

**Record Number:** 25380  
**Author, Monographic:** Villeneuve, J. P.//Rousseau, A. N.//Fortin, V.//Slivitzky, M.//Turcotte, R.  
**Author Role:**  
**Title, Monographic:** Analyse des apports saisonniers et annuels de systèmes hydriques nordiques - Étude d'avant-projet  
**Translated Title:**  
**Reprint Status:**  
**Edition:**  
**Author, Subsidiary:**  
**Author Role:**  
**Place of Publication:** Québec  
**Publisher Name:** INRS-Eau, Terre & Environnement  
**Date of Publication:** 2002  
**Original Publication Date:** 30 juin 2002  
**Volume Identification:**  
**Extent of Work:** v, 53  
**Packaging Method:** pages incluant 3 annexes  
**Series Editor:**  
**Series Editor Role:**  
**Series Title:** INRS-Eau, Terre & Environnement, rapport de recherche  
**Series Volume ID:** 622  
**Location/URL:**  
**ISBN:** 2-89146-487-7  
**Notes:** Rapport annuel 2002-2003  
**Abstract:** Numéro de rapport et ISBN demandés par A. Rousseau et fournis par Jean-Daniel 20020704  
10.00\$  
**Call Number:** R000622  
**Keywords:** rapport/ ok/ dl

**Analyse des apports saisonniers et annuels  
de systèmes hydriques nordiques - Étude  
d'avant-projet**

*Rapport de recherche No R-622    30 juin 2002*

**Analyse des apports saisonniers et annuels de  
systèmes hydriques nordiques - Étude d'avant-projet**

Rapport rédigé pour le

Consortium sur la climatologie régionale et  
l'adaptation aux changements climatiques – OURANOS

Caractérisation physique et sensibilité aux changements  
Sous-programme cycle de l'eau

par

Jean-Pierre Villeneuve  
Alain N. Rousseau  
Vincent Fortin  
Michel Slivitzky  
Richard Turcotte

Centre Eau, Terre et Environnement  
Institut National de la Recherche Scientifique  
2800, rue Einstein, Case postale 7 500, SAINTE-FOY (Québec), G1V 4C7

Projet Apports

Rapport de recherche No R-622

Juin 2002

© Jean-Pierre Villeneuve, 2002  
ISBN : 2-89146-487-7

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTE .....	1
1.2 OBJECTIFS.....	2
1.3 CONTENU DE CE RAPPORT .....	3
<b>2. CARACTÉRISATIONS HYDROCLIMATIQUE ET PHYSIOGRAPHIQUE DES     SYSTÈMES HYDRIQUES NORDIQUES .....</b>	<b>5</b>
2.1 BASES DE DONNÉES DU CLIMATIC RESEARCH UNIT .....	5
2.2 DESCRIPTION PHYSIOGRAPHIQUE .....	6
2.2.1 <i>La formation géologique.....</i>	<i>6</i>
2.2.2 <i>Le climat .....</i>	<i>7</i>
2.2.3 <i>Le système hydrographique.....</i>	<i>7</i>
2.2.4 <i>La végétation .....</i>	<i>8</i>
<b>3. INVENTAIRE DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES ET     PHYSIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>9</b>
3.1 DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES .....	9
3.1.1 <i>Stations de mesures hydrométriques.....</i>	<i>9</i>
3.1.2 <i>Apports naturels à des bassins versants nordiques .....</i>	<i>11</i>
3.1.3 <i>Observations météorologiques.....</i>	<i>12</i>
3.1.4 <i>Relevés nivométriques.....</i>	<i>12</i>
3.1.5 <i>Réflexions sur les données sur grille régulière .....</i>	<i>12</i>
3.2 DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES .....	16
3.2.1 <i>Modèle numérique d'altitude (MNA) et réseau hydrographique numérisé ..</i>	<i>16</i>
3.2.2 <i>Occupation du sol .....</i>	<i>16</i>
3.2.3 <i>Types de sol et propriétés physiques des sols .....</i>	<i>17</i>
3.2.4 <i>Propriétés du couvert végétal.....</i>	<i>18</i>
<b>4. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....</b>	<b>19</b>
4.1 ÉCHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES .....	19
4.2 POTENTIEL D'APPLICATION DES MODÈLES HSAMI ET HYDROTEL SUR DES GRANDS BASSINS NORDIQUES .....	20
4.3 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES MILIEUX HUMIDES .....	23
4.4 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES LACS ET RÉSERVOIRS .....	25
4.5 SOUS-BASSIN VERSANT PILOTE.....	28
<b>5. ÉQUIPE DE RÉALISATION.....</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>31</b>

---

<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>33</b>
<b>ANNEXE A - MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>39</b>
<b>ANNEXE B – HYDROTEL .....</b>	<b>43</b>
DÉCOUPAGE SPATIAL ET MODÉLISATION DES PROCESSUS .....	43
<i>Bilan hydrique vertical.....</i>	<i>43</i>
<i>Écoulements sur la partie terrestre et dans le réseau hydrographique.....</i>	<i>44</i>
<i>Évapotranspiration et évolution du couvert nival.....</i>	<i>44</i>
APPLICATIONS .....	45
<b>ANNEXE C - RELEVÉS NIVOMÉTRIQUES POUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE .....</b>	<b>49</b>

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 5.1	Équipe de réalisation.....	29
Tableau B.1	Description sommaire d'HYDROTEL .....	47

# 1. INTRODUCTION

---

Les systèmes hydriques du nord du Québec sont très particuliers, non seulement de par leur climatologie, mais aussi de par le fait que le pourcentage du territoire couvert par des lacs et milieux humides peut être de l'ordre de 20 à 30% de l'occupation du sol [Philippin *et al.*, 2001]. L'analyse des apports en provenance de ces milieux humides à faible gradient et à grande capacité de stockage à l'échelle des grands bassins versants est fort complexe et il existe peu de modèles mécanistes capables de traiter l'hydrologie des milieux humides et des lacs interconnectés et ce, même si plusieurs études de terrain ont porté sur l'aspect hydrologique de ces milieux dans le cadre de programmes internationaux de recherche tels que GEWEX (*Global Energy and Water Experiment*) et BOREAS (*Boreal Ecosystem-Atmosphere Study*). Le développement d'un modèle hydrologique distribué adapté au contexte nordique québécois, qu'il soit basé sur l'amélioration d'un modèle existant ou le développement d'un nouveau modèle de première génération, représente un besoin réel si l'on considère la production et le potentiel hydroélectriques du nord du Québec (ex. : bassins versants des rivières Eastmain et La Grande). Dans un contexte d'une acclimatation graduelle et conséquente aux changements climatiques (CC), l'utilisation d'un tel outil, alimenté par les données d'expériences de scénarios de CC disponibles au Centre de diffusion des données (CDD) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GEIC)], permettrait d'évaluer : (i) les impacts sur les apports saisonniers et annuels, (ii) divers scénarios de gestion du territoire et des ouvrages hydroélectriques ainsi que (iii) divers scénarios d'optimisation de la production hydroélectrique. Ces études seraient appuyées par des analyses fréquentielles sur les apports, les débits d'étiage et les débits de crues simulés afin de bien caractériser le contexte des impacts et adaptations.

## 1.1 CONTEXTE

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, la limite des zones de pergélisol se déplacerait vers le nord, ce



qui perturberait vraisemblablement l'hydrologie des systèmes hydriques nordiques. Certains écosystèmes, comme les milieux humides, risquent ainsi d'être modifiés considérablement et même, dans certains cas, pourraient disparaître. À l'échelle des bassins versants, on se doit de déterminer avec plus de précision les conditions d'apports saisonniers et annuels pour définir les conditions d'exploitation hydroélectrique. Il existe donc un besoin de disposer d'outils numériques mécanistes pour combler ces manques de connaissance. Pour réaliser ces travaux, on privilégie, dans un premier temps, le développement d'une version du modèle hydrologique distribué HYDROTEL [Fortin *et al.*, 2001a,b] qui serait adaptée au contexte des systèmes hydriques du nord du Québec. Le modèle HYDROTEL représente un bon équilibre entre la modélisation hydrologique basée sur des lois physiques exigeant un nombre élevé de données d'entrée telle qu'incluse dans MIKE SHE [Refsgaard et Storm, 1995] et la modélisation basée sur des bilans de masse et des relations empiriques telle qu'utilisée par CEQUEAU [Morin, 2002] ou HSAMI [Fortin, 2000]. Les propriétés d'HYDROTEL (voir annexe B) et son utilisation en prévision hydrologique par Hydro-Québec (HQ) et le Centre d'expertise hydrique du Québec du ministère de l'Environnement (CEHQ du MENV), justifient de le placer au centre du développement technique de ce projet. Les améliorations apportées sont nécessaires car le traitement actuel des lacs par HYDROTEL n'est tout simplement pas adapté au contexte nordique où ces plans d'eau ont un effet trop significatif pour pouvoir être traités approximativement. Il faut améliorer la simulation des lacs en fonction de transferts horizontaux et verticaux. Quant aux milieux humides, il ne sont pas traités explicitement dans HYDROTEL.

## 1.2 OBJECTIFS

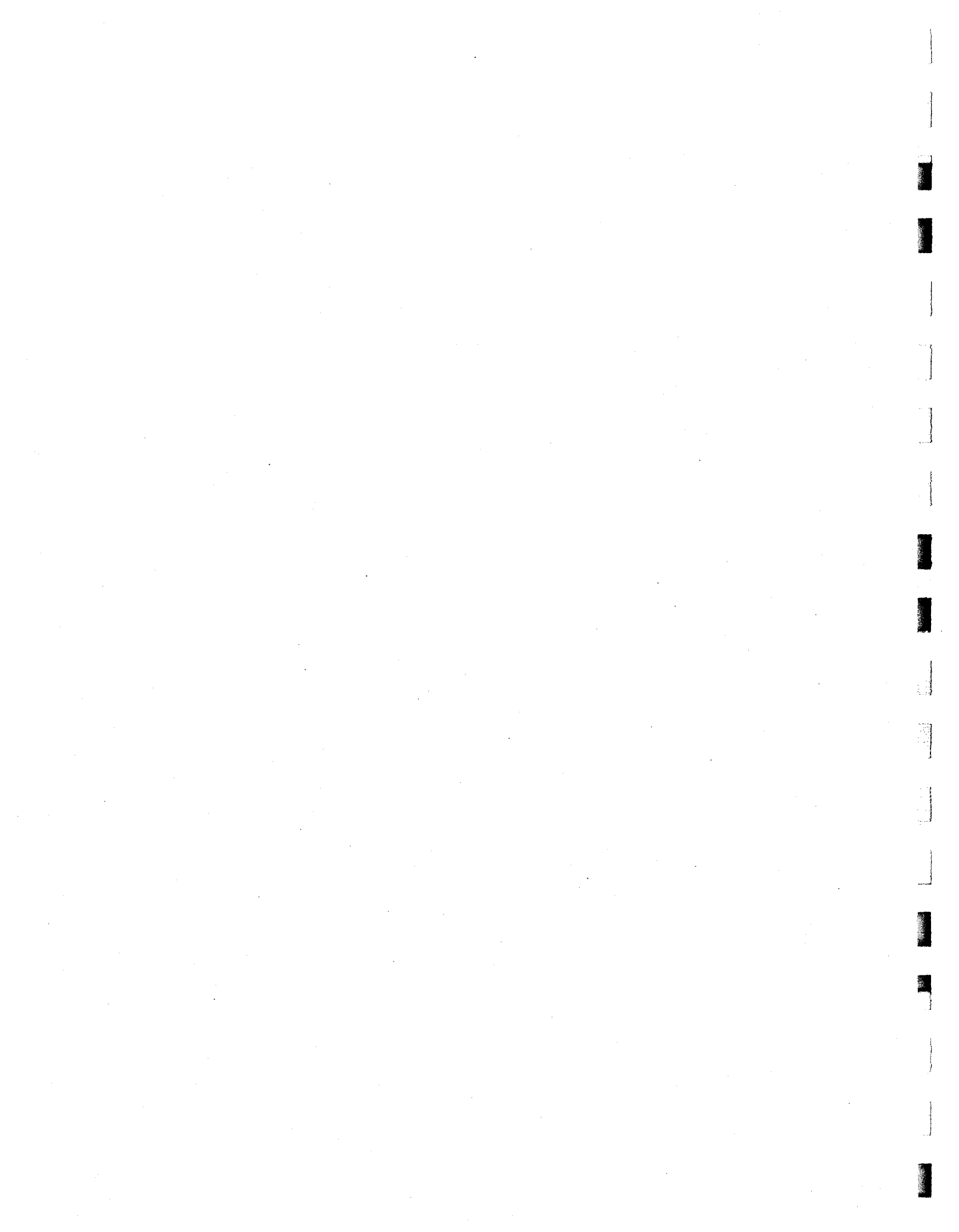
Le présent projet vise à améliorer la connaissance sur l'analyse des apports saisonniers et annuels des systèmes hydriques nordiques. Plus précisément, le projet a pour but de répondre aux trois questions fondamentales suivantes : (i) Quel a été le contexte hydroclimatique des bassins versants nordiques actuellement exploités, ou à fort potentiel hydroélectrique, au cours du dernier siècle ? (ii) Quel est le rôle des milieux humides et lacs interconnectés dans le cycle hydrologique de ces bassins versants ? et (iii) Quelle est la contribution de ces milieux aux apports saisonniers et annuels ?

La méthodologie employée pour répondre à ces questions multiples repose sur la caractérisation hydroclimatique et physiographique ainsi que la modélisation hydrologique des systèmes hydriques supportant la production hydroélectrique du Nord québécois. La présente étude d'avant-projet a pour but de détailler davantage la méthodologie de travail déposée en février 2002 (voir description à l'annexe A). Les activités dans le cadre cette étude d'avant-projet s'inscrivent sous les trois volets suivants: (i) caractérisation des contextes hydroclimatique et physiographique, (ii) inventaire des données physiographiques et hydrométéorologiques et (iii) modélisation hydrologique.

### 1.3 CONTENU DE CE RAPPORT

Mis à part l'introduction (chapitre 1), ce rapport se divise en quatre chapitres. Le chapitre 2 présente : (i) le contenu d'une base de données (BD) planétaire pouvant servir à la caractérisation de l'évolution hydroclimatique du climat de surface des systèmes hydriques nordiques, la BD de données centenaires du *Climatic Research Unit* (CRU) de l'*University of East Anglia* et (ii) une caractérisation préliminaire de la physiographie de la région de la Baie-James. Le chapitre 3 introduit un premier inventaire des données hydrométéorologiques et physiographiques sur les systèmes hydriques nordiques du Québec. Le chapitre 4 présente : (i) une brève discussion sur les échelles spatiales et temporelles de modélisation, (ii) une discussion préliminaire sur le potentiel d'application des modèles HSAMI [Fortin, 2000] et HYDROTEL [Fortin *et al.*, 2001a,b] sur les grands bassins nordiques du Québec, (iii) un sommaire des approches de modélisation hydrologique des milieux humides, (iv) un sommaire sur la modélisation hydrologique des grands plans d'eau (*i.e.*, lacs et réservoirs) et (v) une discussion sur le choix d'un bassin versant pilote. Finalement, le chapitre 5 présente les membres de l'équipe de réalisation.

Les résultats de ces activités de travail permettent d'illustrer, non seulement la faisabilité de la méthodologie proposée, mais également de démontrer l'efficacité et la grande qualité de l'équipe de réalisation en place.



## 2. CARACTÉRISATIONS HYDROCLIMATIQUE ET PHYSIOGRAPHIQUE DES SYSTÈMES HYDRIQUES NORDIQUES

---

Les relations entre les données climatiques, météorologiques, hydrologiques et physiographiques peuvent être utilisées pour faire la caractérisation hydroclimatique des systèmes hydriques. Dans un contexte beaucoup plus global, cette caractérisation doit être accompagnée d'une interprétation de la tendance actuelle de l'évolution des températures et des précipitations, telle que celle présentée par Giorgi [2002]. De plus, une caractérisation des variabilités intersaisonnière, interannuelle et interdécennale des périodes sans gel de sol doit être effectuée à partir d'une analyse des données centenaires rapportées par le *Climatic Research Unit* (CRU) de l'*University of East Anglia* [New *et al.*, 2000, 1999] et ce, conformément aux travaux de Giorgi [2002]. Les bases de données (BD) du CRU sont de plus en plus utilisées en tant que BD étalons pour la caractérisation des climats de surface planétaires et pour la validation de simulations climatologiques. À titre d'exemple, le Groupe de modélisation régionale du climat de l'UQAM utilise présentement ces données pour valider certaines variables de sortie du modèle régional de climat (MRC) canadien (MRCC)<sup>1</sup>. On décrit dans ce chapitre le contenu des bases de données du CRU de même qu'une première description physiographique (formation géologique, climat, végétation, et hydrographie) des bassins versants de la baie James et du complexe La Grande.

### 2.1 BASES DE DONNÉES DU CLIMATIC RESEARCH UNIT

New *et al.* [1999] et New *et al.* [200] présentent respectivement la construction de bases de données à l'échelle de la surface de la terre, résolution de 0,5° latitude x 0,5° longitude, sur la climatologie de surface moyenne, base mensuelle, pour les périodes des années 1961-90 et 1901-96. La climatologie des années 1961-90 est décrite à l'aide de neuf variables : précipitation, fréquence de jours avec précipitation, température moyenne, variation journalière de la température, pression de vapeur, ensoleillement, couverture de

---

<sup>1</sup> Communication personnelle avec Anne Frigon.

nuages, fréquence de gel au sol et vitesse des vents. Cette base de données a été générée à partir de l'interpolation de données enregistrées à différentes stations météorologiques : de 19 800 stations pour la précipitation à 3615 stations pour la vitesse des vents. Cette interpolation, basée une technique de splines, a été faite en fonction de la latitude, de la longitude et de l'élévation. Les données sont accessibles par internet via le site du CRU. Quant à la base de données des années 1901-96, elle contient sept variables climatiques : précipitation, fréquence de jours avec précipitation, température moyenne, variation journalière de la température, pression de vapeur, couverture de nuages et fréquence de gel au sol. Des champs d'anomalies mensuels, par rapport à la moyenne de la période de 1961-1990, ont également été interpolés à partir des données de climats de surface. Les variables primaires (précipitation, température moyenne, variation journalière de la température) ont été interpolées directement à partir de valeurs enregistrées à des stations d'observations. Les autres variables, dites secondaires, ont fait l'objet d'interpolation à partir d'ensembles de données observées et synthétisées en utilisant des relations basées sur les variables primaires.

## **2.2 DESCRIPTION PHYSIOGRAPHIQUE**

Cette section présente une description préliminaire de la physiographie des systèmes hydriques concernés par cette étude d'avant-projet, plus particulièrement la formation géologique, le climat, l'hydrographie et la végétation de la région de la Baie-James.<sup>2</sup>

### **2.2.1 La formation géologique**

La région de la Baie-James se situe entre les 49° et 55° parallèle de latitude nord et couvre plus de 400 000 km<sup>2</sup>. Cette région, qui siège dans le Bouclier canadien, forme une grande plate-forme de formations géologiques qui remontent au précambrien (2,5 milliards d'années). On retrouve des affleurements rocheux sur les hautes terres et des dépôts de till (débris de roche entraînés par les glaciers) de formation quaternaire dans les dépressions et sur le flanc des collines. De l'ouest vers l'est se succèdent une plaine côtière argileuse de 150 km de largeur et parsemée de tourbières, un plateau central

---

<sup>2</sup> Cette section s'appuie sur la synthèse des connaissances acquises en milieu nordique d'Hydro-Québec [Hayeur, 2001].

moutonné, criblé de lacs, et une zone au relief plus accidenté. Il y a 8000 ans, cette plaine côtière était recouverte jusqu'à la cote de 290 m, par la mer de Tyrrell, d'où l'origine de ces dépôts d'argile silteuse et de sable fin.

### **2.2.2 Le climat**

Le climat est froid, de type continental. L'hiver prend place à la fin octobre pour se terminer au début mai. La température minimale moyenne est d'environ  $-23^{\circ}\text{C}$  en janvier avec une valeur minimale aux alentours de  $-50^{\circ}\text{C}$  au plus fort de l'hiver. Le vent joue un rôle majeur au niveau de la morsure du froid, on dit qu'il est plus agaçant que la neige. En moyenne, on y reçoit près de 765 mm de précipitation par an. En juillet, la température moyenne est de  $14^{\circ}\text{C}$ , avec des pointes possibles de  $34^{\circ}\text{C}$ . Les journées d'été sont longues.

### **2.2.3 Le système hydrographique**

Quelques grandes rivières, pauvres en affluents, raccordées presque directement aux lacs du plateau intermédiaire, constituent le système hydrographique. Les rivières sont alimentées par les précipitations. La forte crue printanière est succédée par l'étiage d'été, plus ou moins prononcé selon les variations interannuelles. La crue automnale, d'origine pluviale, provoque un gonflement des eaux qui s'estompera en début novembre. Les réservoirs d'Hydro-Québec (HQ) sont généralement de deux types : des réservoirs qui transforment des fonds de vallées en étendues d'eau, ou des réservoirs qui donnent de l'extension aux grands lacs préexistants et jouent un rôle de régularisation interannuelle des complexes hydroélectriques. Ainsi, les retenues érigées modifient le comportement naturel des lacs préexistants en permettant le stockage de l'eau des crues printanières et automnales pour les libérer par la suite, selon la demande énergétique (surtout la demande hivernale). De manière générale, le débit des tronçons de rivière situés en aval du point de barrage est régularisé selon les périodes d'exploitation ou les modalités de conduite des ouvrages, tandis que les voies de dérivation se comportent selon le régime hydrique naturel en amont.

#### **2.2.4 La végétation**

La taïga, forêt clairsemée, parsemée de tourbières abondantes dans la plaine côtière, occupe la région de la Baie-James. Cette forêt se compose d'épinettes noires, de pins gris, de mélèzes et de trembles. Le diamètre des arbres se situe entre 10 et 15 cm, ce qui ne représente pas un attrait industriel dans la partie septentrionale. On y retrouve également des brûlis, vestiges d'incendies allumés par la foudre à la faveur des périodes estivales de sécheresse et alimentés par la cladonie (variété de lichen). À l'abri des vents, on peut remarquer la présence de quelques feuillus dans les régions exposées au soleil.

### **3. INVENTAIRE DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES ET PHYSIOGRAPHIQUES**

---

Ce chapitre présente un premier inventaire des données hydrométéorologiques et physiographiques disponibles et nécessaires à la modélisation hydrologique des systèmes hydriques nordiques du Québec.

#### **3.1 DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES**

Cette section présente un inventaire des observations hydrométéorologiques *in situ* des bassins versants de la baie James, de la baie d'Hudson et de la baie d'Ungava. L'inventaire porte plus précisément sur les débits et apports en eau à des réservoirs, les précipitations quotidiennes, les observations nivométriques et les mesures du rayonnement solaire. On ne s'intéresse pas aux mesures de température, qui sont généralement disponibles aux stations de mesure des précipitations, ni aux stations fermées depuis plusieurs années. On effectue aussi une mise en garde concernant les données météorologiques disponibles sur grilles régulières. L'inventaire est présentement incomplet: étant donné que certaines sources n'ont pas été utilisées, par exemple les stations hydrométriques opérées par le groupe Ingénierie, Approvisionnement et Construction d'HQ et les stations météorologiques opérées par le Centre d'études nordiques (CEN) de l'Université Laval. Dans le premier cas, les historiques sont généralement très courts, alors que dans le second, il n'existe que très peu de données de précipitation. Finalement, certains réseaux, comme celui de la SOPFEU, sont en évolution constante de sorte que l'information faisant partie de ce rapport n'est pas nécessairement tout à fait à jour.

##### **3.1.1 Stations de mesures hydrométriques**

Le nombre de stations de mesures hydrométriques dans le Nord québécois est très faible en raison des coûts d'installation et d'opération très élevés. À l'aide de la banque de



données HYDAT 1999 d'Environnement Canada (EC), on a dénombré une quinzaine de stations dans le Nord québécois qui sont non influencées et encore en opération (voir figure 3.1). Les stations de Lac-Puisseaux, Kanaaupscow et De Pontois ont été fermées dans les années 1990, mais récemment réouvertes par HQ. On observe que toutes les stations ont été ouvertes avant 1980, la plupart entre 1960 et 1975. La qualité de ces données hydrométriques peut cependant parfois laisser à désirer (en particulier en hiver) et le nombre d'années d'observation est souvent faible. Par ailleurs, il existe au Canada un réseau de stations hydrométriques qui répond à des critères de qualité de base [Yuzyk, 2001]: (i) utilisation du bassin relativement stable dans le temps, (ii) aucune régulation ou diversion importante, (iii) au moins 20 ans de données et (iv) données validées et relativement précises, incluant sous couvert de glace. Ce réseau de 225 stations, nommé RHBN pour *Reference Hydrometric Basin Network*, contient très peu de stations dans le nord du Québec, comme le montre la figure 3.2. Les seuls bassins versants couverts dans cette région sont ceux de la petite rivière de la Baleine, ainsi que ceux des rivières aux Mélézes, à la Baleine et George.

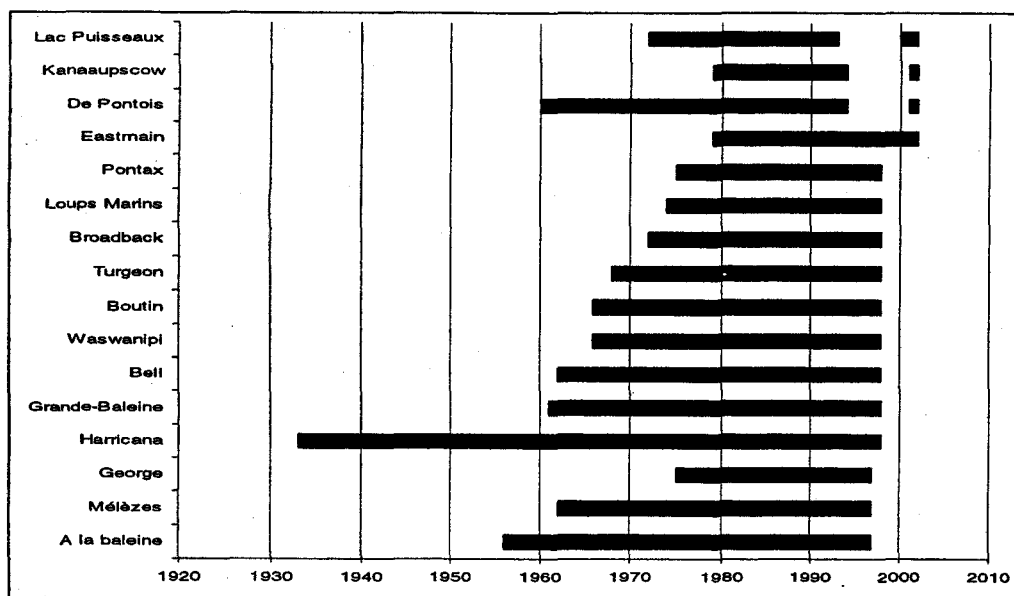


Figure 3.1 Période d'observation pour l'ensemble des stations de mesure du débit en opération dans le Nord

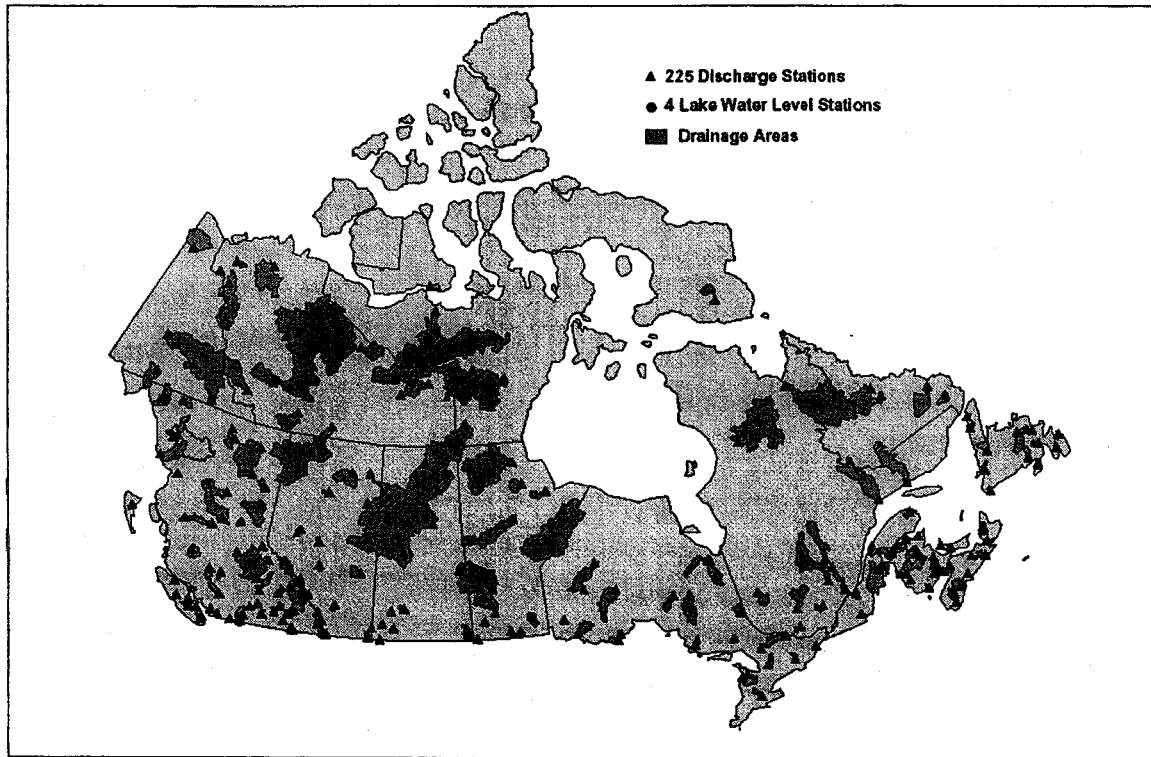


Figure 3.2 Réseau RHBN, tiré de Yuzyk [2001]

### 3.1.2 Apports naturels à des bassins versants nordiques

HQ estime de façon quotidienne, par bilan hydrique, les apports naturels aux bassins versants qu'elle gère, ce qui comprend l'ensemble du complexe de La-Grande-Rivière dans le Nord québécois. Ce calcul est donc fait pour l'ensemble des sous-bassins versants suivants: (i) Caniapiscau (38 000 km<sup>2</sup>), (ii) Eol et Eastmain (40 000 km<sup>2</sup>) (iii) La Grande-1 (2000 km<sup>2</sup>), (iv) La Grande-2, (31 000 km<sup>2</sup>) (v) La Grande-3 (29 000 km<sup>2</sup>), (vi) La Grande-4 (28 000 km<sup>2</sup>) et (vi) Laforge (9000 km<sup>2</sup>), À l'échelle mensuelle, ces données sont relativement de bonne qualité depuis 1985.

### 3.1.3 Observations météorologiques

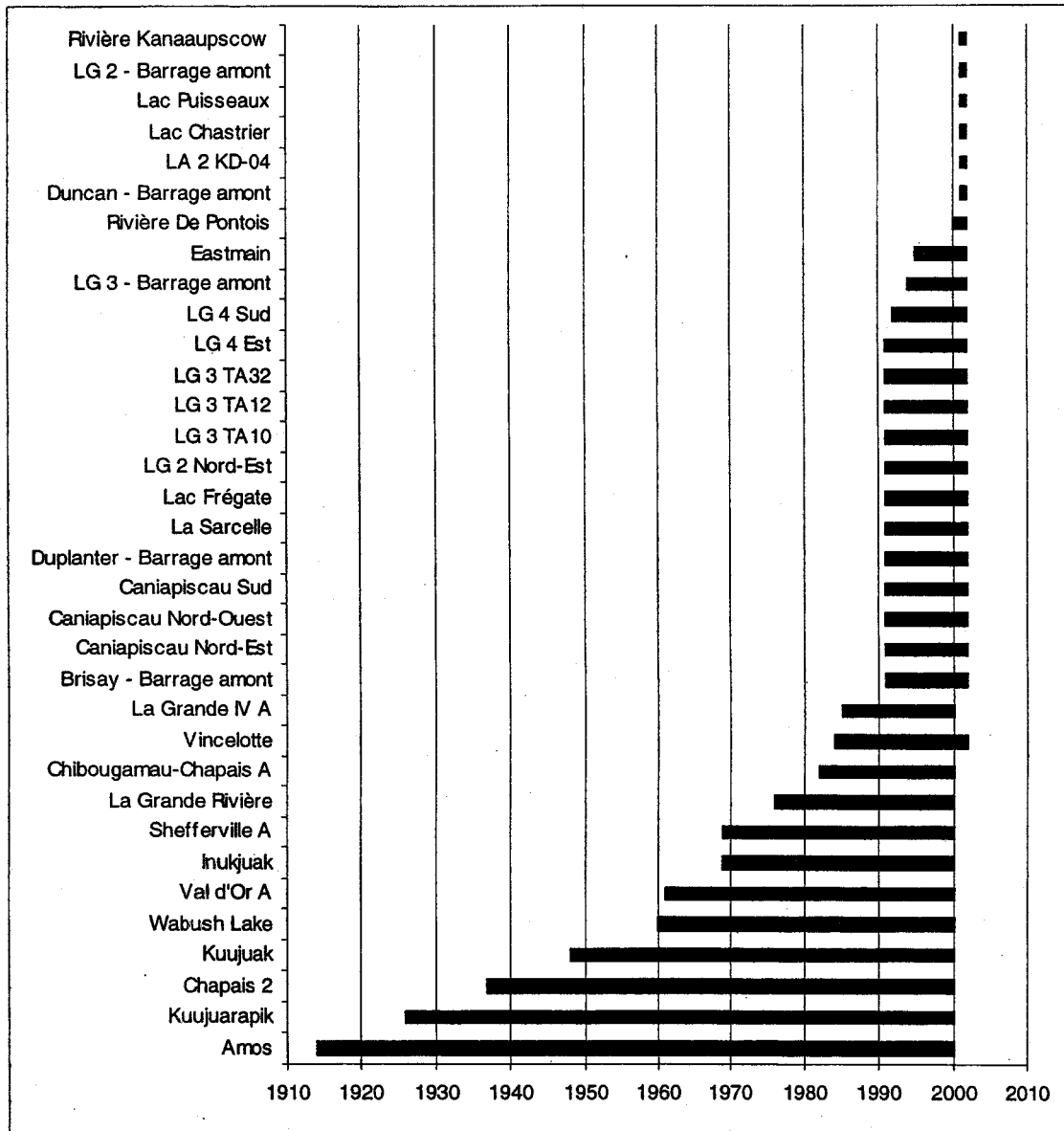
Les stations météorologiques encore actives, ayant des registres de précipitation quotidienne sur des périodes supérieures à dix ans, sont très rares dans le nord du Québec, comme le montre la figure 3.3. Seules trois de ces stations météorologiques rapportent aussi des mesures de rayonnement solaire. Il s'agit de Inukjuak, Kuujuak (mais uniquement depuis 1969) et La Grande-4. Parmi celles-ci, deux stations se trouvent aux limites Est et Ouest du complexe La Grande, soit Schefferville et La Grande Rivière, et toutes les stations mises en opération depuis le milieu de années 1980 se retrouvent à l'intérieur de ce complexe. À noter finalement que les pluviomètres à auget basculant de la SOPFEU n'ont pas été inclus dans cet inventaire.

### 3.1.4 Relevés nivométriques

HQ, le MENV du Québec ainsi qu'EC effectuent des relevés nivométriques (densité et hauteur de la neige) à des fréquences variables au cours de l'hiver. On a récupéré auprès de madame Marie-Josée Doray, météorologue chez HQ, l'ensemble des stations nivométriques actives, sans pouvoir, de façon simple, isoler les stations nordiques. On présente à l'annexe C une liste qui a été épurée rapidement et, par conséquent, qui devra être révisée. Les stations sont listées du nord vers le sud. Les stations dont le nom est du format Rxx appartiennent à HQ.

### 3.1.5 Réflexions sur les données sur grille régulière

Malgré la faible densité des données météorologiques dans le nord du Québec, il existe plusieurs jeux de données sur grille régulière qui couvrent l'ensemble de cette région. Ces données sont obtenues, soit à partir de sorties de modèles climatiques en mode réanalyse, soit par interpolation. Dans les deux cas, l'information de base est la même. Les observations *in situ* sont très éparées. Il faut être extrêmement prudent avec ces jeux de données. EC [Hopkinson, 2000] propose des données de précipitation à l'échelle mensuelle pour l'ensemble du Canada, à une résolution de 50 km. Comme le montre la figure 3.4, les stations utilisées dans le nord du Québec pour effectuer l'interpolation sont relativement peu nombreuses, et la distance entre chacune est très grande.



**Figure 3.3** Période d'observation pour les principales stations météorologiques en opération dans le Nord



**Figure 3.4 Stations de précipitation utilisées pour l'interpolation en 1990, Hopkinson [2000]**

Bien que des méthodes d'interpolation bien plus sophistiquées existent (CANGRID, PRISM, ANUSPLIN), on ne peut pas s'attendre à pouvoir obtenir une résolution de 50 km, même à l'échelle mensuelle. Afin de tester ces données sur grille, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus pour le Labrador, car la *Churchill Falls and Labrador Company* relève de façon manuelle les précipitations depuis 30 ans sur le bassin de la rivière Churchill (voir figure 3.5). Ces données, manifestement pas utilisées par Hopkinson [2000], sont fiables dans la mesure où elles sont fortement corrélées avec les apports naturels à Churchill Falls et avec les débits de la rivière Ashuanipi, comme le montre la figure 3.6.

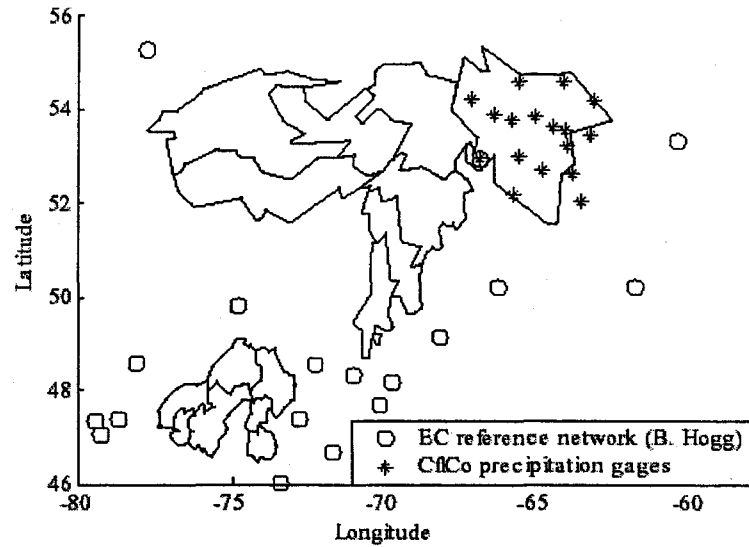


Figure 3.5 Localisation des stations de mesure des précipitations opérées par la compagnie CfiCo [Fortin, 2001]

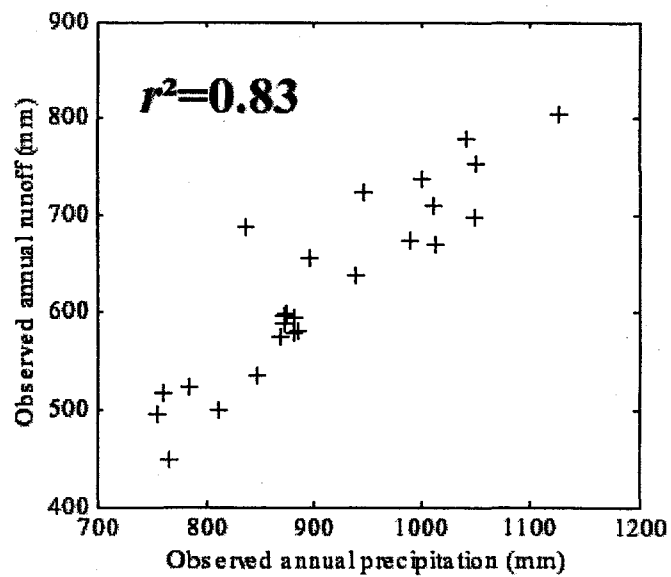


Figure 3.6 Corrélation entre les précipitations annuelles mesurées par la compagnie CfiCo et le ruissellement sur le bassin de la rivière Churchill mesuré par bilan hydrique [Fortin, 2001]

## 3.2 DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES

### 3.2.1 Modèle numérique d'altitude (MNA) et réseau hydrographique numérisé

Pour le Nord québécois, la Base nationale de données topographiques et Forêt Canada représentent deux fournisseurs de modèles numériques d'altitudes (MNA). Dans le cadre d'une étude du suivi du couvert nival du bassin versant de la rivière La Grande, à l'aide de données RADARSAT, Bernier *et al.* [1998] on fait la délimitation de trois sous-bassins amont à l'aide de PHYSITEL [Turcotte *et al.*, 2001]. Pour ce faire, ils ont obtenu un MNA selon une grille géographique d'un pas de 3 secondes d'arc. Pour le bassin versant de la rivière La Grande, cela représente une résolution de 92 m x 50 m. À l'aide de produits VIASAT Géotechnologie, l'équipe de Bernier *et al.* [1998] a généré deux MNA de 50 m x 50 m : (i) un MNA unifié du sous-bassin de La Grande-4 en projection UTM et (ii) un MNA unifié couvrant l'ensemble des trois sous-bassins amont (La Grande-4, Laforge et Caniapiscou) en projection Lambert (plus de 75 000 km<sup>2</sup> de superficie). Afin de limiter la taille du fichier de données sous forme matricielle, le deuxième MNA a été ré-échantillonné selon une maille de 100 m x 100 m. Un réseau hydrographique vectoriel (échelle 1 : 250 000), selon la projection Lambert Conique Conforme, a été utilisé conjointement avec des images Landsat-TM et le MNA pour la déduction automatique des contours à l'aide de PHYSITEL. Par ailleurs, il est important de noter que le MNA utilisé présentait plusieurs discontinuités aux limites des sept feuillets au 1 : 250 000 et que le relief peu accentué ainsi que la présence de nombreux lacs, barrages et digues ont forcé l'équipe de Bernier *et al.* [1998] à mettre sur pied une méthodologie propre à PHYSITEL pour la délimitation des bassins versants de cette région du Nord québécois.

### 3.2.2 Occupation du sol

Les images satellitaires Landsat-TM et NOAA-14 (captées par le radiomètre AVHRR : *Advanced Very High Resolution Radiometer*) représentent deux sources de données qui peuvent être traitées pour obtenir l'occupation du sol dans le Nord québécois. Dans le cadre d'un projet de validation des résultats du modèle régional de climat (MRC) canadien (MRCC), développé par le Groupe de modélisation régionale du climat de l'UQAM,

Philippin *et al.* [2001] du Centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS ont fait l'inventaire des classes d'occupation du sol, selon Cihlar et Beaulieu [1998], pour les bassins versants des rivières Bell, Waswanipi et Rupert. La plus petite unité d'inventaire était la maille de 28 km x 28 km (784 pixels, limite de résolution de 1 km, répartis dans une des 31 classes répertoriées). Le résultat de l'inventaire a été produit sous forme de pourcentage d'occupation du sol propre à chaque maille, dans un ensemble de 14 grandes classes. La carte d'occupation du sol du Canada publiée par Cihlar et Beaubien [1998], du Centre canadien de télédétection, est dérivée d'une analyse d'une image AVHRR montée sur le satellite NOAA-14. À noter que pour les applications dans les régions plus habitées du Québec, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAPAQ) possède des images (Landsat-TM de 30 m de résolution) classifiées de l'occupation du sol.

### 3.2.3 Types de sol et propriétés physiques des sols

La Commission géologique du Canada (CGC) de Ressources naturelles Canada (RNC), possède des cartes numérisées de la répartition spatiale des matériaux de surface au Canada, sur terre et sur de vastes étendues au large des côtes, à l'échelle 1 : 5 000 000 (<http://sts.gsc.nrcan.gc.ca>) [Fortin *et al.*, 2000]. Les matériaux de surface sont regroupés en quatre grandes catégories : matériaux alluviaux, lacustres, marins et glaciaires ainsi que le substratum rocheux. Les types de sols sont également inclus. Quant aux propriétés physiques des sols, elles peuvent être déduites des types de sol selon les tables de données disponibles dans la littérature et dont les principales sont incluses dans la base de données d'HYDROTEL, celles de Rawls *et al.* [1982] et de Cosby *et al.* [1984]. Par ailleurs, il faudra être vigilant étant donné la présence des nombreux sols organiques des milieux humides du Nord québécois [ex. : tourbières carex (*fen*), marais et tourbes à sphaigne (*bog*)]. Pour ce faire, si l'on se fie à Pauwels et Wood [1999a], il faudra prendre connaissance des travaux de Sellers *et al.* [1994] qui présentent une description détaillée de l'occupation du sol et des caractéristiques des types de sol des différents sites d'études du programme de recherche BOREAS. Il faudrait également consulter le paramétrage hydraulique des sols organiques de tourbières du schéma de surface CLASS rapporté par Letts *et al.* [2000]. Par ailleurs, il serait intéressant d'examiner la base de données développée par Reynolds *et al.*, 2000] sur la capacité de rétention en eau des sols inclus dans la carte mondiale numérisée (1 : 5 000 000) de la FAO (*Food and Agriculture*



*Organization*). À noter que pour les applications dans les régions plus habitées du Québec, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAPAQ) possède des cartes numérisées de contours pédologiques qui peuvent être utilisées pour déterminer les types de sol ainsi que leur propriétés physiques (voir Duchemin *et al.* [2001]).

### **3.2.4 Propriétés du couvert végétal**

L'indice foliaire, communément connu sous le sigle de langue anglaise LAI (*Leaf Area Index*), représente une des propriétés du couvert végétal requise par les schémas de surface des modèles de climatologie ainsi que par la plupart des modèles hydrologiques. Masson *et al.* [2002] ont produit une carte de 1 km de résolution, à l'échelle planétaire, de cette importante donnée (*i.e.*, paramètre de surface) de base. Cette carte est disponible après une entente avec Météo France. Cependant, l'utilisation de cette carte devra être précédée par une comparaison entre la carte de l'occupation du sol pour le Nord québécois que Masson *et al.* [2002] ont utilisée pour la dérivation du LAI et la carte d'occupation du sol qui sera utilisée dans le cadre de ce projet. À noter que l'évolution du LAI peut également être dérivée des images hebdomadaires NOAA AVHRR à partir de l'indice de la différence de végétation normalisé (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) [Biftu et Gan, 2001].

## 4. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

---

Ce chapitre est divisé en cinq sections. On y présente tout d'abord une brève discussion sur les échelles spatiales et temporelles de modélisation, suivie d'une discussion préliminaire sur le potentiel d'application des modèles HSAMI [Fortin, 2000] et HYDROTEL [Fortin *et al.*, 2001a,b] sur les grands bassins nordiques du Québec. Puis, on fait des descriptions sommaires des approches de modélisation hydrologique des milieux humides et des grands plans d'eau (*i.e.*, lacs et réservoirs). Finalement, on introduit une discussion sur le choix d'un bassin versant pilote.

### 4.1 ÉCHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES

Le mot échelle réfère à un temps ou à une longueur caractéristique d'un processus, d'une observation ou d'un modèle [Bloschl et Sivapalan, 1995]. Les processus sont souvent observés et simulés sur de courtes échelles spatiales et temporelles mais, dans la pratique, l'estimation des processus est souvent requise à l'échelle des grands bassins versants sur de longues périodes. C'est pourquoi, avant même de procéder au développement ou à l'application d'un modèle, il faut identifier clairement la dimension spatio-temporelle de la problématique et son contexte d'application ainsi que la question à laquelle on désire répondre. Certaines problématiques peuvent requérir une évaluation à des échelles spatiales et temporelles très fines (ex. : l'ordre du mètre carré et de la minute pour la propagation d'une onde de crue ou la contamination toxique des eaux de surfaces) alors que d'autres ne demandent qu'une évaluation à des échelles plus grandes (ex. : l'ordre du kilomètre carré et du mois pour la prédiction des apports pour des fins de production hydroélectrique). Dans le premier cas, il faut que la modélisation s'accompagne d'une description fine de l'hétérogénéité spatiale du bassin versant, tandis que dans le deuxième cas, une description plus globale est convenable.

C'est ainsi que les échelles spatiales et temporelles de la problématique détermineront les échelles caractéristiques à modéliser. Elles influenceront également la comparaison des résultats de simulation avec les données observées et l'interprétation des écarts qui en découlent, par exemple, la comparaison d'une valeur simulée à l'échelle de la journée et à

l'échelle de la parcelle avec celle mesurée à un endroit précis dans la parcelle à un instant donné de la journée. De plus, ce choix d'échelles s'accompagne d'un besoin d'identifier les principaux processus responsables de l'évolution et de la variation spatiale des variables à considérer. Ce qui signifie que les processus gouvernant les variables du bassin versant à des échelles caractéristiques inférieures à celles représentées par la modélisation doivent être négligés. C'est pourquoi il existe en hydrologie des représentations mathématiques différentes d'un phénomène selon les échelles considérées [Shuttleworth, 1988].

## **4.2 POTENTIEL D'APPLICATION DES MODÈLES HSAMI ET HYDROTEL SUR DES GRANDS BASSINS NORDIQUES**

HQ utilise actuellement, de manière opérationnelle pour l'ensemble de ses besoins en prévision hydrologique incluant ceux du Nord québécois, le modèle hydrologique conceptuel et global HSAMI [Fortin, 2000] dont le développement date maintenant de plus de 20 ans. En parallèle, HQ et le CEHQ du MENV mettent en place progressivement, sur des bassins du sud du Québec, le modèle hydrologique distribué HYDROTEL [Fortin *et al.*, 2001a,b] (voir annexe B) dont les caractéristiques plus modernes, notamment le recours à des algorithmes qui, tout en conservant une part d'empirisme, se rapprochent plus des modèles à base physique, et permettent d'espérer des simulations d'une qualité supérieure. Ce choix de modèles correspond à celui de l'utilisateur principal de la modélisation pour les systèmes du nord, HQ, et couvre assez bien le spectre des modèles opérationnels actuellement disponibles dans la communauté (voir Singh [1995], Singh et Frevert [2002a,b]) – un modèle global basé sur des bilans de masse (HSAMI) et un modèle distribué basé sur des lois physiques (HYDROTEL). Une réflexion sur les améliorations à apporter à la modélisation hydrologique propre aux bassins du Nord québécois peut très bien être menée dans la mouvance de ces deux modèles.

Afin de mieux cerner les contributions possibles de ces deux modèles aux études sur les CC, il est souhaitable d'exposer les forces et les faiblesses des deux modèles pour leur application sur des grands bassins versants, incluant plusieurs lacs et milieux humides interconnectés, caractérisés par des réseaux météorologique et hydrométrique de faibles

densités. Dans le cas d'HYDROTEL, cette synthèse doit aussi s'accompagner d'un exposé des contraintes actuelles d'application de la version du logiciel d'accompagnement PHYSITEL [Turcotte *et al.* 2001] dans le Nord québécois. À l'étape de cette étude d'avant-projet, on discute de manière préliminaire des forces et faiblesses des modèles HSAMI et HYDROTEL tout en les confrontant à une proposition subjective de propriétés que devraient avoir un modèle hydrologique capable d'estimer le plus adéquatement possible les réactions réelles des systèmes hydriques nordiques suite à des CC. Une analyse plus approfondie de ces propriétés fera partie de l'étude proprement dite.

Parmi les principaux avantages du modèle HSAMI, il faut compter la simplicité d'utilisation. HSAMI a l'avantage de posséder des algorithmes de calcul qui sont relativement peu intensifs par rapport à HYDROTEL qui utilise des algorithmes de calcul plus intensifs. HSAMI est actuellement installé sur l'ensemble des bassins versants d'intérêt pour HQ et, de toute façon, pourrait être mis en place très rapidement sur un nouveau bassin. L'essentiel de la difficulté d'installation d'HSAMI consiste à effectuer le calage des paramètres du modèle; activité pour laquelle le personnel d'HQ a déjà une bonne connaissance et pour laquelle des algorithmes automatiques sont disponibles ou en voie de développement.

HYDROTEL a le désavantage de ne jamais avoir été installé dans le Nord et d'être de manière générale lourd à mettre en place. À ce sujet, il faut noter au moins deux difficultés. D'abord, le bassin versant doit être découpé assez finement en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) à partir d'un logiciel d'appoint (PHYSITEL) qui fait appel à de nombreuses données physiographiques (topographie, réseau de lacs et de rivières). Or, un pareil découpage spatial, selon les règles actuellement utilisées dans HYDROTEL, ne pourrait pas être supporté par la qualité des données physiographiques de base disponibles dans le Nord québécois. De même, en supposant que des données de meilleure qualité deviennent disponibles, la mécanique algorithmique de PHYSITEL, compte tenu du nombre important de lacs, serait poussée à sa limite extrême comme l'a démontré les tests effectués sur le complexe La Grande [Bernier *et al.*, 1998] (voir section 3.2.1). Par ailleurs, le calage du modèle n'est pas trivial et ce, même pour les bassins versants du sud du Québec où les données sont plus abondantes. Il y a donc lieu d'anticiper des difficultés supplémentaires pour caler le

modèle avec les données disponibles dans le Nord. Avec HYDROTEL, il faut s'attendre à un décalage entre le niveau de complexité du modèle et celui des données disponibles.

Par ailleurs, la simplicité d'HSAMI est aussi son principal désavantage dans la mesure où certains comportements hydrologiques risquent d'être simulés moins adéquatement. Ainsi, une approche intégrant globalement le bassin versant ne permet pas de tenir compte, avec suffisamment de détails, de la variabilité interne des précipitations, des types de sol et de l'occupation du sol. Ainsi, HSAMI ne permet pas de bien séparer les processus distincts qui ont lieu à l'intérieur du bassin versant sur des occupations de sol distinctes (lacs, milieux humides, parties terrestres, etc.). Ceci est d'autant plus important dans cette étude dans la mesure où un objectif se rapportant à la modélisation des lacs et des milieux humides est visé. Par ailleurs, il faut demeurer pleinement conscient que, bien qu'il possède une structure spatiale qui permette de simuler des processus distincts, aucun algorithme n'est actuellement disponible dans HYDROTEL pour tenir compte des effets spécifiques des lacs et des milieux humides. Dans un autre ordre d'idée, HSAMI (et ce contrairement à HYDROTEL) ne peut pas tirer profit de l'ensemble des données potentiellement disponibles. Par exemple, les données de rayonnement solaire et de vent qui sont disponibles en sortie des modèles climatologiques planétaires (MCP) ou des modèles climatologiques régionaux (MCR) ne peuvent pas être mises à profit dans la simulation des processus avec HSAMI alors que le modèle HYDROTEL peut, quant à lui, être adapté interactivement pour tenir compte explicitement de ces données. On peut donc s'attendre à ce qu'HYDROTEL soit mieux adapté pour évaluer les impacts des CC qui ne toucheraient pas uniquement aux températures et précipitations.

Il y a lieu de croire, pour atteindre les objectifs de l'étude proposée, que le modèle HSAMI ne permette pas de modéliser avec suffisamment de précision la variabilité interne des bassins versants quant aux comportements hydrologiques des lacs et des milieux humides. Inversement, la lourdeur du modèle HYDROTEL ne sera pas, faute de données de base suffisantes, compensée par une amélioration proportionnelle des résultats escomptés. Il semble que la voie à suivre est plutôt de préconiser un modèle intermédiaire moins gourmand qu'HYDROTEL, notamment en ce qui a trait au découpage en entités spatiales qui pourrait être moins détaillé, mais permettant d'inclure des traitements algorithmiques selon le type d'occupation du sol (ex. : les zones humides, les

lacs, les versants, etc.) dans le même esprit que certains modèles macrohydrologiques (ex. : le modèle SWB de Schaake *et al.* [1996] ou les différentes versions du modèle VIC [ex. : Liang *et al.*, 1994; Nijssen *et al.*, 2001a,b]. En ce sens, la solution qui sera étudiée dans le projet consistera à adapter la version actuelle d'HYDROTEL (dont le design informatique facilite les ajustements) pour qu'il colle mieux aux prérogatives précédentes. Il est fort possible que notre réflexion conduise à simplifier la modélisation au point où le pas de temps de calcul d'HYDROTEL, actuellement de 24 heures ou moins, soit allongé. Cependant, ceci devra être fait avec soin étant donné le rôle important que joue l'évolution de l'humidité du sol dans les fractions infiltration et ruissellement.

Finalement, dans la mesure où un HYDROTEL intermédiaire est développé, il pourrait se révéler très utile pour analyser les sorties de MCR. L'utilisation d'UHRH suffisamment grande ( $10^2$  km<sup>2</sup> ou latitude/longitude) faciliterait l'utilisation des résultats des mesures satellitaires et des diverses banques de données utilisées couramment dans divers MCR. En intégrant pour chaque UHRH l'information concernant la couverture végétale, les propriétés du sol et la végétation, il serait possible ainsi de modéliser plus correctement les processus hydrologiques. On pourrait également profiter des diverses expériences sur les impacts de l'agrégation/désagrégation des schémas de surface de certains MCR (ex : ISBA de Météo France avec Rhône-Agg [Ledoux *et al.*, 2002]).

### 4.3 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES MILIEUX HUMIDES

Un milieu humide est un écosystème dans lequel l'eau persiste au niveau ou au-dessus de la couche minérale de sol sur une période de temps assez longue pour promouvoir le développement de types de sol et de végétation adaptés à ces conditions particulières [NWWG, 1988]. Dans la plupart des milieux humides du Canada, le contenu élevé en eau et les basses températures font en sortes que la production de matériel végétal excède le taux de décomposition, ce qui favorise l'accumulation de la matière organique appelée tourbe. Il existe plusieurs classes de milieux humides. On y dénombre les communautés d'arbres feuillus en sols inondés tels que les plaines inondables (*swamp*), les communautés d'herbacées en sols inondés (*marsh*), les communautés de tourbes à sphaigne ou de conifères enracinés dans la tourbe (*bog*), les communautés de tourbières

carex où l'eau circule (*fen*), pour ne nommer que celles-là [NWWG, 1988]. Dans l'éventualité d'un réchauffement de ces milieux, l'abaissement du niveau d'eau entraînerait une décomposition accrue de la matière organique accumulée et, par conséquent, ces milieux passeraient de puits à sources de CO<sub>2</sub>.

Les milieux humides ont été étudiés intensivement dans le cadre de programmes internationaux de recherche tels que BOREAS et GEWEX, ou encore dans le cadre de programmes nationaux de recherche supportés par le CRSNG (ex. : Lafleur *et al.* [1997]; Baldocchi *et al.* [1997]; Quinton et Marsh [1999]; Price et Waddington [2000]). Les données observées ont surtout été utilisées pour l'avancement des connaissances et le support à la modélisation des schémas de surface des modèles climatiques (ex. : Pauwels et Wood [1999a,b]; Comer *et al.* [2000]; Munro *et al.* [2000]; Letts *et al.* [2000]) ou encore pour développer des modèles hydrologiques de milieux humides incluant bilans de masse et d'énergie pour prédire l'impact des CC (ex. : Boudreau et Rouse [1995]; Rouse [1998]). Les schémas de surface sont le résultat d'efforts de modélisation mécaniste des bilans de masse et d'énergie de la couche de surface de la partie terrestre (basés sur des lois physiques de la mécanique classique et quelques relations phénoménologiques [Dickinson, 1983]) (ex. : CLASS [Verseghy [1991, Verseghy *et al.* [1993], ISBA [Noilhan et Mahfouf, 1996], SEWAB [Mengelkamp *et al.*, 1999], pour ne nommer que ceux-là).

Plusieurs études estivales de terrain, axées sur l'observation des bilans de masse et d'énergie, ont démontré l'importance des processus d'évaporation, d'écoulement et de stockage dans les milieux humides. Seuls les résultats de quelques études répertoriées sont rapportés dans les paragraphes suivants. Une revue exhaustive qui permettra de supporter les efforts de modélisation fera l'objet du projet que l'on propose.

Roulet [1990] et Brassard *et al.* [2000] ont noté que l'écoulement dans les milieux humides est caractérisé par deux zones en contact hydraulique continu, l'écoulement de surface (dans la couche de matériel au-dessus de la couche organique) et l'écoulement hypodermique (dans la partie saturée de la couche organique). La plupart des modèles d'écoulement traite les milieux humides en couplant les processus de surface avec les processus d'écoulement hypodermique et de stockage de la couche organique des milieux. On peut penser ici au modèle de McKillop *et al.*, [1999] qui bénéficie du couplage

d'un modèle hydrologique de milieux humides avec un modèle d'écoulement à surface libre avec un réseau de tronçons.

En ce qui a trait à l'évaporation et au stockage, ce qu'il faut surtout noter c'est que chaque type de milieu humide possède un bilan hydrique particulier. À titre d'exemple, Boudreau et Rouse [1995] ont étudié le bilan hydrique de cinq types de milieux humides des basses terres, recouvrant le permafrost, de la Baie d'Hudson : milieu humide constitué de plantes vasculaires (*sedge-dominated wetland*), versant de lichens (*upland lichen-heath*), lacs et étangs de la toundra (*tundra lakes and ponds*), milieu humide de bouleaux et peupliers, (*willow-birch wetland*) et forêt clairsemée d'épinettes (*open spruce forest*). Les résultats de ces travaux, pour l'été 1991, indiquent que le ruissellement dépend du contenu initial en eau des tourbières ainsi que de la profondeur de la couche organique. Il semble, lorsque le niveau d'eau baisse en bas de la surface de la tourbière, que le milieu peut rester très humide sous des conditions sèches, ce qui fait ressortir le manque de mobilité de l'eau. Ceci est contraire au comportement des tourbières sous des conditions humides ou des conditions de gel près de la surface lors de la fonte du couvert nival. Des observations du bilan d'énergie ont démontré que le rayonnement net était plus élevé sur les lacs et les étangs que sur les tourbières et le versant de lichen. Plus de la moitié du rayonnement contribuait au flux de chaleur latente et l'évaporation excédait la précipitation au cours de la saison estivale. En dépit de cela, l'écoulement demeurait important, ce qui suppose une contribution importante de l'eau souterraine. Les étangs et le versant de lichen subissaient les plus importants changements négatifs de stockage au cours de la période estivale. Les résultats ont également démontré que le drainage de surface des versants vers les basses terres alimentait en eau les tourbières et le réseau hydrographique. À noter que d'autres études de terrain viennent corroborer ces résultats (ex. : Branfireun et Roulet [1998]; Quinton et Roulet [1998]; Metcalfe et Buttle [1999]).

#### 4.4 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES LACS ET RÉSERVOIRS

Dans les bassins versants où les lacs et les réservoirs occupent un pourcentage élevé de l'occupation du sol (de l'ordre de 20%), il faut bien tenir compte des transferts horizontaux et verticaux de masse et d'énergie pour fermer le bilan hydrique et synchroniser les



écoulements à l'échelle du bassin versant. Le bilan hydrique [ $\text{m}^3$ ] d'un lac ou réservoir sur une période  $\Delta t$  s'écrit comme suit [Dingman, 1994] :

$$\Delta V = P + S_{in} + G_{in} - S_{out} - G_{out} - E \quad (4.1)$$

où  $P$ , est le volume de précipitation,  $S_{in}$  et  $S_{out}$ , les volumes d'eau de surface transitant par le plan d'eau,  $G_{in}$  et  $G_{out}$ , les volumes d'eau souterraine transitant par le plan d'eau,  $\Delta V$  la variation du volume d'eau dans le plan d'eau et  $E$ , le volume d'eau évaporée. À noter que les besoins en énergie régularisent fortement  $S_{in}$  et  $S_{out}$ . Au niveau de la modélisation des processus d'évaporation<sup>3</sup>, d'écoulements provenant de la partie terrestre et du réseau hydrographique de même que l'accumulation et la fonte de la neige, la version actuelle d'HYDROTEL offre, en première approximation, un choix satisfaisant d'algorithmes bien que ces derniers ne soient pas spécifiquement adaptés au contexte des lacs et réservoirs dans le module du bilan vertical (voir annexe B). Il en est autrement en ce qui concerne la formation et la fonte de la glace.

Afin d'établir une base de discussion sur les processus hydrologiques des lacs et réservoirs, on introduit ici l'équation du bilan d'énergie de la couche de surface d'un plan d'eau quelconque [Brutsaert, 1984; Stull, 1988] :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = R_n - H - G + A_w - \rho_w L_e E' \quad (4.2)$$

où  $R_n$ , est le rayonnement net (courtes et longues longueurs d'onde) reçu à la limite supérieure de la couche de surface [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $\rho_w$ , la densité de l'eau,  $L_e$ , la chaleur latente de vaporisation [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ],  $E'$ , le flux massique d'évaporation [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $H$ , le flux de chaleur sensible à la limite supérieure de la couche de surface [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $G$ , le flux d'énergie quittant la limite inférieure de la couche de surface [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $A_w$ , le flux d'énergie par advection dans la couche de surface (ex. : par les précipitations ou l'écoulement d'eau contenant de la chaleur latente) et  $\partial W/\partial t$ , le taux de changement d'énergie dans la couche de surface. Dans le cas où le plan d'eau est couvert de glace, il faut remplacer  $L_e$  par la chaleur

<sup>3</sup> Par exemple, Gibson *et al.* [1996] ont démontré que les résultats de simulation de l'évaporation journalière d'un lac de l'Arctique continental canadien obtenus avec le modèle de Priestley-Taylor étaient similaires à ceux obtenus avec un bilan d'énergie incluant le rapport Bowen.

latente de sublimation,  $L_s$ , et inclure un terme représentatif du flux de chaleur de fusion (ex. : voir de Bruin et Wessels. [1988]). Ce dernier terme sera positif lors de la formation de glace et à l'inverse, il sera négatif lors de la fonte de glace. On peut aussi introduire dans le bilan d'énergie le rapport Bowen (flux de chaleur sensible divisé par le flux de chaleur latente) :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = R_n - G + A_w - \rho_w L_e (1 + Bo) E' \quad (4.3)$$

Dans le cas où le bilan d'énergie est écrit pour un plan d'eau profond, les termes de droite de l'équation (4.2) ou (4.3) représentent la condition à la frontière supérieure du bilan d'énergie thermique du lac ou réservoir (voir modèle unidimensionnel d'évaporation de lacs de Hostetler et Bartlein [1990]). Ce dernier bilan peut alors être utilisé pour prédire la température de l'eau en fonction de la profondeur d'eau et, par conséquent, la formation et la fonte de glace. La solution de ces bilans demande une série de données météorologiques incluant la température (bulbes sec et mouillé), vitesse du vent à une hauteur de référence (ex. : 2 ou 10 m), la couverture de nuages, le rayonnement solaire incident, l'albédo de courtes longueurs d'onde et la pression vapeur dans l'air. Pour les cas où l'on a accès à un minimum de données, Shuttleworth [1993] présente un algorithme et les équations de bases qui permettent d'évaluer l'énergie disponible pour l'évaporation.

Cette brève présentation suffit pour illustrer que la modélisation hydrologique de lacs et de réservoirs s'arrime avec la modélisation des processus physiques à la surface de la terre [Dickinson, 1983] par l'intermédiaire de schémas de surface tels que ceux utilisés dans les MCR et les MCP. Cependant, l'application des schémas de surface demeure problématique, car les données météorologiques requises pour ce genre de modélisation ne sont pas toujours disponibles dans le Nord québécois (voir chapitre 3). Il faut donc penser à développer une approche hybride entre les schémas de surface (ex. : CLASS [Verseghy [1991, Verseghy *et al.* [1993], ISBA [Noilhan et Mahfouf, 1996], SEWAB [Mengelkamp *et al.*, 1999], pour ne nommer que ceux-là) et les modèles de lacs et réservoirs (ex. : voir modèles de Finch [2001] et Hostetler et Bartlein [1990]) qui tiennent compte des bilans de masse et d'énergie et les modèles basés sur seulement les bilans de masse (ex. : voir modèle CEQUEAU [Morin, 2002]). De tels modèles hybrides existent

pour la modélisation de la fonte du couvert nival, les modèles degrés jours – bilan d'énergie. On pense ici, entre autres, au modèle utilisé dans HYDROTEL et au modèle SRM de Kustas *et al.*, [1994]. Une analyse plus approfondie du développement d'un modèle hybride de modélisation hydrologique de lacs et réservoirs fera partie de l'étude proposée.

#### 4.5 SOUS-BASSIN VERSANT PILOTE

Le choix d'un bassin versant pour développer et valider un HYDROTEL intermédiaire est crucial. Peu de bassins, suffisamment grands en milieu de la forêt boréale nordique au Québec, possèdent tant des données hydrométriques et physiographiques que de l'information climatologique et météorologique pertinente. Le bassin de la rivière Ashuanipi (Terre-Neuve) possède certains avantages qui faciliteraient le développement et la validation. Pour ce bassin versant d'une superficie de 19 000 km<sup>2</sup>, situé à la limite Ouest du bassin de la rivière Churchill, et dont il est un sous-bassin, l'on dispose de données hydrométriques journalières continues depuis septembre 1954. La nature du sol et du couvert végétal peut être considérée comme représentative de cette partie de la forêt boréale avec son alternance de lacs et marécages. Pour les données climatologiques, l'on dispose pour Schefferville/Knob Lake, situé à l'extrémité Nord du bassin, des données pour la période 1948 à 1993. Quant à l'extrémité Sud, les stations de Wabush (1953- ) et Fermont (1976- ) devraient être capables de fournir l'information requise. Une station de recherche climatologique de l'université McGill a fonctionné pendant de nombreuses années dans le voisinage de Knob Lake (travaux sur l'hydrologie des tourbières) et l'on pourrait, si nécessaire, pouvoir trouver d'autres informations climatologiques. Enfin, le réseau de la *Churchill Falls and Labrador Company* possède des données mensuelles de précipitations pour 17 sous-bassins versants de la rivière Churchill ainsi que plusieurs relevés de neige à ces 17 sites. L'autre alternative serait d'utiliser le bassin versant supérieur de la rivière Péribonka; avec le réseau hydrométéorologique d'Alcan. Incluant le lac Manouane et Chute-des-Passes, cela représente un bassin de 16 000 km<sup>2</sup>. Une analyse plus approfondie de ce choix fera partie de l'étude proprement dite.

## 5. ÉQUIPE DE RÉALISATION

---

Le responsable administratif du projet est Jean-Pierre Villeneuve du Centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS (ETE), alors que le responsable des activités est Alain N. Rousseau (ETE). Les responsables et collaborateurs des différents volets de l'étude d'avant-projet sont présentés au tableau 5.1. À noter que d'autres collaborateurs pourraient se joindre au projet.

Tableau 5.1 Équipe de réalisation

Volet	Chercheurs responsables	Collaborateurs
<i>Caractérisation hydroclimatique et physiographique</i>	Alain N. Rousseau (ETE) Michel Slivitzky (ETE)	Richard Turcotte (CEHQ) Vincent Fortin (IREQ)
<i>Inventaire des données physiographiques et hydrométéorologiques</i>	Vincent Fortin (IREQ) Alain N. Rousseau (ETE)	Richard Turcotte (CEHQ) J.-P. Fortin (ETE)
<i>Modélisation hydrologique</i>	Alain N. Rousseau (ETE)	Richard Turcotte (CEHQ) J.-P. Fortin (ETE)



## 6. CONCLUSION

---

Ce projet vise à améliorer nos connaissances sur l'hydrologie des lacs et des terres humides, tout particulièrement sur les processus verticaux (*i.e.*, évaporation, accumulation et fonte de neige) et horizontaux (écoulement de l'eau) des systèmes hydriques du Nord québécois. Plus précisément, le projet a pour but de répondre aux trois questions fondamentales suivantes : (i) Quel a été le contexte hydroclimatique des bassins versants nordiques actuellement exploités, ou à fort potentiel hydroélectrique, au cours du dernier siècle ? (ii) Quel est le rôle des milieux humides et lacs interconnectés dans le cycle hydrologique de ces bassins versants ? et (iii) Quelle est la contribution de ces milieux aux apports saisonniers et annuels ?

Au chapitre 2, on a présenté le contenu d'une base de données (BD) planétaire pouvant servir à la caractérisation de l'évolution hydroclimatique du climat de surface des systèmes hydriques nordiques du Québec, la BD du *Climatic Research Unit (CRU)* de l'*University of East Anglia* et introduit une caractérisation préliminaire de la physiographie de la région de la Baie-James.

Au chapitre 3, on a fait un premier inventaire des données hydrométéorologiques et physiographiques pour supporter la modélisation hydrologique dans le Nord québécois. On a pu constater que les données existent, mais que leur qualité n'est pas toujours aussi bonne qu'on le souhaiterait. Ceci étant dit, il semble que ce sont les données hydrométéorologiques qui soulèvent le plus d'interrogations tant au niveau de la longueur des chroniques que de la représentativité spatiale.

Les résultats des travaux entrepris dans le cadre de la modélisation hydrologique, rapportés au chapitre 4, ont permis d'illustrer que, jusqu'à maintenant, les efforts de modélisation des milieux humides et des lacs rapportés dans la littérature ont surtout porté sur des approches de bilans de masse et d'énergie et ce, afin de bien représenter le rôle de ces milieux dans les schémas de surface des modèles climatologiques. Une comparaison préliminaire des modèles HSAMI et HYDROTEL a indiqué que la voie à suivre est de préconiser le développement d'un modèle intermédiaire qui permettra d'inclure des traitements algorithmiques selon le type d'occupation du sol (ex. : les zones

humides, les lacs, les versants, etc.) dans le même esprit que certains modèles macrohydrologiques. Ceci étant dit, un examen plus approfondi de la disponibilité de données sur le rayonnement et sur les possibilités de classification de l'occupation du sol, surtout au niveau des différents types de milieux humides, sera nécessaire avant de décider des approches mécanistes de modélisation qui seront intégrées à HYDROTEL. On a également présenté une discussion sur le choix d'un bassin versant pour développer et valider un HYDROTEL intermédiaire. Peu de bassins, suffisamment grands en milieu de la forêt boréale nordique au Québec, possèdent tant des données hydrométriques et physiographiques que de l'information climatologique et météorologique pertinente. Par contre, on a pas encore identifié définitivement un bassin versant pilote.

Les résultats des activités de travail de cette étude d'avant-projet ont permis d'illustrer, non seulement la faisabilité de la méthodologie proposée en février 2002, mais également de démontrer l'efficacité et la grande qualité de l'équipe de réalisation en place (chapitre 5). Finalement, il est important de noter que les travaux de modélisation de ce projet pourraient bénéficier des études de terrain effectuées par l'équipe du CEN de l'Université Laval qui travaille à la caractérisation des zones humides en région nordique. Les résultats de ces études permettront de valider partiellement l'approche de modélisation des milieux humides et ce, même si ces études se dérouleront à de plus petites échelles spatiales.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Baldocchi, D.D., C.A. Vogel et B. Hall. (1997) Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy. *Journal of Geophysical Research* **102**(D24): 28,939-28,951.
- Bernier M., Fortin J.P., Gauthier Y., Turcotte R. et Royer A. (1998). Suivi du couvert nival à l'aide des données radarsat, rapport d'étapes pour Prévisions et Ressources Hydriques Hydro-Québec. *Rapport No 523-c, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.*
- Biftu, G. F., et T. Y. Gan. (2001). Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. *Journal of Hydrology* **244**: 137-156.
- Boudreau, L.D., et W.R Rouse. (1995) The role of individual terrain units in the water balance of wetland tundra. *Climate Research* **15**(1): 31-47.
- Branfireun, B.A., et N.T. Roulet. (1998) The baseflow and storm flow hydrology of a precambrian shield headwater peatland . *Hydrological Processes* **12**(1): 57-72.
- Brassard, P., J.M. Waddington, A.R. Hill et N.T. Roulet. (2000) Modelling ground-water surface water mixing in a headwater wetland: implication for hydrograph separation. *Hydrological Processes* **14**(15): 2697-2710.
- Brutsaert, W. (1984). *Evaporation into the Atmosphere, Theory, History and Applications*. D. Reidel Publishing Company, Boston, MA.
- Cilhar, J., et J. Beaulieu. (1998). *Land Cover of Canada Version 1.1..* Special Publication, NBIOME Project. Produced by the Canada Centre for Remote Sensing and the Canadian Forest Service, Natural Resources Canada. Disponible sur CD ROM auprès du Centre canadien de télédétection, Ottawa, ON.
- Comer, N. T., P. M. Lafleur, N. T. Roulet, M. G. Letts, M. Skarupa et D. Versegny. (2000). A test of the Canadian Land Surface Scheme (CLASS) for a variety of wetland types. *Atmosphere-Ocean* **31**(1): 161-179.
- Cosby, B. J., G. M. Hornberger, R. B. Clapp et T. R. Ginn. (1984). A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research* **20**(6): 682-690.
- De Bruin, H. A. R., H. R. A. Wessels. (1988). A model for the formation and melting of ice in surface waters. *Journal of Applied Meteorology* **27**: 164-173.
- Dickinson, R. E. (1983). Land surface processes and climate – surface albedos and energy balance. *Advances in Geophysics*, **25**: 305-353.
- Dingman, S.L. (1994). *Physical Hydrology*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.



- Duchemin, M., A. N. Rousseau, L. Lamontagne, et J.-P. Villeneuve. 2001. Utilisation des technologies géomatiques pour spatialiser le facteur K d'érodabilité des sols du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, **81**: 423-437.
- Finch, J. W. (2001). A comparison between measures and modelled open water evaporation from a reservoir in south-east England. *Hydrological Processes* **15**(14): 2771-2778.
- Fortin, V. (2001). Assessment of Regional Trends and Impacts on Hydro-Québec, *Atelier scientifique national sur les tendances de la série chronologique hydrologique du Canada*, 8-9 mai 2001.
- Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. *Rapport de recherche, révision 1.5, Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)*, Varennes, 68p.
- Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fitzback et J. P. Villeneuve. (2001a). A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1: description of the model. *Journal of hydrologic Engineering*, **6**(2): 91-99.
- Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fitzback et J. P. Villeneuve (2001b). A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: application to Chaudière watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, **6**(2): 100-108.
- Gibson, J. J., T. D. Prowse et T. W. D. Edwards. (1996). Evaporation from a small lake in the continental Arctic using multiple methods. *Nordic Hydrology* **27**: 1-24.
- Giorgi, F. (2002). Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations. *Climate Dynamics* (publication en ligne, 12 janvier 2002).
- Hayeur, G. (2001). *Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000*. Montréal, Hydro-Québec. 110p.
- Hopkinson, R. (2000). *Canada Gridded Climate Data 1961 to 1990 Documentation*, Meteorological Service of Canada, Prairie and Northern Region, Environment Canada October 10, 2000
- Hostetler, S. W., et P. J. Bartlein. (1990). Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resources Research*, **26**(10): 2603-2612.
- Kustas, W. P., A. Rango et R. Uijlenhoet. (1994). A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. *Water Resources Research*, **30**(5): 1515-1527.
- Lafleur, P.M., J.H. McCoughey, D.W. Joiner, P.A. Bartlett et D.E. Jelinski. (1997) Seasonal trends in energy water and carbon-dioxide fluxes at a northern boreal wetland. *Journal of Geophysical Research* **102**(D24): 29009-29020.

- Lavigne, M.-P., A. N. Rousseau, R. Turcotte et J.-P. Villeneuve. (2002). Détermination de l'impact du déboisement à grande échelle sur le régime hydrologique d'un bassin versant (Article en préparation pour la *Revue canadienne de génie civil*)
- Ledoux, E., P. Etchevers, C. Golaz, F. Habets, J. Noilhan et S. Voirin. [2002]. Regional simulation of the water budget and riverflows with the ISBA-MODCOU coupled model : application to the Adour and Rhone Basins. Dans Singh, V. P., et D. Frevert. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 283-318.
- Letts, M.G., N.T. Roulet, N.Y. Comer, M.R. Skarupa et D.L. Versegny. (2000) Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme. *Atmosphere-Ocean* 38(1): 141-160.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood et S. Burges. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research* 99(D7): 14,415-14,428.
- Mailhot, A., Rousseau, A. N., S. Massicotte, J. Dupont et J.-P. Villeneuve. (1997). A watershed-based system for the integrated management of surface water quality: The GIBSI System. *Water Science Technology*, 36(5): 381-387.
- Mahrt, L., et H. Pan. (1984). A two-layer model of soil hydrology. *Boundary-Layer Meteorology* 29: 1-20.
- Masson, V., J.-L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet et R. Lacaze. (2002). A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. (article soumis au *Journal of Climate*).
- McKillop, R., N. Kouwen et E. D. Soulis. (1999). Modeling the rainfall-runoff response of a headwater wetland. *Water Resources Research*, 35(4) : 1165-1177.
- Mekis, E. et W.D. Hogg (1999). Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series. *Atmosphere-Ocean* 37(1), 53-85.
- Mengelkamp, H.-T., K. Warrach et E. Raschke. (1999). SEWAB – a parameterization of the Surface Energy and Water Balance for atmospheric and hydrologic models. *Advances in Water Resources* 23: 165-175.
- Metcalfe, R.A., et J.M. Buttle (1999) Semi-distributed water balance dynamics in a small boreal forest basin. *Journal of Hydrology* 226(1-2): 66-87.
- Morin, G. (2002). CEQUEAU. Dans Singh, V. P., et D. Frevert. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 507-576.
- Munro, D.S., L.M. Bellisario et D.L. Versegny. (2000) Measuring and modelling the seasonal climatic regime of a temperate wooded wetland. *Atmosphere-Ocean* 38(1): 227-249.

- National Wetlands Working Group (NWWG). (1998). *Wetlands of Canada, Ecological Land Classification Series No. 24*. Sustainable Development Branch, Environment Canada, Ottawa and Polyscience Publications Inc. Montreal, Quebec, 452pp.
- New, M. , M. Hulme et P. Jones. (2000). Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part II: Development of 1901-96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *Journal of Climate*, **13**(13): 2217-2238.
- New, M. , M. Hulme et P. Jones. (1999). Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of Climate*, **12**(3): 829-856.
- Nijssen, B., R. Schnur et D. P. Lettenmaier. (2001a). Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model, 1980-93. *Journal of Climate* **14**: 1790-1808.
- Nijssen, B., G. M. O'Donnell, D. P. Lettenmaier, D. Lohmann et E. F. Wood. (2001b). Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model, 1980-93. *Journal of Climate* **14**: 3307-3323.
- Noilhan, J., et J.-F. Mahfouf. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* **13**: 145-159.
- Pauwels, V. R. N. et E.F. Wood. (1999a). A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes. 1. Model improvements. *Journal of Geophysical Research* **104**(D22): 27,811-27,822.
- Pauwels, V. R. N. et E.F. Wood. (1999b). A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes. 2. Application and validation. *Journal of Geophysical Research* **104**(D22): 27,823-27,839.
- Philippin, M., Beaumont, D., Bernier, M. (2001) Projet d'inventaire des occupations du sol: Bassins Bell, Waswanipi et Rupert. *INRS-Eau, Rapport No R-602*.
- Price, J. S., et J. M. Waddington. (2000). Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrological Processes*, **14** : 1579-1589.
- Quinton, W.L., et N.T. Roulet (1998) Spring and summer runoff hydrology of a subarctic patterned wetland. *Arctic and Alpine Research* **30**(3): 285-294.
- Quinton, W. L., et P. Marsh. (1999). A conceptual framework for runoff generation in a permafrost environment. *Hydrological Processes*, **13** : 2563-2581.
- Rawls, W. L., D. L. Brakensiek et K. E. Saxton . (1982). Estimation of soil properties. *Transactions of ASAE* **25**: 1316-1320.

- Refsgaard, J. C., et B. Storm. (1995). MIKE SHE. Dans Singh, V. P., *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., 809-846.
- Reynolds, C. A., T. J. Jackson, et W. J. Rawls. (2000). Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research* **36**(12): 3653-3662.
- Roulet, N. (1990). Hydrology of a headwater basin wetland : groundwater discharge and wetland maintenance. *Hydrological Processes*, **4** : 387-400.
- Rouse, W.R. (1998) A water balance model for a subarctic sedge and its application to climatic change. *Climatic Change* **38**: 207-234.
- Schaake, J. C., V. I. Koren, Q.-Y. Duan, K. Mitchell et F. Chen. (1996). Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research* **101**(D3): 7461-475.
- Sellers, P. J., et al. (1994). Boreal Ecosystem-atmosphere Study Experiment (BOREAS) : An overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of the American Meteorological Society* **76**(9): 1549-1577.
- Shuttleworth, W. J. (1993). Evaporation. Dans Maidment, D. R. *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, NY, 4.1-4.53.
- Shuttleworth, W. J. (1988). Macrohydrology – the new challenge for process hydrology. *Journal of Hydrology*, **100**: 31-56.
- Singh, V. P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 1130pp.
- Singh, V. P., et D. Frevert. (2002a). *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 891pp.
- Singh, V. P., et D. Frevert. (2002a). *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 950pp.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Turcotte, R., A. N. Rousseau, J.-P. Fortin et J.-P. Villeneuve. (2002). Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure (Chapitre accepté, Water Science & Application Series, *Advances in Calibration of Watershed Models*, American Geophysical Union, Washington, DC, Éditeurs Duan, Q., S. Sorooshian, H. Gupta, A. N. Rousseau et R. Turcotte)

- Turcotte, R., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte, et J.-P. Villeneuve. (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, **240**: 225-242.
- Verseghy, D. L. (1991). CLASS – A canadian land surface scheme for GCMs, II. Soil model. *International Journal of Climatology* **11**: 11-133.
- Verseghy, D. L., N. A. McFarlane et M. Lazare. (1993). CLASS – A canadian land surface scheme for GCMs, II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology* **13**: 347-370.
- Villeneuve, J.-P., P. Hubert, A. Mailhot et A. N. Rousseau. (1998a). La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue des sciences de l'eau*, **11**(no spécial): 19-40.
- Villeneuve, J.-P., C. Blanchette, M. Duchemin, N. Etong, J.-F. Gagnon, A. Mailhot, A. N. Rousseau, J.-F. Tremblay, M. Roux, et R. Turcotte. (1998b). *Rapport final du projet GIBSI, mars 1998, TOMES 1 et 2 (ANNEXES). Rapport final No. R-462.* Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Sainte-Foy, PQ
- Yuzk, T. (2001). Hydrological Monitoring for Climate Change in Canada, *Atelier scientifique national sur les tendances de la série chronologique hydrologique du Canada*, 8-9 mai 2001.

## ANNEXE A - MÉTHODOLOGIE

---

Il est clair que l'atteinte des objectifs de ce projet représente une très grande opportunité d'améliorer la modélisation hydrologique distribuée appliquée aux systèmes nordiques. Les principales étapes du projet s'articulent autour des trois volets suivants : (i) caractérisation du contexte climatique des bassins versants des rivières Churchill et La Grande, (ii) préparation des données physiographiques de ces bassins versants à l'aide de PHYSITEL [Turcotte *et al.*, 2001] et (iii) développement des modules de modélisation hydrologique des milieux humides et des lacs. Les étapes et activités liées à ces volets sont décrites dans ce qui suit.

1. Caractérisation du contexte climatique. La collecte et l'analyse de données climatiques, météorologiques, hydrologiques et physiographiques ainsi que la compréhension des relations entre ces données représentent les deux grandes activités de travail de cette caractérisation :
  - a. Compilation des données existantes et
  - b. Analyse des données.

Ces étapes sont basées sur des analyses statistiques de données historiques compilées (ex. : analyse fréquentielle des données climatiques, météorologiques, hydrologiques) ainsi que sur l'analyse de l'évolution de l'occupation du territoire. Dans un contexte beaucoup plus global, cette caractérisation sera accompagnée d'une interprétation de la tendance actuelle de l'évolution des températures et des précipitations, telle que celle présentée par Giorgi [2002]. De plus, une caractérisation des variabilités intersaisonnière, interannuelle et interdécennale des périodes sans gel de sol sera effectuée à partir d'une analyse des données centenaires (1901-1998) rapportées par le *Climatic Research Unit* (CRU) de l'University of East Anglia [New *et al.*, 2000, 1999] et ce, conformément aux travaux de Giorgi [2002]. La base de données (BD) du CRU est de plus en plus utilisée en tant que BD étalon pour la caractérisation des climats de surface planétaires.

2. Préparation des données physiographiques. La collecte et l'analyse de données météorologiques, hydrologiques et physiographiques, ainsi que l'intégration de celles-ci dans la base de données d'HYDROTEL, et le traitement des données physiographiques (MNA et réseau hydrographique numérisé) avec PHYSITEL pour le découpage du domaine de calcul, représentent les deux grandes activités de travail de ce volet :

- a. Compilation des données existantes et intégration à la base de données et
- b. Découpage du domaine de calcul.

La deuxième activité de ce volet demandera l'ajustement de PHYSITEL afin que ce dernier puisse tenir compte du nombre très important de lacs interconnectés. À ce moment, toute la notion de subdivision du réseau en tronçons par connectivité devra être réétudiée et corrigée au besoin. La définition des UHRH aux abords des lacs devra elle aussi être réévaluée. Il faudra également s'assurer que PHYSITEL soit robuste pour ces cas d'application extrêmes quant à la taille et au nombre de lacs. Une démarche similaire devra être faite pour les milieux humides. Il faudra également définir des stratégies d'aggrégation de l'information efficace et ce, même si la taille des UHRH est grande.

3. Modélisation hydrologique. Les modélisations hydrologiques des milieux humides et des lacs et leur validation constituent les trois grandes activités de travail des travaux de modélisation :

- a. Modélisation hydrologique des milieux humides;
- b. Modélisation hydrologique des lacs et
- c. Validation.

Ces travaux nécessiteront des revues de littérature sur la modélisation des processus et l'hydrologie des milieux humides et des lacs; des travaux de

programmation; des analyses de sensibilité et d'incertitudes sur les paramètres ainsi que des travaux de calage et validation à l'aide de données observées de natures directe et indirecte. On portera une attention particulière à la représentativité des schémas de surface d'HYDROTEL avec ceux des modèles atmosphériques dans le but d'éviter toute incohérence physique lors d'applications futures dans un contexte d'études d'impacts des CC. De plus, il faudra définir des stratégies de modélisation du transfert horizontal qui tiennent compte des besoins d'aggrégation, la présence de lacs et de milieux humides. Le concept de coefficient moyen de Manning sur l'UHRH devra être absolument revu à l'échelle d'UHRH de grande taille. On devra adapter la stratégie de calage, étant donné la faible densité du réseau de mesures hydrométrique et météorologique, et l'incertitude sur les apports calculés par bilan hydrique.

La réalisation de ces trois volets représente de très beaux défis techniques et scientifiques et ne pourra être complètement complétée à l'intérieur d'une période de deux ans. Elle sera aussi tributaire des études de terrain effectuées par nos collègues du CEN de l'Université Laval portant sur caractérisation des zones humides en région nordique. Les résultats de ces études permettront de valider partiellement nos travaux de modélisation des milieux humides et ce, même si ces études se dérouleront à de plus petites échelles spatiales. Ce projet bénéficiera également de l'expertise technique de collaborateurs à l'IREQ pour la réalisation du deuxième volet et au Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour la réalisation du troisième volet.





## **ANNEXE B – HYDROTEL**

---

HYDROTEL [Fortin *et al.*, 2001a,b] est un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données couramment disponibles tout en pouvant tirer profit des données de pointe fournis par la télédétection et les SIG. Le modèle est composé de cinq modules de calcul des processus hydrologiques (évapotranspiration potentielle, écoulement sur la partie terrestre, écoulement en rivière, bilan hydrique vertical, évolution du couvert nival, voir tableau B.1) effectué en cascade (*i.e.*, découplé) à chaque pas de temps de simulation. Pour certains de ces modules, une sélection d'algorithmes est offerte selon les données disponibles. Ces algorithmes sont purement empiriques ou dérivés des lois physiques incluant quelques paramètres de calage. De plus, HYDROTEL possède un module d'interpolation des données hydrologiques qui offre deux algorithmes qui tiennent compte du gradient vertical de température et de la température de passage de la pluie en neige : polygones de Thiessen et moyenne pondérée en fonction de l'inverse de la distance des trois stations les plus proches.

### **DÉCOUPAGE SPATIAL ET MODÉLISATION DES PROCESSUS**

La figure B.1 illustre le découpage spatial, c'est-à-dire, les unités du domaine de calcul d'HYDROTEL, et précise les échelles spatiales de modélisation de chacun des modules. Ce découpage exécuté par PHYSITEL se fait à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et d'un réseau hydrographique numérisé [Turcotte *et al.*, 2000]. L'interpolation des données météorologiques et le bilan hydrique vertical sont effectués à l'échelle de l'unité hydrologique relativement homogène (UHRH) : plus petite unité homogène de simulation incluant un tronçon de rivière. L'unité temporelle de simulation est la journée ou des multiples de trois heures inférieures à la journée.

#### **Bilan hydrique vertical**

Le bilan hydrique vertical peut se faire selon deux schémas de calcul. Le premier schéma est issu du modèle CEQUEAU [Morin, 2002] et il est basé sur l'utilisation de deux réservoirs en série, associés aux milieu saturé (réservoir sol) et non saturé (réservoir

écoulement de base), simulant le bilan hydrique dans une colonne de sol à l'aide de relations de vidange. Le deuxième schéma est basé sur l'application conjointe de l'équation de Richards et du modèle de flux entre couches de sol de Mahrt et Pan [1984] sur trois couches de sol. La première couche est relativement peu épaisse (10 à 20 cm) et contrôle, selon l'approche d'Horton, l'infiltration et le ruissellement. Les deuxième et troisième couches sont respectivement associées aux écoulements sub-superficiel et basal.

### **Écoulements sur la partie terrestre et dans le réseau hydrographique**

Le transfert des eaux disponibles après le bilan vertical de l'UHRH s'effectue par l'intermédiaire d'un hydrogramme unitaire géomorphologique qui est construit à partir du schéma d'écoulement sur la partie terrestre de l'unité de calcul. Cet écoulement s'effectue de maille à maille sur chacune des UHRH, en tenant compte de la topographie et de l'occupation du sol, pour être agrégé par la suite à l'échelle de l'UHRH. L'hydrogramme géomorphologique est recalculé aussitôt qu'il y a un changement d'occupation du sol. L'écoulement sur la partie terrestre ainsi que l'écoulement dans chaque tronçon du bassin versant s'effectuent selon le modèle de l'onde cinématique ou le modèle de l'onde diffusante. À noter que l'effet des lacs et des réservoirs est pris en compte par l'intermédiaire de bilans hydriques et de relations plus ou moins complexes entre certaines variables caractérisant les plans d'eau et les débits évacués. Les modèles d'écoulement ne sont rien d'autre que des simplifications des équations complètes de Saint-Venant en représentation unidimensionnelle. Le modèle de l'onde diffusante s'obtient si l'on néglige les termes d'accélération dans le bilan d'énergie et si l'on suppose une largeur constante. Quant au modèle de l'onde cinématique s'obtient si l'on néglige en plus le gradient de pression.

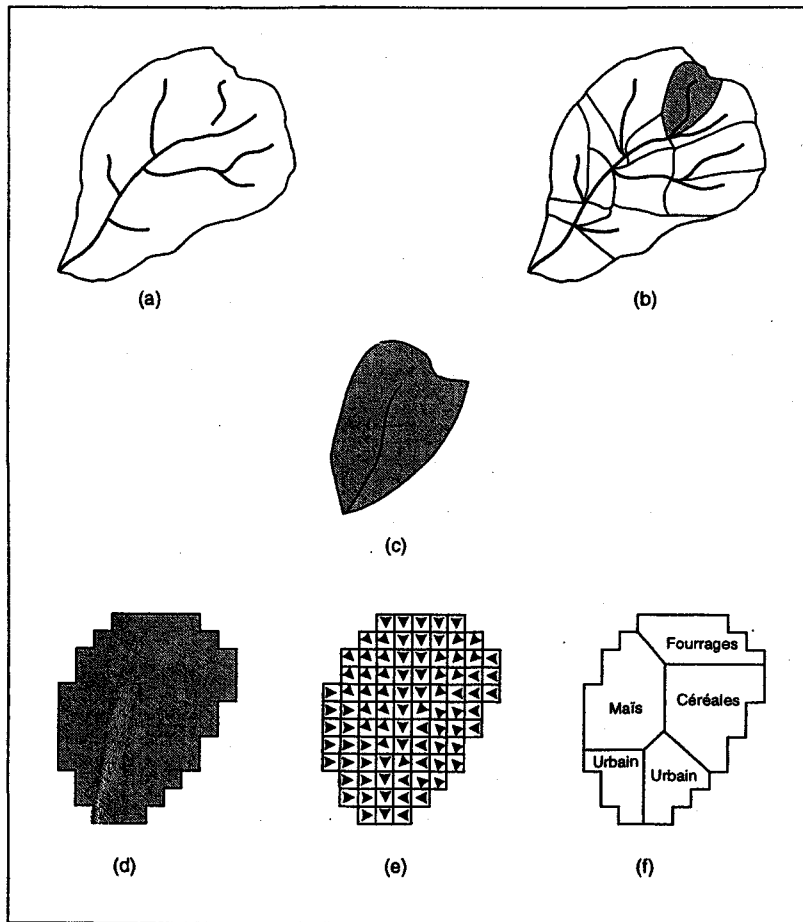
### **Évapotranspiration et évolution du couvert nival**

Pour ce qui est des processus d'évapotranspiration potentielle (options Linacre, Thornthwaite, Penman-Monteith, Priestley-Taylor ou HQ) et d'évolution du couvert nival (méthode degrés-jours – bilan d'énergie) sur une UHRH, ils sont simulés respectivement sur toutes les classes d'occupation de sols ou sur des macroclasses d'occupations de sols

issues d'un regroupement de classes (ex. : forêts de conifères, forêts de feuillus, aires ouvertes) de l'occupation de sol et de l'analyse de l'information extraite des données du satellite LandsatTM.

## **APPLICATIONS**

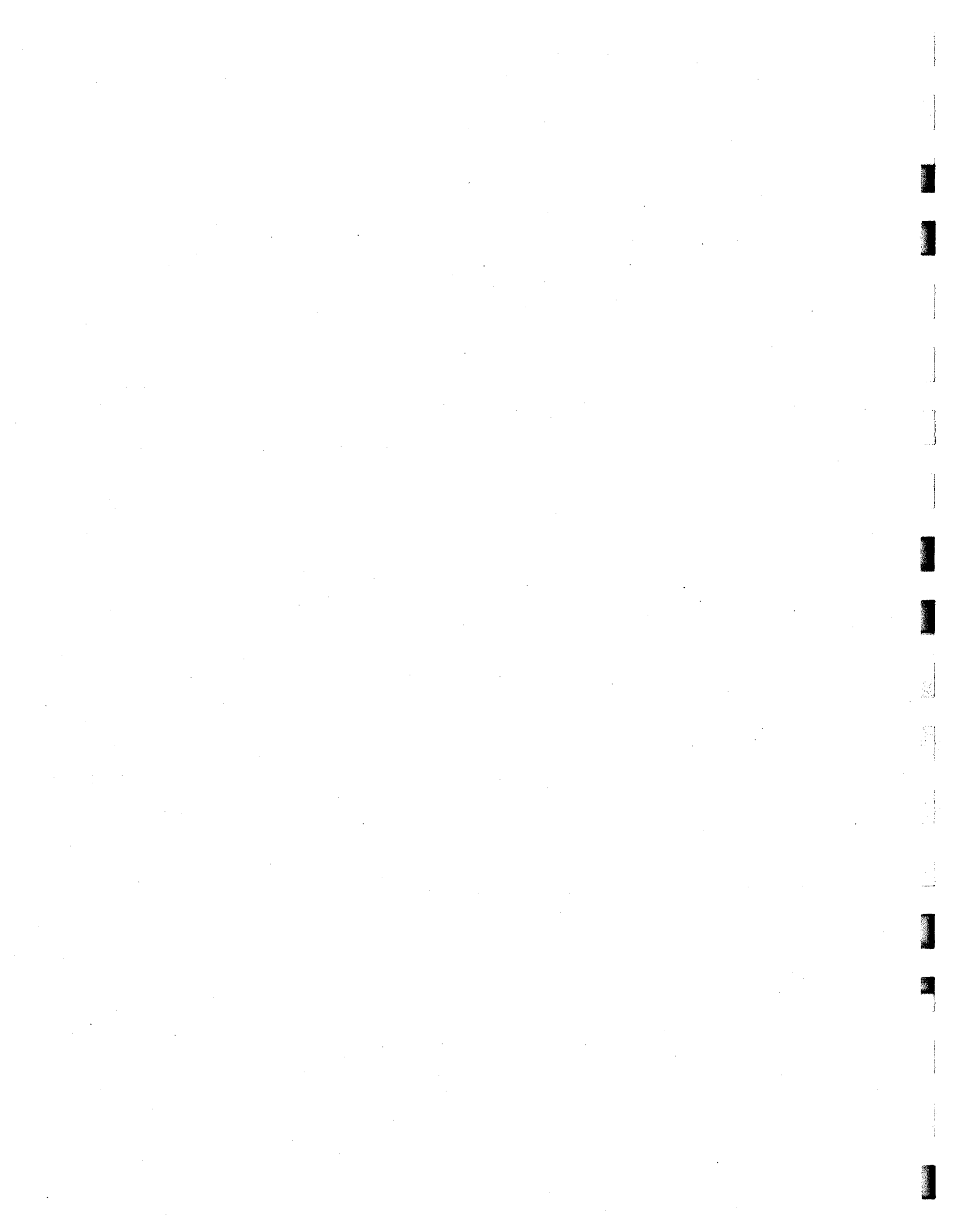
HYDROTEL a été appliqué sur le bassin versant de la rivière Chaudière [Fortin *et al.*, 2001b] dans le cadre du développement du système informatisé GIBSI [Mailhot *et al.*, 1997; Villeneuve *et al.*, 1998b; Rousseau *et al.*, 2000]. Le modèle a également été appliqué sur le bassin versant de la rivière Famine, un sous-bassin versant de la rivière Chaudière, dans un contexte d'évaluation de l'impact des coupes forestières à grande échelle sur le régime hydrique [Lavigne *et al.*, 2002]. De plus, HYDROTEL a été calé sur le bassin versant de la rivière Châteauguay dans le cadre d'une action concertée FCAR-RADARSAT [Bonn *et al.*, 2001]. Deux des principales organisations actives en prévision hydrologique au Québec, Hydro-Québec (HQ) et le centre d'expertise hydrique du Québec du MENV (CEHQ), utilisent à divers degrés le modèle HYDROTEL pour la prévision hydrologique sur certains bassins versants québécois. Finalement, HYDROTEL est également au cœur de travaux de développement d'une stratégie de calage tirant profit des caractéristiques des processus simulés et visant des objectifs multiples [Turcotte *et al.*, 2002].



**Figure B.1** Découpage spatial : (a) bassin versant, (b) bassin versant constitué de plusieurs UHRH, (c) une UHRH, (d) représentation d'une UHRH numérisée, (e) schéma d'écoulement de surface d'une UHRH et (f) occupations du sol d'une UHRH.

Tableau B.1 Description sommaire d'HYDROTEL

<b>Modèle</b>	HYDROTEL	
<b>Concepteur / Distributeur</b>	Fortin <i>et al.</i> [2001a], INRS-ETE	
<b>Processus simulé</b>	<b>Approche de modélisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Évolution du couvert nival</i></li> <li>○ <i>Évapotranspiration potentielle</i></li> <li>○ <i>Bilan vertical</i></li> <li>○ <i>Écoulement partie terrestre</i></li> <li>○ <i>Écoulement en rivière</i></li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Degrés-jours – bilan énergétique</li> <li>○ Linacre, Thornthwaite, Penman-Monteith, Priestley-Taylor ou HQ</li> <li>○ BV3C</li> <li>○ Onde cinématique</li> <li>○ Onde diffusante ou onde cinématique</li> </ul>
<b>Paramètres de gestion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Gestion des barrages</li> <li>○ Occupation des sols</li> </ul>	
<b>Discrétisation spatiale</b>	Unités hydrologiques relativement homogènes, UHRH (trois couches de sol et un tronçon de rivière)	
<b>Pas de temps de calcul</b>	3 heures à 24 heures	
<b>Données d'entrée distribuées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Météorologiques [ex. : précipitation, température (minimum et maximum), autres données nécessaires selon l'approche de modélisation de l'évapotranspiration potentielle]</li> <li>○ Modèle numérique d'altitudes</li> <li>○ Réseau hydrographique numérisé</li> <li>○ Propriétés physiques et hydrauliques des sols (texture, conductivité hydraulique, potentiel matriciel à saturation)</li> <li>○ Occupation numérisée des sols [caractérisée par coefficient de frottement de Manning, profondeur du système racinaire, albédo, hauteur du couvert végétal, indice foliaire (LAI)]</li> <li>○ Propriétés physiques des tronçons des UHRH (pente, longueur, largeur, coefficient de frottement de Manning)</li> <li>○ Données hydrométriques (pour le calage)</li> <li>○ Règles de gestion des barrages</li> </ul>	
<b>Données de sortie et variables de décision distribuées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Débits</li> <li>○ Bilan hydrique des trois couches de sol</li> </ul>	
<b>Contexte d'utilisation et cas d'application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Prévission hydrologique (CEHQ, HQ)</li> <li>○ Gestion des barrages</li> <li>○ Impact des coupes forestières</li> <li>○ Bassins versants des rivières Chaudière et Châteauguay</li> </ul>	
<b>Composantes auxiliaires</b>	PHYSITEL	
<b>Disponibilité du code</b>	Disponible	
<b>Support à l'utilisateur</b>	Oui	
<b>Système d'opération</b>	WindowsNT	



## ANNEXE C - RELEVÉS NIVOMÉTRIQUES POUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE

Nom	Début	Longitude	Latitude
INUKJUAK	1965	-78.1167	58.45
KUUJJUAQ-A	1965	-68.4167	58.1
RIVIERE GEORGE	1987	-64.9167	56.8
LAC-CHATEAUGUAY	1974	-70.0333	56.3833
LAC-GUILLAUME-DELISLE	1974	-76.2167	56.0833
PETITE-BALEINE	1987	-74.3333	55.6833
KUUJJUARAPIK-A	1966	-77.7667	55.2833
LAC-ROMAN	1973	-69.9667	55.0333
DENYS	1983	-77.0667	55
LAC-BIENVILLE	1968	-72.499	54.958
SCHEFFERVILLE-A	1965	-66.8167	54.8
R33	?	-70.963	54.58838889
R34	?	-70.80055556	54.52194444
R35	?	-70.62638889	54.49472222
LAC-CARTEAUX	1974	-68.0333	54.4667
LAC-KANAAUPSCOW	1968	-74.35	54.4537
R32	?	-71.29361111	54.41222222
LAC-FALAISE	?	-68.3022	54.2768
R31	?	-71.44111111	54.24888889
R12	?	-72.5570666666667	54.1500166666667
LAC-BERTRAND	1969	-71.8507	54.1467
R30N	?	-71.59805556	54.13944444
R11	?	-72.5392444444444	54.1300138888889
R10	?	-72.5165638888889	54.0696722222222
R09	?	-72.4826805555556	54.0631
R08	?	-71.7825861111111	54.0482138888889
R23	?	-72.47061944	54.03025
R23	?	-72.4706194444445	54.03025
R06	?	-71.9605555555556	53.9986111111111
R03	?	-72.4429388888889	53.9919611111111
R05	?	-72.25223611	53.93358889
LAC-NOUVEAU	1983	-68.95	53.9333
R13	?	-72.4461972222222	53.9263
R04	?	-72.42041667	53.921825
LAC-VIANNEY	1973	-70.7912	53.917
RNEIG02S	?	-72.53	53.90272
R02	?	-72.53011389	53.90001944



Nom	Début	Longitude	Latitude
R22	?	-72.54145	53.8933666666667
R01	?	-72.66161389	53.86036944
R21	?	-72.7210833333333	53.8356527777778
R20	?	-72.8071666666667	53.8238666666667
R14	?	-73.3477027777778	53.8056972222222
R17	?	-72.8638166666667	53.7875472222222
R16	?	-73.1261666666667	53.7808916666667
R15	?	-73.2563027777778	53.7758972222222
LA GRANDE IV	1985	-73.6667	53.75
R19	?	-73.6925722222222	53.7469472222222
LG-2	?	-77.6333	53.7333
LG-4(NEIGE)	?	-73.7	53.7333
R18	?	-73.7112055555556	53.7074
LA GRANDE-RIVIERE-A	1977	-77.7	53.6333
RIV. CANIAPISCAU	?	-68.5268	53.6008
PUISSEAUX	1987	-71.2	53.6
LAC-SAUVOLLES	1968	-73.1	53.4
LAC-MADIGAN	1973	-69.8615	53.3638
LAC-FREGATE	1966	-74.8667	53.2167
LAC-OPISCOTEO	1969	-68.292	53.129
LAC-ROSSIGNOL	1973	-73.7833	52.7
LAC-ATTICOUPI	1963	-69.9167	52.65
EOL (NEIGE)	?	-76.7167	52.4333
LAC-CADIEUX	1967	-72.6167	52.3833
LAC-CHANTAL	1964	-68.2833	52.25
LAC-LA-BOUILLE	1963	-68.7833	52.15
LAC-JANISSE	1963	-68.1333	51.95
LAC-GAILLARBOIS-SUD	1963	-67.3833	51.8833
LAC-NEOSKWESCAU	1967	-74.3	51.8667
LAC-PLETIPI-NORD	1963	-70.0667	51.8167
PONTAX	1987	-78.1	51.5333
LAC-BENOIT	1952	-71.1167	51.5333
LAC-GRANDMESNIL	1963	-67.5833	51.3333
LAC-PHILIPPE-EST	1963	-69.6	51.2833
LAC-PIACOUADIE	1952	-70.9167	51.2833
LAC-CAMOUSITCHOUANE	1967	-75.4667	51.1
TEMISCAMIE	1986	-72.8833	51.0833
LAC-MACHISQUE	1952	-71.8333	50.8833
LAC-AURIAC	1964	-69.9333	50.8667
LAC-LONG	1954	-72.9667	50.5
LAC-ROLAND	1965	-70.05	50.2333
TURGEON	1988	-79.0833	49.9833