demeurera encore pour quelque temps l'apanage des milieux de la recherche qui ont accès à cette technologie.

Les limites de validité des modèles 2D sont en principe bien connues des hydrauliciens et elles doivent l'être des utilisateurs des logiciels. Certains milieux n'offrent pas les conditions d'applicabilité requises par l'option 2D et il est important que non seulement l'utilisateur mais aussi ceux qui seront appelés à juger les simulations soient avertis de ces limites. Il est impératif que les hypothèses sous-jacentes et les limites d'application du modèle hydrodynamique 2D soient bien définies dans les manuels d'utilisation et soient enseignées dans les manuels et sessions de formation des futurs usagers, ce que nous employons à faire systématiquement depuis

que le logiciel a commencé à être diffusé. De plus, les rapports d'application doivent démontrer en quoi les milieux étudiés répondent aux hypothèses de base du modèle. Par exemple, les milieux stratifiés chimiquement ou thermiquement comme les lacs dominés par les courants de dérive produits par le vent ou les régions d'estuaire à marée caractérisées par des "coins salins" sont en principe exclus du domaine d'applicabilité des modèles bidimensionnels horizontaux.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le domaine de validité des modèles bidimensionnels couvre l'ensemble des cours d'eau de petite, moyenne et grande taille allant jusqu'aux estuaires à marée. Seuls les lacs et les milieux stratifiés échappent à cette hypothèse. L'utilisation des modèles unidimensionnels est surtout recommandée pour les calculs de niveau d'eau (navigation, cartographie des plaines inondables) et comme d'autres outils performants existent pour réaliser ce genre d'étude (ex: le modèle One-D de la Garde-Côtière canadienne, ou HEC-RAS du US Army Corps of Engineers), cette option n'a pas été retenue pour ce projet.

De son côté, l'approche tridimensionnelle convient particulièrement pour les milieux dits "profonds" soumis à une stratification et à des forts courants secondaires comme les courants de dérive induits par le vent. La majorité des problèmes d'écoulements gravitationnels à surface libre sont éligibles à un traitement bidimensionnel. Dans les cas où le profil vertical des vitesses est requis dans de tels milieux, un post-traitement des vitesses obtenues en 2D à l'aide d'une fonction logarithmique permet de l'obtenir (approche quasi-3D). Cette approche permet d'estimer le profil de la couche limite turbulente du lit du cours d'eau mais elle ne procure pas les courants secondaires.

4.3 Les bases scientifiques

Dans le cadre du projet MÉTRIQUE l'objectif visé est la conception d'un logiciel multi plates-formes appelé HYDROSIM destiné à la simulation numérique de l'hydrodynamique fluviale. Nous avons choisi un modèle bidimensionnel horizontal pour la modélisation des écoulements en rivières et estuaire. Du point de vue numérique, notre choix s'est porté sur la méthode des éléments finis, qui s'est avérée un puissant outil de représentation spatiale en ingénierie et se prête facilement à la programmation informatique. Les principales activités de recherche relatives aux opérations de développement du modèle hydrodynamique ont été axées vers la sélection adéquate du modèle mathématique pour répondre le mieux possible à la problématique décrite plus haut, la méthodologie de modélisation du découverture et du recouvrement des bancs avec le débit, et la mise au point d'un solveur non linéaire robuste adapté à la résolution de problèmes de grandes tailles.

4.3.1 Modèle 2D horizontal - Ondes longues

Le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal découle de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique (ou ondes longues). L'intégration latérale des équations de Saint-Venant produit le modèle 1D. Le modèle

de Saint-Venant est également appelé « modèle des eaux peu profondes ». Il est à noter que l'hypothèse de pression hydrostatique limite son applicabilité aux situations exemptes de ruptures de la topographie ou du niveau d'eau (chutes, ressauts hydrauliques).

Le modèle de Saint-Venant apparaît sous deux formes fondamentales quand on considère ses variables d'état :

- la forme *conservative* qui s'appuie sur le niveau d'eau en guise de pression et sur les composantes en (x,y) du débit spécifique (q_x, q_y) pour le mouvement de l'eau ;
- la forme *non conservative* qui utilise également le niveau d'eau pour la pression mais traite le mouvement à l'aide des variables primitives de vitesse (u,v) .

Depuis quelques années déjà, nous avons opté pour l'utilisation de la formulation conservative qui est réputée procurer une meilleure conservation de la masse puisque les variables décrivant le mouvement sont axées sur le débit spécifique. Les équations de Saint-Venant traduisent le principes de conservation de la masse et du mouvement dans les directions (x,y) . L'ensemble des phénomènes physiques qui sont pris en compte dans le modèle mathématique retenu sont :

- l'accélération de Coriolis conséquence de la rotation de la terre ;
- un modèle de turbulence de type « zéro équation » appelé « longueur de mélange » ;
- l'épaisseur de glace en surface qui réduit la profondeur de l'écoulement ;
- le coefficient de frottement de Manning amalgame de différentes influences comprenant le substrat au fond, la glace en surface, les plantes aquatiques sur toute la colonne d'eau et les zones sèches ;
- la porosité pour le traitement spécifique des zones exondées.

Le modèle mathématique a été adapté expressément pour tenir compte explicitement dans le processus de résolution du phénomène de bancs couvrants-découvrants. Cette prise en compte est fondamentale dans la très grande majorité des écoulements à surface libre dans les cours d'eau naturels. En effet, la position de la frontière de l'écoulement dans les milieux naturels est dictée par la valeur du débit ou du niveau de la marée. En outre, sur le maillage de calcul on trouve des éléments secs (découverts), partiellement découverts et mouillés (couverts). Pour plus détails le lecteur pourra consulter le rapport d'étape #3.

4.3.2 Bancs couvrant-découvrant

Un banc découvrant-découvrant est formé de la partie du lit du cours d'eau qui se découvre et se recouvre sous l'influence d'un marnage significatif du niveau de l'eau qu'il s'agisse d'une modification du débit ou de la marée. Tout simulateur hydrodynamique qui ne tient pas compte des bancs couvrants-découvrants considère que les cours d'eau qui se comportent comme des canaux aux parois verticales, ce qui en nature est un point réductionniste compte tenu de l'importance des phénomènes ripariens dans l'environnement aquatique.

L'approche classique de simulation des bancs couvrants-découvrants repose sur une procédure de diagnostic du niveau d'eau. Cette démarche n'est pas toujours stable et est pénalisante en temps

d'exécution notamment sur des calculateurs parallèles. Pour notre part, nous nous sommes proposés de retenir une nouvelle approche plus souple dépourvue de phase de diagnostic, ne présumant rien sur le niveau d'eau. La surface libre peut donc librement plonger sous le fond du cours d'eau occasionnant ainsi des profondeurs négatives non physiques mais tout à fait acceptable d'un point de vue mathématique. On considère donc les régions sèches à profondeur négatives et les zones mouillées à profondeur positives. D'autre part, et dans le souci de respecter les principes de conservation de la masse et du mouvement en zone mouillée, l'écoulement dans les zones sèches est gelé au moyen d'un important coefficient de rugosité. La porosité est exploitée en zone sèche pour annuler les composantes non stationnaires et les effets du vent. Les multiples cas tests académiques ainsi que les études dans des situations réelles ont montré l'efficacité de l'approche. Cela a d'ailleurs donné lieu à la publication d'un article scientifique dans la revue *Advances in Water Resources* qui a eu des échos très favorables de la part du comité de lecture (voir Heniche et coll., 1999).

4.3.3 Résolution non-linéaire

La discrétisation par éléments finis des équations aux dérivées partielles gouvernant le phénomène physique conduit à un système algébrique d'équations du type $[K(U)]\{U\}=\{F\}$. La résolution de ce système matriciel revient à déterminer le vecteur $\{U\}$ représentant les inconnues discrètes du modèle. La particularité de la matrice $[K]$ du système matriciel fait qu'elle est non symétrique, non linéaire (dépend de $\{U\}$) et surtout est souvent de grande taille. Les méthodes de résolution directes sont alors pénalisantes en espace mémoire et en temps d'exécution et limiteraient alors les perspectives d'application sur ordinateurs personnels (PC). La récente méthode de résolution GMRES basée sur un processus itératif a ouvert une voie nouvelle dans le domaine de la résolution de systèmes de grandes tailles et non linéaires puisqu'elle ne requiert ni le stockage ni le calcul explicite de la matrice $[K]$.

Le choix du solveur d'HYDROSIM s'est orienté vers la version GMRES non linéaire pour les raisons évoquées plus haut d'une part et d'autre part car dans bien des cas elle affranchit l'utilisateur de toute technique de pilotage, souvent lourde en coût calcul et difficile à automatiser dans le cadre du développement de logiciel. De plus, pour renforcer la convergence de GMRES nous avons introduit une matrice de préconditionnement par factorisation incomplète et à niveau de remplissage variable. Dans un souci d'efficacité numérique, une attention particulière a été accordée à la mise au point de l'algorithme de stockage creux des matrices. Un point important et compromettant au détriment de la méthode GMRES est sa sensibilité à la distorsion du maillage qui nuit à la convergence de la solution sur certains cas tests. Nous avons alors mis au point avec succès une stratégie de stabilisation reposant sur les techniques de dissipation contrôlée.

4.4 Validations théoriques

Au cours du développement d'HYDROSIM, une part importante du travail a été consacrée à l'élaboration de tests de contrôle pour s'assurer de son bon fonctionnement. Pour prouver la valeur scientifique de l'outil, une batterie de tests académiques a été effectuée pour contrôler

différents points. Une première catégorie de tests a été montée pour contrôler les risques d'erreurs de programmation. Il s'agit de tests sur des canaux droits où on connaît exactement la solution du problème. Cet exercice permet de contrôler si tous les composants du modèle mathématique fonctionnent correctement. Pour des tests plus complexes où la solution analytique n'est pas accessible, on se réfère à ce qui a été produit dans la littérature scientifique. Dans ce qui suit, on décrit brièvement une partie des tests qui ont été effectués pour valider HYDROSIM.

4.4.1 Canal droit – Écoulements uniformes et graduellement variés

Ainsi, la première batterie de tests visée à vérifier si HYDROSIM était capable de reproduire un écoulement normal dans un canal droit à section rectangulaire avec ou sans glace. L'invariance des résultats en fonction de l'orientation du canal dans le plan horizontal a également été vérifiée. Un autre exercice sur le canal droit à section rectangulaire a permis de vérifier le bon fonctionnement des forces de Coriolis et du vent.

Ensuite, nous avons soumis HYDROSIM à une série de tests dans des canaux droits à section rectangulaire pour reproduire les différents profils de la surface libre tels que décrits par la théorie des courbes de remous en hydraulique contemporaine des écoulements à surface libre graduellement variés. Les résultats numériques ont été confrontés avec une très bonne précision à la méthode classique bien connue de Bresse.

4.4.2 Écoulements rapidement variés

À un niveau de difficulté plus élevé, un test assez sensible consiste à vérifier si le modèle est capable de prédire les changements de régime d'écoulement (passage du régime fluvial au régime torrentiel) et de supporter les régimes brusquement variés (ressauts). Nous nous sommes tournés vers la littérature. Ainsi, le laboratoire National d'Hydraulique de France (LNH) d'Électricité de France (EDF) a proposé deux cas tests d'écoulement dans un canal au dessus d'une bosse. Le premier considère le fond lisse et sans friction, et la solution du problème est connue. Qualitativement, l'écoulement est fluvial en amont, critique au droit de la bosse et torrentiel en aval. Ce test a été réalisé sans difficulté. Le second considère le fond rugueux et dans ce cas la solution analytique n'est pas disponible. En outre, on observe un régime fluvial en amont de la bosse, torrentiel au dessus et directement en aval de la bosse un ressaut stationnaire suivi d'un régime fluvial. Le test a été positif mais remarquons au passage que comme l'indique la littérature la résolution de problème de singularité reste toujours plus délicate et la stratégie à adopter doit être adéquate sous peine de diverger. Ce second exercice a non seulement permis de valider le modèle mathématique discret mais également la robustesse de la méthode de résolution.

4.4.3 Stabilité et convergence de l'algorithme de découvrment-recouvrement

À propos de la méthode de résolution, elle a été véritablement testée sur un cas réel à savoir la rivière Ashuapmushuan. Pendant longtemps le solveur était incapable de converger. C'est seulement après avoir appliqué les techniques de stabilisation adéquates que nous avons réussi à le stabiliser et à le faire fonctionner inconditionnellement. Pour s'en assurer nous avons alors repris avec succès tous les projets effectués par le passé par l'équipe sur les tronçons de rivière du Québec en reprenant pour chaque cas trois débits : étiage, moyen et crue maximum.

Le module couvrant-découvrant a été testé en régime permanent et transitoire. En régime permanent, l'exercice visait à reproduire un écoulement dans un canal à section triangulaire où la solution analytique est disponible. C'est là un des rares tests qui a permis d'évaluer de façon très précise la pertinence de l'approche proposée en matière de modélisation du couvrant-découvrant. En régime transitoire, il a été validé sur le cas d'un canal à section rectangulaire à pente variable fermé à une extrémité et soumis à une onde de marée sur l'autre. Le niveau de la surface libre change de manière significative et le but de l'exercice consistait à s'assurer que le plan d'eau était capable de plonger librement sous le fond au bon moment et au bon endroit et que les vitesses de l'écoulement s'annulent bien en zone sèche. Les résultats étaient en très bon accord avec ce que proposait la littérature consultée.

4.4.4 Test du canal recourbé de Rozovskii et de l'épi de Nwachukwu et Rajaratnam

Pour des écoulements bidimensionnels nous avons repris le cas du canal recourbé qui a été testé en laboratoire par Rozovskii. Ses résultats ont servi de base pour de nombreux chercheurs dans l'exercice de validation des écoulements dans les canaux recourbés. L'objectif est de vérifier la vraisemblance entre la topographie du plan d'eau calculée et observée par Rozovskii. D'autre part de s'assurer que le champ de vitesse moyenne calculé reproduisait bien l'aspect 2D de l'écoulement. À l'étape suivante nous avons simulé l'écoulement autour d'un épi. Nous nous sommes basés sur les travaux expérimentaux bien documentés de Nwachukwu et Rajaratnam de l'Université d'Edmonton en Alberta. Le test visait à vérifier l'aptitude du modèle à reproduire la complexité de l'écoulement de même que la topographie de la surface libre. Il s'agit d'un cas test très sensible puisqu'il dépend de beaucoup de modèle de turbulence choisi. En effet, c'est au moyen d'un calage appropriée des contraintes de Reynolds que HYDROSIM est capable de prédire tel qu'observé l'intensité et la longueur du décrochement de l'écoulement en aval de l'épi.

4.5 Validations terrain

De nombreuses études ont déjà été réalisées avec ce modèle bidimensionnel horizontal permettant de reproduire numériquement les écoulements en rivière et dans les estuaires. Le développement d'HYDROSIM permettra à des hydrauliciens non spécialistes des méthodes numériques de mener à bien ce type de simulation après un apprentissage minimal de la technologie mise au point dans le cadre de MÉTRIQUE. Un autre aspect important de la

recherche concernant cet outil est de permettre la résolution de problèmes de grandes tailles malgré le fait qu'on veuille l'implanter sur des plates-formes économiques.

4.5.1 Risques d'inondations - Rivière Montmorency

A titre d'exemple, notons le contrat de l'INRS-Eau avec la ville de Beauport pour l'étude hydrodynamique des risques d'inondation d'un tronçon d'intérêt sur la rivière Montmorency. Certains riverains de ce secteur de la rivière vivent des épisodes d'inondation depuis plusieurs années. Leur propriété subit également des dommages consécutifs à l'érosion sévère des berges. Au cours des dernières années, ces problèmes semblaient s'être intensifiés de sorte qu'au cours de l'hiver 1996, la municipalité a demandé à l'INRS-Eau d'identifier la cause de cette situation préoccupante et d'évaluer le potentiel de quelques mesures de mitigation qu'elle souhaitait mettre en place. Suite à la catastrophe du Saguenay de juillet 1996, la ville de Beauport a immédiatement élargi le mandat initial afin que l'étude inclue des scénarios de crues extrêmes sur un domaine étendu à la plaine d'inondation. Ce contrat a été renouvelé une troisième fois tout récemment pour une analyse plus détaillée en crue extrêmes autour des installations de la station de pompage de la Ville de Beauport, ce qui démontre le potentiel des outils développés et le vif intérêt suscités auprès des gestionnaires soucieux de pro-agir par une anticipation lucide des risques et des événements susceptibles de les concrétiser.

4.5.2 Crues du Saguenay

Suite aux événements de juillet 1996 au Saguenay, la Commission scientifique et technique pour la gestion des barrages a confié aux chercheurs de l'INRS-Eau la mission de reconstituer les crues survenues sur les rivières Chicoutimi et des Ha!Ha! et de les simuler en format numérique. En effet, l'INRS-Eau a conclu une entente avec elle visant à faire l'étude *a posteriori* de la catastrophe en se basant sur les données hydrologiques et topographiques disponibles sur les rivières ciblées. Les éléments de l'étude qui ont permis de valider le MODLEUR ont été rapportés précédemment et nous n'allons mentionner que l'aspect hydrodynamique ci-après.

L'étude visait à recréer les événements hydrodynamiques ayant mené à la catastrophe pour permettre de comprendre dans un premier temps se qui s'est produit à ce moment. Dans un second temps, il s'agissait de simuler à l'aide de scénarios ce qui aurait pu se produire si la gestion des barrages avait été effectuée de façon plus optimale et préventive étant donné que l'on connaissait un peu à l'avance (dans les pluviomètres) les précipitations qui ont été déversées sur les bassins hydrographiques de la région.

Une étude complémentaire pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune a permis aussi d'évaluer les conséquences prévisibles d'un plan de gestion alternative prenant en compte la reconstruction des ouvrages sur les rivières Chicoutimi et aux Sables sur les débordements et les dommages aux résidences tout au long de ces cours d'eau.

Le contrat pour la Commission a constitué la première sortie publique des outils MÉTRIQUE par la mise en œuvre du simulateur HYDROSIM et du MODELEUR en vue d'une utilisation élargie

aux plaines d'inondation dans un contexte de simulations non stationnaires. Ce contexte d'utilisation typique des ruptures d'ouvrage était traditionnellement traité à l'aide d'un programme de calcul bien connu, le modèle unidimensionnel DAMBRK. C'est face aux insuffisances de cet outil que les membres de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages en sont venus à la conclusion qu'une modélisation bidimensionnelle du type HYDROSIM, couplée à une prise en compte évolutive du lit d'écoulement était nécessaire. Cette étude nous a permis de repousser les limites connues de nos logiciels puisque nous avons pour la première fois étendu notre domaine d'analyse très loin dans la plaine d'inondation alors qu'auparavant nous nous limitions principalement au lit mineur des cours d'eau. Nous avons aussi expérimenté avec succès des simulations couvrant d'un seul jet une distance accrue dans une rivière, dans ce cas-ci plus de 20 km.

4.5.3 Modèle du fleuve Saint-Laurent

L'INRS-Eau a conclu une entente cadre de partenariat avec Environnement Canada visant la modélisation du Saint-Laurent sur le tronçon Montréal - Cap à la Roche (près de Trois-Rivières). Il s'agit ici d'un projet d'envergure visant à construire sur ce tronçon d'environ 150 km de long un modèle numérique de terrain et un simulateur hydrodynamique élaborés en utilisant les outils développés à l'INRS-Eau dans le cadre du projet MÉTRIQUE. Le modèle numérique de terrain comprend la génération des maillages, le report de la topographie, ainsi que la spécification des substrats et des macrophytes.

Le projet vise à rendre disponible des simulations numériques utilisant le simulateur HYDROSIM ainsi qu'un modèle de terrain produit par le MODELEUR. De plus, il est prévu de produire une simulation hydrodynamique journalière de ce tronçon pour l'élaboration de plans d'urgence en cas de déversement de pétrole dans le Saint-Laurent.

Le simulateur HYDROSIM effectue ces simulations sur une machine de calcul du ministère de l'environnement du Canada (Direction de l'Environnement atmosphérique). Ce partenariat nous permet de valider les logiciels MODELEUR et HYDROSIM dans un contexte d'utilisation mettant en oeuvre une masse de données imposante.

Les modèles hydrodynamiques (tronçon du lac Saint-François, tronçon Montréal/Trois-Rivières, tronçon Archipel de Montréal) développés dans le cadre de ce projet servent dans un premier temps dans un contexte d'urgence environnementale concernant les déversements pétrolier. Malgré cela, les données de bases de la modélisation seront les plus riches possibles afin de pouvoir facilement répondre aux différentes demandes de modélisation qui ne manqueront pas de survenir. Les mesures de vitesses ont été réalisées par dizaines de milliers sur l'ensemble des tronçons à l'étude en utilisant une méthodologie de caractérisation mettant en oeuvre, la courantométrie à effet Doppler, le positionnement DGPS et d'autres moyens complémentaires permettant de caractériser les plantes aquatiques, un facteur primordial pour simuler fidèlement les courants dans le fleuve Saint-Laurent.

La modélisation hydrodynamique demande beaucoup de données physiques et parfois biotiques. Ce sont la topographie, le substrat du lit, les macrophytes et les informations sur les berges. Ces données proviennent de différentes sources et se trouvent dans des formats très variés. Une

première étape vise à transformer les données dans un format compatible avec la modélisation et à les introduire dans le MODELEUR pour former le modèle numérique de terrain. Un modèle hydrodynamique générique est ensuite conçu afin de répondre aux urgences environnementales. Le modèle hydrodynamique est appelé à subir des mises à jour quotidiennes afin de toujours avoir un champ de vitesse représentatif de l'état présent. Actuellement, les opérateurs du modèle fonctionnent à partir d'une librairie d'événements de référence dans la quelle ils puisent quotidiennement en utilisant la règle du « plus proche voisin ».

Les plaines inondables, les berges et les milieux aquatiques proprement dits forment un continuum dont les limites sont parfois difficiles à établir. De façon générale, ces milieux sont très riches au niveau écologique, et les variations de niveau et de débits y ont un impact marqué. Les descriptions de terrain en milieu terrestre (topographie) et en milieu aquatique (bathymétrie) sont toujours assemblées indépendamment et ne peuvent être regroupées en un seul bloc. Souvent même les datums sont différents.

Ce volet du projet vise à unifier ces ensembles de données existantes et rendra possible une évaluation précise des surfaces inondées ou asséchées, ainsi que les profondeurs d'eau associées aux divers scénarios de gestion des débits du fleuve Saint-Laurent. De cette façon, il deviendra possible d'y intégrer les données biologiques colligées sur les milieux humides. Le MNT original (contexte d'urgence environnementale) sera élargi jusqu'à la limite externe des plaines d'inondation du fleuve Saint-Laurent. Le nouveau MNT ainsi formé pourra supporter un modèle hydrodynamique capable de simuler des crues importantes.

En outre, ce projet valorise un effort conjoint entre Environnement Canada et le MEF, soit les résultats issus de la Convention Canada-Québec relative à la cartographie et à la protection des plaines d'inondation et au développement durable des ressources en eau. Ce projet valorise également une banque de données imposante produite par le Service Canadien de la Faune portant sur la description physique des berges du fleuve Saint-Laurent et de leur état d'érosion.

5. HABIOSIM - Quantifier et aménager les habitats

Dans cette section, nous allons exposer une synthèse aussi complète que possible dans l'état actuel de nos connaissances du simulateur HABIOSIM à la base de toutes les applications environnementales du projet MÉTRIQUE où il a montré son potentiel extraordinaire pour l'analyse de l'impact sur l'habitat de la faune en milieu fluvial. Rappelons qu'il est écrit en langage C++ avec la philosophie orientée objet et il est conçu pour pouvoir être exploité sur les plates-formes Win32. Ce simulateur met en oeuvre toute notre expertise dans le domaine de la simulation des habitats de poissons en utilisant la méthode des éléments finis.

5.1 Les contextes visés

Les applications visées ici sont d'abord celles concernant les modifications au débit des cours d'eau apportées par les ouvrages de retenue (hydroélectriques, réservoirs d'irrigation, etc...). Dans le cas hydroélectrique, les petites centrales sont autant visées que les grands ouvrages d'Hydro-Québec.

L'enjeu des débits réservés et des plans de gestions des débits et niveaux d'eau. Le premier but des travaux de modélisation numérique de l'habitat dans ce contexte est de formuler des recommandations de plans de gestion des débits et niveaux d'eau incluant le concept de « débit réservé » visant à protéger la disponibilité et la qualité des milieux aquatiques à des fins écosystémiques. Dans le cas des projets soumis à la législation fédérale ou provinciale, le principe appliqué est celui du "no net loss". Quand des habitats sont perdus sur le site principal du projet, des restaurations ou des créations d'habitats de remplacement doivent être prévues comme mesure de compensation. Par ailleurs, il est devenu prioritaire de disposer de moyens numériques très performants pour faire face à la nouvelle demande créée par la mise en oeuvre du III^{ème} Plan d'Action Saint-Laurent. Cette initiative fédérale-provinciale a reconnu la pertinence des outils développés dans le projet MÉTRIQUE en accordant une des plus hautes priorités à la mise en application des modèles décrits dans ce rapport. Bien sûr, HABIOSIM est appelé à jouer un rôle primordial dans la problématique des habitats.

Le contexte de la réhabilitation et de la création d'habitats : une deuxième problématique, complémentaire à la précédente visée est donc celle de la réhabilitation et de la création d'habitats. Il s'agit, par des interventions physiques, de restaurer des milieux permettant aux espèces piscicoles ou végétales d'exercer de nouveau, ou d'améliorer des fonctions vitales auparavant limitées par le milieu. Il peut s'agir d'épis, lesquels procurent de l'abri par rapport au courant, de seuils, de modifications au substrat, etc... Ces interventions peuvent être requises

pour corriger ou atténuer les impacts reliés à des ouvrages de génie civil ou des dégradations reliées à la contamination. Ils peuvent également servir à accroître les rendements de production en biomasse piscicole.

Le potentiel d'optimisation des sorties de passes migratoire : ce troisième domaine relié au poisson a été identifié comme potentiel d'application des outils MÉTRIQUE. Plusieurs passes actuelles ne fonctionnent pas à leur plein potentiel, voire pas du tout, en raison d'une conception déficiente de la configuration de la sortie laquelle est cruciale pour le "courant d'appel". Les concepteurs ont besoin d'un outil qui leur permettrait de simuler très localement le champ de vitesse local à la sortie en fonction du débit ou des vitesses du jet de sortie. La prise en compte de l'hydraulique du secteur est aussi nécessaire.

5.2 Les principes

La méthodologie de modélisation des microhabitats (MMH) utilisée est bien connue : elle consiste à traduire en *valeur d'habitat* pour une espèce biologique donnée les variables physiques d'un tronçon représentatif du cours d'eau. La transformation utilise des *courbes de préférence* qui expriment la sélectivité d'espèces de poissons ou de plantes à l'égard du milieu. La surface du site est intégrée avec comme poids d'intégration la valeur locale d'habitat. La variable qui en résulte est l'*Aire Pondérée Utile* (APU) qui a comme son nom l'indique des unités de superficie. Les phases sensibles (limitatives) du cycle de vie des espèces sont considérées prioritairement. Une analyse de sensibilité au débit ou aux autres facteurs déterminant les variables abiotiques (comme le vent, le régime des vagues) est effectuée dans la gamme correspondant à la saison du cycle de vie visée. Il en résulte un graphique montrant la disponibilité de l'habitat (APU) en fonction du débit ou des autres variables indépendantes.

Dans le cas des débits réservés lorsqu'une relation explicite peut être établie entre la disponibilité de l'habitat correspondant à certaines phases hydrologiques (ex : les étiages saisonniers) et la biomasse piscicole, il est plus aisé de définir un seuil de débit réservé axé directement sur la ressource piscicole. Autrement, lorsque ce type de relation ne peut être explicité, le débit réservé est sélectionné en vue de maintenir la disponibilité d'habitat au-dessus d'un certain seuil fixé selon une logique écologique.

Cette méthodologie est largement appliquée un peu partout dans le monde. Elle a pris naissance à Fort Collins, CO au Département américain US Fish and Wildlife (National Biological Survey). Un programme de calcul appelé PHABSIM (pour Physical Habitat Simulation) y a été développé et celui-ci est disponible pour un coût minime dans le domaine public. Ce programme est axé sur une représentation physique du milieu obtenue soit, entièrement par des mesures, ou encore, par une combinaison de mesures et d'un modèle simplifié à une dimension. D'autres initiatives du même genre ont été prises ailleurs dans le monde ; ainsi, le CEMAGREF de Lyon en France a mis au point un code de calcul, EVHA, qui permet de calculer la disponibilité d'habitat dans les tronçons court-circuités requérant un débit réservé fixe (% donné du module). L'approche présuppose un comportement tout à fait statique du tronçon étudié à cause de la constance du débit. À l'instar de PHABSIM, l'hydraulique s'y trouve représentée à l'aide de mesures directes.

Notre approche fait plutôt appel à la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle laquelle procure des résultats nettement supérieurs à une fraction du coût. Pour plus de détails à cet égard, nous référons le lecteur au texte du projet MÉTRIQUE.

Concilier la modélisation des microhabitats avec les politiques « boîtes noires » de débit réservé. Puisque l'application de l'approche "modèle" vise à formuler des recommandations de débit réservé ; elle se substitue aux méthodes hydrologiques ou hydrauliques (périmètre mouillé) de détermination du débit réservé axées sur des critères qui demeurent des "boîtes noires" par rapport à l'habitat. Le résultat recherché est une plus grande précision et une meilleure fiabilité du résultat au niveau biologique. Il existe donc un besoin de politiques ou de pratiques administratives permettant de départager les situations où l'une ou l'autre des deux approches doit être retenue.

Comme les méthodes de type hydrologiques ou hydrauliques font très peu référence aux conditions biologiques locales d'application, notre avis est qu'elles doivent induire des conclusions très conservatrices. Pour les promoteurs désirant opérer dans des conditions hydrologiques allant en deçà des recommandations obtenues par ces méthodes, l'emploi de modèles d'habitat est alors recommandé. Toute cette problématique fait actuellement l'objet d'un projet de recherche conjoint entre l'INRS-Eau, le MEF et le ministère des Pêches et Océans Canada.

Cette question constitue une préoccupation générale actuellement dans le monde. Des centaines de chercheurs se sont d'ailleurs donné rendez-vous à Québec en juin 1996 pour le deuxième Symposium international sur l'hydraulique et les habitats, Écohydraulique 2000 dont les hôtes furent l'INRS-Eau et la Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA). Le symposium a été organisé sous les auspices de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH) et elle est co-sponsorisée par l'Association Internationale des Ressources en Eaux (AIRE) et l'American Fisheries Society (AFS).

5.3 Les bases scientifiques

En plus des données abiotiques de base collectées sur le terrain (topographie, substrats, etc...), le modèle sous-jacent au logiciel HABIOSIM se sert des vitesses et des profondeurs d'eau provenant du modèle hydrodynamique de Saint-Venant résolu avec la méthode des éléments finis (HYDROSIM). Il est également possible de tenir compte d'autres variables pertinentes notamment, le climat des vagues, dans la mesure où celles-ci sont distribuées (x,y) et représentatives de la variabilité du phénomène. Les données de terrain sont d'abord traitées par le MODELEUR qui permet de construire très rapidement un modèle numérique de terrain construit sur un support compatible avec les résultats hydrauliques. Grâce à ses fonctionnalités d'ouverture, le programme permet d'importer les données produites par d'autres modèles de simulation.

La capacité qu'a le logiciel HYDROSIM de gérer le découverture et le recouvrement du lit de la rivière avec la variation du débit permet à l'analyste travaillant avec le logiciel HABIOSIM d'avoir une vue réaliste des hauts-fonds asséchés par une baisse de débit ou des aires inondées par une forte hausse du débit. À cause de la bidimensionnalité (2D) des outils, les champs de

variables sont représentatifs de la variabilité transversale des écoulements ce qui confère un degré de représentativité considérablement accru par rapport aux méthodes traditionnelles.

En effet, ces capacités du logiciel permettent de surmonter plusieurs des limitations des modèles classiques à l'égard de la caractérisation physique du site en permettant de préciser dynamiquement la position de la berge en fonction du débit. Cette fonctionnalité est apparue comme essentielle lors de la consultation pour l'analyse des besoins (Université d'Alberta, US Fish and Wildlife).

Par ailleurs, l'analyste dispose de fonctionnalités graphiques interactives pour modéliser (ou spécifier) les préférences d'habitat pour une espèce donnée par rapport aux variables abiotiques du milieu - vitesse, profondeur, substrats, température, qualité de l'eau, etc... - formant des indices de base. Ceux-ci sont alors combinés sous la forme d'une moyenne géométrique pondérée pour former un indice global représentant une appréciation de l'habitat. Le modèle multiparamétrique dispose de sa propre interface. Les préférences d'habitat prenant la forme de courbes unitaires α -dimensionnelles dépendant des variables abiotiques, HABIOSIM permet à loisir de modifier interactivement et graphiquement la formulation du modèle.

Lors d'une simulation avec des données hydrodynamiques provenant de HYDROSIM et du MODELEUR, on obtient alors l'indice global de préférence en tout point du domaine en fonction des variables abiotiques du milieu. La valeur de cet indice est représentée spatialement sur toute la surface du domaine d'étude ou du tronçon de rivière et peut donc être visualisée. Elle peut également être intégrée sur l'ensemble du site pour donner la disponibilité totale d'habitats. Une intégration par zone est également possible. On peut enfin demander la distribution de fréquences des valeurs d'habitat.

5.4 Le modèle théorique

Le modèle théorique sous-jacent à HABIOSIM comporte trois étapes de traitement

1. Une première étape (ichtyologique et univariée) sert à relier la valeur d'habitat pour une espèce à un stade donné de son cycle de vie à chacune des variables abiotiques ayant une signification pour cette valeur ; on obtient ainsi les indices de base ;
2. Une deuxième étape (ichtyologique et multivariée) sert à construire un modèle de représentation qui tient compte simultanément de tous les facteurs de base expliquant la valeur d'habitat ; il en ressort des indices globaux ;
3. Une troisième étape (spatiale et hydrologique) résultant de l'application des indices globaux permet de quantifier la disponibilité totale de l'habitat (les aires pondérées utiles) dans le milieu pour un débit donné ; la procédure est basée sur l'intégration spatiale de l'indice global pour l'ensemble du tronçon à l'étude ou sur une zone seulement

5.4.1 Les indices de base

Donc, la définition des préférences d'habitat du poisson à l'égard des facteurs abiotiques s'effectue généralement à l'aide de courbes exprimant en ordonnée la valeur entre 0 et 1 de l'habitat en fonction de chacun des facteurs, généralement la vitesse, la profondeur et le substrat. Les courbes peuvent être à caractère empirique (basées sur des statistiques d'observations d'absence ou de présence) ou conceptuelle (axées sur l'interprétation ou la classification). En effet, le fait de pouvoir définir des indices interactivement à l'écran ouvre la porte à l'utilisation d'indices de préférence de type conceptuel en plus du type statistique utilisé maintenant. Ceci permettra à l'utilisateur d'explorer de nouveaux formalismes pour la définition des préférences d'habitat du poisson. La spécification des paramètres de ces courbes représente l'essentiel de l'effort de paramétrisation du modèle d'habitat.

Nous croyons qu'un simple traitement par fichier de paramètres sans support graphique n'est pas suffisant pour spécifier le modèle d'habitat. C'est pourquoi le logiciel HABIOSIM offre des fonctionnalités d'édition et de visualisation graphique des courbes de préférence.

5.4.2 Indices globaux classiques et nouvelles avenues

Très généralement, l'indice global prend la forme d'une moyenne géométrique locale (nœud à nœud du modèle) des indices de base univariés. Le modèle devient donc multivarié. En utilisant une procédure d'analyse de la variance, il est possible de pondérer la moyenne géométrique par le pourcentage de variance expliquée par chacun des indices ou variable individuelle. Quoique l'approche ait été maintes fois validée dans la littérature, la procédure de validation est loin d'être simple à cause notamment de l'incertitude élevée qui entache les variables biotiques et en raison de la dépendance réciproque des variables abiotiques qui sous-tendent les indices globaux.

C'est pourquoi on assiste de plus en plus à l'émergence dans la littérature d'une forme d'indice global qui court-circuite l'étape des indices de base pour construire directement des indices globaux multivariés tenant compte de l'interdépendance des variables abiotiques. L'approche la plus considérée actuellement est celle des régressions logistiques. Le résultat prend également la forme d'une variable dépendante unitaire (IG ou indice global) en ordonnée laquelle varie en fonction de la valeur d'un polynôme multivarié qui fait intervenir les facteurs abiotiques de base. L'intérêt de l'approche est qu'elle permet d'interpréter la valeur de l'indice comme une probabilité de retrouver des poissons dans une classe d'indice donnée. Il n'y a qu'un pas à franchir pour déboucher sur l'évaluation de la biomasse.

Pour exploiter de telles formulations dans HABIOSIM, l'analyste utilisera plutôt la fonction CALCULATRICE qui permet de définir dans un langage de programmation simple (typique du Visual Basic) la fonction et ses paramètres pour ensuite l'exploiter aussi simplement que les indices globaux définis classiquement.

5.4.3 La disponibilité d'habitats

Le calcul de l'Aire Pondérée Utile (APU) est facile à obtenir à partir des indices globaux de préférence (IG) en tous points du tronçon. En fait, une APU donne une mesure (en m^2 ou en %

de la surface totale) de la qualité globale et de la disponibilité de l'habitat en un site témoin. Cette aire est calculée par intégration numérique sur le maillage de calcul des indices globaux de préférence et le résultat est une aire en mètres carrés ou un pourcentage de la surface totale. Il est aussi possible d'appliquer des critères d'intégration ; par exemple, n'intégrer l'aire que lorsque la valeur d'habitat dépasse un certain seuil d'acceptabilité.

Lors de l'analyse des besoins, des intervenants ont souligné l'importance d'être capable de compléter l'étude d'habitat en compilant les variations d'APU en fonction du débit (chronologie) aidant à établir des débits minimums pour la conservation des habitats de poissons. Cette possibilité étant relativement facile à réaliser à l'extérieur de HABIOSIM à l'aide d'un chiffrier, nous n'avons pas jugé nécessaire de l'implanter dans le système.

5.5 Analyses comparatives et validation terrain

Lors de l'étude des besoins, et à diverses reprises par la suite, des intervenants souhaitaient être rassurés de passer de la classe d'outil PHABSIM à HABIOSIM par des preuves que ce choix comporte des avantages significatifs. De plus, il était hautement souhaitable de prouver la validité de la méthodologie de modélisation des microhabitats à l'aide d'une stratégie de validation renouvelée. Nous avons travaillé au sein de groupes internationaux et nationaux afin de constituer et diffuser ces démonstrations et preuves. C'est ainsi que nous avons été actifs au sein:

1. d'un groupe informel nord-américain de modélisateurs provenant de l'université de l'Alberta (Edmonton), du Fresh Water Institute de Winnipeg, du Ministère de l'Environnement de l'Alberta et le US Fish and Wildlife (National Biological Service) de Fort Collins (Colorado),
2. d'un sous-groupe principalement européen de la section Écohydraulique de l'Association internationale de recherches hydrauliques (AIRH) appelé International Aquatic Modeling Group
3. du Centre interuniversitaire de recherche sur le Saumon atlantique (CIRSA).

Des applications ont également été réalisées pour le compte d'Hydro-Québec sur la rivière Moisie et dans le fleuve Saint-Laurent, dans le cadre des Plans d'Action Saint-Laurent (phases II et III) au sein d'un projet interuniversitaire Écorecherche (université d'Ottawa) ainsi que pour la Compagnie Allied Signal dans le fleuve Saint-Laurent. Ci-après, nous allons résumer brièvement les résultats de ces divers travaux.

5.5.1 Comparaison PHABSIM HABIOSIM

Une recherche systématique a été réalisée dans le cadre du CIRSA (Lafleur, 1997 ; Leclerc et Lafleur, 1998) en vue de comparer les deux approches de modélisation surtout du point de vue des implications de leur utilisation. Ainsi, les besoins en données de terrain, les méthodes respectives de simulation des résultats hydrauliques, le pré-traitement des données de terrain, la

qualité de la représentation des résultats, la précision des données hydrauliques ainsi que l'implication des erreurs dans les données sur le résultat de la disponibilité de l'habitat ont notamment fait l'objet d'examen attentifs.

Il est ressorti que HABIOSIM apporte une nette amélioration au niveau de tous les critères étudiés. Quoique les coûts de mise en œuvre de la méthode soient relativement équivalents, HABIOSIM démontre une nette supériorité en apportant une information plus précise à échelle plus raffinée. La qualité des outils de simulation hydraulique laisse moins de place à l'arbitraire (paramétrisation) ce qui confère une meilleure crédibilité aux résultats ; cette qualité facilite l'acceptation des conclusions par l'ensemble des intervenants et décideurs. Au niveau du pré-traitement des données disponibles, les fonctionnalités du système MODELEUR-HYDROSIM-HABIOSIM permettent d'importer et de gérer très efficacement les divers ensembles disponibles en plus de pouvoir les transporter sur des supports homogènes (maillages de représentation en éléments finis). Au niveau des méthodes de représentation, les fonctions graphiques de HABIOSIM permettent de visualiser très facilement les résultats en deux dimensions ce qui permet de les communiquer très efficacement dans les phases successives de consultation.

Enfin, il a été démontré que l'erreur sur les vitesses et les différentes variables abiotiques pouvaient être relativement importantes sans que soit affectée de manière aussi sensible les résultats de disponibilité d'habitat. L'important est que les variables ne soient pas entachées d'erreur systématique. Autrement dit, si l'erreur demeure aléatoire, les transformations algébriques nécessaires pour obtenir les indices de bases et l'indice global propagent les imprécisions mais la procédure d'intégration de la disponibilité de l'habitat permet de les récupérer sur l'ensemble du domaine. C'est la règle des erreurs compensées. Bien sûr, les cartes de disponibilité de l'habitat seront d'autant plus précises que les variables abiotiques le seront au départ, ce qui avantage nettement HABIOSIM par rapport à PHABSIM.

Quelques autres critères ont été considérés comme la prédictibilité, les domaines de validité des simulations et les possibilités de transformer la géométrie des domaines d'écoulement et nous renvoyons le lecteur à Lafleur (1997) ou Leclerc et Lafleur (1998) pour plus de détails.

Somme toute, nous concluons que HABIOSIM peut faire beaucoup mieux à un coût équivalent que PHABSIM en plus de permettre d'entrer dans le champ de la conception et de la restauration d'habitats ce que lui permet de faire la plus haute résolution d'analyse qui le caractérise.

5.5.2 Le saumon de la rivière Moisie

Des travaux très importants de validation (Boudreau et coll., 1996 ; Bourgeois et coll., 1996) ont été réalisés en collaboration avec la firme GÉNIVAR pour le compte d'Hydro-Québec sous la supervision étroite du ministère de l'Environnement et de la Faune et de Pêches et Océans Canada. Ces recherches ont été conduites sur le site Taoti de la rivière Moisie dans le cadre du projet de dérivation des tributaires Careil-Aux Pékans (Sainte-Marguerite III). Il a été possible de mettre au point une nouvelle stratégie de validation axée sur la distribution des observations de présence-absence de poissons au sein des classes de valeur d'habitat procurées par HABIOSIM. La démonstration ayant été convaincante, les résultats ont bénéficié de l'aval ministériel comme

condition d'acceptation des propositions d'Hydro-Québec de débits réservés pour le saumon. Les résultats sont disponibles dans le rapport.

5.5.3 Validation des modèles d'habitats sur la rivière Sainte-Marguerite : les régressions logistiques

En plus de travaux de Lafleur (1997), des recherches prometteuses s'achèvent dans le cadre du CIRSA pour la mise au point d'une nouvelle génération de modèles d'habitats basés sur une formulation algébrique différente de l'indice global. Cette option alternative a été évoquée un peu plus haut (régressions logistiques). Ces recherches (bibliographie non rapportée) sont menées conjointement par Daniel Rioux de l'INRS-Eau (maîtrise supervisée par Michel Leclerc) et Jean-Christophe Guay (maîtrise, Université de Montréal) sous la co-supervision de Daniel Boisclair de l'Université de Montréal et Michel Lapointe de l'Université McGill. En appliquant une procédure de validation similaire à celle développée dans le cadre du projet Sainte-Marguerite, nous avons obtenu des coefficients r^2 supérieurs à 0,85 entre la présence des individus observés dans le milieu et la classe de valeur d'habitat prédite par le modèle. En guise de comparaison, l'approche classique basée sur les indices globaux obtenus par moyenne géométrique d'indices de base donne autour de 0,35-0,4. L'amélioration est dramatique ce qui permet d'espérer une confiance accrue à la valeur de cet outil dans le futur.

La cartographie des habitats établie avec les deux approches a permis de mettre en évidence des améliorations vraiment notables visuellement en faveur des régressions logistiques. La meilleure performance est attribuable au fait que la méthode tient compte explicitement de l'interdépendance des variables de base en plus de ne pas dégrader cette dernière par l'emploi d'indices de base.

5.5.4 Les plantes aquatiques du fleuve Saint-Laurent

Une des applications des plus importantes et des plus innovatrices de ces dernières années dans le domaine de la modélisation des microhabitats est l'application du concept à la représentation des plantes aquatiques dans le fleuve Saint-Laurent (Dans la bibliographie, toutes les contributions comportant J. Morin comme co-auteur).

Dans ce cas, les plantes exercent une influence déterminante sur l'écoulement qui, en retour, peut servir de facteur limitant pour la croissance de ces dernières. C'est donc un processus non-linéaire très difficile à représenter, car il exige une méthode itérative qui permet de converger vers une solution respectant à la fois les conditions d'acceptabilité de l'habitat des plantes et les conditions hydrodynamiques du milieu. De plus, le climat des vagues représente une variable additionnelle aussi déterminante que les courants, la profondeur et la distribution des substrats pour comprendre la distribution des plantes. Il a donc fallu faire appel à une méthodologie très élaborée faisant intervenir simultanément MODELEUR, HYDROSIM, l'approche HABIOSIM, DISPERSIM (adapté pour les bilans sédimentaires à l'échelle annuelle), un modèle de simulation des vagues acquis de Delft Hydraulic Laboratory (Hollande), des caractérisations intensives du

milieu à l'aide d'un échosondeur, d'un courantomètre à effet Doppler, d'une caméra sous-marine, d'un système DGPS. La procédure mise en place a été entièrement validée et fera l'objet d'une soutenance de doctorat par M. Morin au cours de 1999.

Il en est résulté un modèle hydrodynamique des plus représentatifs de l'hydrodynamique du fleuve entre Cornwall et Trois-Rivières excluant l'Archipel de Montréal où les travaux de modélisation viennent de débiter. Ce modèle est opéré de façon semi-continue par la Direction de l'Environnement atmosphérique d'Environnement Canada aux fins de répondre aux urgences maritimes (déversement accidentel d'hydrocarbures) en vue de servir de base pour l'élaboration de critères de gestion des débits et niveaux d'eau du fleuve plus respectueux des composantes environnementales du milieu. L'existence de ce modèle permet également de concevoir et planifier des interventions de restauration des habitats comme ce fut le cas pour Allied Signal à l'Île-aux-Chats à l'exutoire du Lac Saint-François où un site de sédiments contaminés devait être restauré. Les concepts de microhabitats appliqués à l'aide des outils offerts dans MÉTRIQUE ont permis de mettre en place un concept inédit axé sur le maintien de conditions abiotiques favorisant la conservation de la biodiversité du milieu.

5.6 Recherches complémentaires : les débits réservés

Comme le développement de la modélisation des microhabitats sous-tendait la question des débits réservés, nous avons participé en partenariat avec les ministères de l'Environnement et de la Faune du Québec et Pêches et Océans Canada à l'élaboration d'une politique de conservation des habitats piscicoles. C'est ainsi que le développement d'une nouvelle méthode de détermination écohydrologique des débits réservés basée sur une approche régionalisée des cibles de protection et tenant compte des saisons hydrologiques a été proposée. Synthèse des points de vue et approches hydrologique (régionalisation, notamment), écologique et hydraulique, la méthode proposée permet de répondre rapidement et plus adéquatement aux besoins régionaux du vaste territoire québécois tout en permettant dans une démarche de recherche accrue de précision le recours aux modèles de type HABIOSIM.

6. DISPERSIM - «Tracer» les contaminants et les masses d'eau

Dans cette section, nous allons synthétiser l'état actuel du simulateur DISPERSIM destiné au traçage des contaminants en milieu urbain et fluvial. Ce programme est écrit en FORTRAN et partage la même coquille que HYDROSIM. À l'instar de ce dernier, il est conçu pour pouvoir être exploité autant sur des plates-formes économiques (PC) que sur des machines de calcul dispendieuses. Ce simulateur met en oeuvre toute notre expertise dans le domaine de la simulation des phénomènes de transport-diffusion utilisant la méthode des éléments finis.

6.1 Les contextes visés

La plupart des pays développés du monde ont adopté au cours des dernières décennies des politiques d'assainissement des eaux de leurs fleuves et rivières. Au Canada par exemple, plusieurs programmes nationaux et provinciaux ont été lancés pour faire face à ce problème et mettre en oeuvre des mesures économiques et optimales pour le milieu. Les sources de pollution d'origine ponctuelle comme les rejets des municipalités et des industries sont nombreux et on dispose de très peu de moyens pour analyser la propagation de cette pollution et l'interaction conflictuelle avec certains usages nécessitant une bonne qualité d'eau. L'analyse des besoins rapportée dans notre premier rapport d'étape s'était concentrée sur l'approche d'intervention du Plan d'Action Saint-Laurent (PASL) et de Saint-Laurent Vision 2000 (SLV 2000) appliquée de concert avec le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, ainsi que sur le protocole de suivi appliqué spécifiquement aux industries papetières, celui dit "des ESEE" (Études du Suivi des Effets Environnementaux).

Dans tous les cas, le « traçage » en concentration des contaminants est requis au sein des panaches de rejet. Cette concentration doit satisfaire des critères de qualité établis comme des normes réglementaires, du moins à partir d'une certaine distance du point de rejet. Traditionnellement, le traçage est évalué à l'aide de tests de diffusion (essais de traçage) utilisant de puissants colorants comme la rhodamine WT. Ces tests sont coûteux et peu fiables dans la mesure où ils se limitent aux premières centaines de mètres en aval du point d'émission et qu'il font peu de cas des conditions hydrologiques particulières dans lesquelles ils sont réalisés. L'utilisation de la modélisation représente donc une alternative intéressante dans la mesure où elle n'est pas limitée à la distance proximale (à condition de disposer de champs de vitesse simulés) et qu'on peut réaliser l'étude pour des conditions hydrologiques parfaitement normées.

De plus, cette option est plus naturellement interfaçable avec les moyens d'analyse modernes que sont les système d'information géographiques (MÉTRIQUE, éventuellement).

Parmi les variables qui permettent d'analyser la qualité de l'eau, la « concentration » de polluants est donc celle qui permet de reproduire la notion de panache. Le modèle mathématique retenu pour le calcul des concentrations des contaminants repose sur l'équation scalaire à deux dimensions de transport-diffusion avec prise en compte des cinétiques chimiques de transformation des substances.

Les contextes potentiels d'analyse sédimentaire: Le modèle de transport-diffusion dans le milieu fluvial comporte plusieurs autres potentiels qui n'ont pas encore été exploités dans le contexte de MÉTRIQUE. Par exemple, le transport de sédiments en est un si complexe qu'on pourrait y définir plusieurs sous-domaines d'application :

- la problématique du dragage et de la disposition des sédiments de dragage,
- la problématique de l'érosion (affouillement) des sédiments à proximité des sites d'implantation d'ouvrages de génie (piles de pont, quais, etc.),
- la dynamique et l'équilibre sédimentaires et les transport des sédiments contaminés à l'échelle des tronçons fluviaux,

Les contextes de cinétiques particulières : On peut aussi mentionner d'autres contextes qui sont liés aux cinétiques particulières caractérisant l'évolution des substances données dans le milieu fluvial. Par exemple, nous sommes confrontés actuellement à un besoin particulier relié à la sursaturation d'azote dans l'eau provoquée dans les pays chauds par l'apport massif d'air dans l'eau (entente négociée avec l'Entidad Binational de Yaciretá d'Argentine). Cette situation est observable naturellement au pied de chutes mais les ouvrages d'évacuation des crues jouxtant les barrages hydroélectriques produisent parfois les mêmes effets par un appel massif d'air dans les jets des évacuateurs. Dans ces cas, la surconcentration d'azote dans l'eau (jusqu'à 150%) n'est pas un problème pour la faune aquatique tant que les poissons évoluent à une profondeur plus grande que la profondeur de compensation qui maintient l'azote en phase dissoute dans l'eau et leur sang. Toutefois, lorsque le poisson remonte dans la colonne d'eau sur son parcours natatoire, il arrive qu'il dépasse la hauteur de compensation; l'azote se gazéifie alors dans son sang et c'est la syncope. Des mortalités massives sont ainsi constatées sur des dizaines de kilomètres du Rio Parana en Argentine en aval du barrage Yaciretá.

La prise en compte de tels phénomènes dans DISPERSIM requiert l'implantation et la paramétrisation des lois de comportement décrivant le phénomène. L'exploitation d'un tel modèle peut se faire de concert avec HABIOSIM puisqu'il s'agit d'une problématique d'habitat dans laquelle un facteur abiotique délétère compromet l'existence de conditions potentiellement favorables pour l'écosystème aquatique.

On pourrait multiplier ainsi les contextes d'analyse qui peuvent bénéficier de DISPERSIM en tant qu'outil générique permettant d'implanter des conditions et lois de comportement particulières adaptés aux substances transportées. Par contre, on comprend aussi qu'il est périlleux de figer l'interface-usager d'un tel modèle autour d'une problématique particulière. Le risque est alors de compromettre la valeur générique du produit et d'en limiter l'utilisation à un seul contexte. C'est

une des raisons pourquoi nous avons choisi de reporter à plus tard l'option de « ficeler » DISPERSIM à un contexte particulier.

Dans ce qui suit, nous allons présenter plus en détail les fonctionnalités et composantes de base de DISPERSIM développé dans le cadre de MÉTRIQUE visant à répondre aux besoins du domaine à savoir évaluer les concentrations de contaminants transportés par les eaux. Tel que spécifié au début du projet MÉTRIQUE, le principal contexte abordé est celui de la contamination fluviale en aval des zones urbaines, plus particulièrement causée par les débordements des réseaux d'égout unitaires par temps d'averse. La propagation des masses d'eau en provenances des tributaires importants est un autre contexte qui a reçu notre attention car il ne met en œuvre que les fonctions de transport-diffusion du système.

6.2 Les principes

La gestion des eaux usées par temps de pluie constitue actuellement un aspect prioritaire (sinon priorisé) de l'assainissement urbain. De façon épisodique, la surcharge des réseaux d'égout par les eaux pluviales entraîne le rejet vers le milieu d'eaux fortement contaminées. Ces rejets affectent la qualité du milieu et enfreignent les critères d'usages de l'eau et des rives. Les volumes débordés sont considérables et les eaux sont caractérisées par un contenu élevé en matières solides, un déficit en oxygène dissous et une contamination bactérienne importante. De plus, on y retrouve des métaux, hydrocarbures aromatiques et aliphatiques, HAP, BPC et nutriments.

En vue d'évaluer l'impact des débordements, il est nécessaire de considérer différentes échelles de temps et de distinguer les effets immédiats et différés. L'impact immédiat résulte de l'événement individuel et se traduit par une dégradation rapide de la qualité de l'eau. On le qualifie généralement *d'effet-choc*. À une échelle de temps supérieure, la diffusion des contaminants adsorbés et dissous augmente l'étendue de la zone affectée et l'effet persiste sur une période variant de quelques heures à quelques jours. On parle alors d'impacts à moyen terme. À plus long terme, la persistance de la contamination est reliée aux effets cumulatifs des débordements et fait intervenir la dynamique sédimentaire du milieu. Par bilan sur la saison ou sur l'année, l'impact global des débordements peut être évalué.

Plusieurs facteurs justifient l'analyse détaillée de la propagation des eaux d'effluents urbains (émissaire principal ou de débordement). Les interventions coûteuses du programme d'assainissement des eaux municipales qui visaient les émissaires principaux n'ont pas permis dans bien des cas de récupérer des usages du milieu aquatique dans les zones urbaines à cause de la contamination résiduelle associée aux débordements des réseaux unitaires en temps d'averse. Le dépassement des critères de qualité venant restreindre les usages, il s'avère intéressant de pouvoir estimer l'ampleur et la durée de la perturbation en des points stratégiques. Ainsi, avec une meilleure connaissance des impacts, on peut mettre en évidence les besoins et définir les objectifs d'intervention en matière de gestion des réseaux d'égout. Suite à l'étude de la diffusion des panaches de débordement, il devient possible de dégager des critères environnementaux basés sur la protection des usages et applicables à des événements de référence. La prise en compte explicite des usages et des critères de contamination est un besoin sine qua non de la démarche proposée.

Les principaux besoins auxquels essaie de répondre DISPERSIM sont:

- la présence et l'interaction simultanée de plusieurs variables d'état;
- l'obtention de données numériques de vitesses et de diffusion;
- le besoin local de précision dans la région des émissaires;
- le traitement efficace des données spatiales disponibles et du maillage de calcul.

L'approche eulérienne¹ de DISPERSIM est la seule qui permette de résoudre naturellement les équations de transport-diffusion en tenant compte de plusieurs variables d'état simultanément. L'approche lagrangienne ne permet pas d'arriver à un tel résultat sans complications algorithmiques. Le modèle eulérien se sert des vitesses et des profondeurs d'eau provenant du modèle mathématique bidimensionnel de Saint-Venant (HYDROSIM). Il doit donc s'appliquer aux mêmes milieux et est sujet aux mêmes restrictions d'applicabilité: milieu peu profond, écoulement gravitationnel, etc... Les diffusivités sont également calculées à partir des propriétés du champ de vitesse à l'aide de lois connues dans la littérature (Loi de Taylor, longueur de mélange). La méthode de discrétisation retenue ici est la même que le modèle hydrodynamique, soit les éléments finis. Cette approche nous permet de mettre en oeuvre les mêmes outils, principalement MODELEUR, pour prendre en compte les données de terrain. En utilisant la même grille de calcul que celle utilisée pour l'hydrodynamique, et en l'adaptant quelque peu pour répondre localement aux besoins de précision de l'application, il est possible de construire très rapidement un maillage adapté.

6.3 Les bases scientifiques

Dans le cadre du projet MÉTRIQUE, l'objectif visé est la conception d'un logiciel multi plates-formes appelé DISPERSIM destiné à la simulation numérique du transport de contaminants par une approche eulérienne sur un maillage élément fini produit par MODELEUR et sur lequel sont projetés les données de terrain ainsi que les résultats de la simulation hydrodynamique pour le scénario hydrologique visé. Les principales activités de recherche relatives aux opérations de développement du modèle de transport-diffusion sont la sélection adéquate du modèle mathématique, la méthodologie de modélisation des termes de sources et puits pour reproduire les cinétiques chimiques des substances dissoutes dans l'eau et la connexion aux données hydrodynamiques produites par HYDROSIM.

L'expertise plus générique de l'INRS-Eau dans l'approche eulérienne appliquée aux apports des tributaires a été adaptée à la représentation des panaches d'effluents de débordement. Le modèle

¹ L'approche eulérienne permet de résoudre les équations de transport-diffusion directement dans l'espace de la variable d'état, la concentration, qui est véhiculée comme inconnue du problème. Dans l'approche lagrangienne, la résolution s'effectue en faisant appel à un algorithme de transport de particules (particle tracking) dont la distribution dans le milieu à la fin du processus de résolution sert à évaluer indirectement la concentration.

est bidimensionnel dans le plan horizontal ce qui convient relativement bien aux milieux peu profonds bien mélangés verticalement. Il prend aussi en compte l'aspect transitoire. Les cinétiques et la prise en compte de plus d'une espèce chimique à la fois y sont implantées.

6.3.1 Le modèle eulérien de transport-diffusion

L'approche eulérienne consiste à résoudre directement la variable "concentration" en utilisant les équations de transport-diffusion représentées dans l'espace du cours d'eau à l'aide d'une méthode comme les éléments finis. C'est la même approche numérique qu'on utilise pour résoudre les équations du mouvement (modèle hydrodynamique). La méthode eulérienne s'oppose à la méthode lagrangienne qui doit simuler un nuage de particules numériques avant de revenir, par post-traitement du nuage de points, à la concentration. Le principal intérêt de l'approche eulérienne pour aborder ce type de problème réside principalement dans la possibilité de tenir compte plus aisément des interactions entre les différents contaminants présents dans un panache en plus de leur comportement non-conservatif. Il est difficile de travailler au niveau de ces lois de comportement en utilisant l'approche lagrangienne. Elle est cependant plus lourde à manipuler à cause du besoin de discrétisation local requis pour contrôler la diffusion numérique artificielle qui la caractérise. Le niveau d'expertise des usagers doit donc nécessairement être plus élevé.

D'un point de vue physique, les hypothèses de base du modèle sont les mêmes (milieu bien mélangé, peu profond, ondes longues, etc...) que celles du modèle hydrodynamique. Le fait de respecter les hypothèses physiques de base nécessaires pour l'application d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel suffit à assurer la pertinence physique du modèle de transport-diffusion.

L'approche eulérienne est la seule qui permette de résoudre naturellement les équations de transport diffusion en tenant compte de plusieurs variables d'état simultanément. L'approche lagrangienne ne permet pas d'arriver à un tel résultat sans complications algorithmiques. La méthode de discrétisation retenue ici est la même que le modèle hydrodynamique, soit les éléments finis. Le modèle de transport de contaminants exploite les vitesses et les profondeurs de l'écoulement provenant du modèle hydrodynamique bidimensionnel de Saint-Venant. Cette approche nous permet d'exploiter principalement MODELEUR, pour prendre en compte les données de terrain projetées sur pratiquement la même grille de calcul que celle utilisée pour l'hydrodynamique en l'adaptant quelque peu si besoin. Pour répondre localement aux besoins de précision de l'application, il est possible de construire très rapidement un maillage adapté. Enfin, les diffusivités sont également calculées à partir des propriétés du champ de vitesse à l'aide de lois connues dans la littérature (Loi de Taylor, longueur de mélange).

6.3.2 Les lois de comportement incluses

Dans un cours d'eau, les phénomènes de transport-diffusion assurent le transport de contaminants qu'ils soient dissous dans la masse d'eau ou en suspension. Dans une optique de modélisation, il s'avère nécessaire d'identifier les formes de pollution les plus représentatives de la dégradation de

la qualité du milieu. Dans le contexte des débordements, le modèle devait être multiparamétrique et tenir compte simultanément des différents processus physico-chimiques ou biologiques qui peuvent intervenir lors du transport de ces polluants. Un exposé complet des travaux de recherche réalisés est disponible dans Bédard et coll. (1997). Ci-après, nous allons résumer les choix de variables et processus qui caractérisent DISPERSIM dans son état actuel.

L'injection de contaminants sur les limites et à l'intérieur du modèle bidimensionnel doit tenir compte des caractéristiques des émissaires ou des tributaires, de leur aspect transitoire, des débits impliqués et des concentrations des composants chimiques considérés, en somme des charges injectées. Au stade actuel de nos connaissances des besoins, le modèle numérique a été développé pour tenir compte d'au moins trois composants en interaction biochimique. Un des composants est particulaire, de taille très fine, et soumis aux lois de la déposition-dégradation. Peuvent être considérés comme tels les solides et la matière organique en suspension responsables de la turbidité, de la couleur, et de la qualité de l'eau à plusieurs niveaux. À partir de ces solides en suspension, un modèle de transport-dégradation a également été mis au point pour les coliformes fécaux en fonction des constantes climatiques et du milieu. Deux autres composants chimiques en solution sont transportés par le modèle numérique. Les cinétiques d'adsorption-dégradation-transformation du modèle chimique choisi sont également adaptées aux conditions du milieu, du substrat et des solides en suspension.

Les matières solides, parfois flottantes, ont une importance majeure relativement à la pollution par les eaux de débordement. En raison de leur concentration, les solides augmentent la turbidité du milieu et sont source de pollution esthétique. De plus, la forme particulaire des contaminants étant prédominante, les particules solides deviennent des vecteurs de pollution différée. La littérature dans le domaine nous enseigne que plus de 80% de la disponibilité biochimique en oxygène (DBO), de la demande chimique en oxygène (DCO), des métaux, des bactéries et des hydrocarbures sont fixés sur les solides de rejets pluviaux. Il était donc important de développer un modèle pouvant représenter le transport et la déposition de ces solides. En raison des faibles vitesses de courant prévalant en bordure des émissaires de débordement, les particules grossières sédimentent très rapidement. Ainsi, le transfert en aval de l'émissaire des contaminants s'effectue principalement par le biais de particules fines (diamètre inférieur à 100 μm). Ce sont ces particules qui présentent le plus d'intérêt en vue de la modélisation du panache d'effluent.

Le rejet d'eau anoxique à charge organique élevée se répercute par un déficit en oxygène dissous. Ce déficit étant révélateur de l'ampleur de l'impact, la représentation des concentrations en oxygène dissous constitue une priorité d'un modèle de qualité de l'eau. La prise en compte de la DBO est un corollaire de cette décision.

Les coliformes et micropolluants ont été aisément incorporés au modèle dans la mesure où leur dynamique a pu être isolée. Les coliformes constituent une source de nuisance directe donc à prioriser.

Les particules fines en suspension jouent un rôle important dans la turbidité et la qualité des eaux de débordement. Certains phénomènes s'y trouvent spécialement représentés: adsorption-désorption à moyen et à long terme, transport et transformation de la matière organique existante, etc... Les substances dissoutes dans l'eau ont leur propre cinétique de transformation en relation avec, par exemple, les caractéristiques du substrat, les solides en suspension ou les concentrations d'autres substances. Le modèle de transport de solides peut servir de base au modèle physico-

chimique de transport-diffusion des contaminants tels la DBO, les coliformes fécaux (représentatifs de la contamination bactérienne) ainsi que certains métaux et nutriments. Pour chaque type de contamination, l'équilibre adsorption-désorption basé sur des coefficients de partage permet d'évaluer la proportion des formes dissoute et particulaire. De plus, les cinétiques spécifiques de dégradation, de prolifération et de transformation sont intégrées au modèle.

En résumé, les cinq lois de comportement implantées comme termes de sources et puits dans DISPERSIM sont donc:

- les matières solides en suspension ;
- la DBO ;
- l'oxygène dissous ;
- les coliformes fécaux ;
- les micropolluants non conservatifs.

6.3.3 Résolution numérique

Comme nous l'avons vu précédemment, la résolution des équations de transport-diffusion peut être réalisée suivant deux approches distinctes: eulérienne et lagrangienne. Des recherches antérieures menées à l'INRS-Eau ont conduit à développer et comparer les deux approches. Dans un problème comme les débordements où des cinétiques chimiques sont considérées, les concentrations doivent être connues en tout temps. Il est établi qu'une résolution eulérienne, directement dans l'espace de la variable d'état, soit la concentration, s'impose dans ce cas. Les cinétiques de transformation des substances dissoutes dans l'eau, ainsi que les caractéristiques liées aux débordements des eaux usées en rivière justifient amplement l'utilisation de l'approche eulérienne de la modélisation numérique pour représenter les apports de polluants non-conservatifs et les phénomènes de transport-diffusion en rivière. Enfin, ajoutons que cette méthode de résolution est la plus appropriée pour traiter l'apport de volumes d'eau importants.

Étant donné l'état actuel de la recherche sur les modèles eulériens pour la convection-diffusion, le modèle numérique proposé consiste à utiliser l'approche classique de Galerkin et Crank-Nicholson résolue par la méthode des éléments finis adaptative à deux dimensions. Le choix adéquat de la formulation et des conditions aux limites permet de résoudre de façon simple, précise et stable les problèmes de transport même lorsque la convection est dominante. De plus, l'implantation de la procédure automatique de raffinement de maillage basée sur une estimation de l'erreur d'approximation améliore sensiblement la qualité de résultats. Pour la résolution du système d'équations, nous utilisons la même méthode itérative GMRES que dans HYDROSIM (même coquille FORTRAN).

6.4 Validations théoriques

Au cours du développement de DISPERSIM, et à l'instar de HYDROSIM qui appartient à la même famille, une part importante du travail a été consacrée à l'élaboration de tests de contrôle pour s'assurer de son bon fonctionnement. Pour prouver la valeur scientifique de l'outil, une batterie de tests académiques a été effectuée pour contrôler différents points. Une première catégorie de tests a été montée pour contrôler les risques d'erreurs de programmation. Il s'agit de tests dits académiques où on connaît exactement la solution du problème. Cet exercice permet de contrôler si tous les composants du modèle mathématique fonctionnent correctement. Pour des tests plus complexes où la solution analytique n'est pas accessible, on se réfère à ce qui a été produit dans la littérature scientifique. Dans ce qui suit on présente une partie des tests qui ont été effectués pour valider DISPERSIM.

6.4.1 Tests de contrôle de la programmation

Les tests de contrôle de programmation ont été effectués en régime permanent. Les tests ont visé à vérifier la conformité et les caractéristiques de convergence de l'élément fini sur un domaine carré. La fonction à calculer est connue et les termes de sources et puits sont ignorés. Le test visant à vérifier la convergence de l'élément a été effectué sur le cas bien connu et largement répandu dans la littérature de la convection stationnaire d'une distribution gaussienne de concentration. Ce test a permis également de valider la stabilité de la formulation de type Galerkin associée au traitement spécifique des conditions aux limites. Dans les trois cas, les résultats obtenus sur l'erreur entre les solutions analytique et numérique sont très satisfaisants tels qu'attendus en théorie.

6.4.2 Tests de propagation de fronts de concentration

Ensuite, un exercice de simulation de la convection d'un front de concentration sur un domaine carré a permis de contrôler le bon fonctionnement de l'ensemble du système à l'égard de la forme et de la disposition du front compte tenu de l'action des différents termes de sources et puits retenus à savoir :

- matières en suspensions cohésives ;
- matières en suspension non cohésives ;
- solides en suspension et métaux adsorbables ;
- oxygène dissous et DBO.

On ne peut cependant pas affirmer que tous les termes individuels de ces cinétiques et leurs interactions réciproques sont totalement validés quant à leur valeur pratique, cette conclusion

appartenant à la littérature empirique ayant présenté les connaissances utilisées. Quant à la fiabilité de la programmation de ces termes, l'absence de singularités numériques dans la solution une fois activés les termes de source et de puits nous rassure sur leur implantation. Une entreprise de validation plus poussée est complexe car les tests analytiques font défaut pour comparer avec les résultats numériques. Seule une validation terrain détaillée (ou en laboratoire) permettrait d'y arriver.

6.4.3 Tests en régime transitoire

En régime transitoire, les tests visés à vérifier la précision du schéma de discrétisation du temps par l'approche de Crank-Nicholson. En diffusion pure, le modèle se comporte de manière très satisfaisante. En convection pure, le problème est plus délicat. En outre, le test de convection d'un front de concentration dans un canal droit a été exploité. Ce test sévère, qui consiste à transporter un champ de concentration discontinu, et reconnu comme tel dans la littérature a permis de vérifier que le modèle était capable de transporter une discontinuité. Il reste que les oscillations parasites qui apparaissent peuvent être amorties avec un raffinement du maillage et/ou du pas de temps.

Suite aux tests réalisés, on en arrive à la déduction que le modèle de transport-diffusion est fiable. Les termes puits et sources sont correctement implantés dans le modèle et que la résolution simultanée de plusieurs variables s'effectue convenablement. Les résultats génériques de cette recherche relatifs à la résolution des phénomènes de transport-diffusion ont été publiés dans le très réputé *International Journal for Numerical Method in Engineering* (Padilla et coll., 1997).

6.5 Validations terrain

La validation terrain d'un modèle eulérien de transport-diffusion (excluant les sources et les puits) s'effectue à l'aide de tests de traçage. Des mesures de concentration sont collectées dans un panache de traceur, généralement de la rhodamine WT. Des transects sont réalisés en divers endroits du panache à des moments propices correspondant à des états de concentration bien établis (régime permanent). Les critères d'évaluation des résultats des panaches simulés par rapport aux mesures touchent dans ce cas l'évolution longitudinale du maximum de concentration ainsi que l'emprise transversale. Si le test s'effectue en berge, la position du maximum est généralement collée à celle-ci et ne représente pas une variable à considérer pour la validation. Une des difficultés d'une telle validation consiste à assurer l'homogénéité des ensembles de données qu'on veut comparer. Ajoutons qu'il est particulièrement nécessaire de valider le modèle hydrodynamique au préalable, surtout dans la région de la berge du cours d'eau où sont déversées les trop-pleins, car c'est en fonction des gradients de vitesse simulés que sont établies les coefficients de diffusion du modèle de transport.

Jusqu'à présent deux études sur des cas réels ont permis de mettre à l'épreuve le potentiel de DISPERSIM.

6.5.1 Rivière des Prairies : validation à la rhodamine

En vue de tester les algorithmes de transport-diffusion, l'INRS-Eau en collaboration avec Asseau (Bédard et coll., 1997) a mené à bien une étude sur la rivière des Prairies, cours d'eau séparant l'île de Montréal et l'île Jésus (Laval). Prises d'eau, barrage, marinas, parcs, frayères, et zone de pêche récréative sont les principaux usages et aménagements qu'on y retrouve. Cependant les rejets aux émissaires des réseaux d'égout de la CUM et de la municipalité de Laval détériorent la qualité de l'eau de la rivière. L'objectif de l'étude consistait à étudier la propagation des masses d'eau débordées en temps de pluie. Des essais de courantométrie et de diffusion ont été effectués au droit des émissaires de débordement du réseau d'égout de Laval. Les mesures prélevées à partir de l'injection de rhodamine ont permis de valider avec succès les résultats de simulation. Remarquons au passage que la rhodamine est une substance chimique conservative qui permet de valider uniquement les opérateurs de transport-diffusion du modèle mathématique.

6.5.2 Lac Saint François : validation des sources et puits

C'est sur le lac Saint-François (fleuve Saint-Laurent) qu'un premier exercice de validation qualitatif de la cinétique des matières solides en suspension a été amorcé tout récemment dans le cadre d'un projet de recherche financé conjointement par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG), le Conseil de Recherche en Sciences Humaines (CRSH) et le Conseil en Recherche Médicale (CRM) (les travaux de Morin; voir la bibliographie en annexe).

Le lac Saint-François s'étend sur 60 km de large, 8 km de large en moyenne et 254 km² de superficie. La topographie du domaine est complexe avec des hauts fonds, un réseau entrelacé de chenaux et un chenal de navigation maritime creusé de main d'homme. Les variations de vitesses y sont importantes spécialement dans le chenal de navigation. De plus on compte une abondante végétation aquatique qui peut occuper en fonction des saisons une part importante de la colonne d'eau. Un des objectifs de cette étude consistait à identifier les zones de déposition des nutriments associés avec les matériaux en suspension et, en corollaire, à connaître la quantité de matières en suspension pour identifier la quantité de lumière disponible au fond pour la végétation aquatique.

Le traitement des données de terrain a été effectué avec MODELEUR et l'hydrodynamique particulièrement complexe a été simulée avec HYDROSIM. La quantité de matières en suspension a donc été calculée avec DISPERSIM sur la base du modèle numérique de terrain et de l'hydrodynamique produits par les outils développés. La confrontation qualitative entre les résultats numériques et les mesures *in situ* de profondeurs SECHI qui permettent de mesurer la transparence de l'eau et par conséquent d'évaluer la quantité de lumière au fond s'est avérée concluante. Remarquons au passage, qu'étant donné l'envergure des simulations les calculs de l'hydrodynamique et des concentrations ont été effectués sur les puissants calculateurs d'Environnement Canada ce qui démontre, si besoin est, que les outils MÉTRIQUE sont conçus pour fonctionner sur différentes plates-formes.

6.6 Potentiels complémentaires

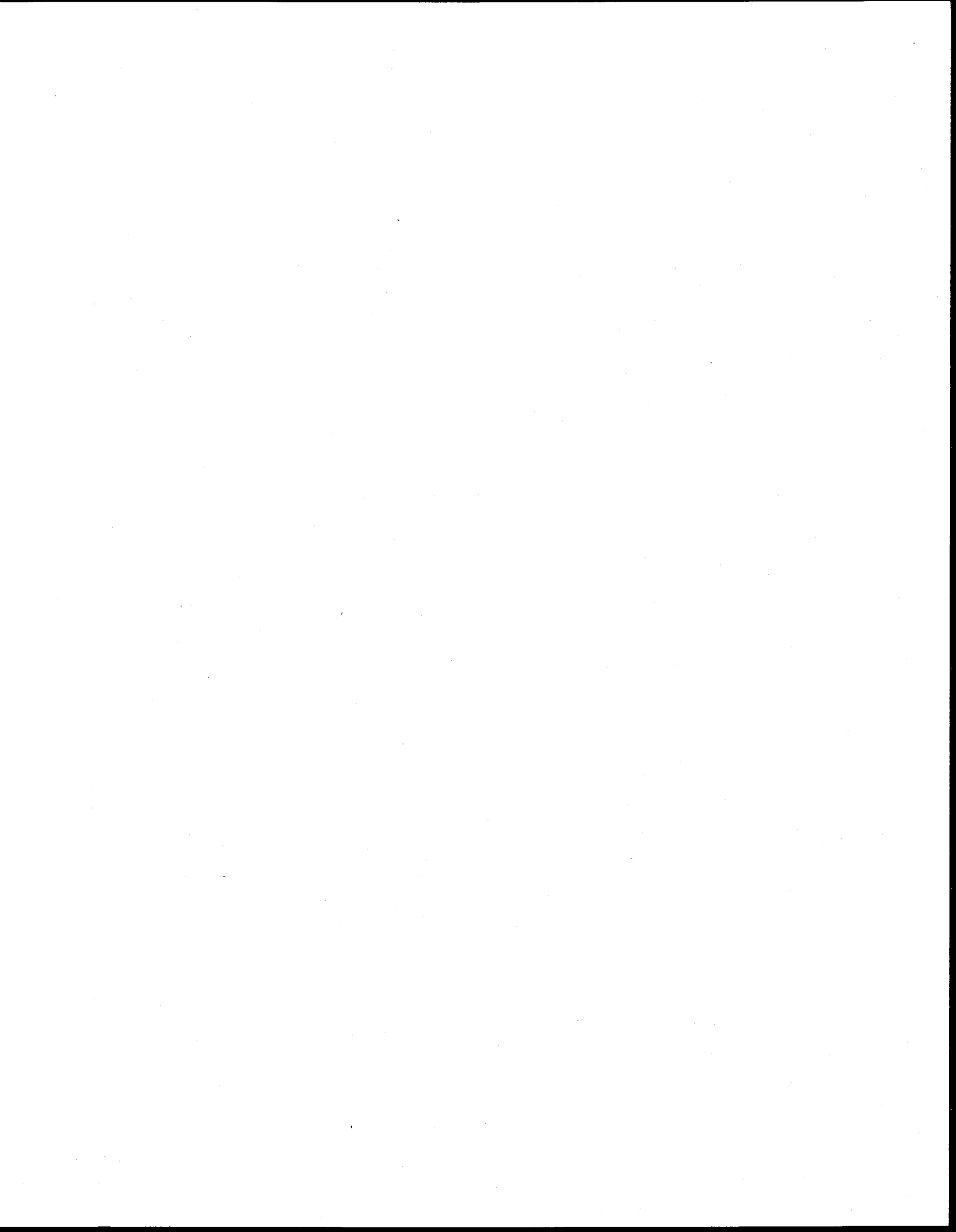
Une autre voie également qui sera très intéressante à explorer dans les années futures est celle concernant la saturation de l'azote dissous dans l'eau. Ce contexte a été abordé au début du chapitre. Les lois de comportement étant bien connues, il est envisageable d'ajouter cette fonctionnalité dans DISPERSIM. Elle sera nécessaire puisque l'INRS-Eau est appelé très prochainement à coopérer avec un organisme sud américain dans le domaine de la gestion de complexes hydroélectriques pour une étude d'impact sur la qualité de l'eau et en corollaire sur l'habitat des poissons.

6.7 Pourquoi pas un logiciel ?

Aucune interface usager n'a encore été déterminée pour DISPERSIM principalement parce que les contextes d'utilisation sont trop variés et pas encore génériques. La valeur générale d'un outil ne peut être obtenue que si le nombre d'utilisateurs le justifie ce qui n'est aucunement le cas actuellement pour les contextes identifiés. La généralisation de l'utilisation peut aussi être obtenue par une réglementation qui en impose l'usage comme ce fut le cas pour les test de traçage reliés à la décontamination des effluents des papeteries (les ESEE évoqués plus tôt).

Cependant, les processus génériques de DISPERSIM pourraient être incorporés dans une interface qui ressemblerait à celle d'HYDROSIM, mais la diffusion d'un tel logiciel demeurerait d'un intérêt très limité étant donné l'absence de lois de comportement permettant de contextualiser les simulations. Il reste que cette situation ne pourra pas durer étant donné que des besoins importants se profilent dans un horizon proche. Il faudra sérieusement songer et dès à présent à réfléchir à une interface usager au même titre que celle développée pour HYDROSIM et HABIOSIM

Il serait certainement approprié d'explorer l'implantation d'un module complémentaire à DISPERSIM qui permettrait à l'utilisateur d'implanter lui-même des lois de comportement permettant de réaliser des implantations particulières. Une telle éventualité est beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît et l'on comprendra qu'un tel développement ne pourrait être réalisé que dans un futur projet.



7. Les acquis complémentaires - Le génie logiciel

Le développement de logiciel en équipe et pour de gros projets doit se faire de manière coordonnée, en respectant les règles du génie logiciel. Nous engageant dans un projet d'envergure, nous avons mis en place des mécanismes permettant de contrôler le développement du code informatique, d'en assurer la qualité et la pérennité une fois que ses artisans auraient quitté l'équipe de développement.

Nous présenterons dans cette section les différents choix réalisés tant au niveau du cycle de construction des logiciels (phase d'analyse, de codage, de test, etc..) que plus directement au niveau de l'écriture du code (normes de programmation, application de la théorie du contrat, inspection de code, etc.).

Nous avons développé une solide expertise tout au long du projet au cours duquel l'équipe de développement a compté jusqu'à 18 personnes. Des façons de faire ont été élaborées et adaptées et des outils innovateurs ont été développés pour soutenir et aider les programmeurs, faciliter la compréhension des quelques 700 classes d'objet format la librairie de modules que nous gérons.

7.1 Environnement de développement

Toutes les machines de développement sont connectées à un réseau Windows-NT qui dispose également d'un serveur et de machines dédiées pour la compilation. Le serveur est la source pour tous les fichiers mis en commun, qui sont principalement :

1. la base de données du système de contrôle de révision du code (RCS) ;
2. la dernière version du code ;
3. la dernière version des librairies ;
4. la version actuelle des librairies externes.

Chaque machine est configurée de la même façon, selon une structure de répertoire standard. Un développeur a une machine assignée, mais peut travailler en réseau sur n'importe quelle machine du groupe.

Les machines dédiées à la compilation sont actuellement au nombre de trois, soit une machine par système d'exploitation supporté (Windows NT 3.51, Windows NT 4.0 et Windows 95/98). Elles permettent non seulement de réaliser une compilation indépendante pour chaque plate-forme,

mais surtout de conduire les batteries de tests dans chaque environnement. Chaque machine dédiée est également équipée de plusieurs compilateurs Borland/Inprise C++ 5.0 (le compilateur de base), Borland/Inprise C++ 5.2, Watcom C++ 11.0 ou encore EGCS 1.1.

L'ensemble des informations sur le projet est rassemblé sur un site Web dédié au projet (voir la bibliographie à la fin et WEB++ plus loin) et géré par le serveur. Sur ce site, on retrouve :

1. le catalogue des classes ;
2. la liste des erreurs de compilation pour chaque plate-forme et pour chaque compilateur ;
3. la liste des bogues rapportés par les utilisateurs.

Une série de tâches est effectuée automatiquement chaque nuit pour garantir que les développeurs trouvent au début de leur travail un environnement de développement à jour :

1. les scripts de compilations sont régénérés pour tenir compte des fichiers ajoutés ou enlevés ;
2. le code au complet est mis à jour sur les machines dédiées à partir de la base de données RCS ;
3. le code au complet est recompilé et les bibliothèques régénérées ;
4. les exécutables sont liés (link) ;
5. les résultats de compilations et de link sont transférés sur le site Web du serveur ;
6. si le link s'est fait avec succès, alors le serveur est remis à jour puis les machines de développement sont remises à jour ;
7. le catalogue des classes du site Web du serveur est régénéré.

7.2 Écriture de code - Outils de développement

L'écriture du code doit se faire en respectant un ensemble de règles codifiées et réunies dans des normes de programmation. Celles-ci assurent que le code est dépersonnalisé afin d'en faciliter la compréhension par tous et la maintenance à long terme. Elles assurent également la cohérence de présentation du code quel que soit le nombre de programmeurs et évitent les erreurs communes. Nous avons élaboré nos propres normes de programmation et celles-ci ont été consignées dans Secretan et Roy (1996).

De plus, tout notre code est écrit en accord avec la « théorie du contrat » proposée par Bertrand Meyer. Nous avons dû adapter cette théorie aux spécificités du C++. En gros, la théorie du contrat considère un appel de fonction comme un contrat qui est passé entre le code appelant et la fonction appelée. Cette dernière doit garantir un résultat pour autant que les données qui lui sont passées sont admissibles et cohérentes. Le contrat est renforcé par une série de tests :

1. les *pré-conditions* qui doivent être respectées par le code appelant ;

2. les *post-conditions* qui sont la garantie que la fonction appelante a fait sa part du contrat ;
3. les *invariants de classes* qui spécifient les états valides des objets transigés.

L'utilisation systématique de la théorie du contrat permet de détecter très tôt dans le cycle de vie du logiciel plusieurs erreurs de programmation. Elle augmente la robustesse du code par un mécanisme d'auto-détection d'erreurs et accroît par là même la confiance dans le code.

Afin de supporter et de faciliter l'écriture de code et la détection des erreurs, nous avons développé un certain nombre d'utilitaires :

1. une *interprétation de la pile d'appel* : lors d'une erreur fatale, on imprime dans un fichier de « log » (log file) la pile d'appels, donc, la suite des fonctions qui a amené à l'erreur. Couplé à la théorie du contrat, c'est un outil puissant pour détecter rapidement la source d'un problème.
2. un *outil de validation de l'allocation mémoire* : les logiciels modernes sont tous basés sur une utilisation dynamique de la mémoire. Encore faut-il que le programmeur gère correctement cette ressource, la libérant après utilisation et ne réutilisant pas de la mémoire désallouée. L'outil développé valide l'utilisation de la mémoire et détecte automatiquement nombre de bogues de ce type qu'il est autrement très difficile de trouver car ils sont souvent aléatoires.
3. un *profileur* (profiler) qui permet de déterminer le temps machine passé dans chaque fonction du logiciel. C'est un outil indispensable pour optimiser le code au bon endroit.
4. un *outil de traçage* : en instrumentant le code avec cet outil, on peut suivre d'appel de fonction en appel de fonction l'exécution du code.

L'utilisation conjointe et systématique de ces façons de faire permet d'obtenir rapidement un haut niveau de confiance dans le code. C'est la validation par les utilisateurs qui permet de détecter les autres classes d'erreur.

7.3 Gérer le développement logiciel - Organisation de groupe

Traditionnellement, la répartition des tâches de développement de logiciel se fait par spécialisation des intervenants: l'analyse, la programmation, les tests, etc. Notre expérience a montré qu'il est avantageux et plus valorisant de ne pas spécialiser les personnes, mais plutôt d'attribuer à chacun un problème complet, celui-ci étant en charge de tous les aspects, tant l'analyse que les tests des composantes produites.

Afin de profiter de l'expérience des personnes plus expérimentées, l'analyse se fait en petit groupe comprenant le responsable du problème et généralement deux seniors. Les juniors profitant ainsi de leur expérience, l'analyse se fait avec une vision plus large de la problématique ce qui garantit que le design s'intégrera bien au code existant.

Le responsable du problème doit écrire un rapport de séance d'analyse. Ce rapport, qui est révisé par les autres participants, garde l'historique des décisions qui sont prises ainsi que leurs

justifications. Il doit bien présenter la philosophie de conception plutôt que les détails qui, eux, changent souvent en cours d'implantation.

7.4 Outils développés

Différents outils ont été développés soit pour analyser le code, générer de la documentation automatiquement ou encore aider dans l'exécution des tâches fastidieuses.

7.4.1 WEB⁺⁺

Web⁺⁺ est un outil de documentation qui analyse du code C⁺⁺. Il produit un catalogue des classes sous forme de pages WWW. Web⁺⁺ produit une page WWW principale - page_principale.htm - qui donne accès à deux vues:

1. une liste alphabétique des classes
2. une liste hiérarchique des classes

A l'aide d'hyperliens, on peut naviguer dans ces pages et accéder la page d'une classe en particulier. En effet, pour chaque classe, Web⁺⁺ produit:

1. des liens vers les fichiers contenant le code ;
2. des liens vers le ou les parents ;
3. des liens vers le ou les héritiers ;
4. la liste des attributs ;
5. la liste des méthodes avec accès direct sur le code de la méthode.

Le fichiers de code (*.h ; *.hpp ; *.cpp) sont présentés avec un coloriage de la syntaxe qui fait ressortir la structure du code. De plus, tous les liens vers des classes ou d'autres fichiers sont résolus ; ceux-ci deviennent dès lors accessibles par hyperliens.

Web⁺⁺ peut aussi extraire les commentaires du code C⁺⁺ pourvu que l'on adopte certaines normes concernant la présentation des commentaires dans le code.

Web⁺⁺ s'est révélé un outil indispensable. Il permet non seulement de maintenir la documentation sur le code à jour (le code est « parsé » chaque nuit) mais encore, il offre une vue d'ensemble sur le code avec un moyen efficace de naviguer entre les quelques 700 classes du projet.

Web⁺⁺ est mis à disposition du grand public sur notre page Web (<http://opinaca.inrs-eau.quebec.ca/logiciels/index.html>). Des centaines de demandes de téléchargement de cet outil ont été satisfaites depuis que l'outil a été mis à la disposition du réseau internet.

7.4.2 DEPEND

Le couplage qui existe entre les différentes classes peut rapidement devenir un problème lorsque le nombre de fichier augmente (près de 3000 fichiers dans notre cas !). Il limite la possibilité de découper le code en groupes indépendants. Un changement dans un fichier force la recompilation d'un trop grand nombre de fichiers.

DEPEND analyse le code et détermine les liens minimum à maintenir. Pour ce programme, on a directement réutilisé les fonctionnalités d'analyse de code développées pour Web⁺⁺.

7.4.3 GENTEST

GENTEST permet de générer automatiquement à partir de la déclaration d'une classe C⁺⁺ le canevas nécessaire à un test unitaire. Pour ce programme, on a directement réutilisé les fonctionnalités d'analyse de code développées pour Web⁺⁺. La génération automatique impose une unité de présentation et une façon de faire.

7.4.4 METRIX

METRIX est un programme qui analyse le code C⁺⁺ des méthodes d'une classe et qui produit un diagnostic quand à la complexité et la lisibilité du code, et donc à la facilité de maintenance de celui-ci. Il teste différentes variables comme :

- le nombre de paramètres d'appel
- le niveau maximum d'imbrication
- la complexité
- le nombre de lignes de codes et de commentaires
- le nombre de points de sortie

Des critères d'évaluation basés sur ces variables permettent de tirer des conclusions utiles pour la simplification du code

7.5 Tests

La production de logiciels de qualité passe par différentes étapes de validation qui comprennent les tests unitaires, la révision de code et les test d'intégration.

Le test unitaire est la première étape de test dans le processus de développement. Il est aussi en relation directe avec la révision de code de la classe. La révision de code de la classe ne peut être faite sérieusement si les tests unitaires n'ont pas encore été réalisés.

Les tests permettent également de s'assurer que le code, dans l'ensemble, ou au niveau de ses composantes individuelles, corresponde toujours aux spécifications fonctionnelles adoptées au préalable.

7.5.1 Test unitaire

Le test unitaire des composantes logicielles est une étape importante du processus menant à des programmes de qualité. Il s'agit d'écrire un programme utilisant la classe à tester sous toutes ses facettes. Il faut essayer toutes ses méthodes l'une après l'autre en essayant de tester tous les cas limites et les cas normaux d'exécution.

Nous nous sommes demandés au départ si nous devons adopter une approche de type "black box" ou de type "white box". Avec un test "black box", il s'agirait de passer par l'interface publique et de vérifier les résultats de l'appel par une vue publique. Un test "white box" permettrait au contraire de s'intéresser à ce qui se passe à l'intérieur de la classe lorsqu'on appelle une méthode.

Notre première impression a été d'essayer d'implanter des tests de type "white box" qui auraient eu accès à tous les attributs de classes leur permettant de jouer leur rôle d'observateur. On a toutefois rapidement constaté que le rôle d'observateur à l'interne était déjà occupé par les préconditions, les postconditions et les invariants de classe.

On a donc constaté que l'application de la théorie du contrat réalisait déjà toute la fonctionnalité de tests à l'interne de la classe. Le rôle du test unitaire a donc été réorienté vers un rôle de type "black box". On conclut donc qu'il faut laisser activés les préconditions, les postconditions et les invariants de classe, et de manière externe, appeler toutes les méthodes publiques de la classe avec des valeurs limites et des cas normaux d'utilisation. On va pour chaque appel vérifier que l'opération s'est déroulée correctement en utilisant les assertions qui sont définies de la même manière que les préconditions et les postconditions.

On réalise un gain très important en concevant le test de cette façon puisqu'on utilise les mêmes médiums. En effet, lorsqu'une précondition, une postcondition ou un invariant échouent, une mécanique de rapport d'erreur est mise en route, on avertit l'utilisateur et on écrit l'erreur dans un fichier standard. En utilisant les assertions dans nos tests unitaires, on passe par la même mécanique de base.

Le test unitaire devient alors un travail de collaboration: on appelle une méthode avec des valeurs non valides, les préconditions s'en chargent; on appelle une méthode avec des valeurs correctes, les postconditions vérifient le comportement interne et les assertions corroborent ce fait d'une inspection externe de l'objet. Le rôle global du test unitaire est de forcer le passage dans tous les chemins de code possibles de la classe.

7.5.2 Révision formelle de code

Le rôle de la révision formelle de code est de faire valider la programmation par des pairs seniors. Cette correction assure que:

1. le code est compréhensible ;
2. le code est réutilisable ;
3. le code compile sans erreurs et sans mises en garde ;
4. les commentaires sont pertinents ;
5. les normes de programmation ont été respectées ;
6. l'implantation correspond au design ;
7. les invariants, pré- et post-conditions sont pertinents.

C'est uniquement lorsque cette étape est franchie que la ou les classes sont intégrées au reste du code.

7.5.3 Test d'intégration

Le test d'intégration, comme son nom l'indique, teste l'intégration de plusieurs composantes en un module indépendant et cohérent. Nous avons réalisé deux types de test d'intégration :

1. un *programme de tests pour la base de données* : suivant la même philosophie que les tests unitaires, on écrit un test d'intégration qui exerce un module à partir de son interface publique. Le programme appelle toutes les méthodes publiques avec des valeurs limites et des cas normaux d'utilisation. On va pour chaque appel vérifier que l'opération s'est déroulée correctement en utilisant les assertions qui sont définies de la même manière que les préconditions et les postconditions.
2. des tests par des *scripts Visual-Test des logiciels au complet* : les logiciels au complet sont exercés à partir des interfaces graphiques à l'aide d'un programme qui permet de contrôler la réponse du logiciel.

7.5.4 Automatisation des tests

Idéalement, les tests devraient être réalisés à tous les jours, à chaque fois qu'il y a un changement dans le code. Nous n'y sommes que partiellement arrivés. L'environnement de test Visual-Test n'a jamais été suffisamment stabilisé pour permettre une exécution automatisée. Néanmoins, les tests existent et tous les logiciels ont passé par tous les tests avant la construction des versions successives déjà livrées.



8. Communications et publications produites

Cette section est consacrée à la présentation de la liste des cinquante six (56) communications et publications produites directement ou suite à des travaux de recherche basé sur l'utilisation des outils développés dans le cadre du projet MÉTRIQUE.

8.1 Sites web

.INRS-Eau (1997). Projet MÉTRIQUE, <http://opinaca.inrs-eau.quebec.ca>,

.INRS-Eau (1997). Simulation des crues du Saguenay, <http://opinaca.inrs-eau.quebec.ca/saguenay>

8.2 Documents écrits²

Bédard, S. (1997). *"Développement d'un modèle de transport-diffusion applicable aux rejets urbains de temps de pluie"*. Mémoire de maîtrise INRS-Eau No. 432, 191 pages, mars.

Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V.D. & Leclerc M. (1997). *"Méthode hydroécologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec"*. Rapport scientifique INRS-Eau 494 conjointement avec le Groupe conseil Génivar, le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et le Ministère des Pêches et Océans du Canada., 90 pages, janvier.

Boudreau, P., Leclerc, M., Morin, J. & Bouchard, D. (1998). *"Optimisation de la solution à un épi visant la restauration de la plage de la baie De La Faim, lac Saint-François"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. 537, 45 pages, novembre.

Boudreau, P. (1997). *"Projet de modélisation du fleuve St-Laurent"*. Séminaire du mercredi midi de l'INRS-Eau, novembre.

Boudreau, P., Bourgeois, G., Leclerc, M., Boudreault, A. & Belzile, L. (1996) *"Two dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution : application to juvenile atlantic"*

² (par ordre alphabétique des auteurs)

- salmon of Moisie River (Québec, Canada)*". Dans le compte rendu de la conférence Ecohydraulique 2000, Québec, Canada, juin.
- Boudreau, P., Morin, J., Secretan, Y., Leclerc, M., Drapeau, G. & Chiasson, Y. (1995). "*Étude par modélisation hydrodynamique de solutions visant la restauration de la plage de la baie De La Faim, lac Saint-François*". Rapport scientifique INRS-Eau No. 437, 40 pages, mars.
- Bourgeois, G., Boudreau, P., Boudreault, A. & Leclerc, M. (1996). "*Modélisation de l'habitat salmonicole au site Taoti sur la rivière Moisie*". Rapport présenté par la Groupe conseil Génivar et l'INRS-Eau à la Vice-Présidence Environnement d'Hydro-Québec
- Doyon, B. (1997). "*Modélisation en crue du secteur des Islets sur la rivière Montmorency*". Séminaire du mercredi midi de l'INRS-Eau, novembre.
- Fortin, P. (1997). "*Collecte des données pour un modèle du Saint-Laurent*". Séminaire du mercredi midi de l'INRS-Eau, décembre.
- Gauthier, Y., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1997). "*Construction d'un modèle numérique d'élévation pour l'analyse de crues majeures à l'aide du logiciel MODELEUR*". Dans le compte rendu du 9ème Symposium International de Géomatique, Ottawa, Canada, mai.
- Heniche, M., Secretan, Y., Boudreau, P. & Leclerc, M. (1999). "*A two dimensional finite element drying-wetting model for rivers and estuaries*". Advances Water Resources Eng., article accepté pour publication.
- Heniche, M., Secretan, Y. & Leclerc M. (1999). "*HYDROSIM : guide d'utilisation. Document HYDROSIM1.0a06*". Document INRS-Eau R482-G2, janvier.
- Heniche, M., Secretan, Y. & Leclerc M. (1998). "*Efficient ILU preconditioning and inexact-Newton-gmres to solve the 2-D steady shallow water equations*". Rapport scientifique INRS-Eau, R482-NT1, 53 pages, mars.
- Heniche, M. (1997). "*Simulation hydrodynamique des crues du Saguenay*". Séminaire du mercredi midi de l'INRS-Eau, octobre.
- Heniche, M. (1997). "*Un nouvel algorithme pour le modèle couvrant-découvrant en hydrodynamique 2D*". Séminaires du GIREF, Québec, Canada, 31 janvier.
- Heniche, M. & Secretan, Y. (1996). "*HYDROSIM : spécifications fonctionnelles*". Rapport INRS-Eau pour le compte de HMS-Énergie.
- INRS-Eau (1997). "*Simulation hydrodynamique et bilan sédimentaire des rivières Chicoutimi et des Ha !Ha ! lors des crues exceptionnelles de juillet 1996*". Rapport scientifique INRS-Eau No. R487, travaux réalisés pour le compte de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, 207 pages, janvier.
- Lafleur, J. (1997). "*Comparaison de deux approches pour la modélisation des microhabitats*". Mémoire de maîtrise INRS-Eau No. 447, 90 pages, août.

- Lapointe, M., Secretan, Y., Driscoll, S., Bergeron, N. & Leclerc, M. (1998). *"Response of the Ha! Ha! River to the flood of July, 1996, in the Saguenay Region of Québec: Large-scale avulsion in a glaciated valley"*. Water Resources Research, 34(9):2383-2392.
- Leclerc, M., Doyon, B., Secretan, Y. & Ouarda, T. (1999). *"Analyse de risque d'inondations, la technique du pre-mortem appliquée à la rivière Montmorency"*. Conférence midi de l'INRS-Eau. février.
- Leclerc, M. (1999). *"L'analyse de risque des inondations dans le secteur des îlets, rivière Montmorency"*. Conférencier invité devant le Conseil municipal et les services techniques de la Ville de Beauport, janvier.
- Leclerc, M. (1998). *"La face cachée des inondations"*. Invité dans le cadre du cours Risques géologiques environnementaux (SCT 8400), Université du Québec à Montréal(UQAM), 11 novembre.
- Leclerc, M. & Boudreau, P. (1998). *"Reconstitution topographique et simulation hydrodynamique des biefs de Chute Garneau et de Pont-Arnaud à l'état naturel"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. 527, travaux réalisés pour le compte du Service du Contentieux d'Hydro-Québec dans le cadre de la cause American Home Insurance Co. et autres contre Hydro-Québec et autres, Cour supérieure de Chicoutimi :150-05-000594-970, 110 pages, mars.
- Leclerc, M., Doyon, B., Secretan, Y., Heniche, M., Lapointe, M. & Boudreau, P. (1998). *"Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R522, pour le compte de la Ville de Beauport, 120 pages.
- Leclerc, M. & Lafleur, J. (1997). *"The Fish Habitat Modeling with Two-Dimensional Hydraulic Tools: a Worthwhile Approach for Setting Minimum Flow Requirements ?"*. Dans le compte rendu de la conférence Instream & Environmental Flow Symposium, Houston, Texas, USA, décembre.
- Leclerc, M. (1997). *"Une approche distribuée pour l'estimation des dommages en plaine inondable"*. Séminaire du mercredi midi de l'INRS-Eau, décembre.
- Leclerc, M., Marion, J., Heniche, M., Ouarda, T. & Secretan, Y. (1997). *"Prédiction des dommages résidentiels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi et aux Sables et du lac Kénogami"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R511, travaux réalisés pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 108 pages, octobre.
- Leclerc, M., Secretan, Y., Roy, Y. & coll. (1997). *"Projet MÉTRIQUE. Rapport d'étape #4 : Logiciel MODELEUR/HYDROSIM"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R482-B, pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, service du Fond de Recherche et de Développement Technologique en Environnement (FRDTE), 136 pages, octobre.

- Leclerc, M., Ouarda, T., Secretan, Y., Heniche, M., Morin, G., Fortin J.P., Lapointe, M. & Morin, J. (1997). *"Towards a comprehensive multidisciplinary modeling approach for flood plain management in the perspective of sustainable development"*. Dans le compte rendu de la conférence International Seminar of Water Resources Management, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Toluca, Mexique, 85-117, mars.
- Leclerc, M., Bechara, J., Boudreau, P. & Belzile, L. (1996). *"A numerical method for modeling the spawning habitat of landlocked salmon"*. *Regulated Rivers : Research and Management*, 12 : 273-285.
- Leclerc, M., Secretan, Heniche, M., Y., Roy, Y. & coll. (1996). *"Projet MÉTRIQUE. Rapport d'étape #3 : Bilan scientifique"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R482, pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, service du Fond de Recherche et de Développement Technologique en Environnement (FRDTE), 237 pages, septembre.
- Leclerc, M., Secretan, Y., Roy, Y. & coll. (1996). *"Projet MÉTRIQUE. Rapport d'étape #2 : État d'avancement des travaux"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R481, pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, service du Fond de Recherche et de Développement Technologique en Environnement (FRDTE), 36 pages, mars.
- Leclerc, M., Roy, Y. & Secretan, Y. (1995). *"Projet MÉTRIQUE. Rapport d'étape #1 : Analyse des besoins"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. R457, pour le compte du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, service du Fond de Recherche et de Développement Technologique en Environnement (FRDTE), 79 pages, décembre.
- Leclerc, M., Boudreault, A., Bechara, J. & Corfa, G. (1995). *"Two dimensional hydrodynamic modelling: a neglected tool in the Instream Flow Incremental Methodology"*. *Transactions of the American Fisheries Society*. 124(5) : 645-662.
- Morin, J. & Leclerc, M. (1998). *"From pristine to present state : hydrology evolution of Lake Saint-François, St. Lawrence River"*. *Can. J. Civ. Eng.* 25 : 864-879.
- Morin, J., Boudreau, P., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1998). *"Pristine Lake Saint-François, St. Lawrence river : Hydrodynamic Simulation & Cumulative Impact"*. Manuscrit soumis à *Journal of Great Lakes Research*, septembre.
- Morin, J., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1998). *"Hydrodynamic modeling of pristine Lake Saint-François, St. Lawrence river : cumulative anthropic impact"*. Communication présentée à la conférence annuelle conjointe GAC-MAC, Québec, Canada, mai.
- Morin, J., Leclerc, M., Secretan, Y., Mingelbier, M. & Cantin, J.-F. (1998). *"A new way of seeing the river : multidimensional aspects of the St-Lawrence physics and habitat. Sharing Knowledge, linking sciences : The St. Lawrence River -from research to remedies"*. Communication présentée à la conférence annuelle sur la réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent, Cornwall, Ontario, Canada, avril à mai.
- Morin, J., Boudreau, P., Cantin, J. F., Secretan, Y., Heniche, M. & Leclerc, M. (1998). *"Atlas des courants du fleuve Saint-Laurent - Lac Saint-François"*. En collaboration avec Environnement Canada (Environnement atmosphérique).

- Morin, J., Lafleur, J., Côté, S., Boudreau, P. & Leclerc, M. (1997). *"Integrated hydrodynamic, waves and plant habitat modeling for shoreline restoration on Clark Island, Lake St. Francis"*. Rapport scientifique INRS-Eau No. 503, pour le compte de Tecsubt Environnement Inc., 46 pages, juillet.
- Morin, J., Leclerc, M., Secretan, Y., & Boudreau, P. (1996). *"Integrated two-dimensional modeling: application to Lake Saint-François (St. Lawrence river, Québec, Canada)"*. Dans le compte rendu de la conférence Ecohydraulique 2000, Québec, Canada, juin.
- Morin, J., & Leclerc, M. (1996). *"Control on Lake St. Francis water levels and flow discharge: historical perspective and impacts"*. Communication présentée à la conférence annuelle sur la réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent, Cornwall, Ontario, Canada, mai.
- Morin, J., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1996). *"Lake St. Francis as no one has seen it before: a detailed bathymetric map"*. Poster présenté à la conférence annuelle sur la réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent, Cornwall, Ontario, Canada, mai.
- Morin, J., Boudreau, P., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1996). *"Distribution des plantes aquatiques du lac Saint-François: l'effet sur l'écoulement"*. Communication présentée à la conférence annuelle sur la réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent, Cornwall, Ontario, Canada, mai.
- Padilla, F., Secretan, Y., & Leclerc, M. (1997). *"On open boundaries in the finite element approximation of two-dimensional advection-diffusion flows"*. Int. J. Num. Meth. Eng. 40(13).
- Roy, Y., Secretan, Y. & coll. (1999). *"MODELEUR: guide d'utilisation. Document MODELEUR 1.0a01"*. Document INRS-Eau R482-G1, janvier.
- Roy, Y. (1997). *"Organisation d'un environnement professionnel de développement de logiciel"*. Séminaire mercredi midi de l'INRS-Eau, octobre.
- Secretan, Y., & Leclerc, M. (1998). *"MODELEUR: a 2D hydrodynamic G.I.S. and simulation software"*. Dans le compte rendu de la conférence IAHR Hydroinformatics 98, Copenhague, Danemark, août.
- Secretan, Y. (1997). *"La place du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans la modélisation hydrodynamique numérique"*. Séminaire mercredi midi de l'INRS-Eau, octobre.
- Secretan, Y. (1997). *"Eléments finis, programmation orientée-objet, logiciels scientifiques: l'expérience de l'INRS-Eau"*. Conférencier invité à la 8ème journée des éléments finis du GIREF, Québec, Canada, mai.
- Secretan, Y. (1997). *"Eléments finis en C++: une approche inspirée des STL"*. Séminaires du GIREF, Québec, Canada, février.
- Secretan, Y. (1996). *"Programmation orientée-objet et logiciels de calcul par éléments finis"*. Séminaire international, Université de Franche-Comté, Besançon, France, octobre.

Secretan, Y., & Roy, Y. (1996). "*Normes de programmation*". Rapport interne INRS-Eau I143, 20 pages.

Secretan, Y. (1995). "*Eléments Finis avec classe(s)*". Séminaires du GIREF, Université Laval, Québec, Canada, mars.