

## Rapport final

# Adaptation des outils PHYSITEL/HYDROTEL au milieu boréal québécois : modélisation des processus hydrologiques et analyses de sensibilité et d'incertitudes

Rapport présenté à  
Ouranos

Alain N. Rousseau, ing., Ph.D.<sup>1</sup>,  
Alain Mailhot Ph.D.  
André St-Hilaire Ph.D.

Centre Eau Terre Environnement  
Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)  
490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

Rapport No- R1639

14 Septembre 2015

---

<sup>1</sup> Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement



## Table des Matières

---

1	Résumé.....	1
2	Compte rendu des réalisations .....	5
3	Diffusion des résultats.....	17
4	Collaboration avec les partenaires.....	27
5	Transfert de connaissances et de technologie .....	35
6	Contributions d'autres sources .....	39



# 1 Résumé

---

Les bassins versants du Moyen-Nord québécois (49e au 55e parallèle) se distinguent par leur climatologie et le pourcentage élevé de territoires couverts par des lacs et milieux humides (de l'ordre de 20 à 30 %) et, surtout, par leur importante contribution à la production électrique du Québec; le complexe de la rivière La Grande générant environ 40% de l'électricité québécoise. Dans le contexte de la gestion de la production d'électricité, Hydro-Québec Production fait la prévision des apports aux réservoirs de ce complexe à l'aide d'un modèle hydrologique global. Par ailleurs, depuis les années 1980, le milieu boréal québécois a subi des hausses de température et de précipitation qui ont modifié le régime des apports aux réservoirs. Compte tenu de ces changements et des caractéristiques physiographiques des bassins boréaux, il a été proposé d'utiliser un modèle hydrologique distribué à base physique pour examiner l'impact sur ces apports des projections climatiques produites par Ouranos. En l'occurrence le modèle HYDROTEL dont la prise en mains est en train d'être complétée par Hydro-Québec Production. Le modèle qui est maintenant convenablement calé pour un certain nombre de bassins répond aux attentes dans les bassins du sud du Québec. Toutefois, pour les grands bassins du Nord comme ceux du Complexe La Grande, l'utilisation du modèle requiert des travaux d'adaptations, entre autres, aux niveaux de la modélisation des milieux humides et de la désagrégation spatiale des précipitations simulées par les modèles climatiques.

Les objectifs généraux de ce projet étaient d'accroître notre compréhension de l'hydrologie du moyen nord afin qu'elle soit bien représentée dans HYDROTEL tout en tenant compte des incertitudes paramétriques associées aux différentes équations gouvernant les processus physiques. Ces objectifs ont été déclinés en trois activités de travail : (AT1) modélisation des processus hydrologiques; (AT2) calage et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes des paramètres de calage d'HYDROTEL; et (AT3) amélioration des plateformes informatiques HYDROTEL et PHYSITEL, ce dernier

étant un SIG dédié à la construction des bases de données de modèles hydrologiques distribués.

Pour Ouranos et Hydro-Québec les principales réalisations issues de ce projet incluent :

- (i) le développement d'une méthode éprouvée de désagrégation sous grille de la précipitation mésoéchelle permettant d'évaluer à fine échelle spatiale l'impact des changements climatiques sur les précipitations;
- (ii) une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements, du stockage de l'eau et de l'évapotranspiration d'un petit bassin versant boréal incluant une grande tourbière minérotrophe aqualisée;
- (iii) l'évaluation du paramétrage de la sublimation et la relocalisation de la neige dues au vent et l'identification du besoin d'inclure le rayonnement sous la canopée pour bien reproduire la crue avec un modèle complexe de l'évolution du couvert nival;
- (iv) la détection de la quasi neutralité fréquente (~76% du temps, majoritairement le jour) de l'atmosphère au-dessus d'un milieu humide causée par une turbulence mécanique forte et une grande inertie thermique; conditions ayant permises le développement d'un modèle simple d'évapotranspiration des milieux humides basé le transfert massique et la stabilité atmosphérique;
- (v) le développement d'un modèle de rayonnement net basé uniquement sur des données de températures journalières (min, max) et une estimation des paramètres permettant de valider l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith dans le nord québécois;
- (vi) la hiérarchisation des paramètres de calage d'HYDROTEL selon la saison et le développement d'une méthode permettant d'évaluer l'incertitude sur les débits simulés et d'identifier son importance durant la fonte et l'étiage estival;
- (vii) dans un contexte d'analyse fréquentielle des débits simulés, évaluation de l'incertitude paramétrique par rapport à l'incertitude statistique, cette dernière dominant pour les périodes de retour supérieures à cinq ans;
- (viii) à l'aide de PHYSITEL, la première discrétisation du complexe de la rivière La Grande (136 648 km<sup>2</sup>) en six sous-bassins (LG1, LG2, LG3, LG4, La Forge 1 & 2, et Caniapiscau) leur subdivision en versants permettant le calcul de crues maximales probables à l'aide d'HYDROTEL; et
- (ix) le développement d'une version 64 bits d'HYDROTEL incluant de nouveaux modules de calculs de la température du sol et des bilans hydriques des milieux humides et isolés.

## 1. Résumé

---

L'avancement de nos compréhensions de l'hydrologie des milieux humides et du milieu boréal en général a été à la base du développement des versions adaptées d'HYDROTEL et de PHYSITEL qui permettront à Hydro-Québec d'appréhender, avec une modélisation distribuée, l'impact des changements climatiques sur le complexe de la rivière La Grande. Ces logiciels sont transposables à l'ensemble du milieu boréal canadien. Une entente conclut, depuis 2005, entre l'INRS et Hydro-Québec (HQ) permet d'ailleurs une distribution commerciale des différentes versions d'HYDROTEL avec interfaces usagers de même qu'une distribution communautaire du noyau de calcul. Cette synergie a permis de mettre en commun des ressources et des expertises qui facilitent les échanges scientifiques et techniques entre les concepteurs d'HYDROTEL, le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), HQ, l'IREQ (Institut de recherche en électricité du Québec) et d'autres usagers (ex. : l'IMTA, Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua). Au total, plus d'une quarantaine de licences ont été distribuées tant pour des besoins d'enseignement (Université de Sherbrooke) et de recherche (Université Laval, UQTR, UQAC, IREQ, École de Technologie Supérieure, INRA de Montpellier, Environnement Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada), que des besoins de prévision hydrologique (IMTA, Ville de Québec, Centre d'expertise hydrique du Québec, HQ). La modularité informatique d'HYDROTEL se prête également bien à cette synergie car elle offre la possibilité de partager le savoir-faire et, par l'entremise d'un site internet public (CodePlex), de mettre à la disponibilité de tous les nouvelles versions du noyau de calcul. Ces développements ont permis à l'équipe de l'INRS-ETE d'acquérir une reconnaissance internationale en modélisation hydrologique distribuée. En effet, HYDROTEL et PHYSITEL ont dans le passé été identifiés comme les outils à utiliser dans le cadre d'appels de proposition de projets de détermination du potentiel hydroélectrique financés par la Banque Mondiale [World Bank, 2009].



## 2 Compte rendu des réalisations

---

L'objectif fédérateur de ce projet était d'accroître notre compréhension de l'hydrologie du milieu boréal afin qu'elle soit bien représentée dans HYDROTEL tout en tenant compte des incertitudes paramétriques associées aux différentes équations gouvernant les processus physiques. Cet objectif a été décliné en trois activités de travail (AT): (AT1) modélisation des processus hydrologiques; (AT2) calage et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes des paramètres de calage d'HYDROTEL; et (AT3) amélioration des plateformes informatiques HYDROTEL et PHYSITEL [35], ce dernier est un SIG dédié à la construction des BD de modèles hydrologiques distribués [9,16]. Les sections suivantes résument les résultats de chaque activité de travail ainsi que les écarts par rapport aux objectifs de départ.

### **AT1 Modélisation des processus hydrologiques**

Cette AT se déclinait en cinq sous activités. La première portait sur la validation de la modélisation des processus d'accumulation et de fonte du couvert nival en milieu boréal à partir d'équivalents en eau in situ mesurés en continu (M.Sc. de M. Oreiller, 2013). Cette étude avait pour but de comparer les simulations d'équivalent en eau de la neige (ÉÉN) et de débit par le modèle HYDROTEL, selon deux approches de modélisation de la neige: (i) thermodynamique et (ii) mixte degrés-jours / bilan d'énergie. L'étude a été conduite sur un bassin versant en milieu boréal québécois [10,28,36]. Les premières simulations du modèle thermodynamique (CROCUS) ont démontré des biais dans le traitement des données météorologiques utilisées en intrants. Des mesures continues de l'ÉÉN, fournis par un senseur utilisant le rayonnement gamma naturel du sol, ont permis de corriger ces biais et d'identifier l'absence de la relocalisation et de la sublimation de la neige transportée par le vent dans les bilans d'énergie et de masse de CROCUS. Pour intégrer ces deux processus, une routine imposant une perte de neige à partir d'un seuil de vitesse de vent de 4 m s<sup>-1</sup> a été introduite dans le modèle. Avec cette routine et des intrants adéquatement corrigés, l'approche complètement

physique de CROCUS a démontré une robustesse et une précision supérieure au modèle mixte degrés-jours / bilan d'énergie. HYDROTEL a ensuite été utilisé pour des simulations de débit sur le bassin à l'étude en utilisant chacun des deux modèles de neige. Avec CROCUS, la crue principale est adéquatement modélisée mais le second pic, attribuable à la fonte retardée en milieu forestier, n'a pu être simulé en raison du manque de mesures météorologiques requis pour réaliser et valider les simulations thermodynamiques dans ce type d'environnement. Bien que le modèle mixte degrés-jours / bilan d'énergie tienne compte des milieux forestiers au moyen de coefficients empiriques, ses résultats s'avèrent être moins précis que lors des simulations utilisant CROCUS pour fournir l'ÉEN à HYDROTEL.

La deuxième sous-AT avait pour objet le développement d'un modèle de désagrégation sous grille de la précipitation mésoéchelle permettant d'évaluer à fine échelle spatiale l'impact des changements climatiques (CC) sur les précipitations (Ph.D. de P. Gagnon, 2012). La modélisation hydrologique nécessite des données de précipitation à une échelle spatiale adaptée au bassin versant analysé. Pour les données futures, la résolution spatiale des champs de précipitation est déterminée par la grille du modèle numérique utilisé. Bien que les résolutions spatiales des modèles météorologiques et climatiques se raffinent avec l'évolution des ressources informatiques et des connaissances physiques du climat, un écart entre la résolution disponible à partir des modèles physiques et la résolution nécessaire pour certaines applications demeure. C'est dans ce contexte que nous avons développé un modèle de désagrégation statistique de la précipitation mésoéchelle produisant des structures spatiales réalistes. L'échantillonnage de Gibbs, une méthode Monte Carlo par chaîne de Markov, a été choisi pour produire les valeurs désagrégées. Cette méthode permet de générer un ensemble de valeurs (ici, l'ensemble des valeurs désagrégées sur les pixels d'une tuile de la grille à résolution mésoéchelle) lorsque la distribution statistique de chaque élément (ici, chaque pixel subdivisant la tuile) dépend des autres éléments de l'ensemble et qu'aucun élément n'est connu. Le modèle a été développé sur trois régions topographiques et climatiques contrastées afin qu'il puisse être le plus universel

## 2. Compte rendu des réalisations

---

possible. La région avec peu de relief se situait dans les États de la Floride, de l'Alabama, de la Géorgie et de la Caroline de Sud, au sud-est des États-Unis, et couvrait environ  $400 \times 400 \text{ km}^2$ . Des données journalières observées à fine résolution (environ 4 km) de 2002 à 2005 ont été utilisées pour définir la structure du modèle et pour en estimer les paramètres. La précipitation sur un pixel est supposée issue de la distribution lognormale avec espérance égale à la moyenne des huit pixels les plus proches à laquelle s'ajoutent deux termes : un tenant compte de la distance des pixels les plus proches et un autre tenant compte de l'anisotropie, définie à partir de la vitesse et de la direction du vent à 700 hPa. L'écart-type de la précipitation sur un pixel croît en fonction de l'espérance et de l'énergie potentielle de convection disponible durant l'événement. Au total, le modèle compte cinq paramètres à estimer. Les données journalières observées de 2006 à 2008 ont été comparées aux données désagrégées par le modèle. Dans l'ensemble, le modèle reproduisait avec justesse la corrélation spatiale et l'anisotropie [14,44], cependant, les valeurs extrêmes des événements convectifs étaient moins bien reproduites. L'adaptation du modèle à une région montagneuse s'est faite en considérant un territoire d'environ  $300 \times 300 \text{ km}^2$  situé dans les États de Washington et de l'Oregon, au nord-ouest des États-Unis. L'analyse des données journalières observées à fine résolution de 2002 à 2005 a mené à l'ajout au modèle d'un terme pour tenir compte de la topographie. Ce terme dépend de l'anomalie topographique, qui correspond, grosso modo, à la différence entre l'altitude observée sur un pixel et l'altitude estimée à partir des pixels du voisinage. Contrairement au sud-est des États-Unis, la vitesse et la direction du vent n'ont pas permis d'expliquer l'anisotropie dans cette région à topographie complexe. Cela dit, le modèle, appliqué à la précipitation journalière de 2006 à 2008, reproduisait adéquatement les plus importantes pointes locales de précipitation causées par la topographie [13]. Il a aussi été observé que le modèle sans le terme tenant compte de la topographie était capable de reproduire l'impact de la topographie lorsque les variations d'altitude étaient peu importantes. L'application en modélisation hydrologique du modèle développé au sud-est des États-Unis s'est faite sur un événement de pluie intense sur le bassin de la rivière

des Anglais, à la frontière entre le Québec et l'État de New-York à l'aide d'HYDROTEL. Les débits simulés variaient selon la méthode utilisée pour répartir spatialement la pluie, illustrant l'importance d'un modèle de désagrégation adéquat. Les résultats ont illustré la valeur ajoutée par le modèle par rapport à l'interpolation, car il pouvait produire un ensemble de champs de précipitation pour un seul événement. Pour un gestionnaire, un ensemble de valeurs facilite le processus décisionnel puisqu'il permet d'illustrer l'incertitude sur les résultats d'une simulation. Aussi, le modèle reproduisait bien l'emplacement de la pointe de précipitation de l'événement, mais la sous-estimait. L'impact de la désagrégation diminue avec la superficie drainée, mais est toujours présent à l'exutoire du bassin (730 km<sup>2</sup>). Le débit simulé est fortement conditionné par la précipitation utilisée en entrée, mais dépend aussi beaucoup des types de sol et du calage du modèle hydrologique [44]. Enfin, la première application hors thèse du modèle développé a permis de valider les précipitations estivales extrêmes d'un modèle régional de climat et d'évaluer l'impact des changements climatiques sur un petit bassin versant [6,24,33].

La troisième sous-AT consistait à améliorer notre compréhension de la dynamique des écoulements, du stockage de l'eau et de l'évapotranspiration d'un petit bassin versant boréal incluant une grande tourbière minérotrophe aqualysée (Ph.D. de G. Carrer, 2014). La thèse comportait cinq objectifs spécifiques : (i) l'évaluation des échanges d'eau de surface avec l'eau souterraine, (ii) l'étude des propriétés physiques des sols, (iii) l'analyse et la comparaison des dynamiques de stockage entre typologies spécifiques (forêt, platières, lanières et mares), (iv) l'évaluation des processus de mélange conceptuel au sein des tourbières minérotrophes aqualysées, et (v) le développement d'un modèle hydrologique spécifique aux petits bassins versants nordiques. Ainsi, deux bassins (< 15 ha) de la région de La Forge-1 (Baie-James, Québec) ont été instrumentés et suivis entre 2008 et 2012. Ces deux bassins étaient dominés par des surfaces forestières en amont et une proportion significative (> 25%) de tourbières minérotrophes fortement aqualysées (> 30%) en aval. Ces bassins ont fait l'objet d'une instrumentation (puits, piézomètres, station météorologique, canaux trapézoïdaux et

## 2. Compte rendu des réalisations

---

capteurs de déplacement) et d'analyses géochimiques ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , COD et conductivité électrique). Les profils phréatiques et piézométriques ont permis de définir un schéma de l'écoulement de l'eau au travers les surfaces aqualisées. Les zones de recharge et de vidange observées au niveau des lanières dépendaient largement de la topographie de surface et ne semblaient pas interagir avec l'eau souterraine [2,26]. Même s'il existait une forte hétérogénéité des propriétés physiques des sols [47], la forêt et la tourbière suivaient une dynamique de stockage similaire [8]. Cependant, au sein de la tourbière, d'importantes variabilités existaient lorsque l'on considérait individuellement les mares, les lanières et les platières. Le traçage isotopique et la modélisation hydrochimique conceptuelle ont permis de définir de façon plus détaillée les processus hydrologiques encourant dans les tourbières minérotrophes aqualisées [1,26,30,45]. Celles-ci forment un véritable système à multiples réservoirs de mélange représentés par les mares [4]. Ce processus hydrologique engendre des conditions favorisant un temps de résidence relativement court des eaux de surface en comparaison aux eaux plus profondes (> 50 cm). Ces résultats ont permis de simplifier les écoulements au travers des surfaces de forêt et de tourbière par des relations empiriques de stockage versus débit, tout en permettant une bonne représentation de l'évolution du stockage [8]. L'ensemble de ces recherches a ainsi permis d'améliorer nos connaissances sur les échanges avec l'eau souterraine, la dynamique de stockage des différentes typologies de végétation, les processus de mélange qui encourent au sein des tourbières et d'entrevoir de nouvelles perspectives de modélisation de ces bassins versants nordiques.

La quatrième sous-AT s'articulait autour du suivi in situ et en continu du bilan d'énergie thermique et des flux de méthane d'une tourbière ombrotrophe (M.Sc. de P.-É. Isabelle, 2014; Stage postdoctoral de D.F. Nadeau, 2012-2013). Les tourbières occupent entre 10% et 20% du territoire boréal mondial, pour une superficie de près de 3 millions de  $\text{km}^2$ . Toutefois, elles sont aussi typiquement éloignées et isolées, ce qui limite le nombre et la précision de données mesurées in situ, particulièrement pour l'évapotranspiration (ET) [15]. Or, ce terme du bilan hydrologique est crucial dans ce type d'environnement, où l'ET estivale peut représenter jusqu'à 95% des précipitations. Les travaux de cette AT

avait pour but de combler ce manque de données en proposant une nouvelle approche pour estimer l'ET des tourbières avec un minimum de données météorologiques. L'étude s'est articulée autour de données recueillies par la méthode de la covariance des tourbillons sur trois tourbières canadiennes. La tourbière Nécopastic, située dans les basses terres de la Baie James, au nord du Québec, était le site d'étude principal avec un jeu de données original, comportant des mesures pour l'été 2012 [18-21,23,31,50]. Les deux autres jeux de données provenaient du réseau Fluxnet, et les analyses ont été faites sur les étés seulement. La deuxième tourbière, Mer Bleue, localisée à environ 10 km à l'est d'Ottawa, en Ontario, était le site de données couvrant les étés 1999 à 2003. Finalement, le site Western Peatland, situé à environ 80 km au nord-est d'Athabasca, en Alberta, et les données analysées couvraient les étés 2003 à 2009. Le rayonnement solaire est le moteur le plus important derrière l'ET, la source d'énergie principale permettant la vaporisation de l'eau. À ce titre, la corrélation était très forte ( $R^2 \approx 0.8$ ) entre l'ET et le rayonnement net, et ce pour tous les sites de mesure et toutes les années analysées. L'ET était pratiquement nulle lors des épisodes de précipitation, mais l'humidification de la surface tourbeuse renforçait par la suite le processus d'évaporation. Le mouvement de la nappe ne semblait pas corrélé, mais une augmentation importante de sa profondeur pouvait causer une diminution de l'ET cumulative estivale – comportement corroboré par les observations de Carrer et al. [3]. Des trois sites, Mer Bleue était celui ayant la plus forte ET estivale, probablement en raison du plus fort rayonnement solaire. Les deux autres sites subissaient un rayonnement semblable, mais la plus grande humidité du site Nécopastic l'avantageait pour l'ET. Les données observées d'ET ont été comparées à des données générées par plusieurs modèles connus : Hydro-Québec, Thornthwaite, Linacre, Hargreaves-Samani, Penman, Priestley-Taylor, Penman-Monteith. Les quatre premiers, fortement empiriques, ne parvenaient pas à expliquer une grande proportion de la variance des données observées. Les trois derniers modèles, tous basés sur le bilan d'énergie, ont offert d'excellentes performances sur chacun des sites. La meilleure performance de l'équation de Penman par rapport à celle de Priestley-Taylor démontre que le calcul du

## 2. Compte rendu des réalisations

---

pouvoir évaporant de l'air apportait une précision significative pour expliquer la variance de l'ET. Néanmoins, ces trois formulations sont très exigeantes en données d'entrée dans le contexte des tourbières boréales, où des données de rayonnement net depuis le sol sont rarement disponibles. Les trois sites à l'étude avaient toutefois en commun une forte récurrence de conditions atmosphériques quasi neutres, causées par une turbulence mécanique accrue, et de très faibles effets de flottabilité thermique. Cette dernière était diminuée par le stockage de chaleur dans le médium tourbe/eau et par la priorisation du flux de chaleur latente aux dépens du flux de chaleur sensible, qui était aussi diminué par une couverture nuageuse et du brouillard fréquent. Ces conditions ont permis de simplifier les équations des profils de vitesse du vent et de vapeur d'eau dérivées de la théorie de similarité de Monin-Obukhov. Ceci a conduit au développement d'un modèle dit de Profil Neutre, équivalent à l'approche des transferts massiques décrite par Brutsaert (2005) et typiquement utilisée sur des étendues d'eau [5]. Ce modèle a donné des résultats prometteurs en termes d'erreur moyenne et de corrélation, mais devient dépendant de la proportion du temps passé sous conditions atmosphériques quasi neutres. Le modèle semble surestimer l'ET lors des périodes quasi neutres et sous-estimer en périodes instables, ce qui semble être un contrebalancement dû au processus d'optimisation. Le modèle est sujet à deux sources d'erreurs principales: une due à la stabilité atmosphérique et une autre due à la non-saturation de la surface. La première semble négligeable, car il y a forte récurrence de périodes quasi neutres aux trois sites. La deuxième peut être importante lors des périodes où le rayonnement solaire est maximal et la surface de la tourbe manifestement sèche suite à plusieurs jours sans pluie. Dans tous les cas, la hauteur de la nappe phréatique semble jouer un rôle sur l'efficacité du modèle en augmentant le stockage de chaleur dans la tourbe, donc le nombre de périodes quasi neutres, et en augmentant le contenu en eau de la tourbe de surface par capillarité.

Au-dessus des milieux humides, les flux de méthane sont traditionnellement quantifiés par des analyses chromatographiques sur des échantillons de gaz collectés via des chambres statiques ou dynamiques. Bien que portable et peu coûteuse, cette méthode

ne permet pas des mesures en continu en plus de ne pas capturer les effets de la turbulence atmosphérique sur les émissions de méthane. Une alternative à cette méthode est l'utilisation de senseurs micrométéorologiques à haute fréquence utilisant la covariance des tourbillons. Jusqu'à tout récemment, ces senseurs optiques opéraient en circuit fermé, ce qui rendait leur opération périlleuse en région éloignée, où se trouvent la majorité des milieux humides au Québec, comme les ressources énergétiques et les opportunités d'étalonnage ou d'ajustements sont très limitées. À l'été 2012, nous avons déployé un nouveau senseur de méthane opérant en circuit ouvert de la compagnie Li-Cor instruments inc. (modèle 7700) au-dessus d'une tourbière ombrotrophe boréale de 60 ha, conjointement à des mesures en continu du bilan énergétique de surface [25,32,37,38]. Le site expérimental (53.7°N, 78.2°W), situé dans le bassin versant de la rivière Necopastic, sous-bassin de la rivière La Grande, près de la baie James, permis d'étudier les flux de méthane à plusieurs échelles temporelles (horaire, journalier et saisonnier) [7]. Il a aussi permis d'illustrer que des périodes d'ébullition de méthane pouvait se produire sur une grande échelle spatiale sous des conditions combinées de faibles pressions barométriques, de rabaissement de la nappe et d'accroissement de la turbulence mécanique. À l'échelle journalière, aucun patron diurnal d'émission n'a été détecté et le taux moyen d'émission était de  $2,4 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . La hauteur de la nappe et la température à 0,3 m de profondeur avaient le plus grand influence sur l'émission. Au niveau saisonnier, la production était de  $4,4 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ , ce qui était équivalent aux résultats d'études antérieures sur des sites similaires. À noter que l'émission maximale s'est produite en août au moment où la nappe avait atteint sa profondeur maximale, ce qui était contraire aux résultats de ces mêmes études.

La cinquième sous-AT mettait l'emphasis sur le développement d'une approche pour estimer l'évapotranspiration des tourbières avec un minimum de données météorologiques. L'objectif à la base de cette AT portait sur le développement d'un modèle de rayonnement net basé uniquement sur des données de températures journalières (minimale, maximale) et la localisation du site ainsi que sur l'estimation des paramètres permettant de valider l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith dans

## 2. Compte rendu des réalisations

---

le nord québécois. Le modèle de rayonnement net requière le calcul du rayonnement extra-atmosphérique, essentiellement basé sur des fonctions trigonométriques, ainsi que les calculs de la transmissivité atmosphérique, l'émissivité atmosphérique et l'émissivité de surface, tous basés sur des relations empiriques. Le développement du modèle a été effectué à l'aide de données mesurées sur trois sites représentatifs du milieu boréal canadien faisant partie du réseau Fluxnet Canada. Le modèle a été mis en œuvre sous une perspective temporelle journalière bien que bon nombre d'équations utilisées peuvent s'appliquer à une échelle plus fine (ex : horaire). Le modèle développé a été appliqué avec les données météorologiques mesurées à la station de l'IREQ située à proximité de l'exutoire de la rivière Nécopastic. Ces données mesurées ont contribué à valider tant la performance du modèle de calcul du rayonnement net que le calcul de l'évapotranspiration selon l'approche Penman-Monteith [17].

### **AT2 Calage et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes des paramètres de calage d'HYDROTEL**

Cet AT portait sur les incertitudes sur les débits simulés par le modèle HYDROTEL attribuables aux incertitudes sur les paramètres (M.Sc. de I. Ben Nasr, 2014). Pour ce faire, deux techniques locales, basées sur le développement en séries de Taylor, ont été utilisées : (i) les méthodes de calcul de la probabilité de défaillance et (ii) les méthodes d'approximation des moments statistiques. Pour les deux méthodes, une comparaison entre l'utilisation de l'ordre 1 et l'ordre 2 a été effectuée (l'ordre désignant le seuil de troncature du développement en séries de Taylor). Afin d'appliquer ces différentes méthodes, certaines hypothèses (telles que l'indépendance des paramètres du modèle, la distribution gaussienne des paramètres en entrée), des années hydrologiques particulières et des indicateurs hydrologiques spécifiques (crues et étiages) ont été considérées. Une fois les incertitudes sur les débits simulés connues, on a défini un critère de Nash-Sutcliffe généralisé qui tient compte de l'incertitude associée au débit simulé dans le cadre de l'exercice du calage pour l'évaluation d'une simulation. Une analyse de sensibilité du modèle vis-à-vis différents paramètres a été réalisée sur une

période de 40 ans (de 1969 à 2009). Le bassin pilote était celui de la rivière Beaurivage. L'analyse de sensibilité du modèle montre que l'influence des paramètres était très variable d'une saison à l'autre et même d'une journée à l'autre [29]. Durant la période de fonte printanière, les paramètres les plus influents étaient le coefficient d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle (FETP), la limite inférieure de la deuxième couche du sol (Z2), le gradient vertical de la température (GVT) et les taux de fonte pour les forêts de conifères et de feuillus (FFCO et FFFE). Durant la période hivernale, les plus influents étaient le FETP, le coefficient de récession (REC), le Z2 et le taux de fonte pour le milieu ouvert (FFFO). Durant l'été et l'automne, le FETP, le Z2 le REC et la limite inférieure de la troisième couche (Z3) représentaient les paramètres les plus influents. L'analyse d'incertitudes faite pour des journées hydrologiques particulières a montré que l'ordre 2 était indispensable à l'obtention de résultats concernant les probabilités de dépassement. L'intervalle de confiance de 95%, calculé pour les années particulières, a illustré que l'incertitude était variable d'une saison à l'autre. Elle était plus importante durant la fonte du couvert nival (printemps) et durant l'étiage estival. Les bandes d'incertitudes étaient plus larges pour l'année la plus sèche. Concernant les indicateurs hydrologiques tels que les débits de crue ou d'étiage, plus la période de retour était grande, plus l'incertitude sur les débits associées aux incertitudes sur les paramètres était importante. Une comparaison entre cette incertitude et l'incertitude statistique associée au choix de la loi d'ajustement (dans notre cas la loi de Gumbel) a montré que l'incertitude statistique s'avérait plus importante pour les périodes de retour supérieures à cinq ans.

### **(AT3) Amélioration des plateformes informatiques HYDROTEL et PHYSITEL**

Cet AT se déclinait en quatre sous-activités. Au cours de l'AT3.1, on a couplé l'outil d'analyse des incertitudes paramétriques UNCSIM à HYDROTEL afin de faciliter ce type d'analyse [12,13]. À l'AT3.2, on a fait une refonte d'HYDROTEL en intégrant: (i) un style de programmation C++ standard (des noms autodescriptifs des classes, des fonctions et variables; un seul type de chaînes de caractères (string); la date en jours Juliens; la

## 2. Compte rendu des réalisations

---

définition de vecteurs; une seule définition du système d'opération (WIN32 et Linux)); et (ii) une programmation défensive; avec un minimum de complexité; et l'utilisation de fichiers au format GeoTIFF, Shapefile et « csv ». L'interface d'HYDROTEL a été revue, afin de permettre de tracer toutes les variables, et ce aux UHRH ainsi que des moyennes pour des groupes d'UHRH. Les coefficients de Nash saisonniers, ou pour des périodes au choix de l'utilisateur sont maintenant disponibles. Dans un autre d'idées, on a utilisé OpenMP pour exploiter les processeurs multi-noyaux avec BV3C (calculs en parallèle par groupe d'UHRH); cependant les gains de temps de calculs n'ont pas été satisfaisants. À l'AT3.3, dans un souci de faciliter le développement de versions 64 bits, on a intégré un SIG commun du domaine public aux noyaux de PHYSITEL et HYDROTEL, soit GDAL/OGR. L'interface d'HYDROTEL utilise DotSpatial qui utilise GDAL/OGR) et il en sera de même pour celui de PHYSITEL, car on l'a séparé du noyau, ce qui facilite la gestion de la mémoire. C'est ainsi que l'on a produit une version alpha d'HYDROTEL 64 bits incluant l'interface. Quant à PHYSITEL, à ce jour seule la version console 64 bits sans interface existe, mais n'est pas complétée. Enfin, à l'AT3.4, on a intégré à HYDROTEL un éditeur des propriétés hydrodynamiques associées aux différents types de sol. L'ensemble de ces travaux a permis de se doter d'outils de modélisation hydrologique distribuée adaptés aux besoins d'applications à grandes échelles (105 km<sup>2</sup>) tels que les grands bassins nordiques d'Hydro-Québec (ex. : Cas du Complexe La Grande [48,49]).

### **Écarts par rapport aux objectifs initiaux**

Le principal écart aux objectifs initiaux se situe au niveau de l'AT1. En effet, on avait une sous-activité qui devait traiter sur la détermination des propriétés hydrodynamiques des horizons pédologiques des sols organiques et des couverts de deux petits bassins boréaux de la région de la Baie de James (Thèse de doctorat de Grégor Levrel). Les horizons pédologiques du premier bassin ont fait l'objet de prélèvements individualisés, tout comme les couverts de sol des deux sites caractérisés par des sphaignes, des mousses hépatiques et des lichens. Les courbes de rétention hydrique et de conductivité hydraulique ont été mesurées sur ces horizons pédologiques et sur les couverts de

mousses, sphaignes, de lichen ou sur les couverts de bryophytes. Les tests d'infiltration à venir sur les colonnes de grandes dimensions visent à cerner les comportements hydrologiques et hydrodynamiques des sols boréaux. Ce projet devait permettre à l'étudiant de compléter sa thèse entreprise dans un premier projet RDC et de travailler à la compilation et à la diffusion de ses résultats (deux articles publiés, un en 2009 et un autre en 2010; présentation préliminaire des résultats en 2010, 2011[47]). Cependant, pour les raisons complexes et extraordinaires invoquées à la section « Rapport final - Problèmes survenus » cette activité a tout simplement été terminée.

### 3 Diffusion des résultats

---

Au cours de ce projet, l'équipe de réalisation a constamment saisi les opportunités de diffuser les résultats. Ainsi, quatre (4) articles sont présentement dans le processus de révision de revues avec comité de lecture; 12 articles ont été acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci; 31 exposés ont été faits à des conférences sous formes de communications au podium ou par affiche; et trois (3) rapports techniques ont été produits. Les sections suivantes présentent la liste de chacune de ces contributions.

#### **Articles présentés à des revues avec comité de lecture**

- (1) Carrer, G. E., A. N. Rousseau, S. Jutras, M. Fossey. 2014. Assessment of the impact of pools on the water isotopic signature of a boreal patterned peatland. (Article soumis le 2014/05/20, révision majeure demandée 2014/09/12; version corrigée retournée 2015/09/10, *Hydrological Processes*)
- (2) Carrer, G. E., A. N. Rousseau, S. Jutras. 2015. Subsurface flows through a patterned fen of a headwater boreal catchment. (Article en préparation)
- (3) Carrer, G. E., A. N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras, S.J. Gumière, D. Nadeau. 2015. Summer evapotranspiration variability of a boreal patterned fen. (Article en préparation)
- (4) Carrer, G. E., A. N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras. 2015. Modelling of surface water mixing in a headwater patterned fen during a summer stormflow using a multiple reservoir approach. (Article en préparation)

#### **Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci**

- (5) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., Rousseau, A.N., C. Coursolle, H. A. Margolis. 2014. Applicability of the bulk-transfer approach to estimate evapotranspiration from

- boreal peatlands. *Journal of Hydrometeorology*, **16**(4): 1521-1538. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0171.1
- (6) Gagnon, P., Rousseau, A.N. 2014. Stochastic spatial disaggregation of extreme precipitation to validate a Regional Climate Model and to evaluate climate change impacts over a small watershed. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**: 1695-1704
- (7) Nadeau DF, Rousseau AN, Coursolle C, Margolis H, Parlange MB. 2013. Summer methane fluxes from a boreal bog in northern Quebec, Canada, using eddy covariance measurements. *Atmospheric Environment* **81**: 464-474.
- (8) Carrer, G. E., A. N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras. 2014. Mosaic surface storages of a small boreal catchment. *Hydrological Processes* (Disponible en ligne le 2014/04/3, DOI: 10.1002/hyp.10195)
- (9) Noël, P., A.N. Rousseau, C. Paniconi, D.F. Nadeau. 2014. An algorithm for delineating and extracting hillslopes and hillslope width functions from gridded elevation data. *Journal of Hydrologic Engineering* **19**(2): 366-374 doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000783
- (10) Oreiller M, Rousseau AN, Minville M, Nadeau DF. 2013. Modeling snow water equivalent and spring runoff in a boreal watershed, James Bay, Canada. *Hydrological Processes* (Disponible en ligne 2013/11/11, DOI: 10.1002/hyp.10091)
- (11) Bouda, M., A.N. Rousseau, S.J. Gumiere, P. Gagnon, B. Konan, R. Moussa. 2014. Implementation of an automatic calibration procedure for HYDROTEL based on prior OAT sensitivity and complementary identifiability analyses. *Hydrological Processes* **28**(12) : 3947-3961. doi:10.1002/hyp.9882
- (12) Bouda, M., A.N. Rousseau, B. Konan, P. Gagnon, S.J. Gumiere. 2012. Case study: Bayesian uncertainty analysis of the distributed hydrological model

### 3. Diffusion des résultats

---

- HYDROTEL. *Journal of Hydrologic Engineering* **17**(9): 1021-1032. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000550
- (13) Gagnon, P., A.N. Rousseau, A. Mailhot, D. Caya. 2013. A Gibbs Sampling Disaggregation Model for Orographic Precipitation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **22**:16-26 DOI:10.1016
- (14) Gagnon, P., A.N. Rousseau, A. Mailhot, D. Caya. 2012. Spatial disaggregation of mean areal rainfall using Gibbs sampling. *Journal of Hydrometeorology*, **13**(1): 324-337. doi:10.1175/JHM-D-11-034.1
- (15) Proulx-Mc Innis, S., A. St-Hilaire, A.N. Rousseau, S. Jutras, G. Carrer, G. Levrel. 2014. Automated soil lysimeter for determination of actual evapotranspiration of bog in Quebec, Canada. *Journal of Hydrologic Engineering* Jan 2014, **19**(1): 60-68 DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000686)
- (16) Rousseau, A.N., J.-P. Fortin, R. Turcotte, A. Royer, S. Savary, F. Quévy, P. Noël, C. Paniconi. 2011. PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. *Water News - Official Magazine of the Canadian Water Resources Association*, **31**(1): 18-20.

#### **Exposés à des conférences et affiches**

- (17) Rousseau A.N., A. Mailhot, A. St-Hilaire, M. Minville, S.J. Gumiere, S. Jutras, D. Caya, D.F. Nadeau, H.A. Margolis, C. Coursolle, P. Gagnon, G. Carrer, M. Oreiller, P.-E. Isabelle, I. Ben Nasr, A. Royer, S. Savary, S. Tremblay, M. Bouda, B. Konan, M.B. Paralange, R. Turcotte, R. Roy. 2014. Adaptation des outils PHYSITEL/HYDROTEL au milieu boréal québécois : étude des processus hydrologiques et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes. 6<sup>e</sup> *Symposium d'Ouranos*, Centre des congrès de Québec, 4 et 5 décembre 2014. Québec, Québec.

- (18) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., A. N. Rousseau, Coursolle, C., Margolis, H. A. . 2014. Near-neutral atmospheric conditions over a boreal wetlands improve the estimation of daily evapotranspiration in remote areas. *World Weather Open Science Conference*. August 16-21, 2014, Montréal, Canada.
- (19) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., A. N. Rousseau. 2014. Frequent near-neutral atmospheric conditions over a boreal bog improve the estimation of daily evapotranspiration in remote areas. *48th Canadian Meteorological and Oceanographic Society. Northern Exposure : The implication of changes in cold environments*. June 1-5, 2014, Hotel Rimouski, Rimouski, Canada.
- (20) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., Rousseau, A.N., C. Coursolle, H. A. Margolis. 2014. Frequent near-neutral atmospheric conditions over a boreal bog improve the estimation of daily evapotranspiration in remote areas. *21st Symposium on Boundary Layers and Turbulence, American Meteorological Society*. June 9-13, 2014, Queens Hotel, Leeds, United Kingdom
- (21) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., Rousseau, A.N. 2014. Frequent near-neutral atmospheric conditions over a boreal bog improve the estimation of daily evapotranspiration using basic weather observations. Paper 1858045. *ASABE International Symposium Evapotranspiration: Challenges in Measurement and Modeling from Leaf to the Landscape Scale and Beyond*. Apr 7-10, 2014, DoubleTree by Hilton Raleigh Brownstone-University, Raleigh, North Carolina
- (22) Minville, M., M. Oreiller, A. N. Rousseau, D. Nadeau. 2014. Modélisation du couvert nival avec des modèles à base physique et conceptuel - Comparaison de l'één obtenu avec le MRCC, CROCUS et HSAMI pour des simulations aux pas de temps 6h, 3h et 1h. *Travaux exploratoires réalisés dans le cadre de la RDC HYDROTEL-Boréal II. Ouranos, Montréal, le 17 mars 2014.*

### 3. Diffusion des résultats

---

- (23) Isabelle, P.-E., Nadeau, D.F., Rousseau, A.N. 2013. Water and Energy Exchanges over a Subarctic Bog in Northern Quebec, Canada. *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting*, San-Francisco, 8-13 décembre, 2013.
- (24) Gagnon, P., A.N. Rousseau. 2013. Extreme precipitation under climate change conditions: Validation of a regional climate model over a small watershed using a spatial disaggregation model. 2013 *Joint Scientific CMOS-CGU-CWRA Congress*, 26-30 mai, 2013. Saskatoon, Saskatchewan.
- (25) Nadeau, D. F., A.N. Rousseau, C. Coursolle, H. Margolis, M.B. Parlange. 2013. Environmental controls on methane fluxes from a boreal bog in northern Quebec. 2013 *Joint Scientific CMOS-CGU-CWRA Congress*, 26-30 mai, 2013. Saskatoon, Saskatchewan.
- (26) Carrer, G., A.N. Rousseau, A. St-Hilaire, M. Fossey, S. Jutras. 2013. Estimating water residence time through a boreal patterned fen peatland using an isotopic approach. *HydroEco'2013. 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology: Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges*. 13-16 May 2013, Université de Rennes 1, Rennes, France.
- (27) Carrer, G., A.N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras. 2011. Hydrological dynamics of a boreal patterned fen peatland: groundwater and surface water interactions / Dynamiques hydrologiques d'un fen boréal structuré: interactions eau souterraine-eau de surface. *Geohydro 2011, Joint meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists*, 28-31 août 2011, Ville de Québec, Québec, Canada
- (28) Oreiller, M., A. N. Rousseau, M. Minville, D. Nadeau. 2013. Évaluation des simulations du couvert nival et des crues printanières par le couplage des modèles HYDROTEL et CROCUS. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un*

*contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Quebec, Canada*

- (29) Ben Nasr, I., A.N. Rousseau, A. Mailhot. 2013. Prise en compte des incertitudes sur les paramètres du modèle HYDROTEL : application des méthodes locales d'estimation. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Quebec, Canada*
- (30) Carrer, G., A.N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras. 2013. Conceptualisation des tourbières minérotrophes boréales dans un modèle hydrologique : mise en pratique et impacts sur les débits du futur. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Quebec, Canada*
- (31) Isabelle, P.-E., D.F. Nadeau, A.N. Rousseau, C. Coursolle, H. Margolis. 2013. Bilans hydrique et énergétique de surface d'une tourbière ombrotrophe boréale située dans le bassin versant de la rivière La Grande, Québec, Canada. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Quebec, Canada.*
- (32) Nadeau, D. F., A.N. Rousseau, C. Coursolle, H. Margolis, M.B. Parlange. 2013. Identification du rôle des variables atmosphériques modulant les émissions de méthane d'une tourbière ombrotrophe boréale du nord du Québec à partir de mesures in situ utilisant la covariance des tourbillons. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Quebec, Canada.*
- (33) Gagnon, P., A.N. Rousseau. 2013. Utilisation de la désagrégation spatiale pour valider les précipitations estivales extrêmes d'un modèle régional de climat et

### 3. Diffusion des résultats

---

pour évaluer l'impact des changements climatiques sur un petit bassin versant. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives*. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Québec, Canada

- (34) Rousseau, A. N. 2013. Changements climatiques et processus hydrologiques: Opportunités de recherche et besoin de formation en hydrologie. *La Recherche Hydrologique au Québec dans un contexte de changement climatique - États des lieux et perspectives*. 25 et 26 avril, Amphithéâtre de l'ÉNAP, Québec, Canada (<http://rhq2013.ete.inrs.ca/videos.html>).
- (35) Rousseau, A.N., A. Royer, S. Tremblay. 2013. Hydroinformatics of watershed hydrology at INRS - Development framework and examples of data processing, editing, display, and transfer algorithms implemented in our software. *Open Geospatial Consortium, Hydrology Domain Working Group*. 20 juin, 2013, INRS-ETE, Québec (QC).
- (36) Oreiller M, Rousseau AN, Minville M, Nadeau DF. 2012. Evaluation of snowpack and snowmelt modeling in subarctic Quebec, Canada, using an energy and mass balance approach. *Annual Meeting of the American Geophysical Union*, San Francisco, États-Unis, 3-7 décembre 2012.
- (37) Nadeau DF, Rousseau AN, Coursolle C, Margolis H. 2012. Water and energy exchanges of a subarctic bog in northern Quebec, Canada, Annual Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, États-Unis, 3-7 décembre 2012.
- (38) Nadeau DF, Rousseau AN, Coursolle C, Margolis H, Parlange MB. 2012. Atmospheric controls on methane emissions from a subarctic bog in northern Quebec, Canada, using an open-path eddy covariance system, *Annual Meeting of the American Geophysical Union*, San Francisco, États-Unis, 3-7 décembre 2012

- (39) Rousseau, A. N, A. Mailhot, A. St. Hilaire, A. Royer, S. Savary, D. Nadeau, G. Carrer, M. Oreiller, I. Ben Nasr, P.-É. Isabelle. 2012. Adaptation des outils PHYSITEL/HYDROTEL au milieu boréal québécois : modélisation des processus hydrologiques et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes. *S9 – Vers des outils de modélisation en hydrologie mieux adaptés. 5e Symposium d'Ouranos*, Coeur des Sciences, UQÀM, 19-21 novembre 2012. Montréal, Québec
- (40) Rousseau, A. N, D. Nadeau, G. Carrer, M. Oreiller, D. Hallema, S.J. Gumiere, S. Jutras, A. St-Hilaire. 2012. Suivi instrumental pour l'étude des processus hydrologiques en milieux nordique et agricole. Présentation au *Colloque GaGiLau 2012. Session 1: Hydrologie et écohydraulique*. Mardi le 25 septembre 2012, INRS-ETE, 2740, rue Einstein, Québec. Québec
- (41) Carrer, G., A.N. Rousseau, A. St-Hilaire, S. Jutras. 2012. An analysis of the spatio-temporal dynamics of summer evapotranspiration from a boreal patterned fen, Quebec, Canada. Oral presentation *IAH Congress - 39th International Association of Hydrogeologists Congress*. September 16-21, 2012, Niagara Falls, Ontario, Canada
- (42) Rousseau, A. N, A. Mailhot, A. St. Hilaire, A. Royer, S. Savary, D. Nadeau, G. Carrer, M. Oreiller, I. Ben Nasr, P.-É. Isabelle. 2012. Bilan des activités de la première année du projet «Adaptation des outils PHYSITEL/HYDROTEL au milieu boréal québécois : modélisation des processus hydrologiques et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes ». 25 avril, 2012, INRS-ETE, Québec.
- (43) Rousseau, A. N, D. Nadeau, G. Carrer, M. Oreiller, S. Jutras. 2012. Suivi hydrométéorologique des tourbières en milieu boréal. Présentation faite dans le cadre de l'atelier *Énergie du Plan stratégique de l'INRS-EMT*. Mercredi le 13 juin 2012, Salle de conférence de l'INRS-EMT, 1650 bv Lionel Boulet, Varennes, Québec

### 3. Diffusion des résultats

---

- (44) Gagnon, P., A.N. Rousseau, A. Mailhot. 2011. Impact of statistical disaggregation of precipitation in physically-based distributed hydrological modeling. Case study: June 2002 flood on the Des Anglais watershed, Quebec, Canada. Affiche présentée au *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl., Abstract H23A-1237 AGU Fall Meeting*, 5-9 December, 2011, San Francisco, CA
- (45) Carrer, G., A.N. Rousseau, A. St-Hilaire, M. Fossey, S. Jutras. 2011. Water movement monitoring in a boreal patterned fen peatland using an isotopic approach. Affiche présentée au *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl., Abstract H41F-1115 AGU Fall Meeting*, 5-9 December, 2011, San Francisco, CA.
- (46) Carrer, G., G. Levrel, S. Proulx-McInnis (étudiants sous les directions des professeurs: Alain N. Rousseau, André St-Hilaire, Sylvain Jutras). 2011. Les tourbières nordiques. *Chronique diffusée à l'émission Futur Simple* le 21 avril 2011, à l'antenne de CKRL 89,1 à Québec. (<http://vimeo.com/25006308>)
- (47) Levrel, G., A.N. Rousseau, P. Lafrance. 2011. Caractérisation de l'infiltration dans les sols boréaux québécois: étude de l'interface « sols - atmosphère » sur deux tourbières minérotrophes du milieu boréal québécois. *Congrès annuel de l'Association Québécoises des Spécialistes en Sciences du Sol et Société canadienne de la science du sol/Société de protection des plantes du Québec/AQSSS-SPPQ*, 25-27 mai 2011, Hôtel-Musée des Premières Nations, Wendake, Qc, Canada

#### **Rapports techniques**

48. Rousseau, A.N., S. Savary, S. Tremblay. 2014. Adaptation du modèle HYDROTEL à la simulation de Crues Maximales Probables sur des grands bassins nordiques - Cas du Complexe La Grande. Institut national de la recherche scientifique Centre - Eau Terre Environnement; 82 pages. (INRS Centre Eau Terre Environnement, Documents scientifiques et techniques; 1573)

49. Rousseau, A.N., A. Royer. 2013. Adaptation d'HYDROTEL pour des applications à grandes échelles ( $10^5 \text{ km}^2$ ) dans un contexte d'études d'impacts des changements climatiques: activités de développement du code - Rapport final du projet. Rapport R-1414, Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ
50. Grindat, S., D.F. Nadeau, A.N. Rousseau. 2012. A practical guide for micrometeorological measurements – Lessons learned from the James Bay field campaign 2012. Rapport Interne I-317, Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ

## 4 Collaboration avec les partenaires

---

Ce chapitre présente un compte rendu du processus d'initiation du projet, de la participation des partenaires et une description des projets d'avenir.

### **Processus d'initiation du projet**

Depuis 1950, le milieu boréal québécois s'est d'abord refroidi d'environ 3°C, puis un réchauffement rapide a repris depuis les années 1980. Si cette tendance se maintenait, l'hydrologie des bassins et, par conséquent, la gestion des complexes hydroélectriques de ce milieu, tel que celui du complexe La Grande qui produit près de la moitié de l'électricité du Québec, seraient vraisemblablement modifiées. C'est sur cette toile de fond que l'INRS-ETE, avec la collaboration d'Ouranos/Hydro-Québec (HQ) et du CRSNG, a réalisé un premier projet RDC portant sur le potentiel d'application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL au milieu boréal. Dans ce projet, une attention particulière avait été portée sur la modélisation des particularités du milieu, en l'occurrence les processus hydrologiques liés au bilan d'énergie et aux écoulements dans les milieux humides et lacs à sorties multiples. Ce projet qui s'est déroulé entre 2006 et 2009 a produit des résultats prometteurs qui incitaient la poursuite des travaux selon les trois grandes thématiques de travail du projet qui vient de se terminer: (AT1) modélisation des processus hydrologiques; (AT2) calage et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes; et (AT3) amélioration des plateformes informatiques HYDROTEL et PHYSITEL, un SIG dédié à la construction des bases de données de modèles hydrologiques distribués.

Au cours des dernières années, HQ-Production a débuté l'implantation du modèle HYDROTEL sur un certain nombre de bassins et les résultats obtenus confirment que le modèle répond aux attentes dans les bassins du sud. Toutefois, au printemps 2014, moment où le projet se concluait, HQ-Production nous informait, qu'une modélisation hydrologique du bassin du Complexe La Grande était devenu nécessaire – ce qui n'était pas à l'affiche de nos activités de travail. De plus, compte tenu des récentes remises en

questions des résultats de la Crue Maximale Probable (CMP) fournis en 2005 par le modèle hydrologique HSAMI, HQ-Production décidait d'utiliser HYDROTEL dont la prise en main était en train d'être complétée. Le modèle qui est maintenant convenablement calé pour un certain nombre de bassins d'HQ répond aux attentes dans les bassins du sud. Pour les grands bassins du Nord comme ceux du Complexe La Grande, l'utilisation du modèle requerrait quelques travaux supplémentaires. Étant donné qu'il existait déjà une synergie entre Ouranos et HQ, HQ-Production et Ouranos décidait d'un commun accord de prolonger notre projet jusqu'à la fin de l'année 2014. Dans le cadre de ce prolongement, nous avons effectué les travaux suivants : (i) analyser l'influence des conditions climatiques sur le sol (gel et dégel) et sur les régimes d'écoulement; (ii) tester la capacité du modèle HYDROTEL à simuler dynamiquement l'écoulement; (iii) caractériser les différents types de sols qui composent l'ensemble du Complexe La Grande et proposer pour chacun d'eux des paramètres appropriés; (iv) intégrer la modélisation de l'écoulement dans les tourbières et proposer pour ce type d'écoulement les bornes pour le calage des paramètres du modèle; et (v) mettre à jour le modèle HYDROTEL afin qu'il soit apte à la simulation de CMP sur le Complexe La Grande.

C'est dans ces deux contextes que nous avons réalisé ce projet sur l'adaptation des outils PHYSITEL/HYDROTEL au milieu boréal québécois : modélisation des processus hydrologiques et analyses de sensibilité, d'identifiabilité et d'incertitudes.

### **Participation des partenaires**

Les partenaires industriels de ce projet étaient Ouranos et Hydro-Québec (HQ). Ce partenariat nous a permis de travailler avec divers collaborateurs de l'IREQ (institut de recherche d'HQ) et d'HQ-Production. Ceux-ci étaient impliqués tant au niveau de la gestion du projet, de l'encadrement d'activités de travail que du transfert de données, du prêts d'équipements et de la codirection de PHQ. De plus, au fil de la réalisation du projet, des collaborateurs du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), de l'École

#### 4. Collaboration avec les partenaires

---

Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), de l'Université Laval (UL), et d'Utah State University (USU) ont contribué de diverses façons.

Au niveau de la gestion du projet, HQ/IREQ a participé activement à la logistique des allées et venues entre Québec et la Baie de James. Ce partenaire a également couvert toutes les dépenses pour les vols d'avion entre l'INRS-ETE et les sites de tourbières à l'étude dans le bassin versant de la rivière La Grande, c'est-à-dire Radisson et LaForge. De plus, les coûts liés à l'hébergement et les repas aux résidences d'HQ ainsi qu'aux déplacements en camion entre les résidences et les sites de tourbières à l'étude. Une personne attirée (M. Vincent) de l'IREQ faisait les réservations des résidences et des moyens de transports aériens et sur place à la Baie de James. Au cours du projet, vingt (20) sorties sur le terrain ont été faites sur différentes périodes allant de quelques jours à plusieurs semaines: six (6) en 2011, douze (12) en 2012, et deux (3) en 2013. À noter que pour des besoins de transport de matériels, une partie des participants à ces missions se sont déplacés en camion de Québec à la Baie de James et les coûts associés ont été couverts par le projet. C. Guay et N. Thiémonge, chercheuses à l'IREQ, ont participé à plusieurs sorties de terrain à la Baie de James dans le cadre des AT1.3 (suivi et modélisation des flux de méthane et du bilan d'énergie de surface d'une tourbière ombrotrophe) et AT1.5 (dynamique hydrique d'un petit bassin dominé par une tourbière minérotrophe).

On tient également à souligner l'apport d'HQ-Production pour sa contribution majeure à l'AT3 (amélioration des plateformes informatiques) et plus spécifiquement à l'adaptation du modèle HYDROTEL à la simulation de Crues Maximales Probables sur des grands bassins nordiques tels que les principaux sous bassins du Complexe La Grande. Cette réalisation a été rendue possible par le travail de coordination des besoins du Dr R. Roy, chercheur à l'IREQ et Directeur Programmation scientifique chez Ouranos et de Mme L. Rémillard ing. M.Sc. Chef Hydrologie chez HQ-Production. Les prévisionnistes d'HQ-Production ont également contribué à la conception de l'interface d'aide au calage manuel d'HYDROTEL (AT2.3). À ce niveau, on tient aussi souligné l'apport des

prévisionnistes du CEHQ. En effet, depuis plus de dix ans, le modèle HYDROTEL est au cœur du système de prévision hydrologique du CEHQ. Le CEHQ a également contribué à l'adaptation du code d'HYDROTEL pour des applications à grandes échelles (105 km<sup>2</sup>) dans un contexte d'études d'impacts des changements climatiques (AT3). À cet effet, on tient à souligner le travail de coordination du Dr Ri. Turcotte ing., conseiller scientifique à la Direction de l'expertise hydrique du CEHQ et coordonnateur du programme "Ressources hydriques" chez Ouranos.

Notons la livraison par M.-J. Doray, Conseillère hydrométéorologie, et Y. Choquette, expertise en instrumentation, de l'IREQ, des données du GMON (Gamma MONitoring d'EEN prises à une fréquence de six heures sur toute la durée de l'hiver) pour le site de la Nécopastic. Ces données étaient essentielles à la réalisation du mémoire de Mathieu Oreiller en marge de l'AT1.1 (amélioration de la performance du module de neige unicouche mixte degrés-jours – bilan d'énergie thermique d'HYDROTEL). On tient également à souligner les prêts d'équipements et d'instruments de mesure faits par le professeur M. B. Parlange de l'EPFL, le professeur H. Margolis et le Dr C. Coursolles de l'UL et le professeur É. R. Pardyjak d'USU. Sans ces prêts, il aurait été impossible que le postdoctorant Daniel Nadeau complète de manière satisfaisante l'AT1.3.

Si l'on exclut les membres du groupe, c'est-à-dire A.N. Rousseau (professeur, responsable du projet dans son ensemble et directeur des thèses de Patrick Gagnon, Gwenael Carrer, Grégor Levrel; directeur des mémoires de Mathieu Oreiller, Imène Ben Nasr, et du postdoctorat de Daniel Nadeau) et les professeurs A. St-Hilaire (codirecteur de thèse de Gwenael Carrer) et A. Mailhot (codirecteur de thèse de Patrick Gagnon, directeur du postdoctorat de Sébastien Raymond et codirecteur du mémoire d'imène Ben Nasr), on tient à rapporter les contributions de : (i) P. Lafrance (professeur) de l'INRS-ETE pour la codirection de la thèse de Grégor Levrel; (ii) Dr D. Caya (chercheur en sciences du climat, concepteur du MRCC) d'Ouranos pour la codirection de thèse de Patrick Gagnon; (iii) Dre M. Minville (chercheure et ingénieure avec une expertise en modélisation hydrologique et impact des changements climatiques sur les apports) de

#### 4. Collaboration avec les partenaires

---

l'IREQ pour la codirection du mémoire de Mathieu Oreiller; et (iv) S. Jutras (professeur) de l'Université Laval pour la codirection de la thèse de Gwenael Carrer. À noter également les échanges scientifiques avec les chercheurs A. Frigon et R. Harvey d'Ouranos, et les professeurs J. Price de Waterloo University ainsi que S. J. Gumiere et J. Caron de l'Université Laval.

Enfin, le CRSNG s'est aussi avéré un partenaire exemplaire. En effet, le complément de financement du projet RDC reçu en 2012 a permis de maintenir en place un technicien en informatique qui a contribué largement à la formation en programmation des étudiants-chercheurs et de maintenir le niveau technologique des logiciels qui ont été transmis à nos partenaires et collaborateurs actuels et futurs.

#### **Projets d'avenir**

Dans le cadre de la révision des Crues Maximales Probables (CMP) au complexe de La Grande Rivière (Complexe La Grande), une modélisation hydrologique du bassin correspondant est nécessaire. Compte tenu des récentes remises en questions des résultats de la CMP fournis en 2005 par le modèle hydrologique HSAMI, HQ-Production a décidé d'utiliser pour cette révision le modèle HYDROTEL. Toutefois, pour les grands bassins du Nord comme ceux du Complexe La Grande, l'utilisation d'HYDROTEL requiert des travaux d'adaptations. Suite au prolongement de ce projet nous avons réalisé les premières adaptations du modèle et produit une version alpha 64 bits. Les résultats obtenus ont été très encourageants et en avril 2015 nous poursuivrons les travaux dans le cadre d'une nouvelle entente de collaboration. Ces travaux sont regroupés sous trois rubriques d'activités : (i) recherche, (ii) intégration et (iii) assistance et support.

Sans rentrer dans les détails, les activités de recherche porteront sur : (i) la mise à jour des cartes d'occupation et des types de sols afin de mieux considérer l'impact des milieux humides et tourbières présents sur l'ensemble du complexe La Grande; (ii) un deuxième modèle d'estimation de la profondeur du gel sera intégré, et ce afin de comparer l'impact de deux modèles (celui intégré lors du projet faisant état de rapport final et le deuxième) sur l'estimation de la profondeur du gel et la modification des

écoulements; (iii) l'intégration d'un algorithme de calcul qui permet de déterminer toutes les composantes du rayonnement net ainsi que les valeurs des autres paramètres nécessaires à l'utilisation de ces équations; (iv) la détermination du potentiel de calculer en parallèle le bilan vertical des trois couches d'HYDROTEL ainsi que l'acheminement de l'eau en rivière (hiérarchisation des tronçons en fonction des nœuds ou jonctions). Les activités d'intégration incluront : (i) l'adaptation d'HYDROTEL au besoin d'HQ-Production-Hydrologie afin d'assurer sa pleine compatibilité avec les données météorologiques sous grille produites par HQ; et (ii) l'intégration du bilan vertical du modèle CEQUEAU (modèle utilisé par Rio Tinto Alcan). Finalement, les activités de d'assistance et support s'articuleront autour : (i) l'accompagnement d'HQ-Production-Hydrologie dans la mise en place de la version 64 bits d'HYDROTEL dans leur plateforme de calage automatique; et (ii) l'accompagnement des personnes responsables de calculs de CMP avec la version 64 bits d'HYDROTEL sur le complexe La Grande.

Ces activités de travail seront financées dans un premiers temps à partir d'une entente de collaboration. Au tout début de cette entente nous allons établir le potentiel d'ajouter des activités de recherche supplémentaires qui feront l'objet d'une nouvelle demande de subvention CRSNG-RDC. Le budget de d'entente de collaboration sera utilisé servira d'appareillage à la demande CRSNG-RDC qui se déroulera sur une période de trois ans, et afin de financer et supporté techniquement un étudiant au doctorat.

#### Description des liens avec les partenaires dans le futur

Du côté d'HQ-Production, Mathurin Daynou Ph.D. et Brou Konan Ph.D., prévisionnistes, feront le suivi de l'avancement technique et participeront à la collecte des données requises pour la réalisation du projet qui débutera en avril 2015. Louise Rémillard ing. M.Sc.A. d'HQ – Production assurera le suivi administratif du projet.

Du côté de l'INRS, ce projet va requérir l'expertise et la supervision du professeur Alain N. Rousseau ing. Ph.D., chargé de projet; Sébastien Tremblay, programmeur et analyste familial (plus de 10 ans d'expérience) avec PHYSITEL/HYDROTEL et de Stéphane Savary,

#### 4. Collaboration avec les partenaires

---

assistant de recherche (M.Sc. Eau, ing. Jr) en modélisation hydrologique et en géomatique appliquée à l'hydrologie (plus de 10 ans d'expérience).

En ce qui a trait à nos liens avec Ouranos, ils se maintiendront comme par leur passé par des échanges sur les perspectives de travaux de recherche avec le secteur énergétiques (hydroélectricité) portant sur l'impact et l'adaptation aux changements climatiques.



## 5 Transfert de connaissances et de technologie

---

Pour Ouranos et Hydro-Québec les principales réalisations issues de ce projet incluent :

- (i) le développement d'une méthode éprouvée de désagrégation sous grille de la précipitation mésoéchelle permettant d'évaluer à fine échelle spatiale l'impact des changements climatiques sur les précipitations;
- (ii) une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements, du stockage de l'eau et de l'évapotranspiration d'un petit bassin versant boréal incluant une grande tourbière minérotrophe analysée;
- (iii) l'évaluation du paramétrage de la sublimation et la relocalisation de la neige dues au vent et l'identification du besoin d'inclure le rayonnement sous la canopée pour bien reproduire la crue avec un modèle complexe de l'évolution du couvert nival;
- (iv) la détection de la quasi neutralité fréquente (~76% du temps, majoritairement le jour) de l'atmosphère au-dessus d'un milieu humide causée par une turbulence mécanique forte et une grande inertie thermique; conditions ayant permises le développement d'un modèle simple d'évapotranspiration des milieux humides basé le transfert massique et la stabilité atmosphérique;
- (v) le développement d'un modèle de rayonnement net basé uniquement sur des données de températures journalières (min, max) et une estimation des paramètres permettant de valider l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith dans le nord québécois;
- (vi) la hiérarchisation des paramètres de calage d'HYDROTEL selon la saison et le développement d'une méthode permettant d'évaluer l'incertitude sur les débits simulés et d'identifier son importance durant la fonte et l'étiage estival;

- (vii) dans un contexte d'analyse fréquentielle des débits simulés, évaluation de l'incertitude paramétrique par rapport à l'incertitude statistique, cette dernière dominant pour les périodes de retour supérieures à cinq ans;
- (viii) à l'aide de PHYSITEL, la première discrétisation du complexe de la rivière La Grande (136 648 km<sup>2</sup>) en six sous-bassins (LG1, LG2, LG3, LG4, La Forge 1 & 2, et Caniapiscau) leur subdivision en versants permettant le calcul de crues maximales probables à l'aide d'HYDROTEL; et
- (ix) le développement d'une version 64 bits d'HYDROTEL incluant de nouveaux modules de calculs de la température du sol et des bilans hydriques des milieux humides et isolés.

Ces avancements de nos compréhensions de l'hydrologie des milieux humides et du milieu boréal en général ont été à la base du développement des versions adaptées d'HYDROTEL et de PHYSITEL qui permettront à Hydro-Québec d'appréhender, avec une modélisation distribuée, l'impact des changements climatiques sur le complexe de la rivière La Grande. Ces logiciels sont transposables à l'ensemble du milieu boréal canadien. Une entente conclut, depuis 2005, entre l'INRS et Hydro-Québec (HQ) permet d'ailleurs une distribution commerciale des différentes versions d'HYDROTEL avec interfaces usagers de même qu'une distribution communautaire du noyau de calcul. Cette synergie a permis de mettre en commun des ressources et des expertises qui facilitent les échanges scientifiques et techniques entre les concepteurs d'HYDROTEL, le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), HQ, l'IREQ (Institut de recherche en électricité du Québec) et d'autres usagers (ex. : l'IMTA, Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua). Au total, plus d'une quarantaine de licences ont été distribuées tant pour des besoins d'enseignement (Université de Sherbrooke) et de recherche (Université Laval, UQTR, UQAC, IREQ, École de Technologie Supérieure, INRA de Montpellier, Environnement Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada), que des besoins de prévision hydrologique (IMTA, Ville de Québec, Centre d'expertise hydrique du Québec, HQ). La modularité informatique d'HYDROTEL se prête également bien à cette synergie car elle offre la possibilité de partager le savoir-faire et, par l'entremise

## 5. Transfert de connaissances et de technologie

---

d'un site internet public (CodePlex), de mettre à la disponibilité de tous les nouvelles versions du noyau de calcul. Ces développements ont permis à l'équipe de l'INRS-ETE d'acquérir une reconnaissance internationale en modélisation hydrologique distribuée. En effet, HYDROTEL et PHYSITEL ont dans le passé été identifiés comme les outils à utiliser dans le cadre d'appels de proposition de projets de détermination du potentiel hydroélectrique financés par la Banque Mondiale [World Bank, 2009].



## 6 Contributions d'autres sources

---

Ce chapitre présente un résumé des principales contributions des collaborateurs de ce projet : Ouranos, IREQ/HQ, EPFL, Université Laval, IREQ, et CEHQ.

### **Ouranos**

René Roy est chercheur en hydrologie statistique et gestionnaire de projets sur les ressources hydroélectriques chez nos partenaires industriels (IREQ et Ouranos). Il a contribué grandement de par son expérience à l'administration du projet ainsi qu'à la logistique des déplacements entre l'INRS-ETE (Québec) et les sites de collectes de données hydrométéorologiques près des réservoirs de LG-2 et LaForge 1.

Daniel Caya a participé à la co-direction de la thèse de Patrick Gagnon (2012) qui portait sur la Désagrégation statistique de la précipitation mésoéchelle.

Anne Frigon a participé à l'encadrement de de la thèse de Patrick Gagnon (2012) qui portait sur la Désagrégation statistique de la précipitation mésoéchelle.

### **IREQ/HQ**

Marie Minville est chercheuse et ingénieure à l'IREQ avec une expertise en modélisation hydrologique et impact des changements climatiques sur les apports. Elle a été la codirectrice du mémoire de Mathieu Oreiller (2013) qui avait pour titre: Modélisation par une approche physique de l'équivalent en eau de la neige à des fins de simulation de crues printanières d'un bassin versant boréal.

Brou Konan est chercheur et expert en prévision hydrologique chez hydro-Québec qui possède une très bonne expérience de travail avec PHYSITEL/HYDROTEL. Il a contribué au développement de l'adaptation d'HYDROTEL aux grands bassins nordiques (Cas du Complexe La Grande) ainsi qu'à la rédaction à la rédaction d'articles sur les analyses de sensibilité et d'incertitudes du modèle HYDROTEL (voir liste des publications de la

section diffusion des résultats) entrepris ultérieurement par Médard Bouda, postdoctorant.

Nathalie Thiémonge et Catherine Guay ont participé à plusieurs sorties sur le terrain à la Baie James.

Dans le cadre du mémoire de Mathieu Oreiller, Marie-Josée Doray et Yves Choquette ont transféré des données du GMON (Gamma MONitoring de l'équivalent en eau de la neige) sur le site de la Nécopastic.

### **EPFL**

Marc Parlange, professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, nous a prêté gracieusement des senseurs de méthane (Open-path CH<sub>4</sub> (LI-7700, LI-COR Biosciences, USA) et de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (LI-7500, LI-COR Biosciences, USA).

### **Université Laval**

Hank Margolis, professeur à l'Université Laval, a contribué par un prêt d'équipement (anémomètres soniques ) à l'élaboration de la campagne de suivi du bilan d'énergie de surface réalisée par Daniel Nadeau et contribué aux communications et publications scientifiques de ce postdoctorant ainsi que de celles effectuées par Pierre-Érik Isabelle.

Silvio Gumiere, professeur à l'Université Laval, a contribué à l'analyse spatiale de l'évapotranspiration des différentes couvertures de sol de la tourbière minérotrophe étudiée par Gwenael Carrer (2014). Il a également contribué à la rédaction d'articles sur les analyses de sensibilité et d'incertitudes du modèle HYDROTEL (voir liste des publications de la section diffusion des résultats) entrepris ultérieurement par Médard Bouda, postdoctorant.

Sylvain Jutras, professeur à l'université Laval, a participé à la co-direction de la thèse de Gwenael Carrer (2014) qui avait pour titre: Dynamique des écoulements et du stockage d'eau d'un petit bassin versant boréal influencé par une tourbière minérotrophe aqualisée des Hautes-terres de la baie de James, Québec, Canada.

### **IREQ**

Au niveau de la logistique, IREQ a joué un rôle prépondérant dans la réussite de ce projet. En effet, Mme Manon Vincent a fait toutes les réservations des chambres de résidences d'HQ et des transports aériens et sur place à la Baie James. Cet appui logistique est évalué à 90 k\$.

### **CEHQ**

R. Turcotte, chef de la division de l'expertise hydrométéorologique, du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) a contribué de par sa vaste expérience avec les outils PHYSITEL et HYDROTEL à plusieurs discussions encadrant la réalisation de l'AT3 qui portait sur l'amélioration des plateformes informatiques HYDROTEL et PHYSITEL. Il a aussi contribué à l'adaptation d'HYDROTEL pour des applications à grandes échelles ( $10^5$  km<sup>2</sup>) dans un contexte d'études d'impacts des changements climatiques.