

**Rapport synthèse du projet CRSNG-RDC
intitulé : « Adaptation du modèle
hydrologique distribué HYDROTEL au
milieu boréal Québécois »**

Rapport de recherche No R-1065

Mai 2009

**Rapport synthèse du projet CRSNG-RDC intitulé : « Adaptation du
modèle hydrologique distribué HYDROTEL au milieu boréal
Québécois »**

Soumis à :

Ouranos,

le consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques

Par :

Alain N. Rousseau

Sylvain Jutras

Centre Eau Terre Environnement

Institut national de la recherche scientifique

490, rue de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

Rapport de recherche No R-1065

INRS-ETE

Mai 2009

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. ÉQUIPE DE RECHERCHE.....	3
3. OBJECTIFS POURSUIVIS ET RÉSULTATS OBTENUS.....	7
AT1 : APPLICATION PHYSITEL/HYDROTEL : BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE NÉCOPASTIC	9
AT1.1 : Implémentation du réseau d'acquisition de données hydrométéorologiques sur le bassin de la rivière Nécopastic	9
AT1.2 : Programmation et paramétrage d'HYDROTEL afin de considérer correctement les apports saisonniers des milieux humides.....	11
AT1.3 : Ajout des projections Lambert et Stéréopolaires à PHYSITEL/HYDROTEL	13
AT2 : ADAPTATION AU MILIEU BORÉAL DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS LIÉS AU BILAN D'ÉNERGIE ET AUX BILANS HYDRIQUES DES MILIEUX HUMIDES ET LACS.....	15
AT2.1 : Évaluation des équations d'estimation d'évaporation et d'évapotranspiration disponibles et compatibles avec les données disponibles afin de déterminer leur applicabilité en milieu boréal et l'intérêt de les intégrer dans HYDROTEL.....	15
AT2.2 : Intégration d'un algorithme de suivi du gel/dégel du sol qui sera adapté aux modèles actuels de fonte de neige.....	17
AT2.3 : Évaluation de la performance du modèle unicouche mixte degrés-jours – bilan d'énergie thermique d'HYDROTEL par comparaison des résultats obtenus avec ceux produits par le modèle français multicouche de suivi et de fonte de neige CROCUS.....	19
AT2.4 : Réalisation d'une revue de la littérature sur les modèles de sous-captage des précipitations en fonction du vent et de la sublimation	21
Rapport en rédaction :.....	21
AT2.5 : Différentiation des types de sols selon la verticale demandant la révision et la reprogrammation de l'algorithme actuel d'échange entre les couches.....	23
AT2.6 : Détermination de l'écoulement et du stockage dans les milieux humides	25
AT2.7 : Modélisation de l'écoulement et du stockage dans les lacs et les réservoirs de grande envergure.....	27
AT3 : MISE EN PLACE D'UNE MÉTHODE DE CALAGE ADAPTÉE AU CONTEXTE BORÉAL.....	29
AT3.1 : Réalisation d'une revue de littérature sur les méthodes de calage des modèles hydrologiques	29
AT4 : SIMULATION DES COMPORTEMENTS HYDROLOGIQUE HISTORIQUES ET FUTURS	31
AT4.1 : Détermination du potentiel d'utilisation des données de réanalyses pour alimenter le modèle HYDROTEL.....	31
AT4.2 : Évaluation de la vulnérabilité des bassins versants en milieu boréal en fonction des modifications du climat et exploration des divers scénarios d'adaptation de la production hydroélectrique.....	33
4. CONCLUSION	35
RAPPEL DE L'IMPORTANCE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE NOS TRAVAUX	35
TRANSFERT DES CONNAISSANCES AUPRES DES PARTENAIRES INITIAUX ET NOUVEAUX	35

1. Introduction

Les bassins hydroélectriques du milieu boréal québécois se distinguent de ceux du sud du Québec non seulement par leur climatologie (température annuelle moyenne entre -2,5 et -5 °C versus 0 et 5 °C; précipitations annuelles entre 600 et 900 mm versus 1 000 et 1 500 mm), mais aussi par le pourcentage élevé de territoire couvert par des lacs et milieux humides interconnectés (de l'ordre de 20 à 30 % versus 3 à 5 %) ainsi que par leur orientation géographique (est-ouest dans le nord versus nord-sud dans le sud). Depuis 1950, le Québec boréal, subarctique et arctique, s'est tout d'abord refroidi d'environ 3 °C, puis un réchauffement rapide a repris depuis les années 1980. Si les tendances actuelles se maintenaient, l'hydrologie de ces bassins serait vraisemblablement modifiée. Dans ce contexte, on se doit de déterminer les conditions d'apports futurs afin d'assurer une planification optimale de la production hydroélectrique. L'analyse des comportements hydriques de ces bassins à faible gradient topographique est complexe et il existe peu de modèles hydrologiques adaptés au milieu boréal et capables de tirer avantage des données issues de la télédétection et des systèmes d'information géographiques (SIG). Il existe donc un besoin de disposer d'outils d'analyse pour comprendre les comportements hydrologiques historiques et futurs. Afin de combler ce besoin, Hydro-Québec (HQ) et Ouranos poursuivent avec l'INRS-ETE le développement et l'adaptation au milieu boréal du modèle hydrologique distribué HYDROTEL.

Au cours des dernières années, HQ, en partenariat avec le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), a entrepris, pour des fins de prévisions hydrologiques d'ensemble, la mise en place du modèle hydrologique distribué HYDROTEL du Centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS (INRS-ETE) sur ses bassins versants du sud Québec (45° au 49° parallèle). HQ désire maintenant déterminer le potentiel d'application d'HYDROTEL en milieu boréal (49° au 55° parallèle) tout en adaptant ce modèle aux particularités du milieu, en l'occurrence par une meilleure estimation des processus hydrologiques liés au bilan d'énergie thermique et aux bilans hydriques des milieux humides et lacs.

Le but de cette proposition de R&D supporté par HQ/Ouranos était d'appliquer et d'adapter HYDROTEL au milieu boréal québécois afin de mieux comprendre et prévoir les comportements hydriques historiques et futurs. Les résultats des travaux permettront de faciliter l'application d'HYDROTEL sur les bassins gérés par HQ ou encore là où l'entreprise compte exploiter des centrales hydroélectriques (ex.: bassin de la Romaine) afin de : (i) simuler avec justesse le comportement des rivières avant et après aménagement et (ii) sur la base de scénarios de CC, évaluer les apports.

La réalisation de ce projet est répartie en quatre thématiques de travail : (i) application de la version actuelle d'HYDROTEL sur le bassin de la Nécopastic afin de poser les diagnostics sur les difficultés d'utilisation en milieu boréal; (ii) adaptation/amélioration de la modélisation des processus associés au bilan d'énergie thermique et aux bilans hydriques des milieux humides et lacs; (iii) mise en place d'une méthode de calage adaptée aux données disponibles; (iv) détermination du potentiel d'utilisation des sorties du modèle régional de climat canadien (MRCC) pour la reconstruction du comportement hydrique des bassins et simulation du comportement hydrique de la Nécopastic dans un contexte de CC.

2. Équipe de recherche

Voici la liste exhaustive des membres de l'équipe de recherche qui ont participé à la réalisation de ce projet.

INRS-ETE

Professeur-chercheur

- *Alain N. Rousseau* : Hydrologie et gestion intégrée par bassin. Expertise dans le développement de systèmes de modélisation intégrée de gestion de l'eau (GIBSI, PHYSITEL, HYDROTEL). Responsable du projet, il a dirigé la réalisation de ce projet dans son ensemble ainsi qu'assuré la supervision des stagiaires postdoctoraux et la direction des étudiants à la maîtrise.
- *Monique Bernier* : Télédétection appliquée au suivi environnemental et à l'hydrologie avec une emphase sur le couvert nival. Elle a participé à l'encadrement d'un stagiaire d'été et guidé la collecte des données géomatiques.
- *André St-Hilaire* : Hydrologie statistique. Expertise en écohydrologie des tourbières. Il a supervisé la revue de littérature sur le sous-captage et agit en tant qu'expert sur le suivi hydrométéorologique des tourbières.
- *Claudio Paniconi* : Hydrogéologie. Expertise dans le développement de modèles numériques d'eaux souterraines et d'eau de surface. Il a contribué à la direction d'un étudiant à la maîtrise (Simon Ricard).
- *Jean-Pierre Fortin* : Concepteur d'HYDROTEL et de PHYSITEL. Il a donné une formation sur PHYSITEL et HYDROTEL à des employés d'Hydro-Québec.
- *Jean-Pierre Villeneuve* : Modélisation mathématique appliquée à la gestion des ressources en eau. Il a dirigé les travaux de doctorat de Richard Turcotte.
- *Yves Secretan* : Hydrodynamique fluviale. Il participait à la direction de Rémy Bourdillon.

Technicien et Assistants de recherche

- *Alain Royer* : Technicien en informatique. Développeur, programmeur et support informatique de PHYSITEL/HYDROTEL a contribué activement à la réalisation des AT1.3 et AT2.5 tout en offrant un support à la réalisation de toutes les AT.
- *Stéphane Savary* : Assistant de recherche en télédétection et modélisation hydrologique. Il a contribué à la réalisation de l'AT1.3 et des AT2.2 et AT2.3.
- *Yves Gauthier* : Assistant de recherche en télédétection de Monique Bernier a contribué à la réalisation de l'AT1.2.

INRS-ETE (suite)

Stagiaires posdoctorals

- *Brou Konan* : Stagiaire post-doctoral d'Alain N. Rousseau. Expertise en mathématique et en modélisation hydrologique. il a contribué activement à la réalisation de l'AT4.
- *Sylvain Jutras* : Stagiaire post-doctoral d'Alain N. Rousseau. Expertise en hydrologie forestière des milieux humides. il a contribué activement à la réalisation des AT1.1, 1.2 et 2.1, ainsi qu'à la gestion du projet dans son ensemble.
- *Alexandru Ciobanas* : Stagiaire post-doctoral d'Alain N. Rousseau. Expertise en mécanique des fluides, thermodynamique (théorie constructale), et transfert de chaleur appliquée à l'écohydrologie. Il a contribué activement à la réalisation de l'AT2.1 et participé à la réalisation de l'AT2.2 et AT2.3

Étudiant au doctorat

- *Grégor Levrel* : Étudiant au doctorat d'Alain N. Rousseau. il a contribué à la réalisation de AT2.5.

Étudiants à la maîtrise

- *Clément Clerc* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau, il a contribué à la réalisation de l'AT2.6.
- *Rémi Bourdillon* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau, il a contribué à la réalisation de l'AT2.7.
- *Francis Gauthier* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau, il a contribué à la réalisation de AT1.2 en tant que stagiaire de juin à octobre 2006. Il a quitté l'équipe par la suite pour faire une maîtrise en sciences de la terre à l'INRS-ETE.
- *François Chrétien* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau, il a contribué à l'initiation de AT2.1 en tant que stagiaire. Il a été présent pendant un mois et a ensuite quitté l'équipe pour entreprendre une maîtrise professionnelle en sciences de l'eau à l'INRS-ETE.

INRS-ETE (suite)

Stagiaires de premiers, deuxièmes et troisièmes cycles

- *Maria Dissanska* : Étudiante au doctorat de Monique Bernier (sujet externe à ce projet). Elle a contribué à la réalisation de l'AT1.2.
- *Patrick Gagnon* : Étudiant au doctorat d'Alain N. Rousseau (sujet externe à ce projet) contribue à la réalisation de l'AT1.2.
- *Martin-Pierre Lavigne* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau (sujet externe à ce projet). Il a contribué à la réalisation de l'AT2.4 en tant que stagiaire de juin à octobre 2006. Bien qu'il ait travaillé en tant qu'assistant de recherche sur un projet externe, ses réalisations ont permis de développer une méthode de calage manuelle d'HYDROTEL.
- *Simon Ricard* : Étudiant à la maîtrise d'Alain N. Rousseau et de Claudio Paniconi (sujet connexe à ce projet). Il a contribué à la réalisation de l'AT2.5 en évaluant l'intérêt de différencier les types de sols selon la verticale le bassin de la rivière Châteauguay.
- *Philippe Boucher* : Étudiant au baccalauréat (Informatique U. Laval), il a contribué en tant que stagiaire à temps partiel (10 heures/semaine) à la réalisation de l'AT1.3 et à la restructuration du code source d'HYDROTEL sous la supervision d'Alain Royer.
- *Ludovic Paul* : Élève ingénieur (École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), France). Il a contribué à la réalisation de l'AT1.3 en participant au développement d'un algorithme pour subdiviser en versants les unités hydrologiques relativement homogènes de PHYSITEL sous la supervision d'Alain N. Rousseau.
- *France-Line Dionne* : Étudiante en génie physique à l'U. Laval, elle a contribué sous la supervision d'Alexandru Ciobanas et Alain Rousseau à l'évaluation de l'équation d'évapotranspiration d'Hydro-Québec.
- *Damien Kints* : Étudiant au DUT génie électrique et informatique industrielle (IUT de Mulhouse, France). Il a contribué à la réalisation de l'AT1.3 en participant au passage de la compilation du logiciel HYDROTEL sous VISUALStudio2005 sous la supervision d'Alain Royer.
- *Marc-André Robin* : Étudiant au baccalauréat (Sciences géomatiques, U. Laval). Il a contribué à la réalisation de l'AT2.7 en effectuant le relevé bathymétrique du seuil situé dans la rivière aux Sables à l'aval immédiat (quelques dizaines de mètres) du barrage de Pibrac-Est.
- *Myriam Tremblay* : Étudiante en informatique (CEGEP Ste-Foy). Elle a contribué au design et à la programmation de l'interface graphique d'aide au calage d'HYDROTEL sous VISUALStudio2005 sous la supervision d'Alain Royer.
- *Levent Demir* : Étudiante en informatique (DUT Génie Electrique Informatique Industriel - Lyon I - IUT-A/ CEGEP Lévis-Lauzon). Il a contribué au design et à la programmation de l'interface graphique d'aide au calage d'HYDROTEL sous VISUALStudio2005 sous la supervision d'Alain Royer.

CEHQ

- *Richard Turcotte* : Chef de la division de l'expertise hydrométéorologique et étudiant au doctorat. Expertise dans l'utilisation d'HYDROTEL. À noter que M. Turcotte poursuit son doctorat à temps partiel sous les co-directions de Jean-Pierre Villeneuve, Alain N. Rousseau et Alain Mailhot. Ses résultats de travaux de thèse contribueront en grande partie à la réalisation de l'AT3 (date de dépôt initial de la thèse, février 2009).
- *Julie Lafleur* : Ingénieure experte sur la gestion du lac Kénogami.
- *Réjean Thibeault* : Technicien en hydrométrie et accompagnateur pour la mesure des débits aux deux déversoirs du lac en Croix.

Hydro-Québec / IREQ / Ouranos

- *Denis Tremblay* : Expert en prévision hydrologique, Hydro-Québec. Expertise avec PHYSITEL/HYDROTEL.
- *Isabelle Chartier* : Chercheure en hydrologie, IREQ. Expertise avec PHYSITEL/HYDROTEL.
- *Réné Roy* : Gestionnaire de projets portant sur le cycle de l'eau, Ouranos. Expertise en hydrologie statistique.
- *Daniel Caya, Anne Frigon, Diane Chaumont et Dorothee Charpentier* : Équipe simulation du climat chez Ouranos
- *Gilles Brosseau* : Chef Innovation technologique, Hydro-Québec.
- *Noël Evora, Martin Beaudoin et Jocelyn Gaudet* : Équipe de suivi du projet à l'IREQ
- *Michel Slivitzky* : Expertise en hydroclimatologie, Ouranos, et professeur émérite (INRS-ETE).
- *Michel Nadeau* : Technicien en instrumentation hydrométéorologique, IREQ.

Communauté Cris de Chisabi

- *Julian Sam* : Sous contractant supervisé par Sylvain Jutras. Responsable des relevés des puits et piézomètres des tourbières ombrotrophes instrumentés.

3. Objectifs poursuivis et résultats obtenus

La réalisation de ce projet est répartie en quatre grandes activités de travail (AT) :

- (AT1) Application de la version actuelle d'HYDROTEL sur le bassin de la rivière Nécopastic afin d'identifier les difficultés d'utilisation en milieu boréal;
- (AT2) Adaptation au milieu boréal de la modélisation des processus hydrologiques liés au bilan d'énergie thermique et aux bilans hydriques des milieux humides et des lacs;
- (AT3) Mise en place d'une méthode de calage adaptée aux données disponibles;
- (AT4) Simulation des comportements hydriques historiques et futurs;

Le document ci-dessous résume les grandes lignes de l'ensemble du projet :

[Rousseau, A.N., S. Jutras, A. Ciobanas, S. Ricard, C. Clerc, R. Bourdillon, P. Gagnon, K. Brou, A. Royer. 2008.](#) Adaptation du modèle hydrologique HYDROTEL au milieu boréal québécois. *Séminaire présenté chez Ouranos le 28 mai 2008*, Montréal, Québec.

Les objectifs détaillés poursuivis par le projet ainsi que les progrès réalisés à leur égard sont décrits dans les pages qui suivent.

AT1 : Application PHYSITEL/HYDROTEL : Bassin versant de la rivière Nécopastic

AT1.1 : Implémentation du réseau d'acquisition de données hydrométéorologiques sur le bassin de la rivière Nécopastic

Cette activité a été complétée avec succès. L'acquisition de données hydrométéorologiques de qualité s'est avéré être un des plus grands atouts de cette étude. Ces données ont été utiles à la réalisation de toutes les activités de l'AT2.

La station Nécopastic, gérée par l'IREQ, offre depuis 2004 une série fiable de données météorologiques de haute qualité. Sa localisation s'est avérée très favorable à son utilisation en modélisation hydrologique. À noter que la station dispose à la fois d'une sonde de hauteurs de neige ainsi qu'une sonde d'évaluation de l'équivalent en eau de la neige. Au début de l'étude, l'installation d'une station météorologique supplémentaire a été faite dans la partie sud du bassin (Station Nécopastic2) afin d'améliorer la répartition spatiale des données météorologiques.

À noter que la station du SMER n'a pas été très utile à cette étude car elle a été démantelée en juin 2007. D'ailleurs, les observations de précipitations prises de 2004 à 2007 ne sont pas directement utilisables en raison de problèmes techniques liés aux instruments utilisés.

Deux capteurs de débits (SW-Argonaut) ont été installés dans le lit de la rivière Nécopastic par l'IREQ. Les données provenant de ces appareils sont d'une extraordinaire qualité, mais la série de données est incomplète, quelques problèmes techniques ayant causés la perte de données à quelques occasions.

Au niveau de la documentation exhaustive des informations cartographiques, disons que certaines sources se sont avérées suffisamment précises (hydrographie et topographie). Alors que quelques sources d'informations cruciales étaient trop grossières (dépôt de surface, occupation du paysage) ont bénéficié d'une caractérisation adaptée à l'aide de la télédétection.

Références :

[Jutras, S., Rousseau, A.N. 2006.](#) AT1.1 : Implémentation du réseau d'acquisition de données hydrométéorologiques sur le bassin versant de la rivière Nécopastic. *Rapport de recherche No R890, INRS-ETE*, Québec, Canada. 25 p

[Jutras, S. I. Chartier, A.N. Rousseau. 2007.](#) Application de PHYSITEL, HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Nécopastic, Baie de James. Communication orale présentée dans le cadre du *XXVII Colloque annuel du Centre d'études nordiques (CEN)*, 1-2 février 2007, Université Laval, Québec, Qc, Canada

[Jutras, S. I. Chartier, A.N. Rousseau. 2006.](#) Application de PHYSITEL, HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Nécopastic, Baie de James. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

[Rousseau, A. N.; Jutras, S., Clerc, C., Bourdillon, R., Secretan, Y., Savary, S., Ciobanas, A., Dionne, F.-L., Levré, G., Turcotte, R. 2008.](#) Adaptation d'HYDROTEL au milieu boréal - Partie I: Modélisation des processus physiques. Affiche présentée dans le cadre du *Troisième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 19-20 novembre 2008, Montréal, Qc, Canada.

AT1.2 : Programmation et paramétrage d'HYDROTEL afin de considérer correctement les apports saisonniers des milieux humides

Cette activité a été complétée avec succès. En plus des objectifs visés, différents aspects liés à la cartographie des caractéristiques hydrologiques du bassin versant à l'étude ont été documentés, évalués et validés. Ceci a permis de clarifier les méthodes d'acquisition de données cartographiques nécessaires à la réalisation de simulations hydrologiques distribuées en milieu Nord-boréal.

La délimitation des occupations du territoire à l'aide d'images Landsat s'est avérée un succès. La classification utilisée est spécifiquement adaptée au contexte particulier du Moyen-Nord boréal et vise l'acquisition d'information pertinente pour la modélisation hydrologique. Les tourbières de la région de Radisson se sont donc avérées toutes physiquement connectées au réseau hydrographique et leur connectivité hydrologique (contribution à l'écoulement) s'est avérée fortement variable, mais jamais nulle (résultats de l'AT 2.6).

Références :

[Jutras, S., Chartier, I., Rousseau, A.N. 2006.](#) AT1.2 : Programmation et paramétrisation d'HYDROTEL sur le bassin de la rivière Nécopastic. *Rapport de recherche No R891, INRS-ETE*, Québec, Canada. 17 p.

[Dissanska M, M. Bernier, Rousseau A.N, Chokmani K, Jutras S. 2007.](#) Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin versant de la Grande Rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images LANDSAT-7 ETM+. *Rapport de recherche No R-927. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE*. Québec, PQ

[Gauthier, F, A.N. Rousseau, M. Bernier, K. Chokmani, S. Jutras. 2006.](#) Connectivité physique des tourbières du bassin versant de la rivière Nécopastic à l'aide d'images LANDSAT-7 ETM+ et exploration de méthodes in-situ pour évaluer la connectivité hydraulique, LG-2, Baie James, Canada. *Rapport de recherche No R901. INRS-ETE*, Québec, Canada. 66 p.

[Dissanska, M.; Chokmani, K.; Bernier, M.; Garneau, M.; Rousseau, A. N., Payette, S. 2008.](#) Suivi écohydrologique des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande à l'aide de télédétection. *76^e congrès de l'ACFAS 2008*, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec

[Gauthier, F., K. Chokmani, M. Bernier, A.N. Rousseau. 2006.](#) Détermination de la connectivité hydraulique des tourbières du bassin versant de la rivière Nécopastic à l'aide de la télédétection. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada

Projets d'article:

Jutras, S., Y. Gauthier, A.N. Rousseau and M. Bernier. Object-oriented classification of a LANDSAT 7 ETM+ image for wetland and flow channels delineation. (Article en préparation pour *Progress in Physical Geography*)

AT1.3 : Ajout des projections Lambert et Stéréopolaires à PHYSITEL/HYDROTEL

Cette activité a été complétée avec succès. Les ajouts de projections ont été faits directement dans PHYSITEL sans affecter le fonctionnement d'HYDROTEL. Ainsi HYDROTEL ne contient maintenant que des algorithmes de calculs liés à la modélisation des processus physiques. De plus, d'importantes modifications ont été faites au cœur des deux logiciels.

PHYSITEL :

Le logiciel PHYSITEL a été complètement mis à jour tant du point de vue de l'état de l'art en programmation C++ que de la modélisation physiographique d'un bassin versant. PHYSITEL supporte maintenant tout type de projection. À noter que dès le début du projet, nous nous sommes aperçus après avoir fait une revue de la littérature qu'il serait préférable de substituer l'algorithme D8 à un plus performant. Ainsi, la détermination de l'orientation de l'écoulement est désormais exécutée par l'algorithme D8LTD¹. Ces travaux nous ont permis d'établir une collaboration de travail avec Stefano Orlandini, concepteur du D8LTD et professeur à l'Université de Modena & Reggio Emilia, en Italie.

Il est maintenant possible d'ajouter les stations (météo, hydro, *etc.*) dans PHYSITEL. Ainsi, lors de l'exportation des fichiers vers HYDROTEL les fichiers de stations sont créés et l'importation de ces fichiers est maintenant possible dans HYDROTEL. Des travaux sont aussi en cours afin d'ajouter un algorithme de séparation d'UHRH en versants.

HYDROTEL :

Les lacs peuvent maintenant comporter plusieurs sorties qui pour le moment doivent se jeter dans un même tronçon. Cette limitation ne provient pas de la théorie, mais de la structure informatique des tronçons. Pour un cas comme le réservoir Kénogami, HYDROTEL devrait être revu pour permettre plusieurs exutoires pour un bassin (Noyau + Interface).

Le sous-modèle PHIM (modélisation de l'écoulement dans les tourbières, voir résultats de l'AT 2.6) a été traduit en C++ et ajouté à HYDROTEL. Il est maintenant possible d'identifier des UHRH tourbières, de créer des jeux de paramètres spécifiques aux tourbières et de simuler l'écoulement avec PHIM². Les autres UHRH sont traitées par BV3C (Noyau + Interface).

Les premiers tests pour inclure le sous-modèle CROCUS³ pour la simulation de la neige dans HYDROTEL sur le bassin de la rivière Nécopastic démontrent que le code source de CROCUS devra être traduit en C++ et intégré à HYDROTEL si on veut l'utiliser en production. Sinon l'appel au programme CROCUS en Fortran est beaucoup trop lent.

¹ Orlandini, S., G. Moretti, M. Franchini, B. Aldighieri, and B. Testa. 2003. Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. WRR 39(6), 1144.

² Guertin, D.P., Barten, P.K. and Brooks, K.N. 1987. Peatland Hydrologic Impact Model: Development and testing. Nordic Hydrology. 18 (2): 79-100.

³ Brun E, David P, Sudul M, Brunot G. 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology 38(128): 13-22.

De plus, afin d'homogénéiser un code informatique conçu et écrit par plusieurs intervenants au fil des années, nous avons débuté une mise à jour au niveau de la programmation en C++ selon l'état de l'art.

Des travaux sont aussi en cours afin d'ajouter un modèle de rayonnement net à HYDROTEL.

Références :

[Royer, A., A.N. Rousseau, J.-P. Fortin, R. Turcotte. 2006.](#) PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

Projets d'article:

Rousseau, A.N., J.-P. Fortin, R. Turcotte A.N., A. Royer, P. Noël, S. Jutras. PHYSITEL, a specialized GIS for distributed hydrological models. (Article en préparation pour *Environmental Modelling & Software*)

AT2 : Adaptation au milieu boréal de la modélisation des processus liés au bilan d'énergie et aux bilans hydriques des milieux humides et lacs

AT2.1 : Évaluation des équations d'estimation d'évaporation et d'évapotranspiration disponibles et compatibles avec les données disponibles afin de déterminer leur applicabilité en milieu boréal et l'intérêt de les intégrer dans HYDROTEL

Cette activité a été complétée avec succès. L'utilisation de la théorie constructale, théorie thermodynamique, et de données de bilans d'énergie du réseau FLUXNET ont permis à notre équipe de valider différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en milieu nord-boréal. Ce travail, essentiellement de modélisation mathématique aura un impact direct dans l'interprétation thermodynamique de l'évapotranspiration dans le domaine de la modélisation hydrologique.

L'utilisation des données de la station Nécopastic (IREQ) a permis d'évaluer la performance de l'équation d'HQ. On a comparé l'ET calculée en résolvant le bilan d'énergie de surface à celle obtenue par le biais de l'équation d'HQ. On a déterminé une résistance stomatale pour laquelle les deux façons de procéder coïncident. Les résultats démontrent que l'équation donne une approximation de l'ETA, puisqu'une grande résistance stomatale correspond à des conditions pour lesquelles l'eau, la lumière et la chaleur sont limitées. Ensuite, on a déterminé une résistance stomatale pour laquelle la température de la végétation correspond à celle de l'air, c'est-à-dire lorsque la plante est dans son état thermique optimal. On obtient alors des résistances faibles correspondant davantage à l'ETP.

Cela étant, nous n'avons pas pu, faute de données terrain, évaluer la performance en milieu boréal d'autres équations disponibles.

Une méthode adaptée aux milieux humides est actuellement implantée dans HYDROTEL. Elle nécessiterait toutefois raffinement et validation.

Références :

[Ciobanas, A., Rousseau AN. 2009.](#) Quantifying the average potential state of the canopy using the bioclimatic optimality hypothesis. Article proposé le 30/04/2008 à *Ecological Modelling*

[Ciobanas, A. I., Rousseau, A. N. 2008.](#) Quantification de l'état potentiel de la végétation selon l'hypothèse de l'optimum bioclimatique. *76^e congrès de l'ACFAS 2008*, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec

[Ciobanas, A., A.N. Rousseau. 2007.](#) A thermodynamic analysis of the evapotranspiration phenomenon. *Eos Trans. AGU*, 88(52), *Fall Meet. Suppl., Abstract H51H-0876*. AGU *Fall Meeting*, 10-14 December, 2007, San Francisco, CA.

[Dionne, F.-L., Ciobanas, A., Rousseau, A.N. 2008.](#) Validation d'un modèle de rayonnement net et comparaison de l'équation d'évaporation d'Hydro-Québec avec le bilan d'énergie thermique de surface. *Rapport de recherche No R-1036*. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.

AT2.2 : Intégration d'un algorithme de suivi du gel/dégel du sol qui sera adapté aux modèles actuels de fonte de neige

Dans le cadre de cette activité nous avons comparé nos données de suivi de la température du sol avec celles simulés par le modèle SHAW⁴ [Flerchinger, 2000]. Les résultats démontrent que le modèle est apte à bien reproduire le mouvement du gel/dégel dans le sol, mais qu'il est aussi fortement tributaire de son modèle de suivi du couvert nival. En effet, un mauvais suivi de l'accumulation du couvert nival en début de saison peut induire un déphasage dans le suivi du gel/dégel. Comme HYDROTEL possède déjà un module de suivi du couvert nival (voir AT2.3), il reste maintenant à déterminer s'il y a un véritable gain au niveau de la simulation des débits en rivière à intégrer le suivi du gel/dégel dans le sol. Les résultats initiaux sur le bassin de la rivière Nécopastic semblent démontrer un effet négligeable du gel du sol sur les écoulements lors des deux derniers hivers.

⁴ Flerchinger, G.N., 2000. The simultaneous heat and water (SHAW) model: technical documentation. Technical Report NWRC 2000-09. Northwest Watershed Research Center, USDA Agricultural Research Service, Boise, Idaho, USA.

AT2.3 : Évaluation de la performance du modèle unicouche mixte degrés-jours – bilan d'énergie thermique d'HYDROTEL par comparaison des résultats obtenus avec ceux produits par le modèle français multicouche de suivi et de fonte de neige CROCUS

Cette activité a été complétée avec succès. À ce jour, la performance du modèle unicouche mixte degrés-jours-bilan d'énergie thermique d'HYDROTEL a été évaluée en comparant les hauteurs de neige simulées avec celle produites par le modèle français multicouche de suivi et de fonte de neige CROCUS⁵. Cette comparaison a été menée en fonction des mesures disponibles aux stations Nécopastic et aéroport de LG2 ainsi que deux stations supplémentaires situées sur le bassin de la rivière Nécopastic. Cette étude de comparaison a été menée pour les hivers 2006-2007 et 2007-2008. Afin de compléter cette étude, les valeurs d'équivalent en eau de la neige simulées devront être comparées à celles mesurées à la station Nécopastic.

Également, le modèle CROCUS a été intégré à HYDROTEL dans sa forme actuelle. Par contre, il serait envisageable de modifier le modèle unicouche mixte degrés-jour-bilan d'énergie thermique d'HYDROTEL vers un modèle énergétique multicouche.

Références :

[Savary, S., Rousseau, A.N. 2008.](#) Comparaison du suivi de l'évolution du couvert nival, sur le bassin de la rivière Nécopastic à l'aide des modèles HYDROTEL et CROCUS. *Arctic Change 2008, Québec 9-12 Décembre 2008, Session T20 Land Surface Processes and their Climate Interactions*. Palais des congrès de Québec.

[Rousseau, A. N.; Jutras, Konan, B., Gagnon, P., Savary, S., Royer, A., Tremblay, M., Noël, P., Paniconi, C., Bernier, M. 2008.](#) Adaptation d'HYDROTEL au milieu boréal - Partie II: Traitement des données et simulations. Affiche présentée dans le cadre du *Troisième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 19-20 novembre 2008, Montréal, Qc, Canada.

⁵ Brun E, David P, Sudul M, Brunot G. 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology* 38(128): 13–22.

AT2.4 : Réalisation d'une revue de la littérature sur les modèles de sous-captage des précipitations en fonction du vent et de la sublimation

Cette activité a été complétée avec succès. Bien que la sous-captation des précipitations solides puisse s'avérer d'une grande importance (biais d'environ 25%), aucun consensus ne semble émerger de la littérature. Une adaptation des résultats obtenus ailleurs dans le monde a permis l'utilisation d'une approche méthodologique adaptée au milieu nord-boréal.

Rapport en rédaction :

Jutras, S., S. Savary et A.N. Rousseau. En préparation. Comparaison des équations et des méthodes d'estimation de la sous-captation des précipitations solides pour la région de Radisson.

AT2.5 : Différentiation des types de sols selon la verticale demandant la révision et la reprogrammation de l'algorithme actuel d'échange entre les couches

Cette activité a été complétée avec succès. La complexité de l'objectif visé a donné place à une grande variété de travaux de recherche. L'approche actuellement utilisée dans HYDROTEL a été minutieusement décortiquée, analysée et validée afin d'y apporter des modifications pertinentes. De plus, une vaste étude de l'ensemble des propriétés hydrodynamiques des sols Nord-boréaux est en cours de réalisation (travaux de doctorat de Grégor Levrel), ce qui apportera d'avantage de précisions sur les processus de migration de l'eau.

Il est maintenant possible de spécifier dans HYDROTEL les types de sols selon la verticale. Cette amélioration a permis à Simon Ricard d'illustrer l'avantage de cette différenciation lors de l'évaluation de la capacité d'HYDROTEL à produire une estimation spatio-temporelle adéquate de la recharge potentielle du bassin versant de la rivière Châteauguay (contribution du projet CRSNG-RDC de Claudio Paniconi). Cela dit, il est possible d'affirmer que les travaux présentés dans ce mémoire proposent une méthode de travail cohérente découlant d'une application du modèle HYDROTEL qui permet, en première approximation, de caractériser efficacement la distribution spatio-temporelle de la recharge d'un bassin versant.

Les travaux de mémoire de Simon Ricard ont permis d'identifier des comportements capricieux de la part de BV3C. L'analyse de sensibilité portant sur la nature des relations entre la variable q_{23} et les différents paramètres contenus dans BV3C permet de pousser davantage l'examen du comportement de BV3C. Cependant, cette démarche ne permet pas d'identifier un seul ou quelques paramètres dominant qui gouverne exclusivement le comportement de la variable q_{23} . Au contraire, l'analyse de sensibilité fait ressortir le caractère variable des relations entre les différents paramètres et la variable à l'étude. Cependant, des tendances semblent se tracer. Certains paramètres présentent effectivement une incidence de nature « hydrophile », c'est-à-dire d'autant plus significative que les types de sol composant la colonne de sol présentent un faciès perméable. En contrepartie, d'autres paramètres induisent une incidence plus significative sur la variable q_{23} lorsque la colonne de sol présente un faciès imperméable. Cette incidence est alors qualifiée « d'hydrophobe ». Pour l'instant nous avons jugé de ne pas modifier la détermination des HGM.

Références :

[Ricard, S. 2008.](#) Évaluation du modèle HYDROTEL à estimer la recharge des aquifères: application sur le bassin versant de la rivière Châteauguay. *Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau. INRS-ETE.*

[Ricard, S., Rousseau, A.N. et Paniconi, C. 2006.](#) Estimation spatio-temporelle de la recharge du bassin de la rivière Châteauguay à l'aide du logiciel HYDROTEL. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

[Levrel, G., Rousseau, A.N., Jutras, S. et Clerc, C. 2008.](#) Évaluation de l'infiltration sur des sols boréaux non-remaniés placés dans des colonnes de laboratoire de grande dimension. *76^e congrès de l'ACFAS 2008*, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec

[Levrel, G.; Rousseau, A. N.; Jutras, S., Clerc, C. 2008.](#) Évaluation des infiltrations sur des sols boréaux non remaniés, paramétrisation d'un modèle de surface HYDROTEL. *61st CWRA Annual Conference. 16-19 June, 2008. Gimli, MB. Managing the health of Canada's lakes and rivers.*

AT2.6 : Détermination de l'écoulement et du stockage dans les milieux humides

Cette activité a été complétée avec succès. Une description précise des processus hydrologiques d'une tourbière typique du milieu Nord-boréal a été réalisée. Celle-ci est à la base de la validation de l'approche d'estimation des apports pour les milieux humides qui a été intégrée dans HYDROTEL. Les résultats comparatifs de simulation hydrologique utilisant cette approche démontrent son efficacité et sa validité conceptuelle.

Pour ce projet, nous avons mis en place un protocole expérimental qui permet de connaître les conditions et l'intensité de l'écoulement des tourbières à dominance ombrotrophe. Par photo-interprétation d'abord et en visitant le terrain ensuite, nous avons pu identifier un site qui comporte un seul exutoire et qui est facilement accessible, c'est à dire à proximité d'une route. Pour mesurer de façon efficace le débit à cet exutoire dont la profondeur ne dépasse guère 30 cm, nous avons installé un canal trapézoïdal de type 12 po SRCRC. Ce type de matériel permet de mesurer de façon simple et précise l'écoulement dans des ruisseaux à pente faible et à faible débit. La hauteur d'eau est mesurée de façon continue à l'aide d'un capteur de pression submersible. En parallèle, des puits et des piézomètres ont été installés sur chacune des tourbières. Les puits permettent de suivre l'évolution de la nappe phréatique alors que les piézomètres servent à évaluer l'état de recharge ou de décharge de la tourbière et à réaliser des tests de conductivité hydraulique à différentes profondeurs. Les niveaux d'eau dans les deux types de tubes sont le résultat de la combinaison entre des mesures manuelles effectuées périodiquement et des mesures en continu obtenues grâce à l'installation de capteurs de pression dans certains puits. Ces données permettent alors, non seulement de pouvoir estimer de façon précise la quantité d'eau qui s'écoule et qui est stockée en fonction des précipitations et des conditions initiales du système, mais aussi de connaître les directions d'écoulement privilégiées. Par ailleurs, ces mesures en continu permettent de disposer d'un jeu de données représentatif, autant des fluctuations événementielles que saisonnières. Additionné aux relevés écologiques et topographiques, ces données nous ont permis d'établir des relations fiables entre des intervalles de niveau de la nappe et le débit à l'exutoire (Mémoire de Clément Clerc dépôt initial en, avril 2009).

Le modèle hydrologique distribué HYDROTEL a été utilisé afin de simuler le débit du bassin versant de la rivière Nécopastic (N53°40.6'; W78°09.8'), Baie de James, Québec. Certains aspects contradictoires liés au paramétrage des sols dans le sous-modèle BV3C d'HYDROTEL ont été soulevés dû à l'abondance des tourbières dans l'environnement étudié. Puisque ce sous-modèle était originalement conçu pour les sols minéraux, un sous-modèle spécifiquement adapté à l'écoulement des tourbières (PHIM) a été choisi afin d'être introduit dans HYDROTEL. Les données nécessaires au fonctionnement de PHIM incluent une description de la structure verticale des sols organiques et une relation liant le débit à la profondeur de la nappe phréatique. PHIM a été calé à l'aide de données provenant d'un sous-bassin de tourbières localisé à l'intérieur du bassin versant pilote. Les résultats préliminaires montrent une bonne concordance entre les débits observés et simulés, qu'il ait été obtenu à l'aide de la version originale ou adaptée d'HYDROTEL. Ces résultats démontrent un potentiel pour une meilleure adaptation des simulations hydrologiques au contexte spécifique des bassins versants Nord-boréaux.

Références :

Jutras, S., A.N. Rousseau, C. Clerc. 2009. Implementation of a peatland-specific water budget algorithm in HYDROTEL. (Sous presse au *Canadian Water Resources Journal*)

Clerc, C.; Rousseau, A. N., Jutras, S. 2008. Suivi de la nappe, de la recharge et de l'écoulement à l'aide de méthodes in situ afin de comprendre la dynamique de tourbières ombrotrophes de la région de la Baie de James. *76^e congrès de l'ACFAS 2008*, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec

Jutras, S.; Rousseau, A. N., Clerc, C. 2008. Analyse comparative de différentes approches de modélisation hydrologique de l'écoulement d'une tourbière ombrotrophe du moyen-nord québécois. *76^e congrès de l'ACFAS 2008*, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec

Jutras, S., Clerc, C., Rousseau, A. N. 2008. Implementation of a peatland-specific water migration algorithm in the HYDROTEL distributed hydrological model. *61st CWRA Annual Conference*. 16-19 June, 2008. Gimli, MB. *Managing the health of Canada's lakes and rivers*.

Clerc, C.; Rousseau, A. N., Jutras, S. 2008. Water table and runoff relationship within peatland dominated watersheds: An in-situ investigation. *61st CWRA Annual Conference*. 16-19 June, 2008. Gimli, MB. *Managing the health of Canada's lakes and rivers*.

Clerc, C., F. Gauthier, S. Jutras, A.N. Rousseau, Y. Michaud. 2006. Détermination de la connectivité hydraulique d'une tourbière du bassin versant de la rivière Nécopastic à l'aide de méthodes in situ. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada

Jutras, S., Clerc, C. Rousseau, A.N. 2007. Rapport d'installation d'un canal trapézoïdal à l'exutoire une tourbière nordique. *Rapport interne I-237. INRS-ETE*. Québec. 24 p

Il y aura des projets d'articles suite au dépôt du mémoire de Clément Clerc (dépôt initial : avril 2009).

Clerc, C. S. Jutras, A.N. Rousseau. Ecohydrology of an ombrotrophic peatland dominated watershed. Article en préparation pour *Hydrological Processes*

Clerc, C. S. Jutras, A.N. Rousseau. Water table and streamflow monitoring of an ombrotrophic peatland dominated watershed. Article en préparation pour *Journal of Environmental Quality*

AT2.7 : Modélisation de l'écoulement et du stockage dans les lacs et les réservoirs de grande envergure

Cette activité a été complétée avec succès. Une méthode de calcul des écoulements dans les lacs à sorties multiples a été développée et ajoutée à HYDROTEL. Cette méthode a été validée sur un exemple théorique et un cas réel (lac Ludger, Laurentides). Elle utilise un bilan de masse à grandeur du lac et des relations niveau/débit, définies à chaque exutoire du lac. Une méthode de détermination des relations niveau/débit dans le cas où aucun jaugeage n'existe a également été développée. Le logiciel de modélisation hydrodynamique 2D MODELEUR/HYDROSIM a été utilisé à cette fin.

Références :

[Bourdillon, R. 2008.](#) Prise en compte par HYDROTEL des lacs et réservoirs à sorties multiples. *Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau. INRS-ETE.*

[Bourdillon, R., A.N. Rousseau, M. Leclerc, R. Turcotte. 2006.](#) Prise en compte par HYDROTEL des lacs et réservoirs à sorties multiples. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada

Publications en cours :

[Bourdillon, R. et Rousseau, A.N. 2009](#) Modification of the Lake Flow Algorithm of the Distributed Hydrological Model HYDROTEL When Modelling Lakes with Multiple Outlets. Article à soumettre.

[Bourdillon, R., Secretan, Y. et Rousseau, A.N. 2009.](#) Utilisation de la modélisation hydrodynamique 2D pour la détermination de la loi de seuil à la sortie d'un lac. Article à soumettre.

AT3 : Mise en place d'une méthode de calage adaptée au contexte boréal

AT3.1 : Réalisation d'une revue de littérature sur les méthodes de calage des modèles hydrologiques

Cette activité a été complétée avec succès. Les travaux de doctorat de R. Turcotte font état de la performance d'une méthode de calage automatique. Cela étant, les coûts de calcul associés aux ordinateurs couramment utilisés en prévision hydrologique font en sorte qu'il demeure peu réaliste d'utiliser cette méthode. Ceci nous a menés au développement d'une stratégie de calage en quatre étapes et au développement d'une interface graphique pour guider l'utilisateur dans le calage du modèle.

Références :

[Rousseau, A. N.; Jutras, Konan, B., Gagnon, P., Savary, S., Royer, A., Tremblay, M., Noël, P., Paniconi, C., Bernier, M. 2008.](#) Adaptation d'HYDROTEL au milieu boréal - Partie II: Traitement des données et simulations. Affiche présentée dans le cadre du *Troisième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 19-20 novembre 2008, Montréal, Qc, Canada.

[Lavigne, M.-P., A.N. Rousseau. 2006.](#) Caractérisation et analyse de sensibilité du modèle hydrologique HYDROTEL. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada

Turcotte, R. 2009. Éléments du calage et de l'implantation d'un modèle hydrologique dans une perspective d'utilisation opérationnelle en prévision hydrologique. *Thèse de doctorat en sciences de l'eau, INRS-ETE*. (Dépôt initial mars 2009)

AT4 : Simulation des comportements hydrologique historiques et futurs

AT4.1 : Détermination du potentiel d'utilisation des données de réanalyses pour alimenter le modèle HYDROTEL

Cette activité a été complétée avec succès. Suite à des travaux d'Ouranos sur la validation des données de réanalyses, il été convenu de concentrer nos efforts sur le développement de méthodes de validation de quelques variables hydrométéorologiques du MRCC et d'appliquer celle-ci sur des bassins versants du Sud du Québec.

Dans l'étude de Gagnon *et al.* (2008), on a procédé à une validation régionale d'une simulation de la version 4.1.1 du Modèle régional canadien du climat (MRCC). Quatre variables hydrométéorologiques, soit les températures minimales et maximales journalières, la précipitation totale et l'écoulement total, sont examinées sur les bassins versants des rivières Châteauguay et Chaudière, Québec, Canada. Ces bassins, situés dans le sud du Québec, sont plus petits (2 530 et 6 682 km² respectivement) que les territoires habituellement utilisés pour la validation de ce genre de modèle (104 – 106 km²). L'objectif est de voir si le modèle est capable de reproduire ce qui a été observé sur ces bassins, et ainsi voir s'il est apte à y produire des résultats fiables pour les années futures dans le cadre d'études de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie sur ces bassins. Dans l'ensemble, le MRCC donne des résultats acceptables, mais des tests statistiques montrent que le biais est significatif pour au moins une saison pour chaque variable. Les analyses montrent que le biais n'est généralement pas trop élevé sur les deux bassins pour les températures maximales (< 1°C). Les températures minimales sont quant à elles nettement sous-estimées (≈ 2°C) en hiver et au printemps sur les deux bassins. Les précipitations sont surestimées significativement en hiver, au printemps et en été pour le bassin de la rivière Châteauguay (11, 35 et 30%), alors qu'il n'est jamais plus grand que 5% sur le bassin de la rivière Chaudière. L'écoulement est fortement surestimé pour les deux bassins sur pratiquement tout le cycle annuel (> 30 %) avec une trop grande variabilité en hiver et au printemps. Idéalement, les constats faits ici pourront servir à orienter des études futures sur la cause des écarts produits par le MRCC et ultimement à une amélioration du modèle.

Dans l'étude de Konan *et al.* (2008), les variables, précipitation totale, température maximale et température minimale de sortie du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC4.1.1 avec CLASS2.7, pilote ERA40d, domaine Québec) sont comparées aux données in situ des stations météorologiques sur six bassins versants au Sud du Québec pour la période 1968-1999. L'objectif est d'analyser la variation spatiale de la simulation MRCC par rapport aux observations et d'évaluer la capacité du modèle à estimer les variables météorologiques à l'échelle de ces bassins. L'interpolation spatiale est effectuée par la méthode de krigeage. Les analyses ont montré les tendances générales (sens de variation spatiale des variables) sont bien reproduites contrairement aux variations locales. En considérant la résolution horizontale (45 km), les phénomènes qui ont une ampleur géographique plus petite ne sont pas reproduits. À l'échelle des bassins versants, la température minimale est plus froide (à l'exception de l'automne) et la température maximale plus chaude. Sur la saison d'automne, les températures simulées sont de 0,2 à 0,7 °C plus chaudes alors que les écarts sont plus élevés au printemps pour la température minimale (simulation de 1,5 à 2,5 °C plus froide) et sur la période printemps-été pour la température maximale (simulation de 0,7 à 1,4 °C plus chaude). Le MRCC génère plus de précipitation que les observations. La précipitation annuelle est plus élevée de 0,14 à 0,60 mm/j, soit de 4 à 22 %. Les saisons d'hiver et d'automne sont correctement simulées (écarts inférieurs à 10 %) contrairement à la période printemps-été (écarts entre 17 et 33 %). Généralement, les précipitations des deux bassins versants (St-François et Chaudière) ayant les plus grandes superficies sont bien estimées par le MRCC.

Références :

- [Gagnon, P., B. Konan, A. N. Rousseau, M. Slivitzky. 2008.](#) Hydrometeorological validation of a Canadian Regional Climate Model simulation within the Chaudière and Châteauguay watersheds (Québec, Canada). Article soumis le 26/11/2007, demande de corrections et resoumission le 30/09/2008, accepté le 3/11/2008 au *Canadian Journal of Civil Engineering*
- [Konan, B., M. Slivitzky, A. N. Rousseau, P. Gagnon. 2008.](#) Validation of Canadian Regional Climate Model simulated temperature and precipitation data in southern Quebec. Article soumis le 12/11/2008 au *Canadian Water Resources Journal*)
- [Konan, B., A.N. Rousseau, M. Slivitzky. 2006.](#) Validation hydrométéorologique du MRCC à l'échelle régionale : Cas du bassin versant de la rivière Chaudière. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.
- [Rousseau, A.N., R. Quilbé, P. Gagnon. 2008.](#) Inventaire des méthodes d'intégration des sorties de modèles de climat pour les études hydrologiques d'impact et adaptation à l'échelle du bassin versant. *Atelier Simulations Climatiques*. 9-10 juin 2008, Ouranos, Montréal, Québec
- [Gagnon, P., Konan, B., M. Slivitzky, A. N. Rousseau. 2007.](#) Validation hydrométéorologique du Modèle Régional Canadien du Climat (simulation acy) à l'échelle régionale : bassins versants des rivières Chaudière et Châteauguay. *Atelier de travail sur la Validation hydrométéorologique du MRCC, organisé par le groupe de modélisation climatologique d'Ouranos*, Montréal, Québec, 13 juin 2007.
- [Konan, B., M. Slivitzky, A. N. Rousseau. 2007.](#) Validation hydrométéorologique des simulations MRCC (Modèle Régional Canadien du Climat) au sud du Québec. *Atelier de travail sur la Validation hydrométéorologique du MRCC, organisé par le groupe de modélisation climatologique d'Ouranos*, Montréal, Québec, 13 juin 2007.

AT4.2 : Évaluation de la vulnérabilité des bassins versants en milieu boréal en fonction des modifications du climat et exploration des divers scénarios d'adaptation de la production hydroélectrique

Cette activité est en voie d'être complétée. Le modèle HYDROTEL a été calé et validé avec les données observées. Les débits ont été, ensuite, simulés avec les paramètres de calage sur des périodes passée (1961-2000) et futur (2030-2070) en utilisant en entrée les variables *stmx*, *stmn* et *pcp* du MRCC. Les simulations « acz » piloté ERA40 pour le passé (1961-2000) et « acu » piloté cgem3.1v2, mc_abv (membre 4) pour le futur (2030-2070). Elles sont disponibles sur quatre points de grille. Les polygones Thiessen ont servi à estimer les moyennes des données météorologiques sur le bassin versant. Les débits sont ceux obtenus à son exutoire. Les analyses sont faites sur des moyennes interannuelles.

Les résultats sont préliminaires. D'autres simulations seront faites avec des données provenant de différents scénarios du MRCC. Cela étant, on constate à l'horizon 2030-2070 :

- En hiver, plus de précipitations (+0,39 mm/j) et plus d'écoulement (+0,29m³/s);
- Au printemps, moins d'écoulement (-0,82 m³/s). Cela suppose qu'il y a moins de stock de neige et donc une bonne partie des précipitations en hiver serait sous forme liquide. Les débits de fréquences de dépassement supérieures à 0,49 seraient plus élevés et ceux ayant des fréquences de dépassement < 0,49 plus faibles. Les crues seraient par conséquent moins élevées.
- En été les débits pourraient être plus faibles; ce qui est la conséquence d'une baisse des précipitations;
- En automne, les débits de fréquences de dépassement supérieures à 0,72 seraient plus élevés et ceux ayant des fréquences de dépassement < 0,72 plus faibles. Les crues seraient plus faibles.

Références :

Résultats préliminaires présentés dans l'affiche suivante :

[Rousseau, A. N.; Jutras, Konan, B., Gagnon, P., Savary, S., Royer, A., Tremblay, M., Noël, P., Paniconi, C., Bernier, M. 2008.](#) Adaptation d'HYDROTEL au milieu boréal - Partie II: Traitement des données et simulations. Affiche présentée dans le cadre du *Troisième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 19-20 novembre 2008, Montréal, Qc, Canada.

4. Conclusion

Bien que les importances scientifique et technique des résultats de nos travaux aient été soulignées brièvement au chapitre précédent, nous tenons à rappeler certaines d'entre elles dans les prochaines sections. Cela dit, le lecteur intéressé par les aspects administratif de ce projet, tant au niveau des réalisations scientifiques, l'équipe de recherche, la diffusion des résultats de la recherche et le transfert des connaissances, l'information financière que des éléments découlant de la formation de personnel hautement qualifié est invité à consulter le [Rapport final de subvention de recherche et développement coopérative \(RDC\)](#) qui a été remis au CRSNG le 30 avril 2009.

Rappel de l'importance scientifique et technique de nos travaux

Ainsi, nos travaux ont contribué directement à mettre en place un cadre de travail d'évaluation du MRCC (modèle régional canadien du climat) aux échelles d'un bassin versant et d'une région et ils font et feront l'objet de publications. Cette évaluation aura une incidence directe sur l'utilisation des sorties du MRCC dans le cadre d'études d'impact et d'adaptation aux changements climatiques. Nos travaux sur le suivi de l'écoulement dans les milieux humides ont donné lieu à un colloque spécial dans le cadre de l'ACFAS 2008 qui a attiré la participation des principaux spécialistes québécois de ce domaine. L'ensemble du projet a donné lieu à beaucoup de projets de publications; la liste des publications à la fin des sections du chapitre 2 de ce rapport en fait amplement état.

Par ailleurs, nos travaux de modélisation sur les écoulements ont attiré l'attention de collègues qui travaillent avec nos partenaires et qui nous permettent présentement en collaboration avec une équipe de chercheurs d'adapter notre méthode de suivi hydrométrique à un autre type de tourbière (minérotrophe dans ce cas ci) et ce dans le cadre d'un autre projet CRSNG-RDC piloté par Serge Payette de l'U. Laval.

Le développement d'une version du logiciel HYDROTEL3.0 dans un style de programmation C++ standard est toujours une option qui nous semble prioritaire. Des travaux en ce sens ont été entamés lors du présent projet mais il reste encore beaucoup à faire. Il s'agit d'ailleurs de réviser lors de l'opération les principales équations utilisées et en évaluer la pertinence. D'importantes modifications pourraient survenir dans le code du sous-modèle BV3C, ainsi qu'à propos des différentes approches liées à l'estimation de l'évapotranspiration actuelle. Un effort de réduction du paramétrage devra aussi être fait afin de faciliter l'utilisation du logiciel.

Dans le cadre de ce projet de recherche, notre équipe a acquis une importante expertise en instrumentation hydrométéorologique en milieu éloigné nordique qui aidera l'interprétation et la compréhension des données acquises par les divers intervenants du milieu. L'importante instrumentation déployée sur le terrain représente actuellement un coût minime à entretenir et il est de notre avis que la poursuite d'acquisition de données hydrométéorologique représente une option très pertinente. Différentes hypothèses pourront être validées à l'aide de cette information.

Transfert des connaissances auprès des partenaires initiaux et nouveaux

Le transfert des connaissances acquises et du savoir s'est fait tout au long de la réalisation du projet. À titre d'exemple, en début de projet (février 2006), une formation sur le fonctionnement

d'HYDROTEL a été donnée à un groupe d'employés d'Hydro-Québec. Différentes réunions publiques (Réunion annuelle, 4 mai 2007; Réunion HYDROTEL, 23 mai 2007) et privées (Rencontre à l'IREQ, 19 juin 2007, Rencontre à l'INRS-ÉTÉ, 18 juin 2008) ont été tenues afin de mettre tant au courant les partenaires du projet de l'état d'avancement des travaux que d'échanger sur des travaux en cours sur la mise en place et le calage du modèle HYDROTEL sur divers bassins versants. Ces réunions sont aussi des moments privilégiés permettant le réajustement des travaux en fonction de certaines demandes spécifiées par les partenaires.

Autre exemple, les résultats des travaux de modélisation de l'écoulement dans les lacs à sorties multiples ont déjà été rapportés par des collègues auprès d'un autre producteur hydroélectrique canadien. Cet organisme, qui utilise un autre modèle hydrologique, est fortement intéressé à intégrer, dans le cadre d'un projet avec une autre université canadienne, notre algorithme dans leur logiciel.

Par ailleurs, à noter que dans les discussions qui ont menées à la définition du projet avec les partenaires, l'INRS-ETE et Hydro-Québec avaient conclu une entente de commercialisation des logiciels PHYSITEL et HYDROTEL. Les logiciels ont été achetés par des divers usagers qui ont élaboré et réalisé des projets en partenariat avec l'INRS-ETE (IMTA, Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua; Ville de Québec, Agriculture et Agroalimentaire Canada) alors que d'autres acheteurs poursuivent leur propre activités de recherche ou enseignement en utilisant les logiciels (CEHQ, École de Technologie Supérieure de Montréal, Université Laval, Environnement Canada, Université de Sherbrooke, Université Cocody, Côte d'Ivoire).

Plus spécifiquement, les améliorations apportées aux logiciels PHYSITEL/HYDROTEL sont déjà mises à profit par Hydro-Québec, un de nos partenaires, ainsi que par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour la prévision des apports aux réservoirs et barrages. L'IMTA a utilisé HYDROTEL pour déterminer le potentiel hydroélectrique de plusieurs bassins versants mexicains. La Ville de Québec a elle aussi pu bénéficier de ces améliorations au printemps 2008 dans le cadre d'un projet de prévision de la crue printanière sur la rivière Montmorency et ce dans un contexte de sécurité civile. Comme ces outils sont aussi intégrés à un autre de nos logiciels (GIBSI –Gestion intégrée des bassins versants à l'aide d'un système informatisé), ils ont contribué directement à la réalisation de projets majeurs avec Agriculture et Agroalimentaire Canada (projet WEBS, watershed evaluation of beneficial management practices, programme Greencover) et Environnement Canada (projet d'élaboration de normes de rendement agroenvironnementales réalisables (NRR) pour les pesticides à l'échelle des bassins versants, programme INÉNA). Ces réalisations représentent par ailleurs des retombées que nous n'avions pas du tout perçues au moment de la rédaction de ce projet.

Tout ceci illustre bien concrètement la qualité de nos réalisations et la confiance que nous avons acquise tant de la part de nos partenaires que de la part de la communauté scientifique, ce qui est fantastique pour nous.

