



## RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

### **Modelling the response of the St. Lawrence tributaries to environmental changes: integrated study and development tools**

Soumis par André Roy  
*Université de Montréal*

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Yves YF. Secrétan, INRS-ETE  
Normand NE. Bergeron, INRS-ETE  
Pascale PM. Biron, Université Concordia

Au  
Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

et  
Ouranos inc.

Avril 2011



## Résumé public des résultats et des avantages pour le Canada

Les changements hydro-climatiques, anticipés d'ici la fin du siècle, auront des effets importants sur la dynamique d'évolution des tributaires du St-Laurent et sur les apports sédimentaires au fleuve. Notre capacité à projeter les impacts de ces changements est toutefois limitée. Le projet visait à combler certaines lacunes qui limitent l'élaboration de scénarios d'ajustement des tributaires. Ces lacunes incluent d'une part, une compréhension limitée des processus géomorphologiques sous couvert de glace et de la sensibilité des berges des tributaires du St-Laurent aux variables hydro-climatiques et d'autre part, l'absence de modèle adapté qui permettent d'évaluer les impacts potentiels des changements environnementaux sur la dynamique des tributaires du St-Laurent. Les grands défis du projet étaient donc de développer et d'améliorer les outils de mesure in situ et de modélisation hydro-sédimentaire 2D et de rendre ces outils fonctionnels afin de les utiliser pour réaliser des projections à long terme. Ce projet a permis d'atteindre une grande part des objectifs fixés tant au niveau de l'acquisition des connaissances nouvelles et que du développement des outils de mesure et de modélisation.

Le développement d'un outil de modélisation représente la première étape dans la réalisation des projections des impacts géomorphologiques et écologiques des changements hydro-climatiques anticipés. Ces projections sont d'un grand intérêt particulièrement pour Environnement Canada intéressé à la biodiversité des milieux riverains notamment dans le corridor fluvial du Saint-Laurent. Dans le cadre de ce projet, un module de transport de sédiment a été intégré au modèle hydrodynamique H2D2 (utilisé par Environnement Canada) pour la rivière St-François. Le modèle pour ce tributaire a aussi été couplé au modèle du fleuve St-Laurent. Cette intégration représente une étape cruciale dans le développement complet de l'outil. Cette étape a permis de tester l'efficacité du modèle en conditions actuelles, de décortiquer et comprendre le rôle des paramètres de modélisation et des conditions initiales sur les résultats du modèles et de mettre en évidence la sensibilité des simulations morpho-sédimentaires à ces variables. La compréhension de ces interactions est essentielle pour interpréter adéquatement les résultats de la modélisation à court et long terme.

Une meilleure connaissance de la vulnérabilité du milieu aux changements climatiques est un enjeu important pour la société et pour le consortium Ouranos. Ce projet a fourni plusieurs indications concernant la vulnérabilité des berges aux variables hydro-climatiques et la vulnérabilité des tributaires aux crues sous-glacielles en période hivernale. L'étude a montré la rapidité et la grande amplitude des processus d'érosion de berges et la sensibilité des berges sableuses aux fluctuations importantes des débits. Compte tenu de cette vulnérabilité et des scénarios hydrologiques projetés, il est présumé que l'étendue des zones en érosion et le volume de sédiments apportés à la rivière et au fleuve par les processus d'érosion fluviale seront accrus. Les résultats obtenus permettent d'identifier des zones à risque compte tenu de l'importance de la zone riveraine, notamment en ce qui concerne les infrastructures humaines et la biodiversité de ces zones. L'étude a aussi montré le potentiel érosif des crues sous-glacielles ce qui fournit des informations uniques permettant de mieux anticiper les impacts de l'accroissement anticipé de la fréquence et de la magnitude de ces crues en hiver. Le projet a permis de faire progresser les connaissances particulièrement en ce qui concerne les processus géomorphologiques sous couvert de glace et la sensibilité des berges des tributaires du St-Laurent aux variables hydro-climatiques.

## **I. DESCRIPTION DES OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET DE RECHERCHE TELS QU'ILS FIGURENT DANS LA DEMANDE DE SUBVENTION ACCORDÉE**

Le but de la présente étude est de développer et d'améliorer les outils de mesure *in situ* et de modélisation hydro-sédimentaire 2D afin d'évaluer les impacts potentiels des changements environnementaux sur la dynamique des tributaires du St-Laurent. Le projet s'articule autour de trois grands thèmes: 1) la simulation des patrons spatio-temporels des ajustements morphologiques des tributaires et la prévision des volumes de sédiments qui seront apportés au fleuve; 2) une meilleure compréhension des effets des changements de température et de débits au cours de la période hiver/printemps sur la formation du couvert de glace et les processus hivernaux et leurs impacts sur le transport de sédiments; 3) une évaluation des impacts hydrologiques, morphologiques et sédimentologiques sur les habitats riverains, principalement à l'embouchure de la rivière dans le fleuve. La recherche fournit des levés sur le terrain effectués deux fois par année sur deux tributaires du St-Laurent (Batiscan et St-François). Ces données permettent de comprendre les processus fluviaux actuels et de calibrer et valider les modèles hydrodynamiques et de transport de sédiments. Le projet fournira des outils de modélisation compatibles avec le modèle hydrodynamique utilisé pour le fleuve St-Laurent. Il est aussi arrimé aux besoins des partenaires en termes de compréhension des processus de transport des sédiments, d'érosion de berge, de formation du couvert de glace et d'impact sur la végétation riveraine.

## **II. DESCRIPTION DES PROGRÈS RÉALISÉS À L'ÉGARD DE CHACUN DE CES OBJECTIFS SUITE À CETTE SUBVENTION**

### **1.0 ACQUÉRIR DES DONNÉES SUR L'ÉTAT ACTUEL DES TRIBUTAIRES: CARACTÉRISER L'ÉTAT ACTUEL DU LIT ET DES BERGES DES TRIBUTAIRES À L'ÉTUDE ET SUR L'ÉVOLUTION DU LIT DE LA RIVIÈRE**

#### *Rivières (bathymétrie, vitesses, couvert de glace, transport des sédiments)*

De nouvelles données bathymétriques et hydrauliques ont été recueillies et compilées sur les rivières Batiscan et St-François. La zone d'étude sur ces rivières s'étend de leur embouchure avec le fleuve jusqu'à 10km en amont. Ces nouvelles données complètent les levés de terrain effectués dans un projet précédent et couvrent la période de mai 2004 à novembre 2010. Ces données ont permis de quantifier la variabilité saisonnière et interannuelle du transport des sédiments. Des cartes des zones d'érosion et d'accumulation ont été produites. Ces nouvelles données fournissent des informations uniques concernant la dynamique d'évolution des tributaires.

De façon plus détaillée, nous avons pu observer et mesurer les effets géomorphologiques des bas débits et niveaux d'eau du fleuve, des crues de fortes amplitudes se produisant au printemps et à l'automne et du maintien prolongé des niveaux d'eau moyen. Les scénarios hydro-climatiques futurs indiquent que ces caractéristiques hydrologiques seront exacerbées dans le futur. Pour la St-François, la forte crue enregistrée en octobre 2005 a remodelé le chenal en amont de l'île St-Joseph et a contribué à accélérer les processus d'érosion des berges dans le secteur aval de cette île. Pour la Batiscan, la comparaison des relevés bathymétriques du printemps et de l'automne 2010 a permis d'évaluer le rôle des faibles débits de 2010, lesquels ont favorisé l'accumulation des sédiments particulièrement à proximité des bancs d'accumulation à l'embouchure de la rivière. Combiner aux données hivernales recueillies après le passage d'une crue sous-glacielle (section 2), ces données permettent de mieux comprendre la dynamique sédimentaire à différentes conditions d'écoulement. Les connaissances acquises grâce à ces données sont importantes pour valider le modèle hydro-sédimentaire et pour établir des scénarios de modification des tributaires en fonction des changements hydro-climatiques futurs.

#### *Berges*

Les berges des tributaires à l'étude ont une composition sédimentaire et une stratigraphie différente lesquelles modulent l'action des processus d'érosion. Nous avons recueilli des nouvelles données sur l'état actuel des berges des tributaires, sur les processus d'érosion et d'évolution des berges et sur leur sensibilité à l'érosion. Les suivis réalisés incluent des mesures directes du recul des berges, des relevés photographiques deux fois par année et les mesures des caractéristiques sédimentologiques et géotechniques des berges permettant la paramétrisation d'un modèle d'évaluation de la stabilité des berges. Des observations et mesures ont aussi été faites pour évaluer la contribution des processus d'érosion liés aux vagues de vent et de batillage. Souvent négligés dans les études de stabilité de berges, ces processus peuvent contribuer fortement à créer des encoches sur la berge et déstabiliser la berge.

#### Mesures directes du recul de berge

Les mesures directes de recul de berge ont été faites à l'aval de la St-François. Dans la section près de l'embouchure, l'érosion fluviale des berges sableuses est dominante et rapide. Nous avons mesuré un recul annuel moyen des berges de 3 m dans cette zone sinueuse de la rivière. Ceci représente un volume annuel

moyen de 6 000 m<sup>3</sup> (pour un segment de 1 km de long) de sédiments apportés à la rivière. La forte érosion de berge que nous avons documentée fournit des informations essentielles pour anticiper l'échelle spatio-temporelle des processus dans ce type de milieu hydro-sédimentaire tant en climat actuel que futur.

#### Processus d'érosion de berge : Relevés photographiques

Les relevés photographiques ont été utilisés pour cartographier la distribution spatiale des zones d'érosion de berge et pour identifier le processus d'érosion de berge qui domine localement (érosion fluviale, glissement de terrain ou processus mixte). Les cartes produites caractérisent l'état des berges et localisent les zones actives entre 2006 et 2010. Cette représentation permet d'avoir une vue globale et d'ainsi évaluer l'amplitude spatiale des processus actifs sur les berges dans la zone d'étude. Ainsi, on observe une érosion active sur 60 % de la section d'étude (présence d'érosion sur une ou l'autre des berges) de la St-François et sur 48 % de la section d'étude de la Batiscan. Le processus dominant d'érosion est l'érosion fluviale sur la St-François et l'érosion liée à l'hydrologie de la berge sur la Batiscan.

Les zones soumises à l'érosion fluviale actuellement seront vulnérables à une plus grande occurrence des fortes crues et à l'augmentation de l'ampleur des débits de pointe. Compte tenu de cette vulnérabilité et des scénarios hydro-climatiques projetés, il est présumé que l'étendue des zones en érosion et le volume de sédiments apportés à la rivière et au fleuve par les processus d'érosion fluviale seront accrus.

#### Paramétrisation d'un modèle d'évaluation de la stabilité des berges des tributaires

Plusieurs mesures physiques ont été faites sur les berges dans le but de paramétriser un modèle d'évaluation de la stabilité des berges en réponse aux fluctuations de l'eau (sol et rivière), de calibrer les équations du modèle (ex.: pression hydrostatique) et de valider les résultats. Steve Darby (collaborateur externe au projet) a donné un atelier de formation sur la paramétrisation géotechnique et hydraulique du modèle.

Les mesures effectuées sur le terrain (4 sites témoins par tributaire) incluent: la géométrie de la berge, la taille des sédiments, la stratigraphie de la berge et les fluctuations temporelles de la nappe phréatique. Sur un des sites témoins, des mesures de pression hydrostatique ont été enregistrées. Les limites d'Atterberg, qui permettent d'obtenir les limites plastiques et liquides du matériel argileux des berges, ont été évaluées. Ces valeurs sont utilisées pour prédire les changements de phases du matériel en fonction de l'eau qui est introduite dans le système. La résistance des sédiments argileux des berges à l'érosion mécanique a été évaluée avec un test de « Direct Shear » qui permet d'obtenir la cohésion et l'angle de friction du sol. La résistance des berges à l'érosion fluviale a été mesurée en laboratoire à l'aide d'un chenal expérimental. Ces travaux ont été réalisés au laboratoire de Thanos Papanicolaou (University of Iowa). Ces expériences ont été menées dans le but de déterminer le cisaillement critique pour l'érosion fluviale pour les matériaux à forte teneur en silt et argile. Ces valeurs critiques permettront d'évaluer la stabilité de la berge lorsqu'elle est soumise aux forces de cisaillement appliquées par l'écoulement fluvial (érosion fluviale) et le seuil critique pour les ruptures de masse (perte de cohésion). L'ensemble des travaux de terrain et de laboratoire et la paramétrisation du modèle ont représenté une partie importante du travail de l'étudiante à la maîtrise travaillant sur ce projet. Bien que des tests préliminaires avec le modèle aient été réalisés, le travail de modélisation reste à compléter.

## **2.0 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES ANTICIPÉS POUR LA PÉRIODE HIVER/PRINTEMPS SUR LA FORMATION DU COUVERT DE GLACE ET LE TRANSPORT DES SÉDIMENTS**

Pour cette portion du projet, nous avons concentré nos efforts sur la réalisation de l'objectif 2.2 qui porte sur le transport de sédiment sous-glaciel. Cette décision a dû être prise afin de tenir compte du désistement de l'étudiant recruté pour travailler sur ce projet. Nous considérons cet objectif comme prioritaire compte tenu de la rareté des informations disponibles sur ce sujet et de l'importance des impacts géomorphologiques anticipés en réponse à l'augmentation des débits hivernaux projetée d'ici la fin du siècle. Nous avons aussi étudié l'impact de l'augmentation des températures sur la durée du couvert de glace. L'approche utilisée est empirique et vise à relier des indicateurs du climat aux caractéristiques du couvert de glace. La simulation de la formation et du bris du couvert de glace à l'aide d'un modèle 1D, CRISSP-1D, n'a pas été complétée compte tenu du départ de l'étudiant recruté. Les données nécessaires à la paramétrisation du modèle ont toutefois été recueillies. Une séquence de photos a été prise à douze stations d'observation le long de la zone d'étude sur la Batiscan au moment de la formation du couvert de glace. Ces photos visaient à documenter la progression spatio-temporelle du couvert de glace lors de sa formation. Des estimations du pourcentage de la couverture de glace dans la zone élargie de chaque station d'observation complètent les documents photographiques. Les températures de l'eau ont été mesurées en continu en amont et en aval de la zone à l'étude. L'épaisseur de glace a aussi été mesurée à différents endroits. La température de l'air a aussi été enregistrée à une station météo installée à proximité de la rivière.

## **2.1 Modéliser et quantifier les impacts des changements dans la température et le débit hivernal (prévus par les scénarios futurs du climat et des débits) sur la formation du couvert de glace (type de glace, progression longitudinale, épaisseur de glace) et sur la stabilité en combinant des approches théoriques, expérimentales et numériques.**

*Approche 1: modélisation des dates de formation et de bris du couvert de glace et de l'épaisseur maximale du couvert de glace à partir d'une approche basée sur un indicateur climatique : les degrés-jour de gel (AFDD)*

### Modélisation des dates de formation et de bris du couvert de glace

Une douzaine de rivières réparties à travers les différentes régions du Québec, entre la latitude 40° et 50° Nord, ont été utilisées pour faire cette étude. Les rivières ont été sélectionnées à cause de leur localisation et de la qualité des données de glace enregistrées aux stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Nous avons estimé les dates de présence du couvert de glace (date de début et fin de la glace) en utilisant la codification enregistrée avec les données hydrométriques. Les séries cumulent au moins 20 ans de données entre 1961 et 2003.

L'indicateur climatique utilisé pour les relations est le cumul de degrés-jour de gel (AFDD). Les données de température utilisées pour faire les calculs ont été extraites des données interpolées du NLWIS (National Land and Water Information Service) qui couvrent le sud du 60°N pour la période historique de 1961 à 2003.

Les valeurs d'AFDD calculées ont été mises en relation avec la durée du couvert de glace (aux stations). Les données indiquent qu'il y a une relation linéaire entre la durée du couvert de glace et les AFDD pour des valeurs d'AFDD inférieures à  $\approx 1500$  degrés-jour de gel. Au-delà de ce seuil, les fluctuations dans la durée du couvert de glace sont faiblement corrélées avec cet indicateur climatique. Les cinq rivières les plus au sud ont généralement des valeurs d'AFDD inférieures à ce seuil. Nous avons utilisé les données de ces rivières pour caler une équation de changement entre ces deux variables. Cette équation a été utilisée pour projeter l'impact de l'augmentation des températures sur la durée du couvert de glace. La moyenne des AFDD pour l'ensemble des scénarios climatiques pour la période de 2046 à 2065 est de 787 ce qui représente une diminution de 300 par rapport à la moyenne pour la période de 1966 à 2003. Pour une rivière la St-François, cette diminution signifie que la durée du couvert de glace serait réduite d'environ 23 jours, soit une durée de 68 jours pour 2046-2065 par rapport à 91 actuellement.

## **2.2 Utiliser une approche expérimentale à l'échelle locale pour estimer les volumes de transport de sédiments au cours de la période hivernale (avec couvert de glace) et estimer l'importance relative de cette période sur le transport total de sédiments.**

Deux types de campagne de terrain ont été effectués pendant les périodes hivernales de 2008 à 2011. Une première campagne visait à estimer le bilan sédimentaire à partir de la quantification des changements bathymétriques au cours de l'hiver et la seconde à documenter les processus de l'écoulement et du transport des sédiments sous la glace en utilisant une gamme d'approches. Le transport de sédiments sous-glaciaire étant rarement mesuré, nous avons développé de nouvelles méthodes de mesure sur le terrain et d'analyse des données. La mise en application de certaines méthodes se sont révélées relativement simple tandis que d'autres se sont montrées très complexes. C'est le cas d'une technique expérimentale utilisant des pit-tag et antennes de détection pour documenter l'initiation du transport de sédiments sur le lit de la rivière. Les tests réalisés avec cette technique sont prometteurs mais les difficultés associées à l'installation des antennes en milieu sablonneux et sous un couvert de glace n'ont pas été résolues à notre satisfaction dans le cadre du projet. Par conséquent cette approche n'a pas été être utilisée. En contrepartie, l'utilisation du géoradar pour effectuer des levés bathymétriques sur de grande surface s'est avérée très efficace sur le type de rivière étudiée et les résultats obtenus sont de haute qualité. L'utilisation de l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) pour estimer les taux de transport sédimentaires sous-glaciaires locaux est très prometteuse et les données font présentement l'objet d'analyses détaillées. Le projet a donc permis de développer et de tester des outils et des approches nouvelles dans l'étude des processus fluviaux sous un couvert de glace.

### *Estimation du transport des sédiments sous couvert de glace*

#### Bilan sédimentaire au cours de l'hiver en quantifiant des changements bathymétriques entre l'automne et l'hiver

Sur chacune des rivières, des relevés bathymétriques ont été effectués à l'aide d'un Géoradar et d'un GPS aux mêmes transects que lors des levés de terrain réalisés en eau libre à partir d'un bateau à l'automne et au printemps. La comparaison des données a permis de quantifier l'amplitude des changements bathymétriques au cours de la période avec couvert de glace. Les résultats obtenus en 2010 sont particulièrement probants puisqu'ils nous ont permis de documenter le rôle géomorphologique d'une crue sous-glaciaire d'amplitude modérée. Les

différences bathymétriques à l'embouchure de la Batiscan indiquent que le talweg a été élargi et approfondi à certains endroits. Les relevés du printemps indiquent que la bathymétrie mesurée au cours de l'hiver a été conservée, montrant le rôle négligeable de la crue printanière de 2010.

Ces données indiquent que les crues hivernales peuvent avoir un effet majeur sur le lit des tributaires du St-Laurent et potentiellement des conséquences importantes sur les habitats fluviaux. On peut donc anticiper que le rôle de cette période dans la dynamique sédimentaire des tributaires sera accru dans un contexte de changements climatiques puisque les scénarios hydrologiques indiquent que la fréquence des débits supérieurs à un seuil de transport (défini en eau libre) sera de 3 à 10 fois plus élevés en hiver (section 4.1).

### Outils d'analyse

Le géoradar a rarement été utilisé pour cartographier le lit des rivières en période hivernale. Les données que nous avons recueillies dans le cadre de ce projet montrent le potentiel de cet instrument pour estimer les changements bathymétriques hivernaux. Le Géoradar permet de plus de documenter les variations spatiales dans les épaisseurs de glace. La configuration de l'instrument, les conditions d'utilisation de l'instrument sur la glace et le post-traitement des données sont des éléments clés pour assurer la qualité des données recueillies. L'analyse des données a nécessité le perfectionnement de nouvelles techniques de traitement des données puisque les logiciels standards de traitement des signaux du géoradar n'ont pas été conçus pour le milieu aquatique sous glace et sont généralement trop contraignants et inadéquats pour ce milieu. Par conséquent, une nouvelle approche a été développée pour traiter les signaux du géoradar. L'approche par wavelets, utilisée conjointement avec l'application de filtres, a permis de mettre en évidence les réflecteurs et de faire ressortir la cohérence spatiale du signal. Un outil Matlab semi-automatisé a aussi été créé pour extraire les interfaces et convertir les données en position (x, y) et élévation. L'ajustement de la vitesse de propagation de l'onde en fonction des caractéristiques du milieu traversé (glace ou eau) permet la conversion des temps en profondeur et élévation.

### Processus locaux de transport des sédiments sous couvert de glace

Les objectifs de ces campagnes de terrain étaient 1) d'évaluer l'intensité de l'activité locale de transport de sédiments en charge de fond (caméra et ADCP); 2) de mesurer la variation relative de la concentration en sédiments dans la tranche d'eau (ADCP) et 3) de documenter la structure de l'écoulement pendant un cycle de marée et au cours d'une crue sous-glacielle (ADCP). Trois campagnes de terrain ont été effectuées sur la Batiscan. Deux à des faibles débits et une lors d'une crue (130 m<sup>3</sup>/s) sous-glacielle. Lors de la crue de janvier 2010, nous avons pu estimer la vitesse de déplacement de la charge de fond à partir de la vitesse de déplacement du fond (« *bottom track velocity* ») mesurée par l'ADCP. Ces vitesses sont présumées équivalentes puisque l'instrument est stationnaire. La hauteur de la couche active est plus difficile à estimer compte tenu de la précision dans les données de profondeur avec l'ADCP et de la qualité moyenne des images enregistrées simultanément. En utilisant une hauteur moyenne de 0.5 cm pour la couche active (limite de précision de l'ADCP et 10 fois la taille des sables moyens au site de mesure), nous obtenons un volume moyen de transport de sédiments de 0.017 kg/m/s. Ces valeurs sont comparables à d'autres mesures effectuées en milieux sableux.

Les mesures effectuées à faible débit ne permettent pas d'identifier clairement le mouvement des particules au fond car la précision de l'ADCP ne permet pas d'évaluer les très faibles vitesses de déplacement du fond (<5 mm/s). La majorité des mesures effectuées au cours de ce relevé se trouvent autour de cette valeur seuil. Cependant, les images de la caméra permettent de voir que les mouvements sporadiques de sédiments et de matière organique sur le fond sont corrélés avec le passage de larges structures d'écoulement plus rapides que l'écoulement moyen. Les vitesses moyennes de l'écoulement sont inférieures à 30 cm/s mais au passage des cellules, cette vitesse peut augmenter jusqu'à 50 cm/s ce qui permet la mise en transport des sables. Ces structures sont aussi corrélées avec les fluctuations de la charge en suspension (« *backscatter intensity* ») dans la tranche d'eau. L'analyse plus poussée des données qui est en cours permettra de mieux définir les liens entre l'écoulement sous la glace et la dynamique du transport des sédiments en suspension et au fond.

## **3.0 MODÉLISATION DES AJUSTEMENTS DES TRIBUTAIRES DU ST-LAURENT**

### **3.1 Modifier et adapter le modèle hydrodynamique H2D2/Modeleur par l'ajout de modules de transport des sédiments**

*Développer et intégrer un module de charge de fond compatible avec le modèle hydrodynamique H2D2 et modeleur.*

Le module de modélisation du transport de sédiment 2D (SED2D) a été développé à partir du modèle morpho-sédimentaire SEDROUT-1D et intégré au modèle hydrodynamique H2D2. Les équations de SED2D sont résolues par la méthode des éléments finis (méthodes des résidus pondérés de type Galerkin). L'intégration dans les

temps du système global hydrodynamique-transport de sédiment se fait par une méthode de pas de temps fractionnés. Pour chaque pas de temps global, on résout un pas de temps hydrodynamique avec le fond fixe, puis un pas de temps de transport avec ces résultats pour calculer les modifications du lit. Les deux modèles partagent les mêmes nœuds et les mêmes éléments. Les calculs sont repris à t+1 avec les nouvelles élévations.

### **3.2 Paramétriser, calibrer et valider les modèles en utilisant les données de terrain et calibrer H2D2**

Le modèle hydrodynamique H2D2 a été paramétrisé, étalonné et validé pour la St-François. Les données bathymétriques et granulométriques recueillies en avril 2005 sur la St-François ont été utilisées pour créer le Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans le SIG modeleur. Le MNT, les vitesses d'écoulement (mesurées avec un ADCP à différents débits) et les élévations de la surface de l'eau (mesurées avec un GPS et avec une sonde à niveau d'eau) ont été utilisés pour étalonner et valider les simulations avec H2D2. Ces résultats montrent que le modèle reproduit adéquatement les mesures de terrain. Ainsi les différences entre les niveaux d'eau simulés et mesurés à la station d'observation située en aval de la rivière sont dans la marge d'erreur des mesures. En ce qui concerne la pente de la surface de l'eau, la différence est inférieure à 1mm/km pour l'ensemble de la zone d'étude. Pour les vitesses de l'écoulement, les différences sont généralement inférieures à 5%.

### **3.3 Modéliser les ajustements de la rivière en utilisant la nouvelle version de H2D2/Modeleur et SED2D pour la période actuelle**

Avant d'effectuer les projections à long terme des ajustements des tributaires, nous avons validé SED2D2 pour la période actuelle pour laquelle nous avons des mesures bathymétriques. Les levés de terrain d'avril 2005 (MNT de départ) ont été comparés aux levés de novembre 2009. Les premières simulations réalisées indiquent que le modèle tend à surestimer les volumes et surfaces d'accumulation dans la St-François. Le modèle montre aussi que la distribution spatiale des zones d'érosion et d'accumulation se fait selon un patron en oscillations, ce qui ne représente pas la distribution observée sur le terrain. Bien que l'utilisation d'une seule classe de sédiments explique en partie ces différences, de nombreuses questions ont été soulevées et nous ont amenés à réviser les équations utilisées dans SED2D et les interactions entre les modules.

#### Vérification des résultats de SED2D

Nous avons testé SED2D dans un contexte simplifié, en utilisant les données expérimentales de Ribberink (1982) obtenu en chenal expérimental. Ces données permettent de vérifier la représentation des processus d'érosion et sédimentation dans le modèle. Les premières simulations ont montré que les volumes de sédiments transportés sont bien simulés par SED2D. Par contre, des oscillations sont présentes. Le développement des oscillations est influencé par la viscosité numérique utilisée, le pas de temps, la formule de transport de sédiments et les conditions morphologiques initiales.

#### Corrections apportées dans SED2D

Suite à ces observations, il est apparu que les équations de transport de sédiments sont de nature hyperbolique, qu'elles ne contiennent aucun amortissement naturel et qu'elles propagent des discontinuités comme des chocs. Certaines corrections ont alors été apportées aux équations employées dans SED2D (formules de transport de sédiment et de calcul des forces de cisaillement, ajout d'un pente critique pour contrôler la pente et taux de mise en mouvement du sédiment), au seuil maximum de changement bathymétrique par pas de temps, à la mise à jour de l'élévation du lit (transfert entre les modules), au maillage de SED2D (éléments T6L compatible directement avec l'hydrodynamique plutôt que des sous-éléments T3) et à la méthode d'intégration dans le temps (Runge-Kutta explicite remplace Euler implicite). Certaines techniques inspirées du traitement des chocs en aérodynamique numérique ont également été implantées: implantation d'une viscosité de type Lapidu sur la modification du lit et sur les fractions et ajouts de termes d'amortissement. Les valeurs utilisées pour ces paramètres sont issues des tests utilisant les données de Ribberink. D'autres variables (la taille des mailles de la grille, la largeur du modèle, la durée du pas de temps et la hauteur de la couche active) pouvant agir sur les caractéristiques des oscillations ont aussi été testées. Le cas simple de Ribberink nous a permis de vérifier l'influence des conditions initiales sur les oscillations et de mieux comprendre le modèle avec une seule classe granulométrique.

#### Vérifications de SED2D modifié pour la St-François

Les modifications apportées au module ont permis d'améliorer les résultats des simulations par rapport aux données observées sur la St-François. Elles n'ont toutefois pas résolu entièrement les problèmes d'oscillation. Le modèle reste sensible aux données initiales. Il est probable que la bathymétrie initiale de la St-François ne soit pas représentative d'un équilibre entre l'hydrodynamique et le transport de sédiment et que cela puisse contribuer à expliquer le comportement du modèle, qui s'apparente à la propagation d'un front (instable) par rapport à une modification plus lente du fond.

### **3.4 Utiliser les modèles climatiques et hydrologiques afin de créer de nouvelles séries à long terme de débits et Modéliser les ajustements de la rivière à l'aide de ces scénarios hydrologiques**

Les nouvelles séries hydrologiques ont été produites par Ouranos. Le modèle hydrologique HSAMI a été utilisé avec un très large éventail de scénarios climatiques. Les données climatiques entrant dans HSAMI proviennent de 68 modèles climatiques globaux (produits avec les scénarios de GES B1, A1B1 ou A2) et trois méthodes de mise à l'échelle statistique (constant scaling, daily scaling et daily transition). Une technique de mise à l'échelle dynamique (modèle régional canadien, CRCM 4.2.3) a aussi été utilisée avec le modèle CGCM3 et ECHAM5 et les trois méthodes de mise à l'échelle statistique. Au total, six types de séries climatiques ont ainsi été générés: les données brutes GCM et RCM mises à l'échelle avec les trois méthodes pour la période 2045-2065. Les séries hydrologiques obtenues avec les données observées (NLWIS:1961 à 2003) et les données de la période de référence (1961-1990) permettent d'évaluer les changements projetés.

Ces nouveaux scénarios hydrologiques tendent à corroborer les résultats obtenus dans l'étude précédente à partir d'un nombre réduit de modèles climatiques et de méthodes de mise à l'échelle. Ainsi, ces nouveaux scénarios montrent que la fréquence des débits supérieurs à un seuil de transport sera de 3 à 10 fois plus élevée en hiver que pour la période de référence. De plus fortes augmentations sont projetées pour la Batiscan. Au printemps, les scénarios indiquent une diminution de cette fréquence pour la St-François et une légère augmentation pour la Batiscan.

#### Modéliser les ajustements de la rivière en utilisant SED2D et H2D2 et les nouveaux scénarios hydro-climatiques

La modélisation à long terme des ajustements de la rivière en utilisant SED2D et H2D2 et les nouveaux scénarios hydro-climatiques n'a pu être réalisée dans le cadre du projet puisque le problème d'oscillation que nous avons identifié dans le module de transport de sédiments n'a pas été résolu.

## **4.0 MODÉLISER L'IMPACT DES CHANGEMENTS HYDRO-SÉDIMENTAIRES SUR LES ÉCOSYSTÈMES À L'EMBOUCHURE DES TRIBUTAIRES**

### **4.1 Coupler le modèle 2D des tributaires avec celui du St-Laurent**

Le modèle H2D2/modeleur et SED2D de la St-François est couplé au modèle du fleuve. Toutefois, compte tenu des difficultés rencontrées avec SED2D pour le tributaire, le déplacement des sédiments l'embouchure de la rivière et la localisation des zones d'érosion et d'accumulation sédimentaire n'ont pu être modélisés dans le cadre du projet.

### **4.2 Modéliser la réponse de la végétation riveraine à l'embouchure des tributaires aux fluctuations du niveau d'eau du fleuve et aux changements à long-terme des débits et des apports sédimentaire du tributaires et à la modification morphologique de ces zones**

Cette section du projet est étroitement liée à la modélisation hydro-sédimentaire à long-terme des tributaires. Sa réalisation a été retardée par les problèmes rencontrés à la section précédente.

#### *Acquérir des données sur la végétation à l'embouchure des deux tributaires à l'étude*

Les images satellitaires récentes (septembre 2006) à haute résolution ont été utilisées pour catégoriser la végétation présente à l'embouchure de chaque tributaire étudié et pour délimiter les zones d'occupation de chaque grande classe de végétation.

## **III. EXPLICATION DE TOUT ÉCART PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS INITIAUX.**

Dans l'ensemble, nous avons réalisé les objectifs prévus initialement. Les écarts par rapport aux objectifs initiaux concernent deux points.

Projet processus fluviaux en hiver: L'étudiant recruté a changé de programme: Nous avons réorganisé le travail dans cette section du projet à la suite du départ du doctorant recruté pour réaliser cette portion du projet. Ainsi, nous avons priorisé l'étude du transport de sédiment sous-glaciaire et des impacts des changements climatiques sur cette dynamique. L'agente de recherche et un assistant de recherche ont travaillé sur ce projet que nous considérons comme prioritaire. Conséquemment, la portion du projet qui devait évaluer les impacts des changements climatiques sur la formation du couvert de glace n'a été que partiellement traitée. Nous avons développé en priorité l'approche empirique pour étudier les impacts de l'augmentation des températures sur la durée du couvert de glace.

Projet modélisation des ajustements des tributaires: Problème des oscillations avec SED2D : Le développement de l'outil de modélisation SED2D a été plus complexe qu'anticipé initialement (section 3). Plusieurs problèmes ont été identifiés et résolus dans le cadre du projet mais le modèle final conserve un problème d'oscillation des



périodes de transport. Malgré une similitude certaine entre les données simulées et observées (distribution spatiale et volume de sédiments érodés et accumulés) pour la période actuelle, nous croyons que la modélisation à long terme dans le futur avec SED2D aurait grandement limité la qualité des résultats. Par conséquent, nous n'avons pas complété cette portion du projet. Le problème lié à la modélisation hydro-sédimentaire et la décision prise en ce qui concerne la modélisation à long terme des tributaires ont eu des conséquences sur la réalisation de la section du projet portant sur la modélisation des milieux riverains. Cette section était fortement dépendante de la réussite de la modélisation avec SED2D.

#### **IV. DESCRIPTION DE L'IMPORTANCE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DES RÉSULTATS;**

– **Développement d'outils:** Le projet a permis de développer et de perfectionner des outils pour étudier l'évolution des rivières. De nouvelles techniques de mesure de la bathymétrie de la rivière en période hivernale ont été testées avec succès. Nous avons aussi défini les bases d'une approche d'évaluation de la vulnérabilité et de la stabilité des berges. Dans le cadre de ce projet, un module de transport de sédiment a été intégré au modèle hydrodynamique H2D2 (utilisé par Environnement Canada). Le modèle a été appliqué sur la St-François et couplé au modèle du St-Laurent. Cette intégration a permis de tester l'efficacité du modèle en conditions actuelles, de décortiquer et comprendre le rôle des paramètres de modélisation et des conditions initiales sur les résultats du modèles et de mettre en évidence la sensibilité des simulations morpho-sédimentaires à ces variables. La compréhension de ces interactions est essentielle pour interpréter adéquatement les résultats de la modélisation à court et long terme

– **Évaluer la réponse des tributaires aux fluctuations hydrologiques (rivière et St-Laurent):** Le projet a permis de documenter la réponse géomorphologique des tributaires du St-Laurent à différentes conditions hydrologiques allant de très bas débits, aux crues hivernales et aux très fortes crues. Ces conditions sont susceptibles d'avoir une plus grande occurrence dans le futur. Les données recueillies fournissent donc des informations importantes pour évaluer l'ampleur des phénomènes et valider les résultats de la modélisation.

–**Transport des sédiments sous couvert de glace et durée du couvert de glace :** Les données recueillies ont permis d'évaluer le rôle géomorphologique d'une crue sous-glacielle d'amplitude modérée et de quantifier l'importance relative de la période hivernale dans la dynamique sédimentaire des tributaires. Le rôle de ces crues est rarement documenté et fréquemment sous-estimé dans la communauté scientifique. Ces données contribuent à accroître les connaissances dans le domaine et à mieux anticiper les impacts de l'augmentation des débits hivernaux. Des relations empiriques entre la durée du couvert de glace et les AFDD ont été élaborées et utilisées avec les projections des températures. La durée du couvert de glace est importante pour les processus de transport des sédiments et pour plusieurs espèces aquatiques.

– **Vulnérabilité des berges à l'érosion:** La cartographie de la stabilité passée et actuelle des berges qui a été faite permet d'identifier les zones où les processus d'érosion ont été actifs et sont toujours actifs. Des indications pertinentes sur la vulnérabilité des berges aux variables hydro-climatiques ont été fournies. Ces informations sont utiles pour le développement et la protection des milieux riverains

#### **V. BREF ÉNONCÉ DES AVANTAGES QUE LE PROJET POURRAIT APPORTER AU CANADA.**

– Les bases de données et cartes produites pourront être utilisées par les partenaires, par les Organismes de Bassin-Versant, par des groupes environnementaux locaux travaillant à la protection des berges et du milieu aquatique et par les riverains intéressés par les cartes produites.

– Les outils développés et les nouvelles techniques de mesure testées dans le cadre du projet ouvrent des avenues originales pour la recherche notamment des rivières en milieu nordique (e.g. Applications originales du GeoRadar). Ces outils pourront être utilisés par d'autres étudiants et chercheurs.

– Le projet a permis d'accroître les connaissances sur les processus de transport des sédiments sous-glacielle. Cette dynamique est très mal connue et par conséquent son rôle est potentiellement sous-estimé. Ces connaissances sont importantes dans le contexte des rivières nordiques du Canada dans un contexte de changements climatiques.

– La problématique d'érosion des berges est critique dans de nombreux milieux, l'amélioration des connaissances sur la sensibilité des berges aux variables hydro-climatiques est par conséquent primordiale dans le contexte des changements climatiques anticipés. Ce projet a fourni des informations qui permettront de mieux appréhender cette problématique.

– Le projet a permis la formation de personnel hautement qualifié. Neuf personnes en plus des quatre chercheurs principaux et des partenaires ont participé au projet.



## Diffusion des résultats de la recherche

<b>Articles présentés à des revues avec comité de lecture :</b>	<b>1</b>
<b>Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :</b>	<b>7</b>
<b>Exposés à des conférences/Affiches :</b>	<b>9</b>
<b>Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :</b>	<b>6</b>
<b>Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :</b>	<b>3</b>

**ARTICLES ACCEPTÉS PAR DES REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE OU PUBLIÉS DANS CEUX CI**

- Charron I., O. Lalonde, A.G. Roy, C. Boyer, et S. Turgeon, 2008. Changes in riparian habitats along five major tributaries of the St-Lawrence River, Québec, Canada: 1964-1997. *River research and application*, 24, 617-631.
- Verhaar, P.M., P.M. Biron, R.I. Ferguson and T. B. Hoey, 2008. A modified morphodynamic model for investigating the response of rivers to short term climate change, *Geomorphology*, 101, 674-682.
- Boyer, C., P. Verhaar, A.G. Roy, P. Biron et J. Morin., 2009. Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes at the confluence of Saint-Lawrence tributaries: potential effects on fluvial ecosystems, *Hydrobiologia*, DOI : 10.1007/s10750-009-9927-1.
- Verhaar, P.M., P.M. Biron, R.I. Ferguson and T.B. Hoey, 2009. Numerical modelling of climate change impacts on Saint-Lawrence River tributaries, *Earth Surface Processes and Landforms*, DIO: ESP-09-0229.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier and A.G. Roy, 2010. Impact of climate change on the hydrology of St-Lawrence tributaries, *Journal of Hydrology*, 384, 65-83.
- Mekonnen, M.A., Y. Secretan, and P.M. Biron, 2010. Two-dimensional morphodynamic model for prediction of climate induced changes in river bed level and sedimentary profile. IAHR *Proceedings*, Seoul, Korea, 2010
- Verhaar, P.M., P.M. Biron, R.I. Ferguson, and T.B. Hoey, 2010. Implications of future climate change in the 21st century on simulated the magnitude and frequency of bed-material transport in tributaries of the Saint-Lawrence, *Hydrological Processes* 10.1002/hyp.7918

**ARTICLES PRÉSENTÉS À DES REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE**

- Turcotte, B., N.E. Bergeron, A.G. Roy and B. Morse, Sediment transport in ice-affected rivers, *Journal of Hydrology* (en révision).

**EXPOSÉS À DES CONFÉRENCES ET AFFICHES**

- Boyer, C., A.G. Roy and P. Verhaar, 2008. Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes at the confluence of Saint-Lawrence tributaries: potential effects on fluvial ecosystems, 15th annual conference on the St. Lawrence ecosystem, at the St. Lawrence River Institute of environmental sciences, Cornwall, Ontario, Canada.
- Boyer, C., P. M. Verhaar, A.G. Roy, D. Chaumont et I. Chartier, 2008. Impacts des changements environnementaux sur l'hydrologie, la dynamique sédimentaire et l'évolution de l'embouchure des tributaires du corridor fluvial du St-Laurent, AQQUA 2008, Baie-Comeau, Québec, Canada.
- Mekonnen, M.A., Y. Secretan, and P.M. Biron, 2010. Two-dimensional morphodynamic model for prediction of climate induced changes in river bed level and sedimentary profile. IAHR, Seoul, Korea, 2010.
- Roy, A.G., C. Boyer, P.M. Verhaar, and P.M. Biron, 2011. Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes of the Saint-Lawrence River and its tributaries, World's Large Rivers Conference 2011, 11-14 avril 2011, Vienne, Autriche.
- Roy, A.G., C. Boyer, M. Tremblay, P.M. Verhaar, N. Bergeron, P.M. Biron, 2010. Impacts des changements environnementaux sur les tributaires du Saint-Laurent, Colloque Ouranos 2010
- Roy, A.G. et C. Boyer, 2011. Impacts des changements environnementaux sur les tributaires du Saint-Laurent, Colloque en Agro-Alimentaire, Drummondville, 2010.

Affiches

- Boyer, C., P. M. Verhaar, A.G. Roy et Pascale Biron, 2008. Impacts des changements environnementaux sur la dynamique sédimentaire à l'embouchure des tributaires du St-Laurent, colloque Ouranos 2008.
- Turcotte, B., N. Bergeron and A.G. Roy, 2009. Sediment transport in ice-covered rivers: a prospect research project. River Ice Processes and Environment (CRIPE), 15th Workshop on River-Ice, St-John, Newfoundland and Labrador, 15-17juin 2009.
- Boyer, C., A.G. Roy, M. Tremblay, P.M. Verhaar, P. Biron and N. Bergeron, 2010. Impacts des changements environnementaux sur la dynamique sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent : rôle des facteurs de contingence, colloque Ouranos 2010.

**AUTRE (Y COMPRIS LES RAPPORTS TECHNIQUES, LES ARTICLES SANS COMITÉ DE LECTURE, ETC.)**

- Mekonnen, M. A. 2010. Développement de SED2D et intégration de SED2D dans H2D2 (rapport).
- Mekonnen, M. A. 2010. Calibration, validation et application du modèle SED2D pour la St-François (rapport).
- Huard D., 2010. Climate change impact on the hydrological regime of St-Laurent tributaries (et bases de données des nouveaux scénarios hydrologiques)
- Boyer, C., 2011. Utilisation de l'ADCP sous couvert de glace : rapport bref sur les mesures des vitesses et du transport de sédiments lors d'une crue et durant une portion du cycle de marée (rivière Batiscan).
- Boyer, C., 2011. Utilisation du géoradar sur deux tributaires du St-Laurent (rapport technique et résultats).
- Verhaar, P.M., 2011. Évaluation des problèmes liés à l'implantation de SED2D dans H2D2 (rapport).



## Transfert des connaissances et de technologie

### Décrivez brièvement les résultats

1- Bonification d'un modèle hydrodynamique existant par l'ajout d'un module de transport des sédiments (SED2D). Dans le cadre de ce projet, un module de transport de sédiment a été intégré au modèle hydrodynamique H2D2 (utilisé par Environnement Canada). Le modèle a été appliqué sur la rivière St-François et couplé au modèle du St-Laurent. Cette intégration a permis de tester l'efficacité du modèle en conditions actuelles, de décortiquer et de comprendre le rôle des paramètres de modélisation et des conditions initiales sur les résultats du modèles et de mettre en évidence la sensibilité des simulations morpho-sédimentaires à ces variables. La compréhension de ces interactions est essentielle pour interpréter adéquatement les résultats de la modélisation à court et long terme

2- Scénarios hydrologiques pour la St-François et la Batiscan en climat futur. De nouveaux scénarios climatiques et hydrologiques ont été élaborés pour les rivières Batiscan et St-François. Ces scénarios ont été analysés afin d'identifier des indicateurs utilisés entre autres pour projeter les impacts futurs des crues hivernales; pour quantifier les changements dans la durée du couvert de glace; et pour évaluer la vulnérabilité des berges à l'érosion. Ces scénarios pourront être analysés plus en détail dans le futur et être utilisé dans un modèle comme SED2D lorsque les problèmes d'oscillation du transport des sédiments seront entièrement résolus.

3- Berges et érosion. Le projet a permis de préciser les bases d'une approche d'évaluation de la vulnérabilité et de la stabilité des berges. Ces informations seront très utiles lors de la réalisation du projet que nous souhaitons débuté cette année. La cartographie de la stabilité passée et actuelle des berges qui a été faite permet d'identifier les zones où les processus d'érosion ont été actifs et sont toujours actifs. Ces indications sont pertinentes pour évaluer la vulnérabilité des berges aux variables hydro-climatiques et pour la mitigation et la protection des milieux riverains vulnérables en climat futur. Les données recueillies dans cette étude sont aussi d'un grand intérêt pour les ministères du gouvernement du Québec et autres organismes puisqu'il existe actuellement très peu de données sur la résistance des sédiments argileux à l'érosion.

4- Couvert de glace : Transport des sédiments sous-glaciel et durée du couvert de glace. L'étude du transport de sédiment sous la glace réalisée dans le cadre de ce projet a permis le développement et le perfectionnement de nouvelles techniques de mesure et d'analyse. Des techniques de mesure de la bathymétrie de la rivière en période hivernale à l'aide d'un géoradar ont été testées avec succès. Les résultats obtenus élargiront le domaine d'utilisation de cet outil et aussi la réalisation d'autres études portant sur la dynamique hivernale des rivières. Les données recueillies ont permis d'évaluer le rôle géomorphologique d'une crue sous-glacielles d'amplitude modérée et de quantifier l'importance relative de la période hivernale dans la dynamique sédimentaire des tributaires. Le rôle de ces crues a rarement été documenté et fréquemment sous-estimé dans la communauté scientifique. Ces données contribuent à accroître les connaissances dans le domaine, à mieux anticiper les impacts de l'augmentation des débits hivernaux et à évaluer la vulnérabilité des tributaires à l'accroissement anticipé de la fréquence et la magnitude des crues sous-glacielles. Des relations empiriques entre la durée du couvert de glace et le cumul des degrés-jour de gel (AFDD) ont été élaborées pour la période historique puis utilisée avec les projections climatiques (température) pour la période 2046-2065 afin d'évaluer la réduction de la durée du couvert de glace pour cette période. La durée du couvert de glace est importante pour les processus de transport des sédiments et pour plusieurs espèces aquatiques.

5-Évaluer la réponse des tributaires aux fluctuations hydrologiques (rivière et St-Laurent). Le projet a permis de documenter la réponse géomorphologique des tributaires du St-Laurent à différentes conditions hydrologiques allant de très bas débits, aux crues hivernales et aux très fortes crues. Ces conditions sont susceptibles d'avoir une plus grande occurrence dans le futur. Les données recueillies et les connaissances acquises sur la dynamique d'évolution des tributaires fournissent donc des informations importantes pour évaluer l'ampleur des phénomènes d'érosion et d'accumulation attendues en relation avec les changements hydro-climatiques anticipés.

La cartographie des zones d'érosion et d'accumulation à différentes échelles de temps permet de mieux comprendre la dynamique sédimentaire de la rivière à l'échelle des saisons, interannuelle et sur 5 ans. Cette cartographie permet d'identifier les secteurs stables et instables de la rivière et de dresser une tendance d'évolution des tributaires.



## Transfert des connaissances et de technologie

### Décrivez tout avantage social ou environnemental qui a découlé ou qui découlera de ces travaux de recherche

Une meilleure connaissance de la vulnérabilité des tributaires du St-Laurent aux changements climatiques est un enjeu important pour la société canadienne et pour le Consortium Ouranos. Ce projet a fourni plusieurs indications concernant la vulnérabilité des berges aux variables hydro-climatiques et la vulnérabilité des tributaires aux crues sous-glacielles en période hivernale. L'étude a montré la rapidité et la grande amplitude des processus d'érosion de berges et la sensibilité des berges sableuses aux fluctuations importantes des débits. Compte tenu de cette vulnérabilité et des scénarios hydrologiques projetés, il est présumé que l'étendue des zones en érosion et le volume de sédiments apportés à la rivière et au fleuve par les processus d'érosion fluviale seront accrus dans l'avenir. Les résultats obtenus permettent d'identifier des zones à risque compte tenu de l'importance de la zone riveraine, notamment en ce qui concerne la biodiversité de ces zones et la présence d'infrastructures humaines.

L'étude a aussi montré le potentiel érosif des crues sous-glacielles ce qui fournit des informations uniques permettant de mieux anticiper les impacts de l'accroissement anticipé de la fréquence et de la magnitude de ces crues en hiver. La projection des impacts géomorphologiques des crues hivernales est importante pour évaluer la vulnérabilité des habitats aquatiques.

Le développement d'un outil de modélisation représente la première étape dans la réalisation des projections des impacts géomorphologiques et écologiques des changements hydro-climatiques anticipés. Ces projections sont d'un grand intérêt particulièrement pour Environnement Canada intéressé à la biodiversité des milieux riverains. Dans le cadre de ce projet, un module de transport de sédiment a été intégré au modèle hydrodynamique H2D2 (utilisé par Environnement Canada) pour la rivière St-François. Le modèle pour ce tributaire a aussi été couplé au modèle du fleuve St-Laurent. Cette intégration représente une étape cruciale dans le développement complet de l'outil. Cette étape a permis de tester l'efficacité du modèle en conditions actuelles, de décortiquer et comprendre le rôle des paramètres de modélisation et des conditions initiales sur les résultats du modèle et de mettre en évidence la sensibilité des simulations morpho-sédimentaires à ces variables. La compréhension de ces interactions est essentielle pour interpréter adéquatement les résultats de la modélisation à court et long terme.

Les résultats du projet contribueront à améliorer notre capacité à comprendre la dynamique des rivières. L'évaluation des impacts des changements hydro-climatiques sur les milieux riverains et aquatiques pourra tirer profit de ces résultats et de ces connaissances nouvelles.

L'amélioration du modèle 2D est une étape importante en vue d'accroître la précision de nos prédictions de réaction de l'écosystème aux changements environnementaux. La vue intégrative de la dynamique du St-Laurent avec ses affluents peut aider à détecter les problèmes avant qu'ils deviennent critiques