

Record Number: 11080
Author, Monographic: Leclerc, M.//Roy, Y.//Secretan, Y.
Author Role:
Title, Monographic: Projet *MÉTRIQUE* : 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.
Rapport d'étape no1 : analyse des besoins
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1995
Original Publication Date: Décembre 1995
Volume Identification:
Extent of Work: vii, 86
Packaging Method: pages incluant un annexe
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 457
Location/URL:
ISBN: 2-89146-398-6
Notes: Rapport annuel 1995-1996
Abstract: Rapport présenté au ministère de l'Environnement et de la faune du Québec (FRDTE), voir R000482, R000481, I000143
Call Number: R000457
Keywords: rapport/ ok/ r000482/ I000143/ dl

Projet MÉTRIQUE

Rapport d'étape No 1 Analyse des besoins

*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 d'étape no 1:
Analyse des besoins*

Présenté au

Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec

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

Rapport INRS-Eau No. 457

Décembre 1995

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Institut National de la Recherche Scientifique - Eau

Michel Leclerc	Professeur, PhD
Yves Roy	Analyste en informatique, BSc
Yves Secretan	Professeur, PhD

Asseau Inc.

Pierre Lavallée	Président, PhD
Sophie Bédard	Spécialiste, MSc

Nous remercions M. Ronald Greendale, consultant, pour ses judicieux conseils de rédaction

Pour les fins de citation:

Leclerc, M., Y. Roy, Y. Secretan (1995).

Projet *MÉTRIQUE*. *Rapport d'étape no 1: Analyse des besoins*. Pour le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Fond de recherche et de développement technologique en environnement (FRDTE). Rapport INRS-Eau R-457. 79 pp.

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. LES CONTEXTES VISÉS	3
2.1. Introduction	3
2.2. Génie hydraulique fluvial	4
2.2.1. Problématiques visées, enjeux	4
2.2.2. Méthodologie, procédures	4
<i>Des méthodes de travail standardisées.</i>	
2.2.3. Les contextes d'utilisation	5
<i>Le contexte de la production des devis et des appels d'offre.</i>	
<i>Le contexte de la conception assistée par ordinateur.</i>	
<i>Le contexte de la diffusion.</i>	
2.2.4. Le bien fondé du modèle hydrodynamique bidimensionnel	6
<i>La modélisation 2D, un choix non-exclusif offrant un grand potentiel.</i>	
<i>Les modèles 1D: utiles aussi, mais pour un usage différent.</i>	
<i>Les modèles 3D: trop tôt pour le transfert technologique.</i>	
2.2.5. Le type d'usager et la formation requise	7
<i>L'opérateur est un spécialiste...</i>	
<i>...et préféablement un professionnel...</i>	
<i>Former quelqu'un à un outil logiciel équivaut-il à le former entièrement à l'hydraulique fluviale ?</i>	
2.2.6. Les validations requises	8
<i>La validation terrain: une procédure stricte qui incombe à l'usager</i>	
<i>La validation théorique: le rôle du chercheur.</i>	
<i>La validation des spécifications: le rôle du vendeur</i>	
2.2.7. Les coûts acceptables d'utilisation	9
<i>Vers des hydrobases du domaine public, un nouveau besoin à combler.</i>	
2.2.8. Validation des besoins	10
2.3. La protection, la réhabilitation et la création des habitats du poisson	10
2.3.1. Problématiques visées, enjeux, potentiels	10

<i>L'enjeu des débits réservés.</i>	
<i>Le potentiel du design d'habitat.</i>	
<i>Le potentiel d'optimisation des sorties de passes migratoire</i>	
2.3.2. Méthodologies, procédures	11
<i>La Modélisation des Microhabitats: une méthodologie générique.</i>	
<i>Concilier la modélisation des microhabitats avec les politiques "boîtes noires" de débit réservé.</i>	
2.3.3. Les contextes d'utilisation	12
<i>Une condition préalable souvent ignorée: les devis d'études</i>	
<i>Le contexte du "relicensing" des centrales hydroélectriques.</i>	
<i>L'importance du support scientifique.</i>	
<i>Le contexte du design d'habitat.</i>	
<i>Le contexte des passes migratoires.</i>	
<i>Un autre contexte négligé: la communication des résultats</i>	
2.3.4. Le bien fondé des modèles utilisés	14
<i>Mieux décrire l'hydrodynamique du milieu.</i>	
<i>Expliciter les hypothèses simplificatrices.</i>	
<i>Nouveaux protocoles de paramétrisation des préférences d'habitats.</i>	
<i>Analyse dynamique.</i>	
<i>Autres besoins.</i>	
2.3.5. Le type d'utilisateur et la formation requise	16
<i>Un nouveau cours à l'INRS-Eau.</i>	
2.3.6. Les validations requises	17
<i>Un besoin générique en voie d'être comblé.</i>	
2.3.7. Les coûts acceptables d'utilisation	17
2.3.8. Validation des besoins	18
2.4. Le contrôle de la pollution industrielle	19
2.4.1. Problématique, enjeux	19
2.4.2. Contextes d'utilisation potentielle	20
<i>Le protocole d'intervention générique</i>	
<i>Le protocole particulier des ESEE pour les papetières.</i>	
<i>Une approche nécessitant l'utilisation de modèles.</i>	
<i>Des applications peu fiables du point de vue hydrodynamique</i>	
<i>Le cadre d'analyse de la contamination.</i>	

<i>Les ESEE: un suivi biologique comparatif en valeur relative.</i>	
<i>Les critères de contamination: une approche à approfondir.</i>	
<i>Que faire des régions influencées par plus d'un panache ?</i>	
<i>Un problème ignoré, l'échelle spatiale de la contamination</i>	
2.4.3. Bien-fondé de l'approche lagrangienne	24
<i>L'approche lagrangienne, un principe naturel.</i>	
<i>Une approche justifiée</i>	
<i>Limitations informatiques de l'approche lagrangienne: un frein</i>	
<i>Des besoins hydrodynamiques.</i>	
<i>Les limites de validité</i>	
2.4.4. Le type d'usager et la formation requise	25
2.4.5. Les validations requises	26
<i>La validation terrain: une procédure simple en apparence</i>	
<i>L'homogénéité des ensembles de données: un aspect délicat et crucial de la validation de modèles</i>	
<i>La validation théorique: un passage obligatoire</i>	
2.4.6. Les coûts acceptables d'utilisation	27
<i>Notre référence: l'état actuel des choses dans le cadre des ESEE</i>	
<i>Vers des hydrobases du domaine public, un nouveau produit numérique à offrir...</i>	
2.4.7. Validation des besoins	29
2.5. Le contrôle des débordements de réseaux unitaires en temps d'averse et le suivi des masses d'eau	29
2.5.1. Problématique, enjeux	29
<i>Une priorité en assainissement urbain.</i>	
<i>Différentes échelles de temps à considérer.</i>	
<i>L'analyse détaillée de la contamination par les débordements: un besoin</i>	
2.5.2. Contextes d'utilisation potentielle	30
<i>Le contexte du design des ouvrages de rétention.</i>	
<i>Les données requises.</i>	
<i>Un contexte secondaire: les panaches des tributaires.</i>	
2.5.3. Bien-fondé de l'approche eulérienne	32
<i>L'approche eulérienne: une démarche naturelle pour traiter les contaminants non-conservatifs</i>	
<i>Le concept de dose: une option de recherche à considérer.</i>	

2.5.4. Le type d'utilisateur et la formation requise	33
2.5.5. Les validations requises	33
<i>Une procédure comparable à celle utilisée pour le modèle lagrangien</i>	
<i>Un défi: valider les processus non-conservatifs du modèle.</i>	
2.5.6. Les coûts acceptables d'utilisation	34
<i>Des moyens sophistiqués pour des aménagements coûteux.</i>	
2.5.7. Validation des besoins	35
3. SPÉCIFICATIONS DES LOGICIELS DE BASE	37
3.1. Présentation du système proposé	37
3.2. La COQUILLE des simulateurs	38
3.2.1. Problématique générale	38
3.2.2. Fonctionnalités	39
<i>Environnement de travail moderne et ergonomique</i>	
<i>Extensibilité des fonctionnalités</i>	
<i>Visualisation graphique des données</i>	
<i>Ouverture sur d'autres produits logiciels</i>	
<i>Capacités multilingues</i>	
3.2.3. Ajouts et modifications	40
<i>Importation/Exportation</i>	
<i>Porter le système sur d'autres plates-formes multitâches</i>	
<i>Traduction de l'interface et des messages</i>	
<i>Habillage d'écran</i>	
3.3. Le simulateur hydrodynamique bidimensionnel HYDROSIM	41
3.3.1. Problématique générale	41
3.3.2. Fonctionnalités	42
<i>Choix bidimensionnel versus tridimensionnel ou unidimensionnel</i>	
<i>Prise en compte du couvrant/déouvrant, conservation de la masse</i>	
<i>Une forme conservative de la masse</i>	
<i>Résolution par éléments finis - vs - différences finis</i>	
<i>Méthode de résolution itérative</i>	
<i>Paramétrisation de la viscosité par une loi de longueur de mélange -</i>	
<i>Diffusivités</i>	

<i>Frottement de la glace et des macrophytes</i>	
<i>Autres facteurs: vents, substrats...</i>	
<i>Le simulateur FORTRAN potentiellement indépendant de la coquille d'HYDROSIM</i>	
3.3.3. Contexte d'utilisation	44
3.3.4. Usagers, marché potentiel	45
3.3.5. Ajouts et modifications	45
<i>Calcul des erreurs</i>	
3.4. Le MODELEUR, un simulateur en soi pour les données de terrain	45
3.4.1. Problématique générale	45
3.4.2. Fonctionnalités	45
<i>Production d'un modèle numérique de terrain</i>	
<i>Construction assistée du maillage</i>	
<i>Le modèle numérique de terrain: le transfert des données de base sur la grille</i>	
<i>Fonctionnalités d'adaptation du maillage: les TRIDs</i>	
3.4.3. Résultats escomptés	47
3.4.4. Contexte d'utilisation	47
3.4.5. Usagers, marché potentiel	47
3.4.6. Ajouts et modifications	47
4. LES LOGICIELS D'APPLICATION	48
4.1. Le simulateur des microhabitats HABIOSIM	48
4.1.1. Problématique générale	48
4.1.2. Fonctionnalités	49
<i>Utilisation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle hydrodynamique prédictif</i>	
<i>Modèle biologique paramétrique et variables d'état</i>	
<i>Visualisation et édition graphique des courbes de préférence pour les facteurs abiotiques</i>	
<i>Accès à un tableur et production de graphiques</i>	
4.1.3. Résultats escomptés	50
4.1.4. Contexte d'utilisation en bref	51
4.1.5. Marché potentiel	51

4.1.6. Ajouts et modifications	51
<i>Facilités multimédias: images</i>	
<i>Calcul de l'aire pondérée utile</i>	
<i>Spécification manuelle des préférences d'habitat</i>	
<i>Validation de la démarche 2D - vs - PHABSIM (1D)</i>	
<i>Hydrologie</i>	
4.1.7. Priorité de développement	52
4.2. Le simulateur de la dispersion des masses d'eau DISPERSIM	52
4.2.1. Problématique générale	52
4.2.2. Fonctionnalités	53
<i>L'approche eulérienne, l'approche éléments finis et le modèle hydrodynamique prédictif</i>	
<i>Modèle transitoire</i>	
<i>Prise en compte des processus physico-chimiques et biologiques: priorités</i>	
<i>Les caractéristiques de la résolution numérique eulérienne</i>	
<i>"Notion de dose"</i>	
4.2.3. Résultats escomptés	57
4.2.4. Contexte d'utilisation	58
4.2.5. Usagers et marché potentiel	58
4.2.6. Ajouts et modifications	58
<i>Intégration à la COQUILLE</i>	
<i>Prise en compte des processus de consommation et réoxygénation naturelle</i>	
<i>Capacité de calcul du simulateur</i>	
4.3. Le simulateur de la dispersion des effluents: PANACHE	59
4.3.1. Problématique de simulation	59
4.3.2. Fonctionnalités de PANACHE	60
<i>Utilisation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle hydrodynamique prédictif</i>	
<i>Algorithme lagrangien</i>	
<i>Cumul possible de l'effet de plusieurs panaches d'effluent</i>	
<i>Choix de divers événements hydrologiques de référence</i>	
<i>Interaction des panaches avec les usages de l'eau</i>	
<i>D'autres outils utiles pour l'analyse des interactions des panaches avec les usages</i>	

4.3.3. Résultats escomptés	62
4.3.4. Résumé des contextes d'utilisation	63
4.3.5. Usagers	63
4.3.6. Ajouts et modifications dans le cadre du projet MÉTRIQUE	63
5. CONCLUSION ET PRIORITÉS GLOBALES DU PROJET	65
<i>Compléter HYDROSIM et le MODELEUR</i>	
<i>Compléter HABIOSIM Version 1.0</i>	
<i>Compléter les outils de la COQUILLE</i>	
<i>Commencer l'intégration de DISPERSIM</i>	
<i>Compléter le prototypage de PANACHE V2.0</i>	
<i>Conclure une entente de commercialisation</i>	
<i>Développer des partenariats pour le prototypage Beta</i>	
6. BIBLIOGRAPHIE	67

ANNEXE: Données sur la consultation

1. INTRODUCTION

Le présent document vise à satisfaire les exigences relatives à l'**analyse des besoins** pour le projet MÉTRIQUE¹ soumis au FRDTE. Le document entend donc définir plus en détail la configuration exacte des problèmes visés par les simulateurs à être développés dans le cadre de ce projet.

Notons d'abord que le projet a pour objectifs globaux de compléter le développement et de rendre opérationnelles les composantes logicielles déjà existantes, certaines de celles-ci étant relativement avancées alors que d'autres sont à l'état embryonnaire.

De manière générale, le projet permettra de doter les gestionnaires scientifiques de l'environnement oeuvrant dans le secteur privé ou dans les agences gouvernementales d'un outil numérique intégré pour:

- supporter efficacement la planification, l'évaluation, l'analyse, la mise en oeuvre et/ou le contrôle d'interventions ciblées sur l'environnement aquatique à l'échelle de tronçons de rivières, fleuves ou estuaires;
- aider à la résolution locale des conflits d'usages, actuels ou potentiels.

Plus précisément, les interventions en question s'inscrivent dans le cadre de problématiques locales touchant la pollution des eaux ripariennes, fluviales et estuariennes, ainsi que les modifications hydrologiques, physiques et physico-chimiques affectant les habitats à poisson. Cette approche, qui vise directement la résolution de conflits d'usages de l'eau - actuels ou potentiels - se distingue nettement d'une démarche à l'échelle du bassin versant (le projet GIBSI par exemple) qui met plutôt l'accent sur les bilans de contamination à cette échelle, l'identification des conflits potentiels et l'établissement de stratégies d'intervention régionales ou sectorielles. Les deux démarches sont cependant complémentaires.

Pour la construction de ce document, nous avons adopté une structure qui permet dans un premier temps (chapitre 2) d'identifier les différents contextes ou problématiques dans lesquels les outils proposés sont appelés à être appliqués. Dans un second temps (les chapitres suivants), nous allons faire ressortir les fonctionnalités de base des outils nécessaires pour répondre aux besoins identifiés. Ici, le point de vue adopté est non-seulement la correspondance de l'outil avec les besoins mais aussi la perspective de *l'usager*.

Il est à noter que l'analyse des besoins est appliquée couramment par les informaticiens dans le but de définir les spécifications informatiques internes des programmes. Ce point de vue, celui de l'informaticien ne sera pas pris en considération, sauf très brièvement, dans ce document.

Les éléments clés des outils ont été soumis à un exercice de recherche et de validation, souvent informelle, auprès de nombreux usagers potentiels. L'usager-type de ces outils est par définition virtuel, puisque les instruments restent à être prototypés et qu'il existe très peu de produits équivalents sur le marché (Voir l'annexe pour description de ces usagers potentiels). Le but ultime du

¹ Système de modélisation hydroécologique à l'échelle des tronçons de rivière pour la gestion intégrée de la qualité de l'eau, des usages et l'écosystème (MÉTRIQUE).

projet étant d'offrir des outils *génériques* à un marché d'utilisateurs à l'échelle mondiale, les personnes consultées n'ont pas été recrutées qu'au Québec, mais aussi au Canada anglais, aux USA ainsi qu'en Europe (France, Norvège). Les rencontres avec les divers intervenants se sont faites au fil des opportunités qui se sont présentées à nous: assistance à des symposiums internationaux, échanges scientifiques dans le cadre de projets conjoints, ou encore, discussions avec des chercheurs invités à l'INRS-Eau. Certaines rencontres ont été convoquées spécifiquement pour les besoins de la consultation.

En plus de préciser les contextes d'utilisation des outils, il s'agissait de vérifier la pertinence des principales décisions ayant été prises lors de la première phase de développement des logiciels HYDREAU (1992-1994). La consultation a permis de consolider la majorité des spécifications (lesquelles avaient à l'époque fait l'objet de nombreuses analyses détaillées) identifiées dans le document de présentation du projet MÉTRIQUE au FRDTE. Cependant, la consultation a aussi permis de faire ressortir de nouveaux besoins fonctionnels que nous allons identifier dans le présent document. Chaque fois que cela sera possible, nous allons identifier les personnes ayant participé à la consultation.

Plus précisément, les discussions ont donc été menées avec les divers intervenants en vue de vérifier:

- les problématiques visées, les enjeux, les potentiels;
- l'intégration des outils dans la pratique (méthodes de travail, procédures);
- le bien-fondé des modèles utilisés;
- les attentes potentielles vis-à-vis des outils (fonctionnalités, résultats typiques);
- le potentiel d'attraction des outils;
- le type d'utilisateur et la formation requise;
- les différentes formes de validation requises selon le contexte
- les coûts acceptables d'utilisation.

2. LES CONTEXTES VISÉS

2.1 Introduction

Nous allons tenter de grouper ici les informations selon les contextes d'utilisation. Certains contextes sont déjà existants, d'autres sont des opportunités qui s'offrent naturellement en raison du caractère générique des outils. Dans le premier cas, c'est souvent notre propre expérience qui est mise à contribution pour décrire le contexte et les besoins qui en découlent (par exemple, le design d'intervention pour le dimensionnement d'ouvrages). Dans le deuxième cas, les opportunités ont pu avoir été identifiées par des partenaires potentiels qui ont attiré notre attention sur des situations où les outils représentent une réponse possible aux problèmes vécus en pratique (design des sorties de passe migratoire).

La structure utilisée ici s'appuie sur la liste des potentiels d'application. Pour chacun de ces contextes, nous allons notamment nous concentrer sur:

- une définition des *problématiques* visées, des *enjeux* qu'ils sous-tendent et du *potentiel des outils* à ce niveau;
- l'*intégration des outils dans la pratique*, surtout en ce qui regarde l'existence de méthodes de travail reconnues, de pratiques administratives voire, de réglementations (existantes ou à établir) dont on devra tenir compte pour diffuser les outils;
- les *contextes d'utilisation*, qui se définissent principalement en fonction de la phase de travail: analyse du milieu, planification et design de projets, évaluation des projets, mise en oeuvre et/ou contrôle des interventions, et à l'occasion, communications avec les intervenants. Le contexte désigne également le milieu où les outils sont appelés à être utilisés (privé, public, académique, etc...);
- le bien-fondé des *modèles utilisés* qui se définit par les hypothèses sous-jacentes, les limites de validité, le choix des variables d'état, les aspects réductifs ainsi que les résultats typiques qu'ils permettent de livrer;
- le type *d'usager* et la formation requise;
- les différentes formes de *validation* requises selon le contexte;
- les *coûts* acceptables d'utilisation;
- la validation du besoin.

À chaque fois qu'un besoin est identifié dans le présent chapitre (paragraphe en italique), nous donnons s'il-y-a-lieu, les solutions envisagées pour tenter d'y répondre dans le cadre du projet. La réponse peut être déjà connue ou faire partie des activités de recherche à venir. Dans certains cas, la réponse dépasse le cadre du projet de recherche et appartient au milieu appelé à appliquer les outils (pratiques administratives, etc...).

2.2 Génie hydraulique fluvial

2.2.1 Problématiques visées, enjeux

On vise ici les situations où des ouvrages de génie civil (digues, jetées, obstructions à l'écoulement, etc...) ou des interventions morphologiques (dragages, remblais, empiétements, etc...) sont de nature à modifier significativement la capacité du cours d'eau de transporter son débit et éventuellement d'entraîner de l'érosion des berges ou de la sédimentation dans le cours d'eau. Le transport de la glace peut également être affecté par de telles interventions. Ces interventions sont courantes, notamment dans le milieu de la navigation commerciale, et sont sujettes à des études d'impacts.

Il est à noter que nous limitons ici notre analyse des besoins aux applications directes de l'hydrodynamique (génie hydraulique). Les applications indirectes (ex: modèles d'habitat piscicole, page 10, contrôle de la pollution industrielle, page 19, contrôle des débordements des réseaux unitaires, page 29) seront traitées plus loin. Cependant, le modèle hydrodynamique reste le même et quelques besoins identifiés ici ne seront pas repris alors.

2.2.2 Méthodologie, procédures

La méthodologie consiste à simuler à l'aide d'un modèle numérique prédictif les conditions actuelles et les modifications prévues, et de les comparer à l'aide d'un *rationnel de comparaison* établi au cas par cas. Ce rationnel de comparaison ou d'analyse demande habituellement le choix d'un (d') événement(s) hydrologique(s) de référence (ex: Q_{7-10} ou débit d'étiage minimum de 7 jours consécutifs de période de récurrence de 10 ans pour les panaches d'effluents). Des critères de sécurité des ouvrages ou encore de bien-fondé environnemental (ex: maintien ou restauration d'usages) sont appliqués.

La tradition en ingénierie demandait habituellement la construction d'un modèle physique (modèle réduit, maquette). Dans les milieux couvrant de vastes étendues (ce qui est le cas habituellement dans le milieu fluvial), les distorsions d'échelle rendaient difficiles l'obtention de résultats précis fiables en plus d'entraîner des coûts importants. L'utilisation de modèles numériques tels que ceux mis en oeuvre dans le projet MÉTRIQUE s'est répandue depuis le début des années 80. L'amélioration des modèles a touché surtout la robustesse et la rapidité des méthodes de résolution et l'adéquation des outils par rapport aux phénomènes de découlement inhérents aux milieux fluviaux et estuariens. Bien que moins lourds à mobiliser que les modèles physiques, les modèles numériques sont demeurée jusqu'à récemment des outils assez coûteux et complexes à utiliser pour en freiner la diffusion.

Au cours de la décennie 80, il existait un besoin de méthodes de travail efficaces et de rationnels d'analyse propres aux modèles numériques. De plus, la mobilisation des outils nécessitait une simplification, une plus grande rapidité et une meilleure souplesse en vue d'agrandir le marché et le champ des applications.

Des méthodes de travail standardisées. Malgré ces limitations, la multiplication des applications pratiques dans différents contextes d'ingénierie a permis de développer l'expertise des modélisateurs qui, de mathématiciens-numériciens qu'ils étaient au départ, sont devenus des hydrauliciens

fluviaux de plus en plus conscients de la complexité de ces milieux. Du côté des fonctionnalités inhérentes aux méthodes de travail, ce sont surtout les outils de traitement spatial des données (contourage, maillage, visualisation) qui, en se développant, ont le plus contribué à accélérer la mobilisation des modèles et conséquemment, en accroître la précision et en diminuer le coût. Ces différents éléments qui étaient des besoins à la fin des années 80 ont été comblés au fur et à mesure du développement des applications. Les rationnels d'analyse se sont quant à eux développés pour répondre à la demande des clients qui attendaient des réponses effectives à leurs questions.

2.2.3 Les contextes d'utilisation

Le contexte de la production des devis et des appels d'offre. Le contexte d'utilisation en génie hydraulique est d'abord celui des *phases préliminaires des études* constituées par: la rédaction des *devis d'études* et la réalisation des *campagnes de terrain*. Il est important de comprendre que la relative nouveauté des outils numériques ne nous permet pas toujours de compter sur l'expérience antérieure des intervenants laquelle se traduirait par des devis types qu'on recyclerait à toutes les sauces. De nouveaux devis doivent donc être rédigés, démarche à laquelle le modélisateur est souvent appelé à participer. Dans ce contexte, les données de terrain jouent un rôle important pour définir la précision du modèle hydrodynamique: le but des campagnes de mesure, les critères de densité spatiale, l'homogénéité des événements hydrologiques et les variables à mesurer sont les éléments importants du devis de terrain.

Il existe donc un besoin pour la production de nouveaux devis lesquels tiendraient compte à la fois du rationnel d'analyse, des protocoles de terrain et des contraintes d'application des modèles (validation).

Ce besoin est habituellement comblé par le client au cas par cas en collaboration avec les modélisateurs.

Le contexte de la conception assistée par ordinateur. Le deuxième contexte d'utilisation important est celui de la *conception* et du *design des interventions*. Le modèle numérique est de peu d'utilité pour la phase d'identification des options de design. Il devient essentiel pour anticiper le résultat de celles-ci et identifier les plus pertinentes. Le modèle peut même aider à optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le principal besoin ici est la disponibilité d'un outil de maillage rapide et souple lequel permet de transformer rapidement le modèle numérique de terrain pour tenir compte des modifications géométriques reliées aux options de design.

Ce besoin est déjà comblé par le MODELEUR d'HYDROSIM.

Un autre besoin exprimé à l'occasion est formé par la disponibilité de pont informatiques permettant de transférer facilement les résultats vers d'autres outils mieux adaptés pour la poursuite du mandat du modélisateur comme les SIG (Système d'information géographiques), les utilitaires de dessins d'ingénieur (ex: Autocad), ou encore, les logiciels de présentation graphique.

Une analyse plus poussée des spécifications informatiques a été menée à l'égard de ce besoin et la conclusion est que le système doit permettre à l'utilisateur d'installer facilement des passerelles bidirectionnelles appelées filtres permettant non-seulement d'exporter les données produites par les

simulateurs vers d'autres utilitaires mais également d'importer des données de ceux-ci. Les spécifications d'import-export ont fait l'objet d'une analyse détaillée en vue d'une implantation générale dans la Coquille des simulateurs.

Le contexte de la diffusion. Un contexte fréquemment rencontré est celui de la *communication des résultats*, qu'elle soit *informelle* ou *formelle*. Dans le premier cas, elle se situe dans la phase opérationnelle de la modélisation; dans le second cas, elle intervient en phase de consultation ou d'audiences publiques. Une image vaut mille mots, et c'est d'autant plus vrai lorsqu'on doit communiquer des résultats de modèle numérique.

Le principal besoin rencontré tant par les modélisateurs qu'en fonction du public visé par les études est la visualisation des résultats. La possibilité "d'habiller" les images brutes produites par les modèles afin de rapprocher le résultat de l'apparence de cartes est un complément utile et même nécessaire.

La nature des données produites par un modèle numérique se prête facilement à la visualisation par ordinateur. Il est donc relativement plus facile aujourd'hui d'expliquer le fonctionnement des modèles mathématiques à partir d'images d'écran, qu'autrefois, alors que nous ne disposions que d'équations ou d'images pauvres en évocation. Les fonctionnalités de visualisation sont déjà implantées dans la Coquille des logiciels du projet MÉTRIQUE. L'habillage d'écran projeté a fait l'objet d'une analyse poussée de spécifications. Cette démarche est résumée à la page 40 (**Habillage d'écran**).

2.2.4 Le bien fondé du modèle hydrodynamique bidimensionnel

La modélisation 2D, un choix non-exclusif offrant un grand potentiel. 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 gravitationnelles (transfert de débit, marée) qui sont visés ici. La majorité des milieux visés par les interventions ciblées par MÉTRIQUE peuvent être analysés à l'aide de cette catégorie de modèle. Une description plus détaillée des besoins techniques de ces milieux et des caractéristiques de la modélisation 2D offertes dans MÉTRIQUE est donnée à la page 41 (section intitulée: Le simulateur hydrodynamique bidimensionnel HYDROSIM). Les autres options possibles, non-couvertes dans MÉTRIQUE, sont principalement les modèles unidimensionnels (1D) et tridimensionnels (3D). Voyons ici ce qui les distingue de l'option 2D:

Les modèles 1D: utiles aussi, mais pour un usage différent. 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 ne sont pas ciblés dans MÉTRIQUE, du moins, dans un premier temps.

Les modèles 3D: trop tôt pour le transfert technologique. 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 dûs 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 des équipements habituellement disponibles (espace-mémoire, capacité et vitesse des microprocesseurs, méthodes de résolution, etc...). Cette génération d'outil demeurera encore pour quelque temps l'appanage des milieux de la recherche qui ont accès à cette technologie.

Bien expliciter les limites de validité hydrodynamique. Les limites de validité des modèles 2D sont en principe bien connues des modélisateurs et elles doivent l'être des utilisateurs de 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. En terme de besoin,

il est impératif (besoin fondamental) que 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 sessions de formation des futurs usagers. 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.

2.2.5 Le type d'usager et la formation requise

L'opérateur est un spécialiste... L'usager type est un hydraulicien fluvial. Une formation de base est donnée dans les programmes universitaires de premier cycle en *génie civil et environnemental*. D'autres catégories de formation de premier cycle aptes à mener des études d'hydraulique fluviale se dessinent: les *géologues* (ou *géographes*) *géomorphologues* lesquels ont l'avantage de détenir une meilleure connaissance des processus naturels. La formation des ingénieurs est parfois plus axée sur les méthodes quantitatives.

...et préféablement un professionnel... Lorsque le contexte d'application soulève des questions de responsabilité professionnelle, l'usager doit, du moins au Québec, être un membre de l'Ordre des Ingénieurs, ce qui réserve le champ de pratique dans ce cas aux diplômés en sciences appliquées (génie).

Notre opinion est qu'il est préférable que l'utilisateur détienne une formation de premier cycle directement ou indirectement reliée à hydraulique fluviale, ou encore, qu'il détienne une expérience pertinente dans le domaine. Cette opinion se justifie par le fait que la complexité de la réalité physique est suffisamment grande pour que l'application des modèles soit rendue très difficile par un non-averti. Corollairement, l'obtention de résultats est très difficile si les conditions de simulation ne sont pas valables physiquement. Cette contrainte constitue en soi un rempart contre les utilisations inappropriées.

En termes de besoins, la formation des usagers du module hydrodynamique est sans doute à définir très précautionneusement en tenant compte notamment des limites de validité des modèles, des procédures de validation et des éléments de responsabilité professionnelle liés à leur utilisation.

En ce qui regarde les principaux agents de modélisation, mentionnons que les études sont habituellement conduites par l'intervenant principal lui-même ou par des consultants recrutés pour ces fins. Étant donnée la nouveauté relative des outils, les chercheurs universitaires (ceux qui les développent) sont quelques fois appelés à participer à ces études. Notre expérience à l'INRS-Eau fait de plus en plus de place aux partenaires (le client ou son consultant) dans la réalisation des études. Cette pratique ne sera plus vraiment nécessaire lorsque les outils pourront être mis entièrement à la disposition des partenaires sous la forme de logiciels.

Former quelqu'un à un outil logiciel équivaut-il à le former entièrement à l'hydraulique fluviale ? Nullement. Notre attitude à cet égard est de prévenir très explicitement l'utilisateur potentiel (le premier paragraphe du manuel de l'utilisateur) de sa responsabilité professionnelle dans le cadre des applications. Notre responsabilité ultime se limite donc à lui fournir un outil convivial et éprouvé.

2.2.6 Les validations requises

La validation terrain: une procédure stricte qui incombe à l'utilisateur La validation d'une application hydrodynamique est devenue au fil des applications une procédure courante dans la plupart des milieux de l'hydraulique numérique. Ainsi, le concept de deux événements mesurés distincts pour la calibration et la validation est très important. Dans certains cas, lorsqu'un sous-modèle doit être validé (par exemple, un modèle de frottement saisonnier associé aux plantes aquatiques ou à la glace), des événements additionnels peuvent être requis pour ce faire.

La procédure de validation terrain est un besoin générique de la modélisation qui consiste à comparer, pour un événement de référence n'ayant pas servi à la calibration, les résultats des simulations de cet événement avec les mesures de débit, de vitesse et de niveau d'eau.

La procédure de validation appliquée couramment sera expliquée dans le manuel de l'utilisateur.

La validation théorique: le rôle du chercheur. D'autres niveaux de validation peuvent être nécessaires pour prouver la valeur scientifique de l'outil. Ces validations dites "académiques" sont généralement publiées dans les revues scientifiques arbitrées par les pairs à l'échelle internationale.

Tout modèle disponible sur le marché devrait avoir déjà fait ses preuves dans la littérature scientifique sous la forme d'articles arbitrés.

Mais il n'en incombe pas à l'utilisateur-client de le faire. C'est la responsabilité du scientifique.

La validation des spécifications: le rôle du vendeur L'agent responsable de la commercialisation des logiciels a aussi pour devoir de valider les spécifications du logiciel qu'il vend. Nous n'allons pas détailler cet aspect ici.

2.2.7 Les coûts acceptables d'utilisation

Notre expérience de leur niveau d'acceptabilité nous révèle que:

les coûts d'utilisation des modèles hydrodynamiques 2D doivent autant que possible demeurer en deçà de 50 000\$ lorsqu'il s'agit de design d'ouvrages de génie civil ne nécessitant pas de développements additionnels du modèle.

Au début de l'histoire des applications d'hydraulique numérique, les coûts atteignaient souvent 100 000\$, voire plus. Les seuls clients capables de consacrer de telles sommes à des études par modèle numérique étaient principalement les grandes agences (Hydro-Québec, SEBJ, Électricité de France, Garde-Côtière) ce qui limitait considérablement le marché. La disponibilité d'outils tels que ceux proposés dans MÉTRIQUE permet déjà de réduire significativement les coûts de mise en oeuvre des modèles jusqu'à des montants excédant rarement 30 000\$. Cette réduction des coûts permet d'ailleurs d'ouvrir plus largement le marché même auprès des clients traditionnels qui font alors plus volontiers appel à de telles méthodes. Les coûts mentionnés excluent les plans et devis ainsi que les opérations de terrain. Les milieux concernés sont habituellement de grand gabarit (fleuve Saint-Laurent).

Vers des hydrobases du domaine public, un nouveau besoin à combler. Enfin, nous envisageons actuellement la possibilité de développer le concept de *commercialisation d'hydrobases*.

Une "hydrobase" est un ensemble complet de données de simulation hydrodynamique (incluant les données du modèle numérique de terrain) qu'on rendrait disponible au public en général en vue d'applications diversifiées: contrôle de la pollution industrielle ou urbaine, applications d'ingénierie, microhabitats, études d'impact, etc.... Le besoin pour un tel produit est relié au coût de production des données qui serait individuellement excessif pour la majorité des intervenants mais abordable collectivement (marché d'utilisateurs). Cette approche se situe également dans l'optique des politiques de recouvrement de coûts que cherchent à implanter les divers niveaux de gouvernement.

C'est ce mode de diffusion qui est utilisé pour les "minutes hydrographiques" du Service Hydrographique du Canada. Des hydrobases seraient d'abord créées pour les cours d'eau offrant suffisamment de potentiel pour intéresser plusieurs intervenants, par exemple, le fleuve Saint-Laurent. Des "événements de référence" validés par les autorités publiques, encore à définir (ex: MEF, Environnement Canada, INRS-Eau) seraient offerts comme produits sur le marché à un prix permettant d'amortir leur production sur plusieurs clients. L'investissement original viendrait de ces autorités et la commercialisation permettrait de recouvrer l'investissement. Les données peuvent être livrées sous différentes formes: cartes-papier, cartes-écran (bitmaps), fichiers GIS, fichiers de données brutes. L'accès peut se faire sur Internet. Des discussions sont en cours actuellement avec Environnement Canada pour formaliser cette approche.

2.2.8 Validation des besoins

La plupart des informations sur les besoins dans le contexte de l'analyse de l'influence ou du design d'ouvrages de génie sont de source interne. Elles sont aussi venues au fil des discussions avec des intervenants externes avec qui nous développons un partenariat.

- Hydro-Québec, région Maisonneuve (1995); *Conception de digues pour la restauration de la plage de la Faim à l'entrée du canal de Beauharnois*; M. Yvon Chiasson, chargé de projet pour le client
- Garde-Côtière canadienne (1994) ; *Analyse de différents scénarios de modes d'opération des brise-glaces et d'ouvrages de contrôle des glaces au lac Saint-Pierre*; M. Brian Morse, chargé de projet pour le client
- Environnement Canada (1993-1995); *Concept d'hydrobase pour le fleuve Saint-Laurent*; Jean-François Cantin, Richard Laurence, hydrographie, hydrométrie, réingénierie des réseaux de mesure, modélisation hydrodynamique
- Transport-Canada (1995); *Analyse de l'influence hydrodynamique de dragages additionnels du chenal maritime du fleuve Saint-Laurent dans la région du lac Saint-Pierre*; M. Bertrand Massé, chargé de projet pour SNC-Lavalin - Procéan, M. Brian Morse pour la Garde-Côtière canadienne
- Hydro-Québec, V.P Environnement (1987); *Analyse de l'influence hydrodynamique d'une jetée dans l'axe de la traversée de la ligne Radisson-Nicolet-Des Cantons sur la migration du poulamon atlantique*; Serge Trussard, chargé de projet pour le client

Plusieurs applications potentielles prennent appui sur la modélisation hydrodynamique pour des fins notamment de protection d'habitats, ou pour le contrôle de la pollution. Elles seront évoquées dans les sections qui suivent.

2.3 La protection, la réhabilitation et la création des habitats du poisson

2.3.1 Problématiques visées, enjeux, potentiels

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. Le premier but des travaux de modélisation numérique de l'habitat piscicole dans ce contexte est de formuler des recommandations de débit réservé visant à protéger la disponibilité et la qualité de ces habitats. 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 prévus comme mesure de compensation.

Le potentiel du design d'habitat. Une deuxième problématique 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 d'exercer de nouveau, ou d'améliorer des fonctions vitales auparavant limitatives. 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. 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.

Une emphase particulière sera mise ici sur le premier volet (débits réservés) en raison du nombre d'expériences que nous avons déjà à notre actif dans ce domaine.

2.3.2 Méthodologies, procédures

La Modélisation des Microhabitats: une méthodologie générique. La méthodologie utilisée est bien connue: elle consiste à traduire en valeur d'habitat 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 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)**. Les phases sensibles (limitatives) du cycle de vie du poisson sont considérées prioritairement. Une analyse de sensibilité au débit est effectuée dans le registre hydrologique 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. Lorsqu'une relation explicite peut être établie entre la disponibilité 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. Autrement, lorsque ce type de relation ne peut être explicitée, le débit réservé est sélectionné en vue de maintenir cette disponibilité au-delà 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, Colorado 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.

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. Quand 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 un besoin de pratiques administratives permettant de concilier l'approche axée sur les méthodes hydrologiques et l'utilisation de méthodes axées sur la quantification de l'habitat.

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 seront l'INRS-Eau et la Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA). Le symposium est 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).

2.3.3 Les contextes d'utilisation

Une condition préalable souvent ignorée: les devis d'études. Les contextes d'utilisation en modélisation d'habitats piscicoles fluviaux sont associés aux problématiques définies plus haut. Comme pour le génie hydraulique, les *phases préliminaires des études* constituées par la rédaction des *devis d'études* et la réalisation des *campagnes de terrain* sont déterminantes pour la qualité des résultats qui vont en émerger. Or, l'expérience des promoteurs et de leurs consultants laisse souvent à désirer en la matière et les modélisateurs se retrouvent parfois avec des devis inappropriés, notamment par rapport aux caractérisations sur le terrain.

Il existe donc un besoin pour la production et éventuellement la standardisation de nouveaux devis lesquels tiendraient compte à la fois des procédures administratives et réglementaires en la matière, du rationnel d'analyse, des protocoles de terrain et des contraintes d'application des modèles (calibration - validation).

Le contexte du "relicensing" des centrales hydroélectriques. Il est important de mentionner ici que de nombreuses compagnies d'utilité hydroélectrique s'apprêtent partout aux USA à renégocier leur licence d'exploitation (relicensing). Pour obtenir leur licence, ils doivent démontrer l'acceptabilité des modes de gestion du débit vis-à-vis des pertes d'habitat piscicole, et inclure une politique de débits réservés. Cette démarche est réglementée au niveau fédéral américain ainsi qu'au niveau des états membres de la fédération. La France entre actuellement elle aussi dans une phase intensive de réautorisation des exploitations de centrales hydroélectriques. Le développement de nouveaux outils de quantification de l'habitat donne donc lieu à une activité très fébrile, notamment, dans ces deux pays. Nous n'avons pas encore entrepris de cheminement approfondi à

l'égard de ces processus, surtout en ce qui concerne la partie réglementaire. Toutefois, des contacts très étroits sont maintenus avec des intervenants de Fort-Collins (National Biological Survey) aux USA, et avec le Cemagref et Électricité de France en vue de suivre l'évolution des pratiques administratives dans ces pays. Il est à noter qu'au MEF le Groupe de travail sur les petites centrales se préoccupe également de cette question.

Mieux connaître les contextes réglementaires des différents pays où sont appelés à être diffusés les outils de modélisation d'habitat constitue, à notre sens un besoin pour la diffusion future des outils. Les attentes du marché devront donc être précisées.

Actuellement, nous nous concentrons plutôt sur les questions scientifiques de base et sur les fonctionnalités informatiques qui permettront de répondre "génériquement" au besoin. Il est à noter que les logiciels ne sont pas créés pour "gérer des règlements". Ils sont là pour répondre à des questions d'ordre scientifique, et accessoirement, pour faciliter la tâche d'analyse et aider à la communication des résultats. Notre partenaire en commercialisation (discussions en cours avec la firme HMS Énergie, filiale de Nouveler, Montréal) a déjà établi des contacts dans son réseau de représentants aux États-Unis afin de préciser les attentes du marché. Il apparaît dans un premier temps que les outils proposés devraient recevoir un très bon accueil aux USA à cause de la puissance et de la convivialité des fonctionnalités proposées. Un argument de vente devra cependant être développé, argument qui apparaît comme un besoin pour les représentants commerciaux:

En quoi un tel outil est-il en mesure de proposer des recommandations plus précises, plus fiables pour l'environnementaliste, d'une part, et plus économiques pour l'exploitant, d'autre part ?

L'importance du support scientifique. Un élément de réponse à la première partie de la question serait de faire valider l'outil comme une réponse acceptable par les "regulators", c'est-à-dire, les agences fédérales qui établissent et gèrent la réglementation nationale. Des contacts sont déjà établis avec le US Fish and Wildlife pour ce faire (voir le paragraphe "Validation des besoins" un peu plus loin). Dans un premier temps, il est apparu que:

L'élément "support scientifique continu" aux logiciels est un critère déterminant de validation de l'outil par ces instances. Ce constat est suffisamment important à notre point de vue pour être applicable à tous les produits issus du projet MÉTRIQUE

Le seul fait que HABIOSIM, comme logiciel, est développé dans un centre de recherche multidisciplinaire (et à but non lucratif) représente un élément déterminant pour juger de la valeur et assurer l'évolution scientifique continue de l'outil à long terme. Du moins, cette conviction est partagée par nos contacts du US F&W.

Du côté des besoins nationaux en la matière (Québec et Canada), les discussions qui auront lieu avec le comité de suivi en cours de projet aideront sûrement à préciser ces divers éléments surtout dans le contexte des petites centrales.

Le contexte du design d'habitat. Le deuxième contexte d'utilisation important est celui de la conception et du design des interventions de restauration d'habitat. Notre expérience en la matière est inexistante. Nos discussions avec plusieurs intervenants en la matière nous ont permis de mettre en évidence cette potentialité. Comme pour les ouvrages hydrauliques, le modèle numérique est de peu d'utilité pour identifier les options. Le modèle peut s'avérer très utile pour évaluer

les interventions. Du point de vue scientifique, nous sommes convaincus que HABIOSIM combiné à HYDROSIM peuvent servir utilement dans ce contexte.

De nouveau, le principal besoin technique ici est la disponibilité d'un outil de maillage souple et efficace permettant de transformer rapidement le modèle pour tenir compte des modifications géométriques reliées aux options de design.

Ce besoin, rappelons-le, est comblé par le MODELEUR d'HYDROSIM.

Le contexte des passes migratoires. Du point de vue des besoins, le contexte des passes migratoires est difficile à définir étant donné l'absence totale de tentatives antérieures de répondre aux difficultés rencontrées avec des modèles. Il semble que deux points émergent:

- *le besoin de mieux définir les critères de design du courant d'appel (longueur, vitesse-seuil) axés sur les comportements rhéotaxiques du poisson migrateur;*
- *le besoin de bien définir les limites de validité du modèle bidimensionnel utilisé par rapport au type de courants qu'on rencontre au pied de chutes, sauts, seuils, déversoirs, etc..., lesquels sont à l'occasion structurés dans un espace tridimensionnel;*
- *les besoins de caractérisation sur le terrain pour mettre en oeuvre une telle modélisation (précision très fine, difficultés d'accès, etc..).*

À notre avis, la seule façon de répondre adéquatement à ces besoins spécifiques serait de conduire un projet expérimental. Des discussions sont en cours avec des consultants pour ce faire. Concernant les critères de design, la méthode utilisée serait l'avis d'expert.

Un autre contexte négligé: la communication des résultats. Le contexte de la *communication des résultats* est très important pour tous les agents impliqués: promoteurs, gestionnaires, consultants, public, média surtout si les projets sont soumis à une procédure d'évaluation environnementale et donnent lieu à des audiences publiques (par exemple, SM3 - Moisie). Comme la méthodologie est relativement nouvelle, elle demande des explications simples et accessibles au public. De plus, comme les enjeux sont de nature environnementale, cela contribue parfois à dramatiser les débats. Raison de plus pour faciliter les communications par des moyens visuels.

Dans ce contexte, il existe un besoin d'outils de visualisation efficaces et de textes de référence vulgarisés permettant à tous les publics de bien comprendre les enjeux et les méthodes utilisés pour les analyser.

Du point de vue du projet MÉTRIQUE, la préoccupation de vulgariser cette approche devra être constante. Les fonctionnalités de visualisation déjà implantées dans la Coquille MÉTRIQUE aideront les futurs usagers à mieux communiquer leurs résultats.

2.3.4 Le bien fondé des modèles utilisés

La modélisation des microhabitats requiert l'utilisation de deux niveaux de modèles: hydrodynamique et biologique. Les deux niveaux comprennent des hypothèses simplificatrices que l'utilisateur doit connaître et respecter dans ses applications.

Mieux décrire l'hydrodynamique du milieu. L'utilisation de modèles hydrodynamiques bidimensionnels est une tendance nouvelle dans le domaine de la modélisation des microhabitats. Elle est

appelée à se développer rapidement. Ceci est dû à la qualité de l'information produite par ces modèles par rapport aux méthodes classiques (PHABSIM). Les hypothèses inhérentes à ce type de modèles (milieu fluvial, bien mélangé) ont été évoquées à la section précédente et le besoin de définir très clairement ses limites d'applications dans les manuels tient toujours. Il est même renforcé par le fait que l'application hydrodynamique pourra à l'occasion être réalisée par des opérateurs moins expérimentés en hydrodynamique fluviale.

Expliciter les hypothèses simplificatrices. Concernant la modélisation biologique, les hypothèses simplificatrices sont plus nombreuses que pour l'hydrodynamique et elles demeurent implicites, i.e. subjectives, dû au type d'équation utilisé par cette approche (indices de préférence adimensionnels, moyennes géométriques d'indices). Par exemple, rien ne permet d'inclure (ou d'explicitier) dans ces modèles les interactions écologiques dans les populations sympatriques (le stress de la prédation et de la compétition), la qualité de l'eau, la mobilité des individus chez certaines espèces, la disponibilité de nourriture, la dynamique de ces processus, etc... Ces hypothèses peuvent limiter sévèrement l'applicabilité des modèles. De plus, comme les applications pourront à l'occasion être conduites par des non-biologistes, il est d'autant plus important de prévenir les opérateurs des écueils d'un tel exercice. Comme pour la modélisation hydrodynamique,

il est impératif (besoin générique) que les limites d'application de la modélisation des microhabitats soient bien définies dans les manuels d'utilisation et lors des sessions de formation des futurs usagers.

Il est à noter également que la modélisation des microhabitats n'a pas encore été appliquée dans un contexte non-stationnaire comme les estuaires à marée ce qui est une autre hypothèse réductrice.

Nouveaux protocoles de paramétrisation des préférences d'habitats. S'il est un domaine dans lequel la recherche scientifique est appelée à combler de nombreux besoins, c'est celui du développement de nouveaux protocoles de paramétrisation des préférences d'habitats.

Un besoin est constitué par la nécessité de représenter la qualité d'habitat d'un milieu à l'aide d'indices ou de tout autre formalisme (ex: intelligence artificielle) construits à partir du raisonnement et des connaissances conceptuelles des écologistes du poisson, des ichthyologistes et autres spécialistes de la faune aquatique. Au niveau du formalisme d'indice, le besoin se traduit par la demande d'un outil interactif de génération graphique de courbes de sélectivité.

Le module HABIOSIM est conçu pour offrir ce genre de fonctionnalité. Notre démarche à cet égard tient à un principe d'ouverture des logiciels qui permet aux opérateurs de se comporter en modélisateurs. Ainsi, ceux-ci ne sont pas limités à un schéma d'application fermé; ils peuvent expérimenter avec l'outil et contribuer au développement de nouveaux protocoles de modélisation de nature plus conceptuelle.

Analyse dynamique. Enfin, la littérature commence à reconnaître les limites du caractère statique de la modélisation des microhabitats telle que pratiquée aujourd'hui, c'est-à-dire la non prise en compte des variations temporelles de qualité de l'habitat et des chronologies de disponibilité.

La prise en compte de l'aspect dynamique des habitats est de plus en plus mentionnée comme un besoin par divers intervenants, surtout académiques, rencontrés entre autres dans les conférences internationales.

Cet aspect a déjà été traité au cours d'études antérieures réalisées pour Hydro-Québec et nos spécifications prévoient d'offrir des fonctionnalités de ce type. La difficulté tient plus au fait que les méthodes d'analyse dynamique de l'habitat sont encore en développement. Doit-on aborder le problème par une démarche déterministe ou statistique ? Différentes écoles y travaillent. En ce qui nous concerne, il s'agira de rester à l'affût afin d'offrir les possibilités nouvelles apparues dans la littérature.

Autres besoins. D'autres besoins également d'ordre expérimental ont été formulés. On note principalement:

l'applicabilité aux petits cours d'eau (présentant typiquement de l'ordre du m³/s et d'une largeur inférieure à 10 mètres) ainsi que la prise en compte d'autres espèces que le saumon (à tort perçu comme l'espèce la plus étudiée).

Ces besoins se rattachent d'une façon ou d'une autre aux différents aspects traités précédemment.

2.3.5 Le type d'utilisateur et la formation requise

L'utilisateur type est un biologiste du poisson préférentiellement diplômé de deuxième cycle ayant reçu une formation complémentaire en hydraulique fluviale. D'autres catégories de formation aptes à mener des études sur les aspects physiques de l'habitat se sont manifestées récemment: les géologues (ou géographes) ou géomorphologues lesquels ont l'avantage d'appartenir aux sciences naturelles. Ces derniers se préoccupent plus particulièrement du rôle du substrat et de la dynamique sédimentologique dans la valeur d'habitat.

À l'occasion, des ingénieurs hydrauliciens seront appelés à participer à des études d'habitat pour définir des débits réservés; il est important que des biologistes soient alors impliqués pour encadrer la dimension biologique et tenir compte des limites d'application des modèles et les interpréter. Ces remarques seront mentionnées très explicitement dans les manuels d'utilisation. Idéalement, ces études devraient être conduites par une équipe comprenant à la fois des biologistes et des hydrauliciens.

En termes de besoins, le contenu de formation des usagers du module microhabitats devra incorporer à la fois le contenu hydrodynamique et les éléments d'écologie fluviale pertinents à la modélisation. Les limites de validité devront être bien explicitées.

Un nouveau cours à l'INRS-Eau. Pour répondre à ce besoin générique, l'INRS-Eau donnera pour la première fois au cours du trimestre d'hiver 1996 un cours de deux crédits intitulé "Hydrodynamique numérique appliquée à la qualité de l'eau et aux habitats". Ce cours est expérimental. Il comprendra des notions de mesures et de modélisation numérique de terrain, de géomorphologie fluviale, de modélisation mathématique et numérique du milieu fluvial, de modélisation des microhabitats ainsi que de modélisation de la qualité de l'eau à l'échelle du tronçon de rivière. L'expérience acquise permettra de préparer le terrain pour faire face à la demande externe lorsque commencera la commercialisation des logiciels.

2.3.6 Les validations requises

La validation d'une application microhabitat n'est pas encore devenue une procédure classique comme pour le modèle hydrodynamique. Une réflexion générale est menée actuellement dans la communauté scientifique pour mettre au point des stratégies efficaces et reconnues. Ce sujet constitue d'ailleurs un des thèmes majeurs du Symposium Écohydraulique 2000. Deux stratégies sont couramment essayées: la première, plus classique, met l'accent sur l'obtention de corrélations significatives entre la biomasse piscicole du cours d'eau, d'une part, et la disponibilité totale d'habitat d'autre part, à un moment jugé limitant du cycle de vie du poisson (ex: en étiage). La deuxième approche, relativement nouvelle, met plutôt l'accent sur le rapport entre la qualité locale de l'habitat et la réponse physiologique du poisson individuel capturé à cet endroit, ou d'autres variables écologiques locales comme l'abondance relative d'individus dans le site étudié.

Un besoin générique en voie d'être comblé. La validation des modèles d'habitats constitue un besoin générique comme tout exercice de ce genre. Ce n'est pas dans le cadre d'un projet comme MÉTRIQUE qu'on arrivera à résoudre cette question complexe. Cependant,

en termes de besoins du projet, il est important que les procédures de validation prouvées et reconnues qui apparaîtront dans la littérature au cours des prochaines années soient véhiculées et proposées dans les manuels d'utilisation. Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir compter constamment sur l'apport de chercheurs ichthyologistes.

Pour ce faire, l'INRS-Eau participe à divers projets de validation de modèles: l'un dans le cadre du Centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique (CIRSA) sur la rivière Sainte-Marguerite, l'autre avec le Groupe Conseil Génivar (Environnement Shooner) supervisé par un comité ministériel intergouvernemental sur le saumon de la rivière Moisie. Les résultats de ces travaux seront certainement publiés dans des revues scientifiques arbitrées. S'il en surgit des méthodes standardisées de validation, elle seront proposées dans le manuel d'utilisation d'HABIOSIM et lors des cours de formation.

2.3.7 Les coûts acceptables d'utilisation

Notre expérience de l'acceptabilité des coûts d'utilisation nous révèle que ceux-ci doivent autant que possible demeurer en deçà de 15-20 000\$ (incluant le terrain) lorsqu'il s'agit de débits réservés pour des petites centrales, ou de design d'habitats.

Les premières applications pour Hydro-Québec atteignaient facilement 75 000\$ (excluant le terrain) en raison du caractère expérimental de l'approche, des coûts de développement des programmes et des procédures administratives reliées à ces études (comités de suivi, audiences, etc...). La standardisation des modèles, la réduction du coût de la modélisation hydrodynamique, l'efficacité accrue des campagnes de terrain, l'efficacité et la convivialité du module HABIOSIM permettront d'atteindre l'objectif de coût visé.

2.3.8 Validation des besoins

Les informations sur les besoins dans le contexte de la protection et de la restauration des habitats fluviaux sont de source interne et externe. Les applications auxquelles nous avons participé depuis 1987, la plupart avec le Groupe-Conseil Génivar dans le cadre de projets d'Hydro-Québec, nous ont permis de nous faire notre propre idée des fonctionnalités que devraient comporter un système de modélisation des habitats. Nos discussions avec d'autres intervenants nous ont permis de mieux situer le cadre d'utilisation qui devrait être offert aux futurs opérateurs quelle que soit leur appartenance.

Le tableau en annexe définit un peu plus précisément les éléments de discussions qui ont eu lieu avec les intervenants externes en regard du projet.

Parmi les contextes de validation internes, on compte les suivants:

- Hydro-Québec, V.P Environnement en collaboration avec le Groupe-Conseil Génivar (1987 à 1995) ; *Projet SM3, proposition de débits réservés pour le saumon de la Moisie, validation du modèle d'habitat*; Geneviève Corfa, Gaétan Hayeur, comité scientifique de suivi (V.P Env.), André Boudreault, Louis Belzile (Génivar), François Caron et autres, MEF
- Hydro-Québec, V.P. Environnement en collaboration avec le Groupe-Conseil Génivar (1989-1992); *Analyse de l'impact d'un projet hydroélectrique sur la rivière Ashuapmushuan*; Diane Villeneuve, V.P. Env., André Boudreault, Louis Belzile (Génivar)
- Hydro-Québec, V.P Environnement en collaboration avec le Groupe-Conseil Génivar (1994); *Analyse d'une méthode alternative de gestion des débits pour la protection du saumon de la rivière Betsiamite*; V.P Environnement, Hydro-Québec, André Boudreault, Louis Belzile, Gilles bourgeois (Génivar)
- Centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique (CIRSA) (1994-95); *Développement de la méthodologie de modélisation d'habitat, stratégie de validation, etc...*; Julian Dodson, Louis Bernatchez (U. Laval), M. Lapointe (U McGill), Daniel Boisclair (U. Montréal), Marco Rodriguez (UQAR)
- José Bechara, ichtyologiste, stagiaire post-doctoral à l'INRS-Eau (1992-1994)

Les contextes externes sont beaucoup plus nombreux, mais nous n'allons mentionner que les principaux:

- Ken Bovee et Terry Waddle, US Fish and Wildlife, National Biological Survey, Ft Collins Colorado *Discussions autour de PHABSIM, design d'habitat, la validation des modèles, le potentiel de nos outils, les besoins de données de terrain en 2D, la réglementation américaines, etc...*
- Pierre Bérubé, MEF (1994-95) *Discussions occasionnelles à propos des micro-centrales, projet de recherche sur une politique québécoise de débits réservés, l'élaboration du présent document.*

- Claude Beaulieu, GES, Georges-Albert Tremblay, OPDQ et FQSA, Michel Larnier, Conseil supérieur de la Pêche, Toulouse, France, (1994-95); *le design de la configuration de sortie des passes migratoires*
- Daniel Caissie et Rick Cunjack, Min. des Pêches et Océans Canada, région du Golfe, Moncton (1995), *Discussions sur l'applicabilité aux petits cours d'eau, PHABSIM, habitats d'hiver*
- Sylvie Valentin, Cemagref, Lyon (France), biologiste-ichtyologue en stage post-doctoral à l'INRS-Eau (1995) et Yann Le Coarer, Cemagref, Aix-en-Provence. *Les procédures de validation des modèles de microhabitat.*
- Allan Locke, Alberta Environmental protection, Chris Katopodis, Fresh Water Institute, Winipeg (1995); *Discussion sur la modélisation 2D de l'habitat - vs-PHABSIM, habitats multispécifiques, applicabilité aux petits cours d'eau, utilisation par des biologistes, besoins de données de terrain.*
- Svein Jakob Saltveit, Musée Zoologique d'Oslo, Norvège (1994) *L'expérience norvégienne, comment composer avec les hypothèses simplificatrices, le rôle du biologiste dans les recommandations de débit réservé.*

2.4 Le contrôle de la pollution industrielle

2.4.1 Problématique, enjeux

La plupart des pays développés du monde ont adopté au cours de cette décennie 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.

Notre analyse des besoins s'est 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). Les principaux volets de ces protocoles ont été considérés et les principales faiblesses ou inconsistances identifiées ont été exprimées en terme de besoins pour nos outils.

D'entrée de jeu, disons que notre adhésion naturelle va au mode d'intervention promu traditionnellement par le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, laquelle est basée sur les critères de qualité de l'eau. Notre démarche à l'égard de cette approche a été amorcée dès 1991, année où l'INRS-Eau concluait une entente de développement de modèles avec le Centre Saint-Laurent. Cette entente a donné lieu à la création de la version 1.0 de PANACHE. Cette version n'a pas été mise en opération systématique pour les papetières en raison principalement du processus de suivi retenu (ESEE) qui s'est inspiré d'expériences différentes dans l'ouest canadien, de la

nouveauté de l'approche, et des coûts d'utilisation dûs à l'absence de données hydrodynamiques sur les milieux considérés (fleuve Saint-Laurent et grands cours d'eau).

Par ailleurs, suite à une première application expérimentale de PANACHE 1.0 (Cantin et al, 1994) sur le lac Saint-Pierre, milieu où nous disposons de résultats de simulations hydrodynamiques, certaines insuffisances de l'outil ont été identifiées et ont donné lieu à une deuxième phase de développement dans le cadre du projet HYDREAU (1993-1994). Ce projet n'a pas permis de compléter la version 2.0 en raison de l'ampleur de la tâche identifiée et de la nouvelle technologie de programmation orientée-objet retenue pour réécrire le logiciel. C'est le but du projet MÉTRIQUE d'achever le prototypage. Dans ce qui suit, nous allons reprendre l'argumentation de base qui a servi à justifier le développement de la version 1.0 (et par conséquent de la version actuelle).

2.4.2 Contextes d'utilisation potentielle

Dans ce qui suit, nous allons procéder à l'analyse des besoins en fonction des différentes étapes du processus d'analyse de la contamination qui induit les interventions. Pour ce faire, nous allons devoir faire référence simultanément à deux approches appliquées couramment au Québec et au Canada: l'une générique est générique et elle est fondée sur des critères de contamination (normes), l'autre est particulière aux Pâtes et Papiers (l'approche ESEE) et elle fait appel à un suivi environnemental dans le milieu. Notre structure de présentation devra donc aller alternativement de l'un à l'autre afin de faire ressortir parfois, les points communs, ou autrement, les besoins particuliers aux deux approches.

Le protocole d'intervention générique Dans le cadre du Plan d'Action Saint-Laurent (PASL) et de Saint-Laurent Vision 2000 (SLV 2000), la réduction des contaminants toxiques s'effectue en six étapes opérationnelles (Le Fleuve, vol. 5, no 3, 1995). Ce processus est appliqué de concert entre le MEF et Environnement Canada. Il comprend principalement:

- 1) l'inventaire (usine, procédés, points de rejet)
- 2) la caractérisation initiale (charges rejetées à l'effluent, effets toxicologiques)
- 3) les objectifs environnementaux (limites définies en fonction du cours d'eau récepteur)
- 4) les normes de rejets (objectifs de réduction selon les technologies disponibles ou à développer)
- 5) les travaux d'assainissement
- 6) le suivi environnemental

Le protocole particulier des ESEE pour les papetières. Le protocole particulier appliqué aux papetières s'inspire de la démarche générique avec des aspects particuliers qui l'en distinguent. Il s'applique à l'ensemble de l'industrie des pâtes et papiers et pas seulement aux usines établies sur le bord du fleuve Saint-Laurent. Il se distingue par le suivi environnemental qui est axé sur l'inventaire dans le milieu comme nous le verrons plus loin. Du point de vue de l'analyse des besoins, ce protocole particulier ne modifie en rien nos conclusions quant aux fonctionnalités de modélisation que devront comporter les outils informatiques.

Une approche nécessitant l'utilisation de modèles. La modélisation numérique est nécessaire pour définir plus précisément certaines étapes du processus d'intervention, particulièrement les étapes 3 et 6. En principe, un test de diffusion à la rhodamine WT est conduit pour connaître les

caractéristiques de mélange du milieu récepteur en aval de l'effluent pour un débit quelconque, un étiage de préférence. Afin d'éviter d'utiliser une distribution arbitraire des panaches, cette description doit être extrapolée pour le débit minimum 7 jours consécutifs de période de récurrence 10 ans à l'aide d'un modèle de simulation de transport-diffusion. Cette période de récurrence est appliquée par consensus des intervenants mais elle ne fait pas partie du règlement. Les données mesurées servent alors à calibrer le modèle.

Dans le cadre général d'intervention, le but est d'analyser le niveau de contamination (par dépassement de critères) dans une région donnée en aval de l'effluent. Dans le cadre particulier des ESEE, le but de l'opération est de délimiter une "zone d'exposition" à l'effluent définie par une dilution inférieure à 1/100, et de la distinguer d'une "zone de référence" non-exposée, en vue d'un suivi environnemental comparatif axé sur des paramètres biologiques. La zone de référence est choisie en fonction de critères d'homogénéité par rapport à la zone d'exposition (vitesse du courant, substrats, caractéristiques de base des masses d'eau).

Il existe donc un besoin de modélisation tant dans le cadre de l'approche générique que dans le protocole particulier des ESEE. Ce besoin est inhérent à l'extrapolation qui doit être faite à un événement de référence hydrologique généralement non-mesurable pratiquement. En plus d'atteindre un bon niveau de précision, l'outil doit être convivial et facile d'utilisation vu qu'il doit servir à des usagers non-numériciens.

Le modèle lagrangien (basé sur un algorithme de "suivi de particules" appelé aussi "marche au hasard") PANACHE vise à répondre à ce besoin. La possibilité de mobiliser rapidement ce type d'outil est un des arguments qui ont présidé au choix de cette approche (voir les sections "Fonctionnalités de PANACHE, page 60 et "Bien-fondé de l'approche lagrangienne", page 24).

Des applications peu fiables du point de vue hydrodynamique. Dans les conditions actuelles d'application, l'étape de l'extrapolation est réalisée à l'aide de modèles sur-simplifiés du panache. En effet, la modélisation utilise habituellement un champ de vitesse uniforme (constant dans l'espace) ce qui ne se vérifie que très rarement dans le milieu naturel. Il en est de même pour les coefficients de diffusion qui sont pris comme des valeurs moyennes pour le tronçon alors qu'ils devraient être variables dans l'espace.

Dans l'optique de l'amélioration de l'étape d'extrapolation par modèles, si importante pour soustraire la démarche de son aspect arbitraire, l'utilisation d'une description plus précise du champ de vitesse dans la zone d'exposition est requise. Cette description doit aussi permettre de spécifier localement les conditions de diffusion.

Cette phase peut être réalisée avantageusement en utilisant un modèle hydrodynamique bi-dimensionnel, associé à une loi de comportement tenant compte de la turbulence locale et permettant ainsi de définir les coefficients de diffusion du milieu à l'échelle locale.

Le cadre d'analyse de la contamination. Considérons maintenant le volet analyse de la contamination. L'approche générique d'intervention reconnaît qu'une zone puisse être détériorée localement à la sortie de l'effluent. Cette "zone de tolérance" est appelée "zone de mélange" et elle ne peut dépasser arbitrairement 300 mètres longitudinalement et 50 mètres (ou la moitié du lit du cours d'eau) latéralement. En dehors de celle-ci, la concentration de contaminant dans le panache ne peut dépasser le critère "chronique" de qualité de l'eau retenu pour la conservation des usages présents dans le milieu. Le critère pour la vie aquatique est le seuil de base à être respecté. Si des

usages exigeants (prise d'eau, récréation, pêche commerciale) sont présents en aval, les pouvoirs publics jouissent d'un pouvoir d'intervention accru pour justifier les actions d'assainissement. Au sein de la zone de mélange, le critère aigu est applicable partout, même au tuyau. La définition de la zone de mélange s'effectue par les moyens décrits précédemment (tests de traçage, extrapolation au Q_{7-10} par modèle).

On voit ici que l'identification des usages cibles à protéger et la prise en compte de critères de qualité de l'eau sont les deux facteurs clés de cette approche.

En tant que besoin, l'analyse de la contamination nécessite des outils qui tiennent compte des usages et des critères de contamination.

Ces deux aspects avaient été identifiés comme des nécessités fonctionnelles dès l'élaboration de la première version de PANACHE. Le raisonnement à l'égard des critères a été poussé un peu plus loin afin d'inclure le concept de contamination cumulée de plusieurs substances présentes simultanément dans le même effluent. C'est le concept d'Unités Standardisées de Contamination (les USC) similaire à l'indice CHIMIOTOX lequel permet de cumuler linéairement les dépassements de critère dans le panache des industries. Ce concept permet aussi d'inclure l'influence du milieu en amont du point d'émission de l'effluent.

Quant aux usages, notre analyse s'est limitée dans un premier temps à offrir à l'utilisateur un module permettant d'interagir visuellement avec une carte de distribution des usages dans la région de propagation des effluents. Cette fonctionnalité permet de gérer une mini-base de données usages (créer, définir, modifier, trier, charger, sauver, consulter, localiser les différentes entités de la base, etc...). L'analyse de ce module a été conduite à l'aide d'une consultation des intervenants dans le domaine.

Les ESEE: un suivi biologique comparatif en valeur relative. Contrairement à l'approche générique, pour intégrer l'aspect contamination dans la démarche d'analyse, le cadre des ESEE s'appuie sur l'observation dans le milieu de paramètres biologiques indicateurs de la qualité de l'eau. Suite à l'identification des zones d'exposition et de référence, un protocole de suivi biologique (monitoring) est appliqué identiquement aux deux endroits en vue de faire ressortir s'il-y-a-lieu les effets de contamination par l'effluent. Les paramètres biologiques touchent le poisson, le benthos et la qualité de l'habitat. La principale difficulté ici réside dans le caractère relatif de la méthode. Si la zone de référence est elle-même contaminée par des effluents situés ailleurs en amont ou à proximité de la zone d'exposition, les différences dans le suivi biologique comparé s'atténuent (perte de sensibilité) et il n'est pas possible alors de tirer des conclusions probantes pour les interventions. La difficulté de choisir précisément les sites d'échantillonnage dans les zones de monitoring constitue un élément d'incertitude additionnelle dans cette approche.

On voit ici apparaître le besoin de disposer d'outils d'analyse à une échelle plus large permettant de définir les zones d'exposition à des sources de contamination situées à l'amont. Ces sources peuvent être ponctuelles ou encore, provenir d'affluents importants définissant des masses d'eau différentes (exemple: les tributaires agricoles).

Nous reviendrons sur cet aspect dans un des paragraphes suivants.

Les critères de contamination: une approche à approfondir. Une approche basée sur des critères de contamination, et permettant d'isoler l'impact spécifique d'un effluent individuel, serait souhaitable pour faciliter le processus d'analyse et d'intervention industrielle.

Pour ce faire, il faut que le modèle offre la possibilité de manipuler notamment, les débits massiques de contaminant, les indices de contamination (incluant, les indices cumulés comme le CHIMIOTOX) et la contribution du milieu récepteur dans la zone d'exposition.

Les critères de contamination obtenus par bioessais sur des échantillons d'effluents dilués progressivement jusqu'à innocuité (ex: le BEAP) constituent également une approche à considérer. Ils permettent de spécifier le degré de dilution de l'effluent qui offrirait un niveau tolérable dans le milieu. Ils pourraient donc être utiles pour délimiter l'ampleur de la zone de tolérance dont jouissent les industries avant les interventions et de mieux fixer les objectifs de réduction des contaminants afin de circonscrire cette zone dans les limites acceptées par la réglementation.

Encore ici, il faut que le modèle utilisé puisse donner des résultats fiables sur la dilution effective du débit de l'effluent dans le milieu récepteur. Une bonne compréhension du concept de dilution est également requise.

Que faire des régions influencées par plus d'un panache ? La zone d'exposition peut ne pas être homogène et être influencée par un panache émis dans une région adjacente (tributaire, industrie ou municipalité), ce qui est souvent le cas dans les zones industrielles ou urbaines. Dans ce cas, l'emploi de critères standards ne permet pas aisément d'inclure l'effet cumulatif des panaches. L'approche ESEE de son côté, perd de sa sensibilité à mesure qu'il devient difficile de distinguer la contamination de la zone d'exposition de celle présente dans la zone de référence. Les bioessais basés sur la dilution devraient utiliser de l'eau déjà contaminée en provenance du milieu récepteur plutôt que de l'eau distillée. On voit que ce cas de figure n'est pas simple à considérer quelle que soit l'approche actuelle retenue

En termes de besoins, le modèle doit donc pouvoir combiner l'effet de plus d'un panache dans le cas de l'approche par critères. Considérant l'approche ESEE, le modèle doit pouvoir aider à mieux définir les zones de suivi.

L'offre de fonctionnalités dans le cadre de la version 1.0 de PANACHE permettait de répondre aux besoins suivants: réponse spécifique à la contamination d'un effluent individuel et prise en compte d'un milieu récepteur homogène. La possibilité de cumuler l'influence de panaches sur la base des concentrations et la prise en compte d'un milieu récepteur hétérogène sont des nouvelles fonctionnalités qui restent à implanter dans PANACHE et elles sont prévues pour la version 2.0.

Un problème ignoré, l'échelle spatiale de la contamination. Dans le cadre des études d'expérimentation de PANACHE version 1.0 dans le lac Saint-Pierre, il s'est avéré que les panaches simulés correspondant aux effluents de Québec Fer et Titane, et de Tioxide dans la région de Sorel-Tracy étaient très loin de satisfaire les critères de contamination chronique pour la vie aquatique, et ce sur de très longues distances, typiquement sur toute la longueur du lac Saint-Pierre. La réalisation d'un test de traçage à la rhodamine WT avait permis de valider le modèle de la concentration. La conclusion de cette expérience est que les échelles spatiales habituellement considérées dans les études de contamination par les industries sont parfois déficientes par rapport à leur envergure

réelle particulièrement dans les milieux à grand gabarit. Cette situation est attribuable à la difficulté de réaliser des études de diffusion dans ce genre de milieu à l'aide de techniques classiques basées sur des tests de rhodamine et des modèles de transport-diffusion basés sur l'hypothèse d'écoulement uniforme.

Ce constat est un argument de plus pour l'utilisation d'un modèle hydrodynamique dans le cadre d'analyse des milieux à grand gabarit.

2.4.3 Bien-fondé de l'approche lagrangienne

Dans ce qui suit, nous allons d'abord décrire simplement les principes de l'approche lagrangienne. Dans un second temps, les arguments de justification de l'approche lagrangienne seront rappelés. Enfin, nous allons considérer les besoins qui en découlent.

L'approche lagrangienne, un principe naturel. La méthode lagrangienne consiste à simuler le transport de contaminants par l'intermédiaire de "particules" (des points mathématiques) en mouvement dans la masse d'eau. Pour les substances conservatives, le mouvement est constitué d'un déplacement moyen (la vitesse du courant), et d'un déplacement aléatoire associée à la turbulence du cours d'eau. En utilisant un grand nombre de particules, le résultat obtenu est un nuage de point prenant la forme du panache de l'effluent. En associant à chaque particule une masse déterminée de contaminant et en analysant la densité du nuage dans l'espace du cours d'eau, on arrive à déterminer la concentration du polluant en tout point. La profondeur, la vitesse locale du courant et les paramètres de la turbulence, en somme les paramètres morphométriques et hydrodynamiques du cours d'eau, sont déterminants pour la qualité du résultat.

Une approche justifiée. L'approche lagrangienne se justifie habituellement par rapport à l'autre approche possible dite "eulérienne". Cette dernière n'utilise pas de particules numériques pour le calcul des concentrations. Celui-ci s'effectue directement sur une grille de calcul laquelle doit, par conséquent, être adaptée avant la simulation afin de procurer la densité d'information nécessaire au besoin de modélisation, en particulier, près de la sortie de l'effluent. Le processus ne peut donc qu'être itératif ce qui l'allourdit. De plus, l'approche eulérienne est entachée de sérieux problèmes de diffusion artificielle lorsque la densité de la grille de calcul ne permet pas de prendre en compte précisément les forts gradients de concentration, typiquement ceux qu'on retrouve près de l'émissaire. Ceci est une nécessité additionnelle pour adapter localement la grille de calcul dans la région du panache avant même d'en connaître la localisation. Quoique possible, cette tâche est relativement fastidieuse et demande un degré d'expertise assez avancé concernant l'erreur de diffusion numérique.

C'est pourquoi nous avons été conduits à considérer l'approche lagrangienne. La mobilisation en est facile: il suffit de choisir un point d'injection et de spécifier un débit particulaire et la simulation peut être réalisée rapidement sans qu'il soit nécessaire de raffiner la grille de calcul dans le panache. Pour le calcul des concentrations, un raffinement de grille est nécessaire pour accéder localement à l'information produite par le modèle. Ce raffinement s'effectue naturellement car il est calqué sur la densité du nuage. La diffusion artificielle n'est pas éliminée par l'approche lagrangienne. Il est cependant possible d'en contrôler explicitement le niveau, et de s'en tenir à celui qui est nécessaire pour lisser la distribution massique portée par le nuage de particules.

Il existe donc un besoin de recommandations précises concernant la diffusion artificielle à injecter dans le modèle pour en respecter les limites de validité.

Ces recommandations seront le résultat de tests élaborés dans le cadre du projet.

Limitations informatiques de l'approche lagrangienne: un frein. La raison principale qui a retardé traditionnellement l'implantation de l'approche est son coût informatique. La lourdeur des calculs limitait considérablement le nombre de particules d'une simulation; en conséquence, la méthode apparaissait comme peu précise. Il a fallu déployer beaucoup de moyens algorithmiques pour rendre une tâche de calcul de suivi de particules praticable sur micro-ordinateur avec un degré satisfaisant de précision. Cette démarche algorithmique a été expliquée en détail dans Leclerc et al (1991a).

Des besoins hydrodynamiques. Quelle que soit l'approche retenue, eulérienne ou lagrangienne, il est nécessaire d'utiliser un champ de vitesse relativement précis afin de bien reproduire à la fois les phénomènes de transport et de diffusion. Les principaux paramètres de cette modélisation sont en effet fournis par le champ de vitesses. C'est pourquoi, nous croyons que:

l'utilisation de modèles de transport-diffusion dans le contexte d'analyse de contamination et d'interventions sur le milieu aquatique implique nécessairement la mise en oeuvre d'un modèle hydrodynamique.

Les limites de validité. Dans le cadre du projet MÉTRIQUE, les premières limites de validité de l'approche lagrangienne sont celles du modèle hydrodynamique que nous avons vues déjà à la page 6 (Le bien fondé du modèle hydrodynamique bidimensionnel).

À celles-ci s'ajoutent celles relatives au fait que les contaminants sont conservatifs et exempts de sédimentation par suite d'adsorption sur les sédiments fins. Les interactions entre les divers contaminants ne sont pas prises en compte non plus. À cet égard, l'approche eulérienne offre de meilleures possibilités de considérer des processus d'échanges plus complexes non-conservatifs (sources et puits).

Comme pour le modèle hydrodynamique et le modèle d'habitat, il est nécessaire de bien expliciter les limites de validité du modèle dans les manuels de l'utilisateur ainsi qu'au cours des séances de formation.

2.4.4 Le type d'utilisateur et la formation requise

L'utilisateur type est un analyste de la qualité de l'eau (chimiste, biologiste, géologue, hydraulicien, spécialiste en environnement aquatique, etc...) ayant reçu une formation complémentaire en hydraulique fluviale.

Idéalement, ces études devraient être conduites par une équipe comprenant à la fois des spécialistes des sciences naturelles et des hydrauliciens fluviaux.

En termes de besoins, le contenu de formation des utilisateurs du module lagrangien de calcul de panaches devra incorporer à la fois le contenu hydrodynamique et les éléments de qualité de l'eau pertinent à la modélisation. Les limites de validité devront être bien explicitées ainsi que les précautions à prendre pour limiter la diffusion numérique.

La réponse à ce besoin a été donnée à la page 16 (voir la rubrique: Un nouveau cours à l'INRS-Eau.).

2.4.5 Les validations requises

La validation terrain: une procédure simple en apparence. La procédure de validation requise pour appliquer un outil de simulation des concentrations passe par la comparaison des résultats du modèle aux mesures *in situ*. Étant donné le caractère conservatif du modèle de transport-diffusion, la validation est comparable à celle d'un modèle hydrodynamique et apparaît simple à réaliser.

Dans le cadre général défini précédemment, les mesures sont réalisées 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 la trajectoire du maximum de concentration, l'emprise transversale ainsi que la valeur de la concentration maximale dans un profil en long. Certains tests permettent indirectement de valider le modèle hydrodynamique. Ainsi, une bonne trajectoire de panache simulé permet de vérifier la direction des lignes de courant du modèle hydrodynamique.

L'homogénéité² des ensembles de données: un aspect délicat et crucial de la validation de modèles.

La procédure de validation décrite ci-haut paraît simple à première vue mais elle comporte des difficultés importantes qui peuvent cependant être surmontées. Ces difficultés ont trait parfois au manque d'homogénéité entre les données collectées sur le terrain et celles produites par le modèle. L'homogénéité des conditions d'obtention des données doit en effet être assurée en vue d'éviter de comparer des ensembles de données qui ne se comparent pas (bilans de masse, position des transects, durée des échantillonnages, etc...).

Notre expérience de validation des panaches simulés au lac Saint-Pierre nous indique que les difficultés de terrain inhérentes aux tests de traçage donnent parfois des résultats imprécis et cette marge d'incertitude peut entraîner des écarts d'homogénéité significatifs par rapport au modèle. Il peut s'avérer nécessaire à l'occasion de valider les données de terrain elles-mêmes avant d'entreprendre l'exercice de validation du modèle. Par exemple, la vérification du bilan de masse du traceur (dans le modèle, il est automatiquement assuré) et de la direction des transects (qui doit être perpendiculaire au courant, sinon elle doit être normalisée comme dans le modèle), le contrôle des seuils de détection du colorant par l'instrumentation (le modèle ne comporte pas de tels seuils) sont des activités obligatoires de la procédure de validation. Elles sont nécessaires pour rendre justice au modèle.

En termes de besoin, la procédure de validation des modèles de panaches devra être élaborée tant au niveau des principes (ex: homogénéité des ensembles de données) qu'au

² La notion d'*homogénéité* de deux ensembles de données qu'on veut valider l'un par rapport à l'autre réfère aux conditions dans lesquelles elles ont été obtenues. Par exemple, le débit du cours d'eau, les variables choisies, les échelles de temps et d'espace considérés, la localisation des points de données doivent être comparables pour les deux ensembles.

niveau des précautions à prendre sur le terrain pour favoriser l'obtention de mesures valides et homogènes. Les procédures de validation des données de terrain devront être explicitées et acceptées par les pairs.

Un article sur une opération réussie de validation terrain (tests du lac Saint-Pierre) est en préparation et il sera soumis pour publication dans une revue scientifique internationale arbitrée par les pairs. Cette procédure comprend également un protocole de validation basé sur la télédétection aéroportée.

La validation théorique: un passage obligatoire. Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment concernant les autres modèles du projet MÉTRIQUE,

la philosophie derrière l'approche modèle de panache, le modèle mathématique lagrangien ainsi que ses approches algorithmiques doivent faire l'objet de publications dans des revues scientifiques arbitrées.

Deux articles scientifiques sont en voie d'achèvement et leur soumission à des revues devrait se faire au cours du premier trimestre de 1996. Les thèmes développés concernent le développement mathématique de base, les choix algorithmiques et les nombreux tests analytiques permettant de valider les résultats obtenus à l'aide de solutions mathématiques connues. La rédaction de ces articles s'effectue à partir du contenu du rapport Leclerc *et al* (1991a). Les nouveaux développements requis pour la version 2.0 de PANACHE feront également l'objet de communications du même type.

Un premier article scientifique a déjà été publié pour exposer et valider la philosophie de l'approche auprès de la communauté scientifique (Leclerc et Boudreault, 1993).

2.4.6 Les coûts acceptables d'utilisation

Notre référence: l'état actuel des choses dans le cadre des ESEE. Le coût acceptable de réalisation d'une analyse par modèle de contamination par une industrie nous semble tenir entre 25 000\$ et 40 000\$, soit le coût d'un test de rhodamine sommaire assorti d'analyses complémentaires par modèles simplifiés (sans modélisation hydrodynamique). Ce coût représente l'état actuel des choses. Compte tenu des critiques formulées précédemment à l'égard des inconsistances et des imprécisions de l'approche actuelle, un tel montant peut sembler à la limite de l'acceptabilité par les industriels. Une approche mieux articulée permettrait-elle d'envisager un rehaussement de ce seuil ? Il est difficile de répondre à cette question tant que les preuves de supériorité de l'approche proposée n'auront pas été faites.

Le coût d'une analyse par modèle de la propagation d'un contaminant telle que décrite précédemment dans cette section est intimement lié à deux activités principales: la production de champs de vitesse dans le tronçon étudié et le test de traçage. La mise en oeuvre du modèle de panache est très peu coûteuse étant donné l'efficacité de l'outil développé. Il ne faut cependant pas négliger les difficultés de validation terrain évoquées précédemment.

Concernant le test de traçage, il doit de toutes façons être réalisé quel que soit le modèle de panache utilisé.

La véritable différence qui pourrait entraîner des coûts additionnels par rapport à la démarche classique tient au modèle hydrodynamique et aux opérations de terrain spécifiques pour sa mise en oeuvre. Mentionnons d'abord que les données de terrain seraient certainement obtenues à un coût tout-à-fait abordable si l'on faisait correspondre cette campagne avec le test de rhodamine. Les deux méthodes de caractérisation requièrent toutes deux des méthodes de positionnement, des mesures bathymétriques, des mesures courantométriques, des embarcations, etc... Prolonger quelque peu les opérations de terrain du test de traçage ne feraient que rentabiliser les coûts fixes liés à cette activité. Il s'avère aussi que dans bien des milieux, particulièrement les voies navigables, les données bathymétriques existent déjà et sont disponibles à un coût relativement abordable (les "Minutes hydrographiques" du Service Hydrographique du Canada, par exemple). Ainsi, il ne faut pas considérer les opérations de terrain en vue de l'exploitation d'un modèle hydrodynamique comme une activité additionnelle lourde et coûteuse.

Concernant la modélisation hydrodynamique elle-même, le projet MÉTRIQUE vise principalement à rendre cette activité à la portée des intervenants tant au niveau financier que technique. En termes financiers, la rapidité et l'efficacité des outils vont contribuer de plus en plus à en réduire le coût d'utilisation. Par exemple, leur utilisation directe sur ordinateur-portable dans le contexte du terrain est un facteur d'économie réelle. Cette opportunité fait déjà l'objet de tests dans le cadre du Centre interuniversitaire sur le Saumon atlantique. Dans le même ordre d'idée, l'offre d'*hydrobases* (voir à la page 28, la rubrique "Vers des hydrobases du domaine public, un nouveau produit numérique à offrir"), véritables jeux de données déjà constituées et approuvées par les pouvoirs publics devrait permettre de rendre toute l'opération non-seulement abordable en termes de coûts mais également moins sujette à l'arbitraire concernant la qualité des données utilisées.

Vers des hydrobases du domaine public, un nouveau produit numérique à offrir... Nous envisageons actuellement la possibilité de développer un nouveau type de "produit" numérique axé sur le concept d'*hydrobase*.

Une "hydrobase" est un ensemble complet de données de simulation hydrodynamique (incluant les données du modèle numérique de terrain) qu'on rendrait disponible au public en général en vue d'applications diversifiées: contrôle de la pollution industrielle ou urbaine, applications d'ingénierie, microhabitats, études d'impact, etc.... Le besoin pour un tel produit est relié au coût de production des données qui serait individuellement excessif pour la majorité des intervenants mais abordable collectivement (marché d'utilisateurs). Cette approche se situe également dans l'optique des politiques de recouvrement de coûts que cherchent à implanter les divers niveaux de gouvernement.

C'est ce mode de diffusion qui est utilisé pour les "minutes hydrographiques" du Service Hydrographique du Canada. Des hydrobases seraient d'abord créées pour les cours d'eau offrant suffisamment de potentiel pour intéresser plusieurs intervenants, par exemple, le fleuve Saint-Laurent. Des "événements de référence" validés par les autorités publiques, encore à définir (ex: MEF, Environnement Canada, INRS-Eau) seraient offerts comme produits sur le marché à un prix permettant d'amortir leur production sur plusieurs clients. L'investissement original viendrait de ces autorités et la commercialisation permettrait de recouvrer l'investissement. Les données peuvent être livrées sous différentes formes: cartes-papier, cartes-écran (bitmaps), fichiers GIS, fichiers de données brutes. L'accès peut se faire sur Internet. Des discussions sont en cours actuellement avec Environnement Canada pour formaliser cette approche.

2.4.7 Validation des besoins

Plusieurs des éléments d'information inclus dans cette section nous ont été fournis par Normand Rousseau du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.

Parmi les contextes de validation, on compte aussi les suivants:

- Pour Environnement Canada en collaboration avec la firme ASSEAU Inc.; *Développement de la version 1.0 du logiciel PANACHE; Validation terrain; Analyse de la contamination du lac Saint-Pierre par les industries de la région de Sorel.*

Dans le cadre de ce projet, les personnes impliquées et les éléments considérés sont:

- Paul Boudreault (Environnement Canada): l'approche de l'analyse de contamination;
- Jean-François Cantin (Environnement Canada): premier usager de PANACHE, il a documenté les éléments à améliorer dans la version 2.0 et participé à la définition du concept d'*hydrobase* sur le fleuve Saint-Laurent;
- Pierre Lavallée (Président Asseau Inc.): à l'origine des tests de rhodamine au MEF, a participé au développement du concept de test numérique, conseiller auprès de l'Association de l'industrie forestière pour le développement d'une approche alternative aux ESEE; sa firme est elle-même impliquée dans ce genre d'étude ainsi que dans l'assainissement industriel en général;
- Jean-Pierre Fortin (INRS-Eau): télédétection aéroportée, validation terrain de PANACHE à l'aide d'images numériques;
- Jean-Pierre Fau (Groupe-conseil ROCHE): tests de traçage pour la validation terrain de PANACHE)
- Lynn Cleary (déléguée scientifique du Centre Saint-Laurent): l'ensemble du projet

D'autres éléments ont fait l'objet de discussions séparées:

- Gaétan Duchesneau (Environnement Canada): indice CHIMIOTOX.

2.5 Le contrôle des débordements de réseaux unitaires en temps d'averse et le suivi des masses d'eau

2.5.1 Problématique, enjeux

Une priorité en assainissement urbain. La gestion des eaux usées par temps de pluie constitue actuellement un aspect prioritaire 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 rivages. 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, HAP et nutriments.

Différentes échelles de temps à considérer. 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'impact 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.

L'analyse détaillée de la contamination par les débordements: un besoin. 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.

2.5.2 Contextes d'utilisation potentielle

Le contexte du design des ouvrages de rétention. Le contexte décrit ici est la résultante ultime de l'analyse de la contamination par les débordements des réseaux unitaires. La mise en oeuvre d'un modèle de propagation de panaches d'eaux de débordements vise à:

- 1) identifier les zones du milieu soumises à un dépassement de critères de contamination durant un épisode d'averse intense décrit par un pollutogramme de période de récurrence donnée;
- 2) estimer la quantité d'eau qui doit être retenue durant un tel épisode et le moment le plus propice pour intervenir; Le résultat est un pollutogramme acceptable
- 3) établir les dimensions et les caractéristiques des ouvrages de rétention permettant de réaliser cet objectif.

Pour ce faire,

l'analyste doit disposer du pollutogramme des différents émissaires de débordements affectant le tronçon. Le pollutogramme est un événement décrit par le débit déversé en fonction du temps et par une qualité d'eau variant en fonction de la phase de lessivage du réseau.

Dans l'état actuel des choses une telle analyse utilise les critères de contamination *aigue*. L'événement de déversement a une période de récurrence d'un an. L'événement hydrologique décrivant le

cours d'eau est le débit minimum 7 jours consécutifs de période de récurrence 2 ans ($Q_{7,2}$). La qualité ambiante du milieu récepteur correspond à un "bruit de fond" à l'amont du site de déversement. Les principaux paramètres de qualité de l'eau considérés sont les bactéries coliformes, les matières particulaires et la matière organique. Les éléments nutritifs sont plus difficiles à prendre en considération.

Un niveau d'intervention plus efficace exigerait de prendre en considération des critères de contamination "chroniques". Une telle approche devrait tenir compte des échanges sédiments-eau et du niveau de contamination détaillé des eaux en provenance de l'amont. Les états décrits peuvent alors être eux-mêmes affectés par des débordements d'émissaires situés à l'amont. C'est donc une situation de contamination à sources multiples qui doit être envisagée. Nous sommes donc en présence d'une situation très complexe qu'il est très difficile de décrire autrement qu'avec des modèles de simulation appropriés tenant compte des paramètres à traiter.

En raison de la complexité des situations évoquées, réaliser de telles simulations représente un véritable défi pour les modélisateurs mais ce n'est pas du domaine de l'impossible. L'importance des investissements dans les aménagements justifie à elle seule le développement des outils.

Les données requises. Pour mettre en oeuvre un modèle de ce type sur un tronçon fluvial, le modélisateur a besoin:

- 1) des données habituelles requises pour une modélisation hydrodynamique détaillée: bathymétrie globale et locale (plus précise dans la région des émissaires), substrats, relations niveau-débit, courantométrie locale (pour fins de validation), hydrologie du tronçon ($Q_{7,2}$), ligne de berge précise;
- 2) les données de tests de traçage afin de valider le modèle de transport-diffusion, lesquels doivent être réalisés dans les régions de déversement;
- 3) données sur les usages actuels ou potentiels;
- 4) analyse de la fréquence des débordements associée à la caractérisation des contaminants présents (débit, concentrations, charges), en somme les pollutogrammes cibles

Un contexte secondaire: les panaches des tributaires. Le contexte des panaches de tributaires est décrit comme secondaire parce qu'il peut bénéficier accessoirement de l'utilisation du type de modèle décrit au paragraphe suivant (Bien-fondé de l'approche eulérienne). On vise ici à définir plus précisément les différentes masses d'eau qui se forment à partir du confluent d'un cours d'eau important et de ses tributaires.

En effet, il peut s'avérer nécessaire de faire intervenir la qualité de l'eau du milieu ambiant, telle qu'influencée par les tributaires, dans l'analyse de la contamination d'un tronçon fluvial par des sources ponctuelles urbaines ou industrielles.

Nous avons vu que pour conduire une analyse de contamination rigoureuse, il ne suffit pas de prendre en compte la source de pollution visée directement par l'analyse (effluent industriel, émissaire de débordement). Le milieu ambiant à l'amont de la source définit le plancher de la contamination sur lequel viendra se juxtaposer la nouvelle source. Le milieu ambiant peut être homogène transversalement; dans ce cas, cela signifie que les apports hydrologiques ou autres sont injectés suffisamment loin en amont pour permettre une homogénéisation. Autrement les nouveaux

apports hydrologiques introduits à proximité (kilomètres) du secteur d'analyse vont définir des masses d'eau hétérogènes latéralement qui vont conditionner le niveau de contamination des nouveaux apports locaux.

Concernant donc l'interaction tribulaire-cours principal, les masses d'eau se co-pénètrent par diffusion turbulente et la concentration résultante est un mélange des concentrations originales. Les variables d'état considérées ici par notre modèle sont généralement des valeurs adimensionnelles exprimant la proportion relative (entre 0 et 1) des masses d'eau originales contribuant à la qualité de l'eau en un point donné du cours d'eau. Connaissant la concentration originale des différents paramètres physico-chimiques, et à condition que ceux-ci soient généralement conservatifs, on peut estimer la qualité ambiante dans la zone de mélange. Les variables traitées se limitent aux contaminants conservatifs parce que les cinétiques implantées dans le modèle sont plutôt conçues pour répondre aux besoins de simulation posés par les débordements des réseaux unitaires (voir le paragraphe "**Prise en compte des processus physico-chimiques et biologiques: priorités**" à la page 53). C'est pourquoi, il n'est pas recommandé d'en activer le calcul dans le contexte des tributaires.

2.5.3 Bien-fondé de l'approche eulérienne

L'approche eulérienne: une démarche naturelle pour traiter les contaminants non-conservatifs. En bref, 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 (voir le paragraphe "Bien-fondé de l'approche lagrangienne" à la page 24. 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 (voir le paragraphe "**Les caractéristiques de la résolution numérique eulérienne**" à la page 55). Le niveau d'expertise des usagers doit donc nécessairement être plus élevé.

Les hypothèses sous-jacentes à chacune des variables d'état décrites au paragraphe "**Prise en compte des processus physico-chimiques et biologiques: priorités**" (page 53) sont nombreuses et il sera nécessaire de les expliciter très clairement pour les futurs usagers. La thèse de maîtrise de Mlle Sophie Bédard et les écrits résultant du maintien d'une activité de recherche académique dans ce volet serviront de base pour élaborer les manuels offerts avec le modèle.

Du 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 (voir la paragraphe intitulé "Le bien fondé du modèle hydrodynamique bidimensionnel" à la page 6). Le fait de respecter les hypothèses physiques de base nécessaires pour l'application d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel devrait suffire à assurer la pertinence physique du modèle de transport-diffusion.

Le concept de dose: une option de recherche à considérer. La distinction effectuée entre les critères de contamination aiguë et chronique fait référence à la durée à laquelle les masses d'eau contaminées sont ou devraient être soumises à un degré de contamination donné. Du point de vue formel, la modélisation de ce concept donnerait naissance à une nouvelle variable d'état appelée "dose". La dose réfère à l'intégration temporelle de la concentration d'un contaminant à laquelle est soumis un volume d'eau donné. Pour implanter ce concept, il faudrait pouvoir à la fois suivre ce volume d'eau dans l'espace (approche lagrangienne) et retracer l'évolution temporelle de sa concentration afin de pouvoir procéder à l'intégration temporelle.

Dans l'état actuel de nos modèles, ce concept devra recevoir une attention particulière des chercheurs avant de pouvoir être proposé comme une solution pratique au sein de logiciels d'application.

Le lecteur trouvera un traitement complémentaire de ce concept au paragraphe intitulé "Notion de dose" à la page 57.

2.5.4 Le type d'utilisateur et la formation requise

L'utilisateur type est un analyste de la qualité de l'eau (chimiste, spécialiste en environnement aquatique, etc...) ayant reçu une formation complémentaire en hydraulique fluviale et en méthodes numériques de base, de préférence au deuxième cycle universitaire. En effet, étant donnée les difficultés additionnelles reliées à l'application de l'approche eulérienne (discrétisation spatiale adaptée, diffusion artificielle à contrôler) et à la prise en compte de processus non-conservatifs, l'expertise nécessaire pour utiliser le modèle proposé sera supérieure à celle requise pour appliquer l'approche lagrangienne, donc vraisemblablement une maîtrise en sciences reliée au domaine, incluant de la physico-chimie, ou une expérience équivalente.

Idéalement, ces études devraient être conduites par une équipe comprenant à la fois des spécialistes de la qualité de l'eau et des hydrauliciens fluviaux, sans compter, les autres domaines d'expertise reliés à l'hydrologie urbaine.

En termes de besoins, le contenu de formation des usagers du module eulérien de calcul de panaches devra incorporer à la fois le contenu hydrodynamique et les éléments de qualité de l'eau pertinents à la modélisation. Les limites de validité devront être bien explicitées ainsi que les précautions à prendre pour limiter la diffusion numérique artificielle.

La réponse à ce besoin a été donnée à la page 16 (voir la rubrique: Un nouveau cours à l'INRS-Eau.).

2.5.5 Les validations requises

Une procédure comparable à celle utilisée pour le modèle lagrangien. La validation terrain d'un modèle eulérien de transport-diffusion suit sensiblement la même procédure que celle employée pour un modèle lagrangien, soit 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. La position du maximum est généralement colée à la berge 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. Encore une fois, c'est la même problématique que pour valider un modèle lagrangien. Enfin, 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.

Un défi: valider les processus non-conservatifs du modèle. L'aspect le plus difficile de la validation terrain concerne les processus non-conservatifs. Notre réflexion à cet égard n'en est qu'à ses débuts et nous n'avons pas de solution générique à proposer pour y arriver. Cela ne veut pas dire que cette solution n'existe pas. Nous n'avons simplement pas eu encore l'occasion de la définir en pratique. Notons tout de même que les lois de comportement implantées dans le modèle pour décrire ces processus ont fait l'objet d'une recherche bibliographique très élaborée (thèse de maîtrise de Sophie Bédard, INRS-Eau) et que les lois sélectionnées devaient répondre à des critères d'applicabilité et de validation antérieure dans des situations réelles.

Il existe donc un besoin de conduire des recherches additionnelles permettant de mener à des solutions de validation explicites à l'égard des processus non-conservatifs de l'approche eulérienne.

Par ailleurs, du point de vue de la validation analytique, il s'agit de démontrer le bien-fondé des choix numériques effectués pour traiter les problèmes de stabilité de la solution et la diffusion artificielle. La majorité des tests analytiques ont déjà été effectués et une publication scientifique est en préparation.

2.5.6 Les coûts acceptables d'utilisation

Des moyens sophistiqués pour des aménagements coûteux. Les coûts acceptables d'utilisation d'un tel modèle dans le contexte des débordements de réseaux unitaires sont très supérieurs à ceux envisagés pour une application lagrangienne. Ils peuvent facilement se chiffrer à plus de 100 000\$ et plus probablement plus près de 200 000\$ compte tenu de la complexité des étapes d'étude à réaliser:

- caractérisations-terrain particulières pour la modélisation hydrodynamique et l'inventaire des usages,
- tests de traçage pour la validation-terrain du modèle de transport,
- caractérisation des événements de référence hydrologiques,
- caractérisation des événements de référence des émissaires de débordement,
- modélisations hydrodynamiques (calibration, validation, prédiction),
- modélisation des panaches individuels et/ou combinés (cas de plusieurs),
- validation-terrain du modèle eulérien,
- analyses des scénarios de dépassement de critères,

- simulation des scénarios de réduction,
- optimisation d'un scénario, choix d'une solution d'intervention
- conception des ouvrages, etc...

Compte tenu des investissements impliqués dans de telles interventions (typiquement 100\$ par citoyen d'une ville, Pierre Lavallée, communication personnelle), l'utilisation de telles outils est amplement justifiée surtout que les attentes des citoyens et des élus mettent le consultant dans un contexte d'obligation de résultat.

Contrairement au cas des émissaires de débordement, l'analyse de la propagation de masses d'eau de tributaires (dans l'hypothèse de paramètres conservatifs) se réalise beaucoup plus facilement à des coûts abordables. Tout tient cependant à la disponibilité d'*hydrobases* (voir le paragraphe "Vers des *hydrobases* du domaine public, un nouveau produit numérique à offrir" à la page 28.) dans les tronçons étudiés. Dans l'hypothèse où de telles bases de données numériques seraient disponibles sur un milieu donné, ce qui est tout-à-fait plausible dans un avenir rapproché sur le fleuve Saint-Laurent, la mise en oeuvre d'un modèle de "masses d'eau" reviendrait à un coût pas beaucoup plus élevé que la modélisation lagrangienne, c'est-à-dire, près de 15 000\$. La disponibilité d'*hydrobases* permettrait également de diminuer les coûts d'une analyse de débordements.

2.5.7 Validation des besoins

Plusieurs des informations données sur le contexte d'analyse et de design dans le contexte des débordements des réseaux unitaires en temps d'averse ont été obtenues lors d'une réunion séminaire le 8 août 1995 où assistaient:

- Pierre Lavallée, président Asseau inc., consultant pour les problèmes de ce type pour les villes de Paris, Québec et Laval; M. Lavallée était accompagné de Hubert Colas, spécialiste de sa firme et Sophie Bédard actuellement au service d'Asseau mais à l'époque en rédaction de thèse de maîtrise sur le même sujet;
- Jean-Claude Deutsch, directeur du CERGRENE, Noisy-le-Grand, Paris
- Pierre A. Côté, ingénieur, ville de Québec

La validation des besoins concernant les tributaires a été faite avec:

- Jean-François Cantin et Paul Boudreault, Environnement Canada; *Analyse de la contamination des eaux du lac Saint-Pierre*
- Jean Morin, INRS-Eau qui oeuvre dans le cadre d'un projet inter-institutionnel visant à la *réhabilitation de l'écosystème Saint-Laurent* (projet Écorecherche financé par le Conseil national de la Recherche, Programme des Trois-Conseils)

Nos propres expériences antérieures concernant les applications de ce type ont également contribué à la définition des besoins

- Masses d'eau dans le lac Saint-Louis (Projet Archipel de Montréal) pour Hydro-Québec

- Masses d'eau de la rivière Sainte-Anne dans le tronçon fluvial Lotbinière-Grondines pour l'étude d'impact de la traversée de la ligne Radisson/Nicolet/Des Cantons sur les voies migratoires du poulamon atlantique

3. SPÉCIFICATIONS DES LOGICIELS DE BASE

La perspective adoptée à compter de ce chapitre est celle des fonctionnalités de base des outils nécessaires pour répondre aux besoins identifiés au chapitre précédent. Il est à noter que la fonctionnalité principale d'un outil de simulation est le modèle mathématique qui le sous-tend. Par la suite, interviennent tous les autres dispositifs qui permettent de les mobiliser rapidement et efficacement dans différents contextes.

3.1 Présentation du système proposé

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les modèles numériques proposés doivent permettre la représentation des phénomènes suivants:

- la qualité et la disponibilité des habitats piscicoles représentées par la méthodologie de modélisation des microhabitats (HABIOSIM);
- la propagation des eaux d'émissaires de débordement ou de tributaires importants dans un tronçon de cours d'eau par un modèle de transport-diffusion bidimensionnel eulérien (DISPERSIM);
- la propagation d'eaux d'effluents de sources ponctuelles industrielles ou urbaines dans un tronçon de cours d'eau par un modèle de transport-diffusion bidimensionnel lagrangien (PANACHE).

Deux modules de préparation et de simulation des données de base sont essentiels à la mise en oeuvre de ces modèles d'analyse. Ils visent *la prise en compte des données de base du milieu*, et *la simulation des courants fluviaux* (hydrodynamique). Plus précisément, ils ont pour objet:

- la préparation du support de données (construction et raffinement d'un maillage en éléments finis) et la représentation numérique des données de terrain, notamment la bathymétrie et les matériaux du lit, (MODELEUR);
- l'hydrodynamique bidimensionnelle adaptée au contexte fluvial et nordique (HYDROSIM).

Le projet s'intègre dans un noyau logiciel existant formant une Base appelée COQUILLE qui définit déjà de multiples fonctionnalités, notamment l'organisation des interfaces usagers, la gestion du stockage des données et de leur importation/exportation, la visualisation graphique des résultats dans un espace géoréférencé, et l'aide contextuelle. Sans être un système d'information géographique (SIG), cette coquille comporte à maints égards plusieurs fonctionnalités habituellement offertes par cette catégorie d'outils. Plus important encore, la COQUILLE rend disponible une façon de faire et une expertise qui est réutilisée par tous les logiciels greffés à elle grâce à l'utilisation de la philosophie et des technologies orientées-objet.

3.2 La COQUILLE des simulateurs

3.2.1 Problématique générale

La composante logicielle que nous appelons COQUILLE est le module central des logiciels HYDREAU permettant de regrouper toutes les fonctionnalités communes à l'ensemble des outils proposés afin d'offrir à l'utilisateur un environnement convivial et intuitif.

De grands efforts de recherche/développement ont été déployés au cours des dernières années pour mettre en place la coquille présentée ici. Cette coquille constitue une partie de la mise de ressource de l'INRS-Eau dans le projet MÉTRIQUE. Dans l'ensemble, celle-ci ne fait donc pas partie des activités financées par le projet; cependant, certains développements additionnels issus de l'analyse de besoins pourront donner lieu à des activités nouvelles et occasionner des coûts. Dans leur état actuel, les fonctionnalités principales de la coquille sont formées de :

- *une interface usager conviviale et ergonomique*: graphisme élaboré (bidimensionnel), barre de menus, barre de boutons de fonctions contextuelle, convertibilité facile dans la langue de l'utilisateur (en vue de l'exportation), menus plats et boîtes de dialogues à pages, menus "pop-up" liés aux objets à l'écran, indicateurs de progression de tâche, capacités d'habillage d'écran;
- *un gestionnaire de données de projet*: pour gérer la multitude de fichiers relatifs à un projet, les sauvegarder, les recharger, les importer et les exporter;
- *des capacités de visualisation*: contourage, zoom, déplacement panoramique, vecteurs, déformée, maillage, noeuds;
- *une gamme d'outils adaptés et ouverts*: un calculateur programmable de champs de variables de type éléments finis, une sonde d'exploration, calculateur de lignes, surfaces, volumes, le traitement graphique des usages de l'eau (utile pour l'analyse des conflits d'usages de la ressource);
- *des capacités multitâches*;
- *des capacités multi-fenêtres*;
- *une aide contextuelle* de type hypertexte.

L'état d'avancement actuel des modèles proposés dans ce projet les situe à des degrés divers d'intégration dans la coquille de simulation. Les simulateurs de transport-diffusion lagrangien (PANACHE) et de l'habitat piscicole (HABIOSIM) sont entièrement intégrés dans cet instrument. De plus, ils ont été élaborés totalement selon la philosophie orientée-objet, ce qui a facilité considérablement leur intégration. Dans le cas du simulateur hydrodynamique, le programme a été conçu en FORTRAN standard afin de faciliter le découplage machine et permettre l'utilisation de plates-formes plus puissantes et mieux adaptées dans certains cas à l'accomplissement de tâches de calcul considérables (sur le fleuve Saint-Laurent par exemple). Cependant, pour des tâches plus courantes pouvant être réalisées sur un ordinateur personnel, une forme de couplage est nécessaire et cette fonctionnalité reste à être développée dans la coquille. Notons toutefois que la partie préparation des données MODELEUR pour le simulateur FORTRAN est intégrée dans la COQUILLE, et ce, selon la philosophie objet.

Dans le cas du simulateur eulérien de transport-diffusion (DISPERSIM), rien n'a encore été réalisé dans l'intégration du modèle au sein de la coquille. Toutefois, ce logiciel pourra profiter de l'expertise d'intégration des autres logiciels déjà unis à la coquille.

3.2.2 Fonctionnalités

Environnement de travail moderne et ergonomique

La COQUILLE telle que décrite a suscité un intérêt marqué parmi les gens consultés sur ce module. La possibilité de pouvoir interagir avec les simulateurs de façon conviviale et ergonomique fut le point le plus apprécié. Les interfaces usagers modernes améliorent et accélèrent la compréhension des fonctionnalités des logiciels pour les utilisateurs. Cet avantage leur permet de se consacrer directement à leurs tâches professionnelles sans avoir à être spécialistes de l'informatique. Du point de vue design, les choix concernent surtout le style d'interaction privilégié offert à l'utilisateur pour interagir; notre approche privilégie les menus plats (comportant aussi peu de niveaux que possible), des boîtes de dialogue "à pages" (permettant de grouper dans une seule boîte de dialogue l'ensemble des activités formant une tâche) ainsi que les barres d'outils contextuelles au mode d'interaction.

Extensibilité des fonctionnalités

Un second aspect intéressant de la COQUILLE est qu'on peut y ajouter de nouvelles fonctionnalités qui profitent immédiatement à tous les logiciels qui y sont rattachés. Par exemple, l'ajout d'une sonde permettant de connaître la localisation dans l'espace selon différents systèmes de coordonnées a immédiatement pu être utilisée par tous les logiciels faisant usage de visualisation géoréférencée.

Visualisation graphique des données

La COQUILLE fournit à l'utilisateur la visualisation graphique des données et des résultats de simulation sous forme d'isolignes, d'isosurfaces, de vecteurs et de noeuds. Une légende est associée aux données affichées s'il y a lieu. Dans la version actuelle, la visualisation est bidimensionnelle. Toutefois, le modèle de données prévoit une transformation future en trois dimensions.

Ouverture sur d'autres produits logiciels

D'après nos expériences et les résultats de nos consultations, la possibilité d'importer des données de terrain ou d'exporter des données de simulation vers d'autres logiciels connus est ressortie comme une nécessité. La COQUILLE ne disposant pas présentement de telles fonctionnalités aura à être améliorée en ce sens. L'analyse des spécifications a permis de définir une stratégie basée sur la construction de filtres d'import-export externes, possibilité qui est donc à la disposition de l'utilisateur lui-même (principe d'ouverture).

Capacités multilingues

La COQUILLE instaure un mécanisme permettant l'utilisation de plusieurs langues dans les interfaces usagers. Il suffit de disposer de la traduction adéquate et une langue peut être rendue disponible aux logiciels MÉTRIQUE. Tous les messages d'erreur, d'avertissement se font aussi dans la langue de l'utilisateur.

3.2.3 Ajouts et modifications

D'autres besoins reliés à la coquille sont apparus suite à l'analyse des besoins avec les intervenants externes au projet, notamment:

Importation/Exportation

Nous avons vu que les fonctionnalités d'importation/exportation vers des logiciels commerciaux seraient très appréciées. Les outils visés ou formats désirés sont notamment,

- Outils de design vectoriel: Autocad.
- Systèmes d'information géographique (GIS): Arc Info, SPANS.
- Tableurs: Excel, Lotus 1-2-3, Quattro Pro...,

Porter le système sur d'autres plates-formes multitâches

Nos logiciels fonctionnent présentement sur OS/2 (WARP) qui est une plate-forme multitâches cablée à 32 bits. Toutefois, nous nous sommes dotés d'outils qui nous permettront de plus facilement porter les logiciels sur d'autres plates-formes multitâches 32 bits, notamment WindowsNT et Window95 qui sont des produits fort populaires. La prochaine étape sera donc de porter au besoin les outils vers certaines de ces plate-formes.

Traduction de l'interface et des messages

Tous nos logiciels sont conçus pour supporter le multilinguisme. Actuellement, seulement le français est disponible. Évidemment, on devra disposer de la traduction anglaise en priorité. Du point de vue fonctionnel, tous les textes, expressions et termes formant les messages de l'interface sont regroupés dans des fichiers de langues plutôt que compilés dans les programmes, ce qui rend le processus de traduction plus facile à réaliser, et à la portée de l'utilisateur lui-même, ce qui fut très apprécié lors de la consultation (les norvégiens, par exemple).

Habillage d'écran

Les usagers ont manifesté le désir de pouvoir ajouter des éléments graphiques ou du texte à même les images représentant les résultats des simulations, c'est ce que nous appelons l'**habillage d'écran**. L'analyse des besoins a mis en évidence plusieurs types d'habillage possibles:

- Texte: titre, source, date, étiquette, nomenclature;
- Grille: pour le repérage et l'orientation, utilisation d'une grille avec des amorces de coordonnées;
- Flèche du Nord: orientation;
- Barre d'échelle: rapport entre les distances figurées et les distances réelles, facteur d'échelle;
- Marqueur: indication, repérage ou signalisation d'informations en des endroits précis;
- Légende: liste des signes figurant sur une représentation;
- Cadre: bordure entourant l'image ou encore des éléments de l'image;
- Image bitmap: affichage d'une image bitmap dans l'espace de visualisation;

Ces outils supplémentaires sont introduits dans une optique de favoriser la communication des résultats (par exemple, présentations orales devant différents publics, des publications écrites, démos). Ce côté diffusion de l'information et formation est pris en compte dans la COQUILLE.

3.3 Le simulateur hydrodynamique bidimensionnel HYDROSIM

Dans cette section, nous allons exposer de manière un peu plus détaillée qu'au chapitre précédent les éléments essentiels formant un simulateur hydrodynamique bidimensionnel aussi complet que possible dans l'état actuel de nos connaissances.

3.3.1 Problématique générale

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 (flux hydrologiques, marées). Ce modèle est devenue au cours de la dernière décennie un outil reconnu scientifiquement pour la simulation des écoulements dans les rivières, les fleuves et les estuaires (voir entre autres Herrling, 1982; Kawahara et Umetsu, 1986; Leclerc et coll., 1987, 1990b,c, 1994). 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. 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 m³/s, la ligne de courant 50 m³/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 (voir un peu plus loin à la page 45 la section intitulée: "Le MODELEUR, un simulateur en soi pour les données de terrain").

3.3.2 Fonctionnalités

Choix bidimensionnel versus tridimensionnel ou unidimensionnel

Comme nous l'avons mentionné précédemment (page 6, section intitulée: Le bien fondé du modèle hydrodynamique bidimensionnel), 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 Brian Morse de la Garde-Côtière canadienne, ou HEC-2 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.

Prise en compte du couvrant/découvrant, conservation de la masse

Un banc découvrant est formé de la partie du lit du cours d'eau qui est subit directement un marnage significatif du niveau de l'eau qu'il s'agisse d'une modification du débit (hydrologie) ou de la marée. Tout simulateur hydrodynamique qui ne tient pas compte des bancs découvrants ne peut considérer que les cours d'eau se comportant comme des canaux d'ingénieur aux berges verticales, ce qui est un non-sens compte tenu de l'importance des phénomènes ripariens dans l'environnement aquatique. Les versions antérieure et actuelle du simulateur HYDROSIM ont cette capacité.

Une forme conservative

La forme conservative de la version en développement du simulateur hydrodynamique découle d'un modèle mathématique ayant des variables d'état de type "flux" (débit spécifique en m^2/s) plutôt que de type "vitesses" (en m/s). Cette forme mathématique est importante, voire essentielle pour livrer aux applications subséquentes, surtout les simulateurs de la qualité de l'eau, des données d'entrée plus fiables, c'est-à-dire, respectant plus précisément les bilans de masse. La nouvelle version supprime l'ancienne au chapitre de la forme conservative laquelle, de concert avec un maillage adapté à la précision recherchée, procure une meilleure prédiction locale des courants.

Résolution par éléments finis - vs - différences finis

La méthode des éléments finis (voir Dhatt et Touzot, 1981; Secretan, 1991) est une méthode de discrétisation (décomposition spatiale en petits éléments) à la fois du domaine de simulation et des différents termes du modèle mathématique. La communauté scientifique partage l'opinion générale que les "*éléments finis*" constituent un médium de support souple, adaptatif et interpolable pour les données. En effet, les éléments finis ont une taille et une orientation qui peut s'ajuster

localement. C'est probablement la meilleure topologie de données disponible pour prendre en compte la variabilité de morphologie et de facteurs d'influence des milieux naturels. Nous avons choisi d'utiliser un élément triangulaire d'approximation linéaire, le T6-L (triangle à six noeuds divisible en quatre et d'approximation linéaire), suite à nos propres travaux et aux consultations que nous avons eues avec Zang à Compiègne, France (voir aussi Zang (1992)).

L'approche classique dite "par différences finies", quoique plus simple à programmer, est plus rigide à utiliser à cause de l'orthogonalité de la structure. En effet, les éléments de discrétisation forment des carrés ou des rectangles de dimension constante par région du domaine de simulation ce qui ne laisse pas beaucoup de possibilité pour représenter des formes quelconques. La seule solution consiste à réduire partout la taille de la maille selon le degré d'exigence de précision maximum du domaine, avec comme résultante, un maillage inutilement dense en d'autres endroits. La taille du problème devient alors trop considérable.

Méthode de résolution itérative

Lors de la résolution du système d'équations algébriques découlant de la discrétisation par éléments finis, nous comptons autant que possible utiliser une méthode dite itérative (Saad et Schultz, 1986; Secretan, 1991, 1992) plutôt qu'une méthode directe. Ce type de méthode a la réputation d'être robuste et rapide et elle ne requiert pas le stockage de matrices ou l'enumérotation des noeuds lors du raffinement du maillage ce qui facilite l'implantation du modèle sur de plus petites machines. Ces deux avantages sont exploités et même requis pour l'utilisation du simulateur sur micro-ordinateur. Cependant, le gain de vitesse obtenu par cette méthode est toujours apprécié, même sur des machines plus puissantes, et il mène souvent à une recherche accrue de précision à l'aide d'un maillage plus fin.

L'implantation d'une telle approche dans le cadre du projet MÉTRIQUE reste cependant sujette à la démonstration de sa faisabilité pour les écoulements fortement convectifs.

Paramétrisation de la viscosité par une loi de longueur de mélange - Diffusivités

Les contraintes turbulentes (aussi appelées contraintes de Reynolds) représentent une des composantes importantes de l'équation de conservation de la quantité de mouvement (modèle de Saint-Venant). Elles expriment l'influence des variations rapides des vitesses de courant sur la turbulence du cours d'eau. C'est donc un phénomène important à considérer pour connaître les caractéristiques de mélange des masses d'eau. La viscosité turbulente est le paramètre d'ajustement de ce facteur dans le modèle hydrodynamique.

Plusieurs modèles bidimensionnels classiques définissent le paramètre de viscosité turbulente comme une constante sur le domaine d'écoulement ce qui est trop simplificateur lorsqu'on veut post-traiter le champ de vitesses pour obtenir des valeurs de diffusivités (utiles pour les simulateurs de transport-diffusion). L'utilisation d'une loi dite "*de longueur de mélange*" a prouvé son efficacité dans le passé pour représenter les cisaillements latéraux associés aux forts gradients de vitesses et aux accélérations convectives. Une communication du Dr. Wang de l'université du Mississippi (Congrès de l'AIHR, Londres, 1995) nous a permis de valider ce choix.

Frottement de la glace et des macrophytes

Les climats nordiques ont pour effet de couvrir les cours d'eau d'une couche de glace qui ajoute un frottement additionnel à la rugosité des matériaux du lit, en plus de restreindre verticalement la

section d'écoulement. Les macrophytes (plantes aquatiques) ont un effet similaire mise à part la réduction de section. La prise en compte de l'influence de la glace, au minimum sous la forme d'un couvert fixe, est importante sous nos latitudes pour permettre l'opération des modèles à l'année longue. De même, les plantes aquatiques peuvent exercer une influence plus que déterminante sur l'écoulement fluvial en été (par exemple, les lacs Saint-Pierre, Saint-François et Saint-Louis sur le fleuve Saint-Laurent) rendant essentielle la prise en compte de ce facteur. Nous avons déjà testé des algorithmes pour inclure ces deux facteurs (Boudreau et coll., 1994) et ils sont maintenant implantés dans le simulateur hydrodynamique.

Autres facteurs: vents, substrats...

Parmi les autres facteurs à considérer, on note la sollicitation du vent qu'on paramétrise avec la formule de Wu (1969). Le frottement du lit associé à la taille des aspérités, des macro-rugosités et des matériaux du lit est traité avec une loi empirique de type Manning (Boudreau, 1994). La force de Coriolis reliée à la vitesse de rotation de la terre et à la latitude du lieu est également incluse dans le modèle. Nos consultations avec M.F. Lapointe de l'université McGill nous ont également permis de développer plus à fond le potentiel d'utilisation des outils HYDREAU (HYDROSIM, MODELEUR) dans un contexte géomorphologique (modèles de substrats, forces tractrices, mobilité des matériaux du lit, etc...).

Le simulateur FORTRAN potentiellement indépendant de la coquille d'HYDROSIM

Certaines tâches de calcul hydrodynamique nécessitent l'utilisation de machines très puissantes afin d'obtenir des résultats dans des délais raisonnables. En principe, le programme hydrodynamique permet la réalisation de calculs sur un ordinateur personnel et la tâche de calcul est alors entièrement gérée par le logiciel HYDROSIM. Cependant, la capacité des ordinateurs personnels peut s'avérer insuffisante pour les problèmes de grande taille ou transitoires (par exemple, estuaires à marée) ou lorsque l'utilisateur est pressé d'obtenir des résultats (par exemple, en situation de calibration ou dans les contextes d'urgence). La possibilité de diriger la tâche vers une machine plus puissante à partir du "front end" peut alors s'avérer un atout.

Les gens consultés ont mentionné leur intérêt concernant cette possibilité tout en ajoutant que pourvu que les procédures de transfert des fichiers de simulation et de transfert des résultats soient bien documentées et faciles à exécuter, ils ne croient pas nécessaire que HYDROSIM ait à piloter l'exécution de la simulation. Nous croyons possible de gérer les communications réseaux entre la plate-forme d'HYDROSIM et la plate-forme de la machine de calcul dans une version subséquente.

3.3.3 Contexte d'utilisation

Rappelons brièvement les principaux contextes d'utilisation visés:

- Études d'hydraulique fluviale pour des fins de génie civil, de navigation.
- Production de données hydrodynamiques pour des études de transport de contaminants, de disponibilité d'habitats du poisson, de sédimentologie, etc...

Nous référons le lecteur au chapitre précédent pour une description plus élaborée de ces différents contextes.

3.3.4 Usagers, marché potentiel

- Ingénieurs hydrauliciens, aménagistes, environnementalistes.
- Firmes de consultants en hydraulique fluviale, études d'impacts.
- Ministères gouvernementaux de l'environnement ou de ressources hydriques, producteurs d'hydroélectricité, gardes-côtières, agence de gestion halieutique ou d'assainissement des eaux, agences de bassin.
- Départements universitaires de génie civil ou de génie environnemental.

3.3.5 Ajouts et modifications

Calcul des erreurs

Cette fonctionnalité est susceptible d'aider l'utilisateur à identifier les zones du domaine de simulation qui sont susceptibles par leur forte variabilité spatiale de générer des erreurs de simulation plus importantes.

Tout calcul hydrodynamique basé sur les éléments finis est une approximation de la solution exacte. Le modèle est exact pour les variations linéaires mais une erreur d'approximation est générée dans les zones de fortes variations. L'erreur est également liée à la taille locale de la discrétisation et il est ainsi possible d'améliorer la précision en cassant le maillage en éléments plus petits. Le problème est que plus le maillage est fin plus le calcul hydrodynamique est lourd, d'où l'intérêt de raffiner le maillage aux seuls endroits où cela est nécessaire.

Le moteur de calcul HYDROSIM aura donc la capacité de calcul de l'erreur et il raffinerait alors le maillage aux endroits appropriés.

3.4 Le MODELEUR, un simulateur en soi pour les données de terrain

3.4.1 Problématique générale

Le modeleur est en soi un simulateur qui se trouve intégré avec le simulateur hydrodynamique. Premier instrument à être mis en œuvre dans une étude de simulation, il se situe au cœur 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.

3.4.2 Fonctionnalités

Production d'un modèle numérique de terrain

Il crée le maillage d'éléments finis nécessaire à la modélisation hydrodynamique, et réunit de nombreuses fonctionnalités qui permettent d'interagir graphiquement avec ce maillage. L'objet de simulation du 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.

Construction assistée du maillage

Nous préconisons 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'usager 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 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. Le maillage résultant peut faire l'objet d'un lissage local pour améliorer son aspect.

Le modèle numérique de terrain: le transfert des données de base sur la grille

C'est la seconde tâche importante effectuée par le modéleur. Pour la bathymétrie par exemple, nous procédons par un prémaillage des points de mesure à l'aide d'un algorithme de triangulation de Delaunay. Cette triangulation qu'on retrouve aussi dans les SIG (ex: SPANS) est en fait un prémaillage dit "donneur". Sur ce médium temporaire de type "éléments finis", il est possible de visualiser les données de base avec les fonctions graphiques de la coquille.

Fonctionnalités d'adaptation du maillage: les TRIDs

Un aspect très important d'un mailleur est l'adaptativité. Un concept simple, puissant et fonctionnel de raffinement de maillage a été mis au point. C'est un mode de traitement récursif et intégré dans une structure arborescente, qui permet d'utiliser toutes les fonctionnalités et classes d'objets existantes du maillage de base (par exemple, les noeuds, les éléments, le contourage par interpolation, etc.).

Pour y arriver, nous nous sommes inspirés de la structure QUAD utilisée dans SPANS. Rappelons que cette structure est formée de carrés qui peuvent être subdivisés en quatre à volonté selon le besoin. Habituellement, la subdivision peut se faire jusqu'à douze fois, niveau qui procure une précision spatiale suffisante pour représenter la variabilité de l'information. Le degré de raffinement détermine la taille des fichiers et la durée d'affichage. Un défaut des structures QUAD traditionnelles est la discontinuité de l'information aux frontières des unités. De plus, cette structure purement orthogonale est un médium rigide pour représenter la géométrie d'un milieu. En ce sens, elle peut se comparer en mieux aux différences finies adaptatives.

Nous recherchions une structure adaptative pouvant représenter naturellement la géométrie, en plus d'être interpolable entre les noeuds. Il fallait donc que la continuité de l'information soit assurée aux frontières des éléments (continuité C^0 , Dhatt et Touzot, 1981). De plus, comme la topologie fondamentale des structures de données du système était constituée de triangles, nous avons opté pour une adaptation du concept de QUAD qui intégrerait la puissance des méthodes d'éléments finis. Il en est résulté les TRIDs^c, pour TRIangles Divisés. Les TRIDS sont des éléments

triangulaires d'approximation linéaire qui peuvent être subdivisés récursivement en quatre sous-triangles. Adaptative à volonté, la méthode est extrêmement puissante pour représenter l'information.

3.4.3 Résultats escomptés

Les résultats attendus de l'ensemble des travaux relatifs à ce simulateur sont d'abord, un instrument de mobilisation des données souple, s'ajustant aux besoins de l'utilisateur, précis, efficace, robuste, rapide et utilisable sur micro-ordinateur. Il ressemble à un système d'information géographique (SIG) dédié au milieu riparien, mais sans comporter toutes les fonctionnalités de cette classe d'outils. Il peut éventuellement servir sur une base autonome (stand alone) pour la représentation des données.

3.4.4 Contexte d'utilisation

- Préparation des modèles numériques de terrain (MNT) porté sur un maillage d'éléments finis triangulaires.
- Préparation des fichiers d'entrée pour une simulation hydrodynamique.
- Assister l'observateur sur le terrain dans la validation des données mesurées.

Il est à noter que le MODELEUR s'avère un outil utilisable en soi et plusieurs intervenants nous ont avoué qu'ils pourraient s'en servir pour préparer leurs données à l'utilisation d'autres modèles hydrodynamiques.

3.4.5 Usagers, marché potentiel

- Ingénieurs hydrauliciens, aménagistes, environnementalistes.
- Firms de consultants en hydraulique fluviale, études d'impacts.
- Ministères gouvernementaux de l'environnement ou de ressources hydriques, producteurs d'hydroélectricité, gardes-côtières, agence de gestion halieutique ou d'assainissement des eaux, agences de bassin.
- Techniciens en caractérisation.
- Départements universitaires de génie civil ou de génie environnemental.

3.4.6 Ajouts et modifications

Importation/Exportation des données

Il a été mentionné qu'il serait important d'avoir accès à des tableurs pour visualiser ou pour modifier des données lorsqu'elles prennent la forme de graphiques. Des filtres d'importation/exportation seront à définir.

4. LES LOGICIELS D'APPLICATION

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 la sédimentologie fluviale et la propagation d'hydrocarbures après un déversement accidentel. Pour l'instant, nous avons restreint nos développements aux contextes suivants:

- HABIOSIM: microhabitats, débits réservés
- DISPERSIM: qualité de l'eau, dispersion de masses d'eau, débordement de réseaux d'égout unitaires, panaches de tributaires
- PANACHE: qualité de l'eau, effluents industriels, sources ponctuelles

4.1 Le simulateur des microhabitats HABIOSIM

4.1.1 Problématique générale

Le lecteur est invité à retourner au chapitre précédent pour un traitement plus élaboré de la problématique. Seules les dimensions les plus importantes seront évoquées ici.

La qualité et la disponibilité des habitats piscicoles en rivière sont principalement liées aux caractéristiques abiotiques (physiques, physico-chimiques) du site. Une dégradation de la qualité de l'eau, une altération du régime hydrologique, ou encore, l'implantation d'un ouvrage hydraulique peuvent se traduire par des pertes ou des gains de qualité ou de disponibilité d'habitats. Dans le passé, on a surtout considéré la pollution comme la cause principale de la disparition de nombre d'espèces de poisson dans les milieux naturels. Aujourd'hui, avec les études de suivi environnemental et les études d'impacts *a priori*, on prend conscience que les perturbations de nature physique ont souvent des conséquences tout aussi délétères.

Par exemple, les régimes d'exploitation dits "de pointe" (par éclusées), caractéristiques de certaines centrales hydroélectriques, occasionnent d'énormes variations à très court terme de débit et de température dans la rivière. Cette évolution temporelle du débit a pour effet de modifier, non seulement la disponibilité et la qualité des habitats, mais également leur position dans le milieu. Le stress et la dépense d'énergie qui en résultent peuvent mettre en péril les populations piscicoles.

Parfois, la construction de barrage a pour but de se doter d'une réserve visant la régularisation du débit à des fins piscicoles. Ainsi, on réalise des ouvrages de régularisation à la tête des bassins

versants pour soutenir en aval les étiages les plus sévères de l'été, accroître la disponibilité d'habitats, et ainsi augmenter la productivité piscicole du milieu.

Dans un contexte de gestion, l'objectif ultime de la modélisation numérique des habitats consiste en la détermination de débits réservés ou en une régularisation des régimes d'exploitation adaptée au maintien des habitats. Le modèle de microhabitats peut également servir à mettre en valeur la ressource piscicole: optimiser les conditions hydrodynamiques du courant d'appel en aval des passes migratoires, ou encore créer ou reconstituer des habitats piscicoles dans les tronçons de cours d'eau subissant une dérivation. Ici au Québec, il est même question dans certains cas de réaliser des ouvrages de régularisation à la tête des bassins versants pour soutenir les étiages les plus sévères de l'été, accroître la disponibilité d'habitats, et ainsi augmenter la productivité piscicole du milieu. Au minimum, l'outil peut servir à vérifier la valeur des modèles d'habitat utilisés.

Peu de moyens d'analyse existent actuellement pour réaliser de telles études (ex: le modèle PHABSIM du US Corps of Engineers) et leur efficacité laisse à désirer à plusieurs égards: carence de validation, insuffisance de description du milieu physique, lourdeur de mise en oeuvre, faiblesse conceptuelle, rigidité, etc... Un des buts du projet MÉTRIQUE présenté brièvement ici est de fournir à la communauté scientifique (académique ou autre) un outil scientifique précis, ouvert, simple et convivial à utiliser, économique à mettre en oeuvre et adaptable par l'utilisateur, et en même temps, un instrument de calcul qui tient compte de la pratique actuelle.

4.1.2 Fonctionnalités

Utilisation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle hydrodynamique prédictif

Le logiciel HABIOSIM se sert des vitesses et des profondeurs d'eau provenant du modèle mathématique de Saint-Venant et de la méthode des éléments finis (HYDROSIM). Les données de terrain sont d'abord traitées par le MODELEUR qui permet de construire très rapidement un maillage adapté.

Prise en compte du couvrant/découvrant

La capacité qu'a le logiciel HYDROSIM de gérer le couvrant/découvrant avec la variation du débit permet au scientifique 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.

Cette capacité du logiciel permet de surmonter la plupart 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 (Université d'Alberta, US Fish and Wildlife).

Modèle biologique paramétrique et variables d'état

Le scientifique dispose de fonctionnalités graphiques interactives pour modéliser 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. Le scientifique peut à loisir modifier interactivement 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 d'habitats de différentes classes de valeur.

Visualisation et édition graphique des courbes de préférence pour les facteurs abiotiques

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 plutôt que statistique comme 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.

Accès à un tableur et production de graphiques

Les analyses statistiques pour l'élaboration des courbes de préférence d'habitat nécessitent l'utilisation de chiffrier ou de tout autre logiciel offrant des possibilités statistiques. Il en va de même pour la production de graphiques comme des séries temporelles d'habitat ou de débit (APU versus le débit, par exemple). Quoique la possibilité de mobiliser des ressources de ce type dans le même logiciel serait très utile, nous avons choisi de ne pas les offrir, du moins dans une première version. De manière plus générale, notre démarche nous a conduits à ne pas offrir les types d'outils logiciels qui peuvent aisément être mobilisés autrement sur la même plate-forme.

L'utilisateur pourra toujours avoir accès à des filtres d'exportation des données permettant l'accès à des chiffriers populaires comportant toutes les facilités de graphisme 2D et 3D avec légendes et impression couleur. Les procédures d'exportation seront à définir.

4.1.3 Résultats escomptés

Nous comptons livrer un outil adapté à un ensemble élargi de besoins et ouvert à l'expérimentation de nouvelles approches visant une prise en compte des stress environnementaux dans la caractérisation des habitats.

4.1.4 Contexte d'utilisation en bref

- Évaluation de l'impact d'ouvrages hydroélectriques, de plans d'irrigation ou d'une gamme variée de modifications physiques (incluant la qualité de l'eau) du milieu fluvial sur l'habitat du poisson.
- Détermination de débits réservés ou de régimes hydrologiques adaptés.
- Support visuel et médiatique lors d'audiences publiques en la matière.

4.1.5 Marché potentiel

- Consultants biologistes, ichtyologues, hydrauliciens aménagistes.
- Toute agence publique ou société privée susceptible d'affecter l'hydrologie ou l'hydrodynamique d'un cours d'eau par régularisation, détournement, prélèvement pour l'irrigation ou certains ouvrages de génie.
- Agences de gestion halieutique.
- Département universitaires de biologie ou de génie environnemental.

4.1.6 Ajouts et modifications

Facilités multimédias: images

Lors de la consultation, on a exprimé le désir de pouvoir afficher des images bitmaps pour compléter la présentation des résultats lors de conférences, de séminaires ou d'expositions. Les usagers disposent déjà du module des usages leur permettant de documenter les divers usages de l'eau et ce, de façon géo-référencée. Ce module ne permet pas encore la présentation d'images. Cette capacité pourrait être ajoutée à la COQUILLE.

Calcul de l'aire pondérée utile

Le calcul de l'Aire Pondérée Utile (APU) est facile à obtenir à partir des indices globaux de préférences en tout points du tronçon. En fait, une APU donne une mesure (en m² 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 à partir des indices globaux de préférence dont la qualité dépasse une certaine valeur et le résultat est une aire en mètres carrés ou un pourcentage de la surface totale.

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.

Spécification manuelle des préférences d'habitat

HABIOSIM est prévu pour fournir une interface graphique d'édition des courbes de préférences d'habitat laissant à l'utilisateur la possibilité de spécifier les indices de base en manipulant une courbe. Des intervenants, quoique ravis de cette capacité, ont remarqué l'absence de capacité de formuler textuellement les paramètres de la courbe.

Par exemple, si on veut spécifier un indice dont la valeur est 0 jusqu'à ce qu'on atteigne le débit de 1,5 m/s auquel cas la valeur est 1 jusqu'à l'infini. Avec l'interface graphique, vous spécifiez

facilement cette courbe sauf lorsque vient le temps de spécifier exactement 1,5 m/s et non 1.499956 m/s, cela est difficile de l'obtenir en manipulant la courbe alors que ce serait facile de simplement l'écrire. Nous devons donc ajouter cette fonctionnalité.

Validation de la démarche 2D - vs - PHABSIM (1D)

Plusieurs intervenants seraient rassurés de passer de la classe d'outil PHABSIM à HABIOSIM si la preuve était établie que ce choix comporte des avantages. Nous travaillons au sein d'un groupe de recherche 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), dans le but de faire cette démonstration au cours de l'année. Notre attente est une précision accrue, un coût de mobilisation égal ou inférieur, et une meilleure capacité prédictive, ce dernier avantage ouvrant la porte au "design d'habitat".

Hydrologie

Nous avons également consulté sur le niveau de fonctionnalité hydrologique qui devrait se trouver au sein d'HABIOSIM (et éventuellement en guise d'outil générique dans la COQUILLE). Il est apparu que de simples fonctions de base comme pouvoir lire les séries disponibles afin de les utiliser pour générer les chronologies d'habitats (pour des périodes cibles), établir les courbes de débits classés ou quelques moments statistiques serait un minimum. L'accessibilité à des outils plus puissants serait un avantage mais pas une nécessité. C'est pourquoi il serait pertinent d'examiner les possibilités offertes par les autres classes d'outils offerts à l'INRS-Eau par l'équipe de la Chaire en Hydrologie du professeur Bobée.

4.1.7 Priorité de développement

Il nous est apparu lors de la consultation que le simulateur d'habitat devrait recevoir (après HYDROSIM et le MODELEUR) un très haut degré de priorité étant donné son caractère innovateur et la primeur qu'il représentera une fois mis sur le marché.

4.2 Le simulateur de la dispersion des masses d'eau DISPERSIM

4.2.1 Problématique générale

La problématique visée ici a été abordée à la section intitulée: "Le contrôle des débordements de réseaux unitaires en temps d'averse et le suivi des masses d'eau", page 29. Ici, nous ne poursuivrons plus loin l'analyse de ce contexte. Rappelons seulement que le modèle proposé vise surtout les débordements des réseaux d'égout unitaires en temps d'averse. Accessoirement, le même modèle peut servir à simuler la propagation des masses d'eau en provenance de tributaires fluviaux importants.

Dans ce qui suit nous allons présenter plus en détail les fonctionnalités et composantes de base de l'outil proposé visant à répondre aux besoins du domaine. Le principal volet abordé est celui du choix des variables d'état du modèle dans le contexte urbain. Une courte discussion accompagnera cette présentation.

4.2.2 Fonctionnalités

L'approche eulérienne, l'approche éléments finis et le modèle hydrodynamique prédictif

Les principaux besoins visés ici 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 eulérienne (voir "Bien-fondé de l'approche eulérienne, page 32) 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. Cette approche nous permet de mettre en oeuvre les mêmes outils, principalement le 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.

Le modèle eulérien se sert des vitesses et des profondeurs d'eau provenant du modèle mathématique bidimensionnel de Saint-Venant. 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).

Modèle transitoire

Un modèle de transport-diffusion des contaminants dissous et particulaire peut être utilisé pour représenter la dispersion d'un effluent.

Puisque le débit et les charges rejetées varient tout au long d'un événement, un modèle transitoire est essentiel.

Le modèle transitoire présente aussi un grand intérêt en vue d'évaluer les effets différés et cumulatifs résultant du caractère intermittent des événements. Les personnes consultées appuient fortement cet énoncé.

Prise en compte des processus physico-chimiques et biologiques: priorités

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 doit être multiparamétrique et tenir compte simultanément des différents processus physico-chimiques ou biologiques qui peuvent intervenir lors du transport de ces polluants.

Le tableau 1 présente quelques uns des paramètres à considérer, leurs impacts sur le milieu fluvial, les processus à considérer dans une optique de modélisation ainsi que les données requises pour

en tenir compte.

Tableau 1. Variables d'état d'un modèle de panache non-conservatif des débordements de réseaux d'égout unitaires en temps de pluie

Variable d'état	Impacts	Processus considérés	Données requises
Solides en suspension	-Turbidité -Transport de contaminants adsorbés -Accumulation au fond	-Sédimentation -Déposition / remise en suspension	-Granulométrie -Caractérisation du substrat
Coliformes fécaux	-Pollution bactériologique	-Mortalité / disparition	-Taux global de mortalité
Oxygène dissous	-Mortalité piscicole associée au déficit	-Consommation dans la colonne d'eau -Réaération -Consommation par les sédiments	-Taux de dégradation de la DBO -Taux de réaération -Demande benthique
DBO	-Désoxygénation -Contamination organique	-Dégradation -Déposition	-Taux de dégradation -Partage des formes solide et dissoute
Ammoniac	-Mortalité piscicole -Enrichissement associé à l'excès de nutriments	-Cycle de transformation des formes d'azote	-Coefficients de transformation
Micropolluants	-Choc toxique -Mortalité piscicole -Enrichissement des sédiments	-Sorption -Déposition -Dégradation -Volatilisation	-Coefficients de partage -Taux de dégradation -Coefficient de volatilisation

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 particulière des contaminants étant prédominante, les particules solides deviennent des vecteurs de pollution différée. Tel que rapporté par CEGEO (1993), plus de 80% de la DBO, de la DCO, des métaux, des bactéries et des hydrocarbures sont fixés sur les solides de rejets pluviaux. Il est donc nécessaire 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 (ASSEAU, 1993; Lavallée, 1989). 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.

Analyse des concentrations en oxygène dissous 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.

Coliformes et micropolluants Ces deux paramètres peuvent aisément être incorporés au modèle dans la mesure où leur dynamique peut être isolée. Les coliformes constituent une source de nuisance directe donc à prioriser.

Les cinétiques associées aux particules fines en suspension 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... Afin d'être en mesure de considérer le transport et la déposition-dégradation en rivière des matières solides en suspension, la modélisation numérique requiert une approche eulérienne plutôt que lagrangienne (Tanguy, 1991). D'autre part, 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

Les caractéristiques de la résolution numérique eulérienne

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 (Luk et coll., 1990). Enfin, ajoutons que cette méthode de résolution est la plus appropriée pour traiter l'apport de volumes d'eau importants.

L'expertise antérieure de l'INRS-Eau dans l'approche eulérienne appliquée aux apports des tributaires peut être adaptée à la représentation des panaches d'effluents de débordement. Le modèle 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. Des expériences ont été conduites pour incorporer l'aspect sédimentologique.

Dans un premier temps, un modèle de transport des solides en suspension sera établi. Puisque l'on peut considérer que les grosses particules sédimentent dans les premiers mètres, le modèle traitera des classes de particules de faible granulométrie. Le processus de sédimentation sera représenté en tenant compte des vitesses de chute de particules fines non-cohésives et de la caractérisation du substrat. À l'échelle événementielle, la composition du substrat peut être considérée constante et

un potentiel d'adsorption des solides peut être évalué. Tanguy (1991) propose un modèle bidimensionnel horizontal pour la représentation du transport de solides en suspension.

Le modèle de transport de solides pourra 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 permettra d'évaluer la proportion des formes dissoute et particulaire. De plus, les cinétiques spécifiques de dégradation, de prolifération et de transformation seront intégrées au modèle. Une telle représentation des cinétiques chimiques à l'intérieur d'un modèle de transport-diffusion est proposée par Shen et coll. (1992).

Dernièrement, l'approche eulérienne de la modélisation par éléments finis a conduit à des applications fort intéressantes pour résoudre les phénomènes de transport-diffusion en rivière. Différentes approches permettent de contrôler la dispersion artificielle et les oscillations numériques de la méthode lorsque la convection par les courants est dominante par rapport à la diffusion. D'une part, on note l'utilisation d'algorithmes décentrés dans l'espace utilisant des fonctions de pondération ("upwind") pour contrôler la dispersion et les oscillations de la solution (Brooks et Hughes, 1980; Hughes et coll., 1989; Khelifa et coll., 1993). D'autres méthodes augmentent la précision des algorithmes d'approximation de l'équation de transport dans l'espace et dans le temps (Donéa, 1984; Park et Liggett, 1990; Sudicky et McLaren, 1992). D'autre part, de nouvelles techniques permettent de conserver la précision, tout en diminuant la dispersion et les oscillations numériques des solutions associées à la méthode centrée de Galerkin et Crank-Nickolson. Certaines de ces techniques optimisent le choix des différents types de formulations (Galeati et Gambolati, 1989; Giudice et coll., 1992). D'autres techniques ajoutent de la souplesse au modèle en exploitant convenablement des patrons de conditions aux limites classiques et nouveaux (Gartling, 1978; Chang et Finlayson, 1979; Padilla et coll., 1990). D'autres techniques encore utilisent où cela est nécessaire de simples fonctions de performance le long des lignes de courant (Noorishad et coll., 1992; Perrochet et Bérod, 1993). Une méthode relativement simple consiste à mailler le domaine de simulation en tenant compte de l'erreur commise; cette méthode est dite "adaptative".

Étant donné l'état actuel de la recherche sur les modèles eulériens pour l'advection-diffusion, le modèle numérique proposé consiste à utiliser l'approche classique de Galerkin et Crank-Nickolson 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 l'advection est dominante. Le modèle a récemment fait l'objet d'une communication soumise à la revue *Advances in Water Resources* (Padilla et al, 1995). Le modèle devra cependant comprendre les techniques de raffinement adaptées à la précision des calculs du phénomène (erreur). Ce raffinement peut être obtenu à l'aide des fonctionnalités de remaillage inhérentes au module lagrangien (voir PANACHE), ou encore par l'utilisation de fonctions de performance le long des lignes de courant si la présence de très forts gradients de concentration le requiert. Lors de la résolution du système d'équations, nous utilisons la même méthode itérative GMRES.

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, nous proposons que le modèle

numérique soit développé pour tenir compte d'au moins trois composants en interaction biochimique. Un des composants sera particulaire, de taille très fine, et soumis aux lois de la déposition-dégradation. Pourront 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 sera également mis au point pour les coliformes fécaux en fonction des constantes climatiques et du milieu. Deux autres composants chimiques en dissolution seront transportés par le modèle numérique. Les cinétiques d'adsorption-dégradation-transformation du modèle chimique choisi seront également adaptées aux conditions du milieu, du substrat et des solides en suspension. Parmi les modèles à deux composants chimiques qui retiennent actuellement notre attention, on peut mentionner la DBO-DCO et l'azote organique).

Nous aurons à décider de la pertinence d'implanter les options que nous venons d'évoquer et d'utiliser d'autres composants dissous conservatifs ou non (cations, métaux) en interaction avec le milieu. La définition des constantes d'adsorption-dégradation, leur pertinence et leur dépendance seront établies en première approximation à partir de la littérature existante. Une validation analytique du modèle numérique et une calibration sur le terrain seront également réalisées en fonction des opportunités pour ce faire.

"Notion de dose"

Suite à ces simulations, il serait possible de traiter les résultats en se basant sur la notion de "dose". Ce concept traduit quantitativement les notions de norme chronique, norme aiguë, laquelle sous-tend la durée de l'impact infligé au milieu. Il est appliqué entre autres pour optimiser la dose de larvicide biologique (le B.t.i.) à appliquer dans certaines rivières d'Afrique et d'Asie du Sud-Est pour contrôler l'abondance des insectes piqueurs causant la malaria (voir Solomon et coll., 1992; Chalifour et Delfour, 1990, 1992). Du point de vue numérique, l'intégration en un point donné de la réponse du milieu en concentration et de la durée du phénomène procure directement ce résultat. Soit par un simple post-traitement des fichiers de résultats transitoires de concentration aux noeuds de la grille d'éléments finis, soit par une intégration temporelle, on pourra cartographier la réponse événementielle du milieu en terme de dose. La difficulté prévisible actuellement est l'absence d'expériences antérieures concernant un tel concept pourtant simple à implanter. Cependant, les normes chroniques et aiguës pour les usages et les divers contaminants existent, ce qui nous procure une base de départ pour explorer la valeur du concept de dose. Malgré sa simplicité, ce concept a donc un côté spéculatif sur le plan pratique. Son implantation sera donc expérimentale et ne sera offerte ultimement que si nous parvenons à nous en servir.

4.2.3 Résultats escomptés

Le résultat attendu de cet aspect de la proposition est un simulateur multifonctionnel permettant d'adresser en régime transitoire l'évolution spatiale de diverses classes de contaminants dans un tronçon fluvial et de comparer les concentrations obtenues aux critères de pratique des usages du milieu. L'outil sera intégré dans un système informatique ergonomique convivial permettant à l'utilisateur d'interagir graphiquement avec la machine en plus de visualiser ses résultats. Le simulateur sera documenté convenablement afin de permettre une paramétrisation adéquate des lois de comportement.

Plus précisément, le modèle de transport-diffusion des eaux d'émissaires de débordement permettra, dans un premier temps, d'évaluer les impacts à court terme sur le milieu et les usages. La variation spatiale et temporelle des concentrations en matières solides, oxygène dissous, DBO et coliformes fécaux pourra être calculée. Dans un second niveau de développement, certains métaux et nutriments pourraient être considérés. Le modèle tiendra compte de la sédimentation des particules solides, ce qui permettra d'identifier les zones d'accumulation.

L'analyse des concentrations permettra d'évaluer certains paramètres révélateurs de l'ampleur de l'impact. Le temps de récupération du milieu (période nécessaire à la restauration des conditions initiales), le facteur de dépassement des normes de qualité et le taux de dilution du milieu pourront être évalués par post-traitement. Le facteur temporel pourra être considéré en introduisant le concept de "*dose*" dans la démarche. Les impacts à plus long terme sont associés à l'accumulation de contaminants dans la zone benthique. Vu la difficulté de traiter ce phénomène à long terme par simulation, la réalisation de bilans sur un ensemble d'événements permettra par caractérisation directe d'estimer le niveau de pollution rémanente.

4.2.4 Contexte d'utilisation

- Étude de la qualité de l'eau à l'échelle du panache de débordement dans le milieu fluvial ou estuarien en vue du design optimal d'ouvrages de rétention;
- Étude des conditions générales de mélange des masses d'eau, par exemple, le panache d'un tributaire dans un fleuve.

4.2.5 Usagers et marché potentiel

- Spécialistes de l'assainissement des eaux et du contrôle de la pollution.
- Toute industrie ou municipalité susceptible par ses rejets d'affecter la qualité de l'eau et ses usages.
- Agences de contrôle de la pollution, agences de bassin, ministères de l'environnement.
- Département universitaires de génie chimique, de génie civil ou de génie environnemental.

4.2.6 Ajouts et modifications

Intégration à la COQUILLE

Cette intégration ne nous est pas apparue prioritaire à court terme et elle devrait se produire plus tard lorsque les modèles utilisés auront été maîtrisés à l'usage lors des tests de validation ALPHA.

L'interface-usager du module de résolution sera alors développée pour tenir compte du choix du modèle chimique, de l'entrée interactive des données et des paramètres de simulation, et de la visualisation des résultats. Les fonctionnalités seront ainsi greffées à la COQUILLE de simulation.

Prise en compte des processus de consommation et réoxygénation naturelle

Afin de représenter la variation des concentrations en oxygène dissous, des cinétiques de consommation d'oxygène et de réoxygénation naturelle du milieu seront considérées par le modèle. Elles s'ajouteront au processus physique de diffusion de la masse d'eau désoxygénée.

Capacité de calcul du simulateur

Il est à noter qu'à l'instar d'HYDROSIM, le simulateur eulérien a été développé entièrement en langage FORTRAN standard et qu'il peut fonctionner complètement découplé d'une interface-usager graphique. Cette approche peut faciliter l'utilisation du modèle pour des problèmes de grande taille qui dépassent la capacité des micro-ordinateurs personnels. En effet, il est alors possible de transférer physiquement ou électroniquement les fichiers de simulation sur une autre machine plus puissante et d'exécuter la tâche. À la fin, les résultats sont rapatriés sur le micro-ordinateur pour la visualisation et l'analyse.

Cette fonctionnalité nous est apparue nécessaire lors d'un test expérimental sur la Seine avec nos collaborateurs du CERGNE (France, Laure Simon). Les simulations sur le Saint-Laurent (par exemple, le lac Saint-François dans le cadre du projet Écorecherche) sont également candidates pour un traitement différé sur des machines puissantes. Dans les deux cas, c'est la grande taille du problème qui est déterminante.

4.3 Le simulateur de la dispersion des effluents: PANACHE

Le chapitre 2 (la section intitulée: Le contrôle de la pollution industrielle 19) adoptait un point de vue contextuel à l'égard de l'utilisation des outils. De nombreux besoins y ont été explicités et les moyens à mettre en oeuvre pour y répondre ont été donnés. Dans ce qui suit, nous allons présenter de manière un peu plus détaillée les éléments d'analyse du simulateur PANACHE qui répondent soit à des nécessités scientifiques ou fonctionnelles. Nos priorités seront évoquées en fonction de l'état actuel de développement de l'outil. Les contextes d'utilisation seront rappelés ainsi que les usagers types à qui est dédié ce nouvel instrument.

4.3.1 Problématique de simulation

Comme nous l'avons vu à la section précédente, deux grandes classes de méthodes de résolution existent pour résoudre numériquement le problème du transport-diffusion de solutés: les approches eulérienne et lagrangienne. L'approche eulérienne consiste à résoudre l'équation différentielle dans l'espace de la variable d'état du modèle (calcul direct de la concentration). La méthode lagrangienne fournit une solution indirecte par la densité massique d'un nuage de points mathématiques transportés et dispersés selon les caractéristiques locales du champ de vitesses. La concentration des contaminants est donc obtenue par post-traitement en fonction de la densité massique du nuage dans le volume d'eau considéré.

Le simulateur proposé pour les effluents d'origine ponctuelle est donc basé sur une méthode lagrangienne de résolution: cette méthode est bien adaptée aux sources industrielles et urbaines car elle permet une mobilisation simple et très rapide et une facilité de simuler divers scénarios

(une fois l'hydrodynamique déterminée, bien sûr). Le modèle est facile d'utilisation et permet un contrôle explicite sur la diffusion numérique, phénomène inhérent à toute méthode de discrétisation. Les algorithmes mis au point pour ce simulateur sont poussés à la limite de l'efficacité sans sacrifier à la précision. Les bases mathématiques et algorithmiques ainsi que les tests de validation sont exposés dans un rapport de recherche de Leclerc et coll. (1992a). On peut aussi trouver dans ce document la justification complète de l'utilisation de l'approche lagrangienne dans le contexte présent.

Cette méthode, aussi appelée "méthode de marche au hasard", est de plus en plus utilisée pour résoudre les équations dites "hyperboliques". La plupart des applications sont dans le domaine des écoulements souterrains (Walton, 1989; Konikow et Bredehoeft, 1978; Kinzelbach et Ackerer 1986; Prickett et coll., 1981; Schwartz et Crowe, 1980). La littérature ne fournit pas beaucoup d'exemples d'applications dans les écoulements à surface libre, du moins jusqu'en 1990: on peut citer Van Dam (1981), Dykes et Robertson (1985) et Heemink (1990). La versatilité de la méthode de marche au hasard constitue un avantage important sur les méthodes eulériennes. Comme chaque particule numérique représente un modèle qui se comporte de façon indépendante dans l'espace et le temps, on peut facilement modifier la formulation mathématique pour tenir compte de certains processus tels que la dégradation, la sédimentation et l'évaporation.

Dans sa forme actuelle, le modèle utilisé ne s'attaque qu'à la résolution de l'équation de transport-diffusion assortie de termes de dégradation. Des données hydrodynamiques sont indispensables pour la simulation particulière ce qui donne la distribution spatiale du nuage de points. La méthode des éléments finis a été privilégiée pour la résolution hydrodynamique.

La concentration est obtenue par un post-traitement sur le panache de particules: on somme aux points de calcul les influences massiques significatives des particules dans leur voisinage, chaque particule ayant une distribution de masse centrée sur sa propre position. Cette méthode permet un bon lissage des concentrations auquel s'ajoute la possibilité de contrôler la diffusion additionnelle associée à cette phase de calcul. Plusieurs distributions de masse peuvent être utilisées: triangulaire, uniforme, gaussienne, etc. La distribution gaussienne a été retenue en raison de la similitude de cette fonction avec le processus diffusif lui-même.

Le choix du support du calcul des concentrations a demandé une réflexion très approfondie: il fallait chercher un support adaptable à la densité d'information produite par les particules (ou recherchée par le modélisateur) et topologiquement homogène d'un panache à l'autre même si sa densité de noeuds varierait. Le but de cette recherche était de rendre possible l'addition de panaches. C'est de là qu'a surgi l'idée des TRIDs, soit un raffinement récursif du maillage de base ayant servi à produire l'hydrodynamique. Ainsi, les éléments du maillage sont cassés en quatre, puis en seize, jusqu'à ce que le critère de raffinement soit rencontré. La densité locale des particules dans un élément du maillage de base détermine le critère de raffinement des TRIDs. Les nouveaux noeuds et éléments ainsi produits forment un nouveau maillage qui sert de support au calcul des concentrations.

4.3.2 Fonctionnalités de PANACHE

On trouve ici résumées les principales fonctionnalités retenues pour répondre aux besoins identifiés à la section "Le contrôle de la pollution industrielle" (page 19).

Utilisation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle hydrodynamique prédictif

Le logiciel PANACHE se sert des vitesses et des profondeurs d'eau provenant du modèle mathématique de Saint-Venant et de la méthode des éléments finis (HYDROSIM). Les données de terrain sont d'abord traitées par le MODELEUR qui permet de construire très rapidement un maillage adapté. Les diffusivités sont estimées localement selon les propriétés du champ de vitesse en utilisant une loi dite de "longueur de mélange".

Algorithme lagrangien

Nous avons en main une version en voie de prototypage d'un modèle lagrangien de simulation: comme nous l'avons mentionné précédemment, c'est la deuxième génération de l'outil. La première version avait été développée pour le Centre Saint-Laurent dans le cadre du Plan d'Action Saint-Laurent, phase I (Leclerc et coll. 1991a,b; 1992a). Quoique consacrés à la solution du même problème, plusieurs algorithmes de la première version ont été modifiés et/ou optimisés suite à l'étape de validation sur un cas réel survenu après le prototypage de la version 1.0 (Cantin et coll., 1994). Plusieurs discussions avec les auteurs de cette étude ont d'ailleurs constitué l'essentiel de notre consultation à l'égard de PANACHE.

Maintenant, le calcul des concentrations s'effectue sur une grille standard éléments finis ce qui permet d'utiliser les fonctionnalités de visualisation de la coquille. La grille utilisée est un raffinement de la grille du modèle hydrodynamique (à l'aide de TRIDS) et elle en respecte la topologie (position des noeuds et des éléments générateurs). Cette contrainte topologique vise à permettre de cumuler plusieurs panaches partageant un même tronçon. Ajoutons que toute simulation des équations de transport-diffusion est sensible au degré de conservation de la masse obtenu lors de la simulation hydrodynamique. La version antérieure du simulateur hydrodynamique utilisait une forme mathématique non-conservative. Cette option a été remise en question en faveur d'une approche considérée comme conservative.

Cumul possible de l'effet de plusieurs panaches d'effluent

Nous avons vu au chapitre précédent qu'il doit être possible de cumuler des panaches pour analyser leur effet combiné. À cette fin, il faut faire interagir algébriquement des données de concentrations entre elles, permettant ainsi l'élaboration d'études sur des sites où existent plusieurs points d'injection de contaminants. Il doit aussi être possible d'interagir avec d'autres ensembles de données comme les tributaires d'un tronçon qu'on étudie à l'aide du simulateur eulérien DISPER-SIM, ce qui permettrait de réaliser en une seule opération naturelle toute l'analyse de la contamination d'un milieu donné. Quoique possible en principe, cette forme d'interaction n'est pas encore implantée, mais les algorithmes sont identifiés (ils utilisent les TRIDS).

Choix de divers événements hydrologiques de référence

Les algorithmes mathématiques de PANACHE sont basés sur des équations de transport-diffusion conservant la masse obtenues de la simulation hydrodynamique préparée par HYDROSIM et le MODELEUR. Ces outils peuvent préparer divers événements hydrologiques caractérisant adéquatement le milieu sur lequel on désire faire l'étude, par exemple, le débit minimum sept jours consécutifs de période de récurrence 10 ans utilisé couramment au MEF. La mobilisation simple et économique des événements hydrologiques de référence permet de fournir des études approfondies et complètes du milieu. Pour les événements reconnus (ex: le Q_{7-10}), l'approche permet de

standardiser les calculs. Comme pour HABIOSIM, des fonctionnalités de base d'analyse hydrologique nous sont apparues sinon nécessaires, du moins utiles.

Interaction des panaches avec les usages de l'eau

En vue de répondre au besoin d'analyser l'interaction entre la position des panaches industriels et les usages du milieu, la coquille de simulation a été dotée d'un module-outil consacré aux usages de l'eau. Il permet de confronter visuellement les utilisations du milieu fluvial aux concentrations des panaches à l'aide de critères de contamination en plus d'effectuer différentes tâches comme l'édition, la création, la modification, la classification, la consultation des attributs, etc... C'est la valeur générique de l'outil qui nous l'a fait implanter dans la coquille commune à tous les simulateurs plutôt que sur PANACHE seulement.

D'autres outils utiles pour l'analyse des interactions des panaches avec les usages

Nous avons identifié certains besoins de post-traitement relatifs aux champs de concentration. Par exemple, la concentration chute très brutalement en aval du point d'émission puis se stabilise autour d'une valeur plancher qui varie asymptotiquement vers l'aval et il est difficile de représenter cette variable selon une échelle linéaire. Le tracé du logarithme de la concentration fournit une image du panache beaucoup plus signifiante que celui de la variable brute. Le *calculateur* de la coquille est l'outil tout désigné pour accomplir cette tâche. Il permet d'effectuer plusieurs types de post-traitements numériques sur les panaches en vue de faire ressortir certaines dimensions additionnelles d'une analyse de contamination.

Pour obtenir la valeur de la concentration en un point donné du panache, la coquille offre la *sonde*. Notre analyse des besoins a permis de mettre en évidence cette fonctionnalité. Le point "sondé" est situé exactement sous le curseur de la souris. Avec en background le champ de concentration (ou tout autre champ de variable), l'utilisateur du logiciel peut explorer le milieu partout où celui-ci est documenté. La sonde fournit le moyen privilégié pour considérer de manière un peu plus précise les interactions entre les panaches et les usages.

Enfin, un autre groupe d'outils de la coquille permettra de définir les caractéristiques géométriques des interactions entre les panaches et les usages. Il sera en effet possible de calculer par simple questionnement graphique la *longueur*, la *superficie* ainsi que le *volume* des zones contaminées.

4.3.3 Résultats escomptés

Le résultat attendu de cette activité de développement est un simulateur éprouvé, rapide, efficace et facile à utiliser permettant d'évaluer la concentration (ou le dépassement de critère) en tout point d'un tronçon de rivière, de fleuve ou d'estuaire à marée en tenant compte de la présence simultanée de plusieurs sources d'émission, incluant les tributaires et les émissaires de débordement. Une méthode d'analyse visuelle de la contamination tenant compte des usages actuels ou potentiels, et des recommandations générales de mise en oeuvre du modèle dans la pratique font aussi partie des résultats attendus. Enfin, plusieurs publications scientifiques et rapports seront produits, en plus d'un cours (formation continue) adressé aux futurs utilisateurs.

4.3.4 Résumé des contextes d'utilisation

- Modélisation de la propagation dans le milieu fluvial de contaminants d'origine ponctuelle dans un contexte d'intervention normalisée (par exemple, les ESEE).
- Simulation de stratégies alternatives de réduction des charges de polluants ou de localisation d'émissaires en terme de dépassement de critères de contamination, en tenant compte des usages potentiels ou actuels.

4.3.5 Usagers

- Spécialistes de l'assainissement des eaux et du contrôle de la pollution.
- Toute industrie susceptible par ses rejets d'affecter la qualité de l'eau et ses usages.
- Agences de contrôle de la pollution, agences de bassin, ministères de l'environnement.
- Département universitaires de génie chimique, de génie civil ou de génie environnemental.

4.3.6 Ajouts et modifications dans le cadre du projet MÉTRIQUE

Cette version mise à jour de notre simulateur lagrangien a besoin de développements additionnels de prototypage pour allonger sinon compléter la liste des situations qui doivent être prises en compte dans une analyse de contamination standardisée.

Comme nous l'avons vu, le modèle actuel est déjà un outil intéressant à plus d'un titre. Cependant, certaines fonctionnalités qui étaient apparues nécessaires suite à l'application de la version 1.0 au lac Saint-Pierre (Cantin et coll., 1994) n'ont pas encore été incorporées dans la version actuelle. Ainsi, on peut déjà identifier :

- l'addition des effets contaminants de plus d'un panache d'effluents lagrangien (prioritaire);
- la prise en considération simultanée des panaches de source ponctuelle (lagrangiens) et des tributaires ou émissaires de débordement (eulériens);
- le traitement des événements hydrodynamiques non-stationnaires, produits par une marée par exemple (estuaires fluviaux et de rivières) (prioritaire).

D'autres ajouts moins fondamentaux mais perçus comme nécessaires restent aussi à implanter ou à réaliser:

- prévoir les cas de rejets eux-mêmes non-stationnaires ou encore discontinus;
- permettre de comparer des résultats sur des simulations hydrodynamiques différentes;
- calculer les concentrations effectives à partir de concentrations unitaires et de charges réelles injectées;
- post-traiter les concentrations réelles à l'aide de critères de contamination (Aires de dépassement de norme);

- optimiser certains algorithmes afin d'accroître la rapidité du traitement, qualité non-négligeable pour opérer sur un micro-ordinateur;
- post-traiter automatiquement les données hydrodynamiques de base pour générer automatiquement les valeurs de diffusivité aux noeuds du modèle;
- procéder à de nombreux tests analytiques pour maîtriser la valeur des paramètres numériques de l'approche lagrangienne, la plupart basés sur la densité du nuage de points. Ces tests sont requis pour formuler les recommandations appropriées à l'utilisateur (prioritaire).

5. CONCLUSION ET PRIORITÉS GLOBALES DU PROJET

L'analyse des besoins nous a permis de préciser et de valider plusieurs des contextes d'utilisations identifiés au cours des années antérieures. Il sera ainsi été possible de revoir nos priorités de développement en fonction des attentes et des besoins réels de nos partenaires. Le sentiment général qui ressort est que les outils qui seront développés sont attendus par le milieu, mais dans certains cas, le contexte d'utilisation n'existe pas encore formellement.

Nous allons dans ce qui suit faire part en résumé de l'état de nos priorités à court terme:

Compléter HYDROSIM et le MODELEUR

La plus haute priorité est accordée à la base de nos logiciels, soit le simulateur hydrodynamique d'HYDROSIM et le MODELEUR. Un effort important devra être mis pour finaliser l'intégration de ces produits avec le module de calcul FORTRAN.

Compléter HABIOSIM Version 1.0

De part son intérêt, ce logiciel sera une primeur à sa sortie. C'est pourquoi nous entendons finir le développement de sa version 1.0 le plus rapidement possible afin d'aller en phase de validation Alpha. Afin de faciliter ce premier aboutissement, il est possible que cette version ne comporte pas toutes les fonctionnalités désirables. Une priorisation devra être faite. Une deuxième version est envisagée dans l'horizon du projet. Les premières réactions des usagers à la version 1,0 et les nouveaux besoins liés au développement rapide de ce secteur d'intervention seront incorporés dans une version améliorée (V2.0).

Compléter les outils de la COQUILLE

De nombreuses facilités sont désirées dans nos logiciels pour aider l'analyse et la planification. Nous aurons à ajouter des outils dans la COQUILLE pour soutenir ces objectifs. Notamment,

- l'habillage d'écran
- usages de l'eau (à compléter)
- calculatrice (à compléter)
- exportation de données
- impression de résultats
- ponts informatiques (filtres)

Ces ajouts profiteront à tous les logiciels existants et à venir.

Commencer l'intégration de DISPERSIM

Nous allons commencer l'intégration de DISPERSIM dans la COQUILLE tout en laissant le temps aux algorithmes d'être validés et testés. Le logiciel DISPERSIM sera donc complété vers la fin du projet.

Compléter le prototypage de PANACHE V2.0

Dans sa nouvelle version, PANACHE V2.0 répond à plusieurs attentes de la part des usagers potentiels impliqués dans le processus des Études de Suivis des Effets Environnementaux appliqué aux papetières. Cependant, la version 1.0 est déjà disponible pour créer la demande. Le besoin devra donc s'actualiser avec cette version avant que la deuxième soit livrée sur le marché. En attendant, nous allons compléter son prototypage.

Conclure une entente de commercialisation

Des négociations sont en cours avec une firme de commercialisation de logiciels scientifiques de Montréal (affiliation avec Nouveler et Hydro-Québec). Cette entente prévoit du financement à court terme pour le prototypage, la mise en marché, le support à long terme des usagers-clients, le développement de nouveaux modèles, etc... L'entente sera de portée spécifique, elle aura une durée de cinq ans et elle s'intégrera dans le cadre d'une entente générale qui couvre plusieurs autres produits de l'INRS-Eau.

Développer des partenariats pour le prototypage Beta

Plusieurs partenaires sont intéressés à nous accompagner dans nos développements. Ceux-ci se recrutent dans tous les milieux: académique, public, privé. La liste des groupes ou individus susceptibles d'offrir des sites Beta est donnée au tableau en annexe.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ASSEAU (1993). Étude intégrée du fonctionnement des intercepteurs Centre et Marigot, Addenda étape 1, phase IIa, Diffusion des eaux de débordements de réseaux unitaires à la rivière des Prairies, rapport final, 92 p.
- Boudreau, P., M. Leclerc et G.R. Fortin (1994). Modélisation bidimensionnelle de l'influence des plantes aquatiques sur l'hydrodynamique du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent (Québec). *Revue canadienne de génie civil* (sous presse).
- Brooks, A.N. et Hughes, T.J.R. (1980). Streamline Upwind/Petrov-Galerkin methods for advection dominated flows. Proc. Third Internat. Conf. on Finite Element Methods in Fluid Flow, Banff, Canada.
- Cantin, J.F., P. Boudreault (Bio.), M. Leclerc, J.Y. Charette (1994). Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau de tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 1. Volume 3: Analyse numérique de la contamination du tronçon Tracy -Lac Saint-Pierre par les effluents industriels et les tributaires majeurs. Rapport scientifique INRS-Eau No. RS#319
- CEGEO Technologies (1993). Recommandation de critères environnementaux pour les rejets urbains par temps de pluie, 44 p.
- Chalifour, A. et M. Delfour (1992). Optimal distribution of larvicides in running water, *SIAM J. of Optimization* 2(2):264-303.
- Chalifour, A. et M. Delfour (1990). Optimal Control in World Health Problems: *Onchocerciasis* Control. Proc. of the 29th Conf. on Decision and Control, Hawaiï, IEEE Publishing Services, NY, 2949-2944.
- Chang, M.W. and Finlayson, B.A. (1980). On the proper boundary conditions for the thermal entry problem. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 14, 935-942.
- Dhatt, G. et G. Touzot (1981). Une présentation de la méthode des éléments finis. Presses de l'Université Laval. Québec, Maloine, Paris.
- Donéa, J. (1984). A Taylor-Galerkin method for convective transport problems. *Int. J. Num. Methods. Eng.*, 20, 101-119.
- Dykes, P.P.G. and Robertson, T. (1985). The simulation of offshore turbulent dispersion using seeded eddies. *Appl. Math. Mod.*, Vol. 9, pp. 429-433,
- Galeati, G. et Gambolati, G. (1989). On boundary conditions and point sources in the finite element integration of the transport equation. *Water Resources Res.*, 25 (5): 847-856.

- Gartling, D.K. (1978).** Some comments on the paper by Heinrich, Huyakorn, Zienkiewicz and Mitchell. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 12, 187-190.
- Heemink, A.W. (1990).** Stochastic modelling of dispersion in shallow water. *Stochastic Hydrology and Hydraulics.*, Vol 4, pp. 161-174,
- Herrling, B. (1982).** Coupling of one and two-dimensional finite elements for the computation of tidal flow in estuaries. *Adv. Wat. Res.*, V5.
- Hodgins, D.O., A.H. Kilback et R.H. Young (1993).** New Tracer Techniques for Pulp Mill Effluent Delineation - Setting the basis for Effects Monitoring Programs. Proceedings of the 1993 Environmental Conference. Tappi Press, Technology Park, Atlanta (GA) USA.
- Hughes, T.J.R., Franca, L.P. et Hulbert, G.M. (1989).** A new finite element formulation for computational fluid dynamics: VII. The Galerkin/Least-Squares method for advective-diffusive equations. *Comp. Methods App. Mech. Eng.*, 73, 173-189.
- Kawahara, M. and T. Umetsu (1986).** Finite elements methods for moving boundary problems in river flows. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 6(6):365-386.
- Khelifa, A., Robert, J.-L. et Ouellet, Y. (1993).** A Douglas-Wang approach for advection-diffusion transient problem. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 110: 113-129.
- Kinzelbach, W. and Ackerer, P. (1986).** Modélisation de la propagation d'un contaminant dans un champ d'écoulement transitoire. *Hydrogéologie*, Vol.2, pp. 197-206.
- Konikow, L.F. and Bredehoeft, T.D. (1978).** Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. Book 7, Chap. C2, Techniques of Water-Resources Investigation of the USGS, US Gov. Print. Off., Washington. 90p.
- Lavallée, P. (1989).** La gestion des eaux usées en temps de pluie; l'impact sur le milieu récepteur des événements fréquents, Thèse de doctorat, INRS-Eau, 196 p.
- Leclerc, M., G. Dhatt, J.L. Robert, J.C. Tessier, A. Soulaïmani, P. Dupuis et Y. Matte (1987).** Modélisation des écoulements de l'Archipel de Montréal par éléments finis: aspects divers de l'application. *Revue internationale des Sciences de l'eau*, 3(2), 41-56.
- Leclerc, M., P. Boudreau et L. Belzile (1990c).** Etude d'impact d'avant-projet phase I - Modélisation numérique des habitats à ouananiche d'un tronçon représentatif (km 68) de la rivière Ashuapmushuan. Pour le Groupe Environnement Shooner Inc. et la Vice-présidence Environnement, Hydro-Québec. Rapport #INRS-Eau RS-316. 64 p. et 4 annexes, Décembre 1990.
- Leclerc, M., M. Montminy, G. Martin, J. Benoit, P. Boudreault et L. Cleary (1991a).** Développement et validation analytique d'un modèle de simulation lagrangien de panaches d'effluents. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 2. Rapport scientifique, INRS-Eau No. RS#321, 170 p.

- Leclerc, M., P. Dupont, P. Boudreault (Biol.), J. P. Fortin et L. Cleary (1991b). Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau de tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 1. Volume 2: Caractérisation de la diffusivité des écoulements du tronçon Tracy - Lac Saint-Pierre par tests de rhodamine et télédétection aéroportée. Rapport scientifique INRS-Eau No. RS#318, 66 p.
- Leclerc, M., P. Boudreault, M. Montminy, G. Martin, J. Benoit et L. Cleary (1992). Le logiciel PANACHE - Version 1.0: manuel de l'utilisateur. En collaboration avec la firme ASSEAU Inc. dans le cadre d'une entente institutionnelle entre l'INRS-Eau et le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. Rapport 3. Rapport scientifique INRS-Eau No. RS#322, 106 p.
- Leclerc, M., A. Boudreault, J. Bechara et G. Corfa (1993a). Two dimensional hydrodynamic modelling: a powerfull tool for the improvement of the Instream Flow Incremental Methodology. *Transactions of the American Fisheries Society* (accepté pour publication).
- Leclerc, M., P. Boudreau, J. Bechara, L. Belzile et D. Villeneuve (1993b). Modélisation de la dynamique de l'habitat des ouananiches (*Salmo salar*) juvéniles de la rivière Ashuapmushuan (Québec, Canada). *Bulletin français des pêches* (sous presse).
- Leclerc, M. et P. Rasmussen (1994). Risques environnementaux, débits réservés en aval des ouvrages hydroélectriques et gestion des populations salmonicoles en Scandinavie. Rapport de mission en Scandinavie. Mars 1994. 18p et annexes.
- Luk, G.K.Y., Lau, Y.L. and Watt, W.E. (1990). Two-dimensional mixing in rivers with unsteady pollutant source. *Journal of Environmental Engineering*, 116, 1: 125-143.
- Noorishad, J., Tsang, C.F., Perrochet, P., and Musy, A. (1992). A perspective on the numerical solution of convection-dominated transport problems: a price to pay for the easy way out. *Water Resources Research*, 28(2): 551-561.
- Padilla, F., Leclerc, M. et Villeneuve, J.-P. (1990). A formal finite element approach for open boundaries in transport and diffusion ground-water problems. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 11: 287-301.
- Park, N.S. et Liggett, J.A. (1990). Taylor-Least-Squares finite element for two dimensional advection-dominated unsteady advection-diffusion problems. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 11, 21-38.
- Perrochet, P. and Bérod, D. (1993). Stability of the standard Crank-Nicolson-Galerkin scheme applied to the diffusion-convection equation: some new insights. *Water Resources Research*, 29, 9:3291-3297.
- Prickett, T.A., Naymik, T.G. and Lonnquist, C.G. (1981). A random-walk solute transport model for selected groundwater quality evaluations. Illinois State Water Survey, Campaign, Bulletin 65, 101 p.
- Saad, Y. et Schultz, M. (1986). GMRES: a generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 7: 856-869.

- Secretan, Y. (1992).** Un schéma élément finis simple et adaptatif pour les écoulements de Navier-Stokes compressibles. *Rev. Eur. des Eléments finis* 1(1): 31-50
- Secretan, Y. (1991).** Contribution à la résolution des équations de Navier-Stokes compressibles par la méthode des éléments finis adaptatifs: développement d'un élément simple. Thèse PhD, Ecole Polytechnique fédérale de Zurich, No 9728.
- Shen, H. T., Yapa, P. D. et Zhang, B.(1992).** A model for transport and fate of chemical spills in rivers, report 92-5, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, 48 p.
- Solomon, M., A. Chalifour, J. Desrosiers et J. Boisvert (1992).** An application to vehicle routing Methodology to Large-Scale Larvicide Control Programs. *Interfaces*. 22(3).
- Souchon Y., Trocherie F., Fragnoud E., Lacombe C. (1989).** Les modèles numériques des microhabitats des poissons: application et nouveaux développements. *Rev. Sci. Eau*, 2, 807-830.
- Sudicky, E.A. and McLaren, R.G. (1992).** The Laplace Transform Galerkin Technique for large-scale simulation of mass transport in Discretely fractured porous formations. *Wat. Res. Res.*, 28, 2: 499-514.
- Tanguy, J.M. (1991).** Modélisation du transport solide par les courants à l'aide de la méthode des éléments finis. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Van Dam, G.C. (1981).** Models of dispersion. In: Pollutant transfer in the sea. Vol.1. Kullenberg, G. (ed.) CRC Press, Boca Raton, Florida. pp. 91-160,
- Walton, W.C. (1989).** Numerical groundwater modeling: flow and contaminant migration. Lewis Publishers, Inc. NWWA, 272pp.
- Wu, J. (1969).** Wind stresses and surface roughness at air-sea interface. *J. of Geoph. Res.* 74(2).
- Zang, B. (1992).** Modélisation d'écoulements à surface libre avec fronts mobiles par éléments finis. Thèse de docteur de l'UTC, option Mécanique appliquée, acoustique et matériaux. 234p.

Annexe

Données sur la consultation

Annexe: données sur la consultation

Personnes consultées et affiliation (ordre alphabétique)	(Nature de la consultation) (I) = Informelle (F) = Formelle	Principaux produits visés (ententes possibles)
BECHARA, José Instituto de Ictiologia del Nordeste (INICNE) ARGENTINE	Modélisation du microhabitat Débits réservés Modèles de terrain (F)	Hydrosim Modeleur (Site Beta)
BENOÎT, Julien Centre de recherche VOLVOX Inc.	Les outils informatiques Transportabilité vers microsoft (Windows NT, Win32) (F)	Le système HYDREAU
BERGERON, Normand INRS-Géoressources	Modélisation du microhabitat (poulamon) d'hiver Géomorphologie fluviale (I)	Hydrosim Modeleur Habiosim (Site Beta)
BÉRUBÉ, Pierre MEF	Petites centrales Petits cours d'eau Applicabilité aux différentes espèces de poissons Coûts d'utilisation	Hydrosim Habiosim
BILODEAU, Laurent Hydro-Québec	Modélisation numérique de terrain (I)	Modeleur

Annexe: données sur la consultation

BOUDREAULT, Paul Environnement Canada	Modélisation de la qualité de l'eau Méthode de gestion Bases de données Fonctionnalités générales (F)	Le système HYDREAU Panache Dispersim
BOULVA, Jacques HMS Énergie WELTE, François MOINEAU, Jean-Pierre FAMIC - HMS. Energie Inc.	Spécifications orientées-Objet Intégration informatique Commercialisation Support aux usagers (F)	Tout le système <i>(entente de commercialisation)</i>
BOVEE, Ken WADDLE, Terry National Biological Survey Mid-Continent Ecological Science Center Ft. Collins, Colorado, USA	Modélisation d'habitat Procédure américaine de certification hydroélectrique Modèles 2D - vs - 1D Validation des modèles standards futurs aux USA Commercialisation logiciels PHABSIM Définition du support aux usagers (F)	Habiosim Hydrosim Modeleur
BREIL, Pascal CEMAGREF	Ecohydrologie Séries temporelles d'habitat (I)	Hydrosim Habiosim
BRUNET, Gilles MEF Évaluations environnementales	Accessibilité du produit par les consultants Procédures de validation Communication des résultats (I)	Hydrosim Habiosim

Annexe: données sur la consultation

CAISSIE, Daniel Ministère des Pêches et Océans - Région du Golfe Moncton (Nouveau-Brunswick)	Modélisation classique du microhabitat (PHABSIM) (F)	Hydrosim Modeleur Habiosim (Site Beta)
CANTIN, Jean-François LAURENCE, Richard Direction régionale de l'Environnement atmosphérique Environnement Canada	Modélisation hydrodynamique Grands fleuves Standardisation d'événements de référence Diffusion de résultats HydroBases de données Intégration informatique d'utilisation (F)	Tout le système d'utilisation et de diffusion de résultat en discussion) (Site Béta)
CHALIFOUR, Alain UQTR Membres du GIREF (Université Laval)	Méthodes numériques Modélisation de données orientée-objet (I)	Librairie de classes d'objet éléments-finis (ententes académiques de recherche et de formation)
CHIASSEON, Yvon Hydro-Québec	Contexte d'utilisation Design d'ouvrages Hydraulique fluviale Protection berge Modélisation du terrain (I)	Hydrosim Modeleur
CORFA, Geneviève Hydro-Québec	Modélisation d'habitat Débits réservés Validation des modèles Contexte d'utilisation Agence semi-publique (I)	Habiosim

Annexe: données sur la consultation

CRABBÉ, Philippe Institut de recherche en Environnement et Économie	Modélisation de la contamination Intégration des résultats dans une perspective Socio-économique Besoins de communications Politiques publiques (I)	Intérêt général pour les outils (non-spécifique)
CUNJAK, Richard A. Fish Habitat and Enhancement Division Science Branch Min. of Fisheries and Oceans Moncton (Nouveau-Brunswick)	Habitats d'hiver (I)	Habiosim (versions futures)
DODSON, Julian (biologiste du CIRSA) Université Laval	Modélisation d'habitat (saumon) Validation modèle Contexte d'utilisation académique (recherche, formation)	Habiosim Hydrosim Modeleur (Site Béta)
DUMONT, Stéphane Services hydrauliques Garde côtière canadienne MORSE, Brian Services hydrauliques - DMABH Garde côtière canadienne	Modélisation hydrodynamique (grands fleuves) Intégration avec ID Problèmes de glace et de navigations (F)	Hydrosim Modeleur Coquille (Site Beta)
DUPUIS, Pierre Service hydraulique - SEBJ	Modélisation hydrodynamique Infographie Design d'ouvrages (I)	Hydrosim Modeleur

Annexe: données sur la consultation

HARBEC, Germain Dir. Planification et valorisation de la technologie - Hydro-Québec	Intégration informatique (I)	Le système HYDREAU
HEROUIN, Éric Cemagref	Modélisation d'habitat ID-VS-2D Incertitudes des variables physiques Modèles de substrat Modélisation numérique de terrain (I)	Habiosim Hydrosim Modeleur (Site Béta)
HERVOUET, J.M. EDF - Dir. des Études et Recherches	Modélisation hydrodynamique Applications environnementales Possibilité d'intégration Modeleur - TELEMAT Les outils D'EDF (I)	Modeleur Habiosim Panache (Ententes de collaborations en discussion)
KATOPODIS, Chris Fishries and Oceans Canada Central and arctic region Freshwater Institute	Système d'analyse HYDREAU Modélisation du micro habitat classique-VS-Habiosim (F)	La Coquille Modeleur Habiosim Hydrosim
KILLINGTVEIT, Aanund University of Trondheim Department of Hydraulic and Environmental Engineering VASKINN, Kjetil Arne Norwegian Hydrotechnical Laboratory Atle Harby	Le système HYDREAU. Ils ont un River Simulation System (Technologie antérieure opérationnelle) (I)	Tous

Annexe: données sur la consultation

LANTERS, François SABATON, Catherine EDF - Départ. Environnement aquatique et atmosphérique FRANCE	Protocole de terrain Chronologie d'habitat Effets des études Débits réservés (I)	Habiosim Modeleur Hydrosim (Site Beta)
LAPOINTE, Michel	Contexte <u>potentiel</u> d'utilisation en morphosédimentologie fluviale - Variable substrat Hydrolique fluviale Modélisation de terrain Opérations de terrain Modèles d'habitat	Modeleur Habiosim (Site Béta)
LARINIER, Michel GHAAPPE Inst. de Mécanique des fluides France BEAULIEU, Claude Groupe Environnement Shooner Inc.	Modélisation hydrodynamique - VS - design des seuils de passe migratoire Design d'habitat (I)	Hydrosim Modeleur Habiosim (Site Beta)
LAVALLÉE, Pierre COLAS, Hubert Les Consultants BPR Asseau Inc.	Contexte d'utilisation privé Modélisation des débordements (choix variables) Design d'ouvrages de rétention Hydraulique fluviale Modélisation des panaches industriels Procédure fédérale des ESEE (Étude de suivi des effets environnementaux) (F)	Hydrosim Modeleur Bispersim Panache (Site Béta) (Partenaire du projet)

Annexe: données sur la consultation

LOCKE, Allan GHANEM, Ashraf STEFFLER, Peter Alberta Environmental Protection Cochrane (Alberta) University of Alberta	Modélisation d'habitat 2D - VS - 1D Protocole de mesure de terrain Modèle numérique de terrain Modélisation hydrodynamique couvrant-découvrant Intégration MODELEUR - Modèle hydrodynamique personnel (F)	Habiosim Modeleur (Site Beta)
MANOHA, Bruno Département Environnement EDF	La philosophie de l'écohydraulique au sein de l'AI RH Ecohydraulique 2000 (I)	Tous
MARCHAND, Étienne	Modélisation hydrodynamique Intégration informatique Les outils du CNRC (I)	Hydrosim Modeleur
ROPARS, Yann Travaux publics et Services gouvernementaux Canada - Gare Maritime Champlain	Contexte d'utilisation Travaux publics pour navigation Hydraulique fluviale Fleuve Saint-Laurent Etudes d'impact Modélisation du terrain (I)	Hydrosim Modeleur
ROUSSEAU, Normand MEF	Contrôle de la pollution industrielle Analyse de la contamination Les ESEE	Hydrosim Panache Dispersim

Annexe: données sur la consultation

SALTVEIT, Svein Jakob LFI - Zoological Museum University of Oslo Norway	Modélisation d'habitat en Norvège Débits réservés Validation de modèles Limites des hypothèses (I)	Habiosim Modeleur
SHOONER, Gilles BOUDREAULT, André BOURGEOIS, Gilles BELZILE, Louis Groupe Environnement Shooner	Modélisation du microhabitat (saumon) Débits réservés (F)	Hydrosim Habiosim (Site Beta)
SIMON, Laure CERGRENE France	Modélisation hydrodynamique Modélisation numérique de terrain Méthodes numériques - Modèle de dispersion (F)	Hydrosim Modeleur Dispersim Panache
SOUCHON, Yves VALENTIN, Sylvie KAPRA, Hervé Yann Le Coarer Cemagref de Lyon et d'Aix-en-Provence France	Modélisation d'habitat en France Restauration écologique du Rhône Modèles ID-VS-2D Validation de modèles d'habitat Formalismes de modélisation d'habitat (F)	Habiosim Modeleur Hydrosim (Site Beta)
TANGUY, Jean-Michel Min. de l'équipement, du logement et des transports Service technique central des ports maritimes et des voies navigables	Modélisation hydrodynamique Systèmes d'information rivière Sédimentologie fluviale Dragage (I)	Système Hydreau Modeleur (Site Beta)