

*Développement de scénarios hydrologiques  
à des fins de modélisation de la dynamique  
sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent  
dans un contexte de changements climatiques*

**Étude réalisée par Ouranos pour le compte du projet**

**Effects of Water Level Fluctuations on the Tributaries of the Saint-  
Lawrence: A Perspective on Sustainable Development**

Décembre 2005

**Ouranos** est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, initiative conjointe du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et du Service météorologique du Canada avec la participation des universités Laval et McGill, de l'UQAM et de l'INRS. Valorisation Recherche Québec a collaboré à la mise en place d'Ouranos et à son financement. Les opinions et résultats présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité d'Ouranos et n'engagent pas les organismes précités.

Auteures : **Diane Chaumont**

Spécialiste, Scénarios climatiques (Ouranos)

**Isabelle Chartier**

Chercheure, Hydrologie (Ouranos/IREQ)

Collaborateur(s) : **Georges Desrochers**

Chercheur (Ouranos / IREQ)

**René Roy**

Chargé de projet changements climatiques

(Ouranos / Hydro-Québec)

**Philippe Gachon**

Coordonnateur scénarios climatiques – Analyse  
du climat (Ouranos / Environnement Canada)

**Frédéric Guay**

Géographe (Ouranos/UQÀM)

## Table des matières

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
<b>1. OBJECTIF DES TRAVAUX</b> .....	<b>5</b>
<b>2. DESCRIPTION DES BESOINS</b> .....	<b>5</b>
<b>3. MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>6</b>
3.1 Modélisation hydrologique.....	7
3.1.1 <i>Choix et description du modèle HSAMI</i> .....	7
3.1.2 <i>Étalonnage du modèle</i> .....	7
3.1.3 <i>La gestion des ouvrages</i> .....	9
3.2 Stations d'observations.....	10
3.2.1 <i>Génération de la série climatique synthétique</i> .....	10
3.2.2 <i>Stations météorologiques et hydrologiques</i> .....	11
3.3 Scénarios climatiques .....	13
3.3.1 <i>Méthode des deltas</i> .....	14
3.3.2 <i>Modèles climatiques et scénarios d'émission de GES retenus</i> .....	14
3.3.3 <i>Région de référence</i> .....	19
3.4 Avantages et inconvénients de la méthode.....	20
<b>4. DESCRIPTION DES RÉSULTATS</b> .....	<b>22</b>
4.1 Scénarios climatiques .....	22
4.2 Scénarios hydrologiques.....	25
4.2.1 <i>Hydrogrammes annuels moyens et débits module</i> .....	25
<i>Bassin de la rivière Yamachiche</i> .....	28
<i>Bassin de la rivière Batiscan</i> .....	29
<i>Bassin de la rivière St-Maurice</i> .....	30
<i>Bassin de la rivière St-François</i> .....	31
<i>Bassin de la rivière Richelieu</i> .....	32
4.2.2 <i>La bi-modalité des crues futures</i> .....	33
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>34</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>35</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>37</b>

## Liste des figures

---

Figure 1 : Localisation des bassins versants des tributaires à l'étude .....	6
Figure 2 : Schéma du modèle conceptuel HSAMI.....	8
Figure 3 : Exemple de calcul de la température maximale journalière par la méthode des polygones de Thiessen; Bassin de la rivière Batiscan. Noter que les unités des axes sont des coordonnées UTM en mètres. ....	11
Figure 4 : Stations météorologiques et hydrométrique utilisées : a) Yamachiche, b) Batiscan, c) Richelieu, d) St-Maurice et e) St-François.....	12
Figure 5 : Températures quotidiennes minimum et maximum simulées par le MCGC2 pour la tuile 46, 39°N et 75°W.....	16
Figure 6 : Capacité de rétention d'eau dans le sol telle que perçue par le MCGC2.....	17
Figure 8 : Grilles des MCG retenus (couleur grise) et région de référence pour le calcul des deltas (couleur rouge). a) HadCM3, b) ECHAM4 et c) CSIRO. ....	20
Figure 9: Moyenne mobile de 30 ans des changements de températures minimum et maximum et des précipitations des 6 réalisations de 1975 à 2085 dans la région à l'étude. DJF pour décembre-janvier-février; MAM pour mars-avril-mai; JJA pour juin-juillet-août et SON pour septembre-octobre-novembre. Les changements sont calculés par rapport à la période 1961-1990.....	23
Figure 10 : Diagramme de dispersion des changements de précipitations et de températures moyennes pour les trois horizons d'intérêt. ....	24
Figure 11: Rivière Yamachiche : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon..	28
Figure 12: Rivière Batiscan : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.....	29
Figure 13: Rivière St-Maurice : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon..	30
Figure 14: Rivière St-François : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon..	31
Figure 15: Rivière Richelieu : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon..	32
Figure 16: Débits reconstitués pour les années 1970 et 1987, bassin de la rivière Batiscan	33

## Liste des tableaux

---

Tableau 1	Superficies des bassins versants à l'étude, périodes d'étalonnage et de validation et coefficients de Nash .....	9
Tableau 2	Modèles de climat globaux et scénarios SRES utilisés lors de l'élaboration des scénarios climatiques. ....	19
Tableau 3:	Avantages et inconvénients de la méthode des deltas .....	21
Tableau 4	Variations des débits modules selon les réalisations et les horizons climatiques	27

## INTRODUCTION

---

La communauté scientifique reconnaît que les activités humaines contribuent à modifier la composition de l'atmosphère, particulièrement la concentration des gaz à effet de serre, ce qui se répercute sur le climat. Dans son *Troisième rapport d'évaluation*, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2001), le principal regroupement international de spécialistes en sciences du climat, affirme qu'il existe de nouveaux indices plus solides indiquant que la plus grande partie du réchauffement observé durant les 50 dernières années est attribuable aux activités humaines, par le biais de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Le rapport conclut que les influences de l'homme continueront de changer la composition de l'atmosphère tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle et que ce changement pourrait persister plusieurs siècles. Les preuves scientifiques apportées quant à la présence et la persistance des changements climatiques accroissent la nécessité d'agir pour identifier les impacts qui en découleront dans différents secteurs d'activités et de prévoir des stratégies d'adaptation.

Il est probable qu'un changement du climat affectera de façon directe le régime hydrologique ; toutefois, la forme et la sévérité des changements hydrologiques demeurent peu documentées. En se basant sur deux modèles de circulation générale, Croley (2003) a montré que les changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs pourraient entraîner une baisse de débit de 4% à 24%. Ces modifications sur le cours d'eau principal amènent les chercheurs à se questionner sur l'ajustement qui se fera à l'embouchure des tributaires dans le fleuve Saint-Laurent. À cette fin, on doit tenir compte à la fois des changements hydrologiques dans le cours d'eau principal et des modifications de la dynamique de l'écoulement sur les tributaires en amont de leur jonction avec le fleuve. C'est la seconde partie de la problématique que nous avons documentée dans la présente étude. Quels sont les changements anticipés de température et de précipitations sur les bassins versants des tributaires du Saint-Laurent ? Comment la combinaison des changements de température et des précipitations se répercute-t-elle sur le débit des cours d'eau ? Le rapport décrit la méthode de construction de scénarios climatiques et hydrologiques servant d'intrants au modèle de simulation de la dynamique sédimentaire à la jonction de cinq tributaires du Saint-Laurent.

Nous décrivons en premier lieu le modèle hydrologique, de même que les procédures d'étalonnage et de simulation. Par la suite, nous présenterons les données hydrologiques et climatologiques utilisées. Vient ensuite la démarche suivie lors de la construction des scénarios climatiques. Finalement, les résultats sur les séries climatiques et les simulations hydrologiques seront présentés.

## **1. OBJECTIF DES TRAVAUX**

---

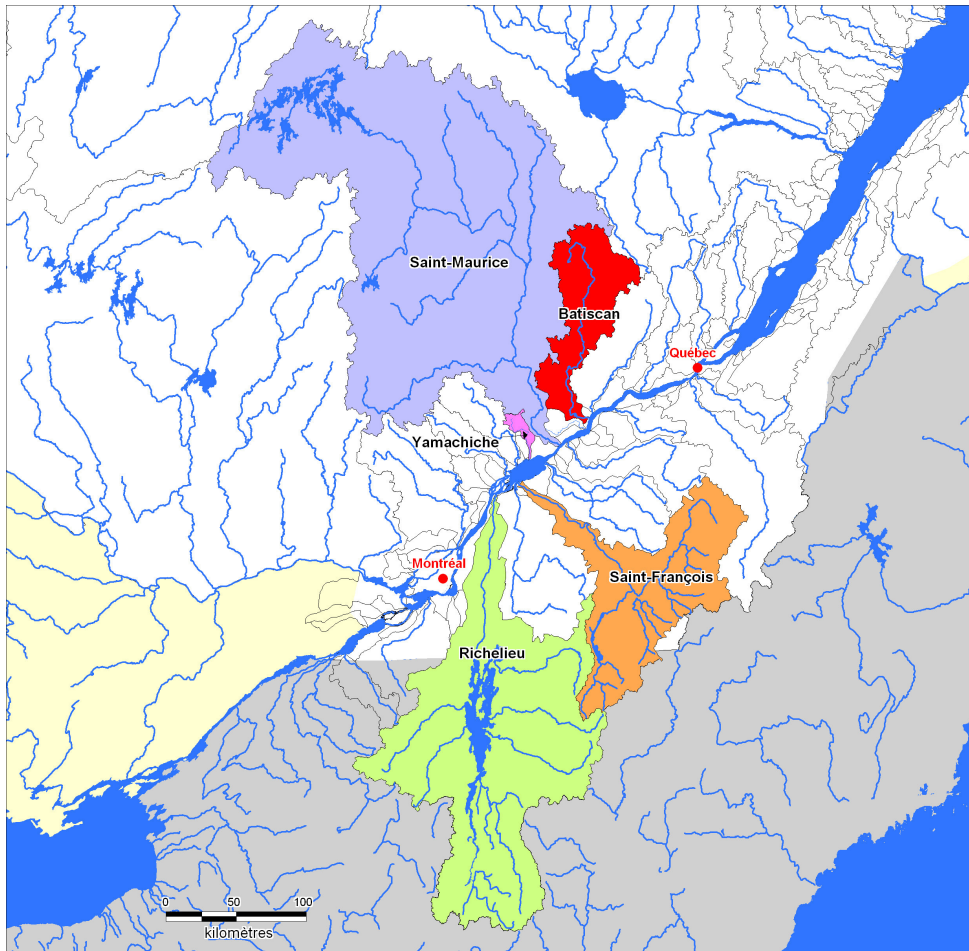
Le but du travail est d'établir des scénarios hydrologiques pour cinq tributaires du Saint-Laurent centrés sur les décennies **2020** (2010-2039), **2050** (2040-2069) et **2080** (2070-2099) qui seront utilisés pour simuler la dynamique sédimentaire future à l'embouchure de cinq tributaires du Saint-Laurent en tenant compte des changements climatiques. Les cinq tributaires étudiés sont les rivières Richelieu, St-François, St-Maurice, Yamachiche et Batiscan. Cette sélection permet l'analyse de cours d'eau de différentes tailles, s'écoulant dans des contextes géomorphologiques divers et localisés sur les deux rives du fleuve Saint-Laurent. Tel que mentionné précédemment, les changements du niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent seront aussi tenus en compte pour analyser l'ajustement du lit des tributaires ; toutefois, ils ne font pas partie de ce rapport.

## **2. DESCRIPTION DES BESOINS**

---

Plusieurs méthodes peuvent conduire à la réalisation de scénarios climatiques dans le cadre d'une étude d'impacts des changements climatiques à l'échelle régionale. Ce sont les besoins identifiés par le projet Impact et Adaptation, le temps et les ressources disponibles de même que la validation de la méthode qui justifient la démarche. Les éléments qui ont été considérés pour le choix de la méthode sont les suivants :

- Variables climatiques : températures quotidiennes minimales, températures quotidiennes maximales, précipitations quotidiennes liquides, précipitations quotidiennes sous forme de neige
- Variables hydrologiques : débit quotidien des tributaires à leur jonction avec le fleuve Saint-Laurent
- Horizons d'intérêt : 2020 (2010-2039), 2050 (2040-2069) et 2080 (2070-2099)
- Localisation : 5 tributaires du Saint-Laurent dans son tronçon fluvial : Richelieu, St-François, St-Maurice, Yamachiche et Batiscan (voir figure 1)
- Enveloppe de scénarios climatiques considérés équiprobables



**Figure 1** : Localisation des bassins versants des tributaires à l'étude

### 3. MÉTHODOLOGIE

---

La construction des scénarios hydrologiques a été réalisée en trois principales étapes : 1) le modèle hydrologique a été étalonné à l'aide des observations climatologiques et hydrologiques du passé, 2) les simulations du régime hydrologique du passé sont réalisées à l'aide du modèle calibré et des observations climatologiques et 3) le régime hydrologique futur est simulé avec les scénarios climatiques futurs. Il importe de retenir que l'analyse des changements hydrologiques futurs doit se faire en comparaison avec les simulations hydrologiques actuelles (débit reconstitué) et non pas avec les observations hydrologiques actuelles. Nous décrirons maintenant plus en détails chacune des étapes qui ont conduit à la construction des séries hydrologiques futures de même que les données utilisées.

## 3.1 Modélisation hydrologique

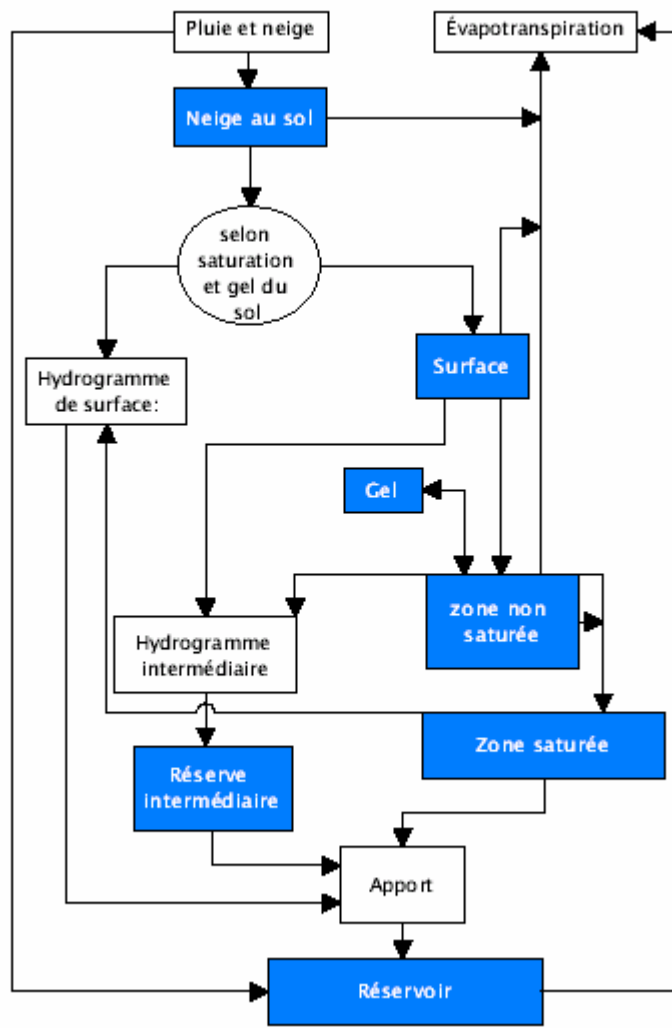
### 3.1.1 Choix et description du modèle HSAMI

Le modèle hydrologique HSAMI est disponible chez Ouranos par le biais d'Hydro-Québec, où il est utilisé depuis plus de quinze ans pour la prévision des apports aux réservoirs. En plus d'être un modèle connu et largement testé, nous l'avons choisi pour sa facilité d'utilisation de même qu'en fonction de la disponibilité et de l'accessibilité des données nécessaires à son usage. En effet, les simulations hydrologiques sont effectuées à partir d'observations journalières de seulement quatre variables météorologiques principales: pluie, neige, température minimale et température maximale. Des données d'ensoleillement et de neige au sol peuvent également être ajoutées à cette liste mais cette option n'a pas été retenue dans le cadre de ce projet. Mentionnons également que certaines études ont montré que le choix du modèle hydrologique n'aurait que très peu d'impact sur les résultats de la modélisation des débits dans un contexte de changements climatiques (GICC-Rhône, 2002). Ainsi, nous considérons que le recours à un seul modèle hydrologique par opposition à une comparaison entre plusieurs modèles hydrologiques, répond à nos besoins.

Le modèle HSAMI (Fortin, 2000) est un modèle météo-apport à base de réservoirs permettant la simulation des apports naturels à un réservoir ou du débit à l'exutoire d'un bassin versant. C'est un modèle conceptuel en temps discret, à base de trois réservoirs linéaires en cascade qui génèrent des impulsions filtrées par deux hydrogrammes unitaires. Les simulations sont effectuées au pas de temps journalier et le modèle reçoit pour chaque type de donnée, une seule donnée pour chaque pas de temps ; ce type de modèle est appelé « modèle global » par opposition à un « modèle distribué » qui tiendrait compte de la distribution spatiale des intrants lors de la simulation. La fonte de la neige, l'évapotranspiration et les différents processus sont simulés par le modèle grâce à un système d'équations et de paramètres empiriques qui sont déterminés lors de l'étalonnage du modèle. La figure 2 présente de façon simplifiée l'ensemble des processus du modèle HSAMI. Les cases bleues représentent les « réservoirs » dans lesquels l'eau peut être emmagasinée et les différentes flèches montrent les trajets possibles que peut emprunter l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin (réservoir).

### 3.1.2 Étalonnage du modèle

Avant d'être en mesure d'effectuer des simulations pour le futur, le modèle hydrologique sera d'abord étalonné et validé sur une période de 30 ans (1961-1990). Le tableau 1 présente les périodes ayant servi à l'étalonnage du modèle hydrologique et à la simulation du régime hydrologique actuel. On peut noter dans le tableau 1 que les années ayant servi à l'étalonnage varient d'un bassin à l'autre, ces différences dépendent de la disponibilité des données.



**Figure 2 :** Schéma du modèle conceptuel HSAMI (Fortin, 2000)

La qualité de l'étalonnage est évaluée par le coefficient de Nash<sup>1</sup> dont la valeur varie entre 0 et 1. Ce projet visant à estimer les changements moyens de la valeur des débits sur une période relativement longue, nous avons considéré que le modèle était étalonné lorsque des valeurs de coefficient de Nash supérieures à 0.75 étaient atteintes. Nous avons cependant réussi à obtenir des valeurs de coefficient de Nash supérieures à 0.80 pour quatre des bassins modélisés (tableau 1).

---

<sup>1</sup> Nash J.E. et J.V. Sutcliffe (1970) *River flow forecasting through conceptual models*, J. Hydrol., **10** (3), 282-290.

**Tableau 1** Superficies des bassins versants à l'étude, périodes d'étalonnage et de validation et coefficients de Nash

Bassins	Superficie totale (km <sup>2</sup> )	Superficie étalonnée(km <sup>2</sup> )	Période d'étalonnage <sup>2</sup>	Période de validation	Coefficient de Nash
Yamachiche	269	269	1960-1972	1980-1990	0,842
Batiscan	4 700	4 580	1960-1975	1976-1990	0,849
St-Maurice	43 250	715,8	1974-1987	1988-1998	0,827
St-François	10 180	9 610	1960-1975	1976-1990	0,831
Richelieu	23720	22 000	1960-1975	1976-1990	0,789

Lorsque le modèle est correctement étalonné, nous l'utilisons pour reconstituer les débits pour les années 1961 à 1990 inclusivement. Il est important de noter que ce sont les débits reconstitués, et non les débits observés, qui seront comparés aux débits simulés pour les horizons futurs. En conséquence, l'étape d'étalonnage et de validation du modèle est très importante puisque les débits qui en résultent serviront de référence à l'appréciation des résultats finaux. Cette façon de faire est utilisée afin de permettre l'élimination du biais du modèle hydrologique.

### 3.1.3 La gestion des ouvrages

Les débits simulés par HSAMI sont obtenus suite à la modélisation des processus hydrologiques naturels d'un bassin versant. Cependant, plusieurs bassins versants du Québec sont exploités à des fins hydroélectriques et la présence de digues et de barrages sur ces rivières modifie leur régime naturel d'écoulement. Par conséquent, le mode de gestion des réservoirs créés par ces ouvrages devrait, dans la mesure du possible, être considéré lors de la modélisation hydrologique.

Pour les rivières Batiscan et Yamachiche, l'étalonnage a été effectué sur la superficie entière du bassin. Ces bassins sont peu influencés par les ouvrages qui s'y trouvent et la présence de ceux-ci a été considérée comme négligeable aux fins du projet. Concernant le bassin de la rivière St-Maurice, il nous a été possible de profiter des données d'étalonnage fournies par Hydro-Québec. Le modèle HSAMI a donc été étalonné pour un bassin intermédiaire de 715.8 km<sup>2</sup>. Ce sous-bassin est situé en aval du bassin versant, entre les ouvrages de la Gabelle et de Grand-mère (pour lesquels les règles de gestion sont

---

<sup>2</sup> Il est à noter que les périodes d'étalonnage et de validation peuvent changer d'un bassin à l'autre, en fonction de la disponibilité des données.

connues). La superficie totale réelle du bassin de la rivière St-Maurice (à partir du réservoir Gouin) est de 43 250 km<sup>2</sup>. Les données de débits reconstitués et simulés pour ce bassin correspondent cependant aux apports naturels du bassin intermédiaire de 715.8 km<sup>2</sup>. Toutefois, si nécessaire, il est possible d'estimer quels seraient les débits totaux du bassin en effectuant un calcul à l'aide du rapport des superficies du bassin entier par rapport au bassin intermédiaire.

Enfin, pour les bassins des rivières St-François et Richelieu, où l'on retrouve plusieurs réservoirs pour lesquels nous ne possédons pas les données concernant les règles de gestion, nous avons omis de considérer l'effet des règles de gestion.

## 3.2 Stations d'observations

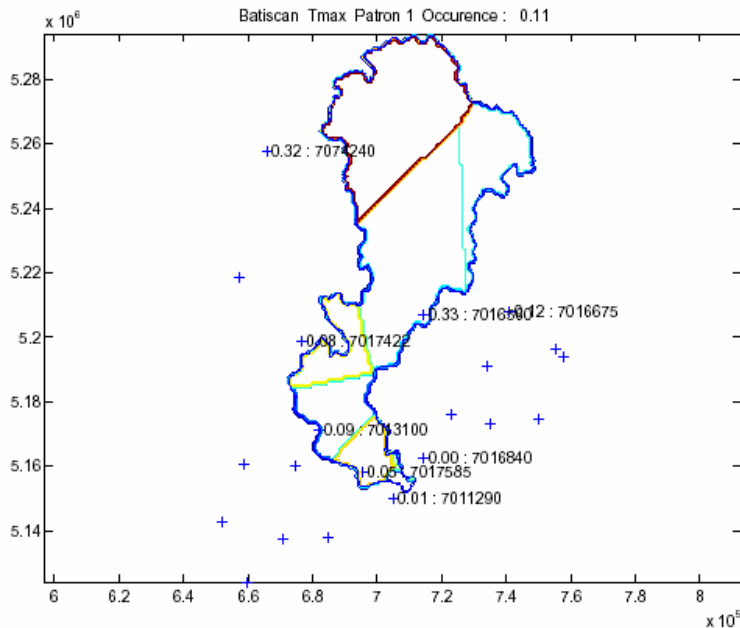
### 3.2.1 Génération de la série climatique synthétique

Le modèle hydrologique HSAMI est un modèle global qui simule les apports naturels au bassin versant en utilisant un pas de temps de 24 heures. Puisque nous possédons des données journalières provenant de plusieurs stations, le calcul de la série météorologique synthétique permet de fournir au modèle une seule valeur journalière de **température maximale, température minimale, pluie et neige** pour l'ensemble du bassin modélisé. Cette série de données servira à la fois à l'étalonnage du modèle et à la génération de séries climatiques futures par la méthode des deltas.

Pour chaque bassin, une « moyenne des observations au bassin » ou « météo au bassin » est calculée pour chaque jour de la période de référence et pour chaque type de données. Cette valeur journalière qui sera fourni en intrant au modèle, est calculée par la méthode des polygones de Thiessen<sup>3</sup>. La figure 3 présente un exemple de résultat du calcul de la « météo au bassin » pour une journée donnée dans le bassin de la rivière Batiscan. Sur l'ensemble des 19 stations météorologiques utilisées pour le bassin, 8 stations ont été retenues pour le calcul de la température maximale synthétique de cette journée. Le poids attribué aux stations retenues de même que leur numéro d'identification sont donnés. La zone d'influence des stations est également tracée sur le bassin. Un patron est attribué à chaque jour en fonction du nombre de stations disponibles pour la journée.

---

<sup>3</sup>Thiessen, A.H. et J.C. Alter (1911) Climatological Data for for July, 1911: District No. 10, Great Basin. *Monthly Weather Review* July 1911:1082-1089.



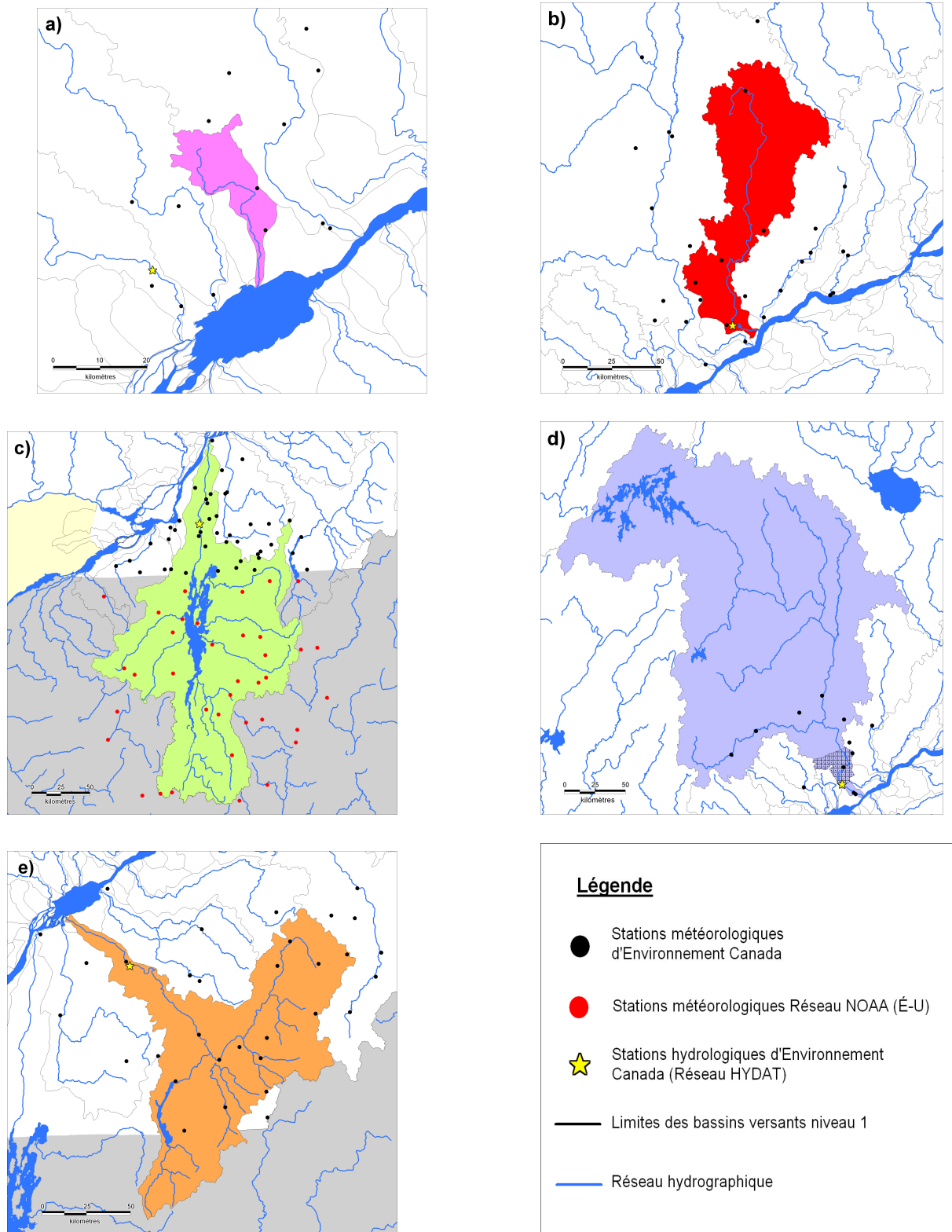
**Figure 3 :** Exemple de calcul de la température maximale journalière par la méthode des polygones de Thiessen; bassin de la rivière Batiscan. Noter que les unités des axes sont des coordonnées UTM en mètres.

### 3.2.2 Stations météorologiques et hydrologiques

La majorité des stations météorologiques utilisées sont celles du réseau d'Environnement Canada. Les données pour ces stations sont disponibles gratuitement sur Internet. Pour chaque bassin modélisé, les stations météorologiques ont été choisies dans un rayon d'environ 50 km du tributaire. Le bassin de la rivière Richelieu se trouvant presque entièrement sur le territoire américain, nous avons aussi utilisé les données du réseau américain NOAA pour établir les séries climatiques nécessaires à la modélisation hydrologique du bassin.

Toutes les données hydrologiques utilisées dans le cadre du projet proviennent des stations du réseau HYDAT d'Environnement Canada. Les données pour ces stations sont disponibles gratuitement sur Internet. Les stations météorologiques et hydrométriques utilisées dans le cadre de ce projet sont présentées à la figure 4. Une liste exhaustive des stations choisies et des périodes de disponibilité des données est présentée à l'annexe A

Après avoir complété l'étalonnage, la validation et les simulations hydrologiques, nous avons appris qu'une correction des données hydrométriques avait été effectuée par Environnement Canada (Bouchard et Morin, 2000). Un nouvel étalonnage basé sur les données corrigées a été effectué, de même que les simulations pour deux tributaires.



**Figure 4 :** Stations météorologiques et hydrométrique utilisées : a) Yamachiche, b) Batiscan, c) Richelieu, d) St-Maurice et e) St-François

Toutefois, nous avons noté peu de différences avec les simulations précédentes. Compte tenu que l'exercice consiste à faire la différence entre les simulations des périodes futures et les simulations de la période de référence, nous croyons qu'il n'est pas nécessaire de refaire les simulations avec les données corrigées.

### 3.3 Scénarios climatiques

Les modèles de climat globaux (MCG) sont les meilleurs outils de base à partir desquels on peut construire des scénarios de changements climatiques (GIEC 2001). Toutefois, il n'est pas recommandé d'utiliser les sorties brutes des modèles climatiques globaux, parce qu'ils comportent de trop grand biais et que l'échelle spatiale de ces modèles n'est pas appropriée pour l'évaluation des impacts des changements climatiques à l'échelle régionale. Ainsi, on a mis à l'évidence que les sorties des MCG requerraient une mise à l'échelle spatiale et une correction des biais afin de lier les projections issues des MCG aux impacts régionaux des changements climatiques. Plusieurs méthodes ont été proposées afin de réduire l'échelle spatiale, mentionnons entre autres, la mise à l'échelle dynamique, la mise à l'échelle statistique par régression et les générateurs stochastiques de climat.

En considérant d'une part, les besoins présentés plus haut et d'autre part le temps et les ressources nécessaires à la production de scénarios à plus haute résolution via les méthodes de mise à l'échelle statistique et dynamique, nous avons construit les scénarios climatiques du présent projet avec la méthode dite des «deltas». Cette méthode offre l'avantage d'être relativement rapide et simple à effectuer, tout en permettant d'établir une gamme de scénarios climatiques plausibles à partir d'un ensemble de simulations de modèles climatiques globaux ayant fait l'objet d'une évaluation reconnue par le GIEC.

Notons toutefois que le consortium Ouranos a participé à l'évaluation de méthodes de mise à l'échelle statistique sur l'est du Canada (Gachon *et al.* 2005) et exploite également un modèle climatique dynamique à haute résolution spatiale, le Modèle régional canadien du climat (MRCC, Laprise *et al.* 2003). Ces outils nous permettront de construire des scénarios climatiques à plus haute résolution pour les études d'impacts et d'adaptation aux changements climatiques. Au moment de réaliser ce projet, nous ne disposons malheureusement pas de simulations du MRCC validées sur l'horizon de temps souhaité et la technique de mise à l'échelle statistique des précipitations n'est pas encore satisfaisante pour être appliquée dans les délais de temps souhaitables.

#### 3.3.1 Méthode des deltas

En bref, la méthode des «deltas» consiste à utiliser la différence entre la moyenne mensuelle d'une variable simulée par un MCG sur une période de 30 ans dans le futur et la moyenne mensuelle de la variable simulée par ce même MCG durant la période de référence (1961-1990). Pour la température, le delta mensuel est additionné aux données

climatiques quotidiennes ; dans le cas de variables qui sont soit positives, soit nulles telle la précipitation, on applique le changement par un ratio. Les changements sont appliqués aux données climatiques quotidiennes synthétisées pour chaque bassin versant durant la période de référence (voir section 3.2.1). Pour chaque mois, la méthode de construction des séries climatiques s'exprime ainsi mathématiquement :

Pour les températures :

$$Tscen_{a+\Delta a,m,j} = (TMCG_{future_m} - TMCG_{référence_m}) + Tobservée_{référence_{a,m,j}}$$

Pour les précipitations :

$$Pscen_{a+\Delta a,m,j} = (PMCG_{future_m} / PMCG_{référence_m}) \times Pobservée_{référence_{a,m,j}}$$

où  $T(P)scen_{a+\Delta a,m,j}$  est la température (précipitation) quotidienne pour le jour j du mois m de l'année a+Δa avec Δa le nombre d'année entre la période future et la période de référence

$T(P)MCG_{future_m}$  est la moyenne mensuelle de température (précipitation) simulée par un MCG sur un horizon donné et moyennée sur les 30 années de l'horizon

$T(P)MCG_{référence_m}$  est la moyenne mensuelle de température (précipitation) simulée par un MCG sur la période de référence et moyennée sur les 30 années de cette période

$T(P)observée_{référence_{a,m,j}}$  est la température (précipitation) quotidienne observée à une station météorologique pour le jour j du mois m de l'an a de la période référence

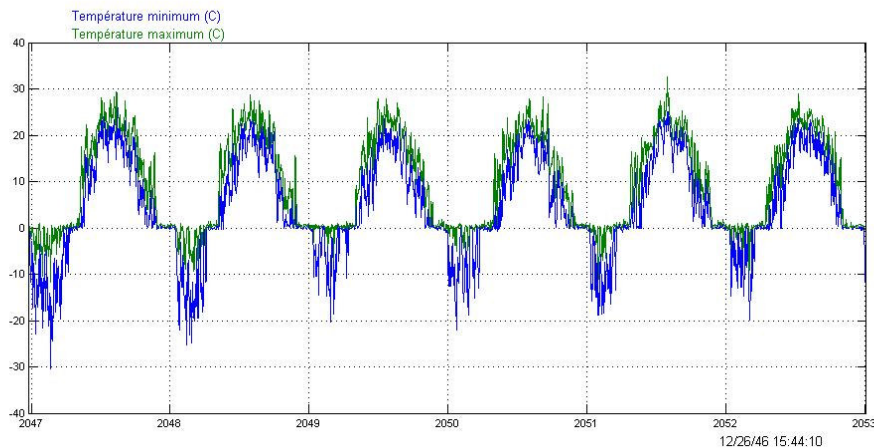
Puisque le modèle hydrologique tient compte de l'état de la précipitation (pluie ou neige), nous avons effectué un transfert de la neige en pluie en fonction de la température moyenne. Ainsi, lorsque la température moyenne quotidienne se situe entre -2°C et +2°C, un transfert linéaire de neige en pluie est effectué de façon à ce que toute la neige soit transformée en pluie à 2°C et aucune transformation ne survienne à -2°C.

### 3.3.2 Modèles climatiques et scénarios d'émission de GES retenus

Compte tenu des fortes incertitudes associées à la représentation du climat à l'échelle régionale ou locale (qui varie très fortement d'un modèle à l'autre), le GIEC suggère d'utiliser lorsque cela est possible, plusieurs modèles afin d'avoir un éventail plus large des changements possibles. Il est aussi préférable d'avoir recours à plusieurs scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES). Afin de faciliter et de standardiser la réalisation d'études d'impacts des changements climatiques, le GIEC diffuse les données de MCG via le Centre de Distribution de Données (CDD) (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>). À partir de ces banques de données, nous avons retenu trois MCG en tenant compte des besoins du présent projet et des critères recommandés par le GIEC pour la sélection des MCG dans un contexte d'étude d'impacts des changements climatiques. Dans la présente étude, les modèles retenus doivent répondre aux critères suivants :

- Être couplés atmosphère-océans en 3D
- Être documentés dans la littérature revue par les pairs
- Avoir réalisé une simulation de contrôle sur plusieurs siècles (pour des raisons de stabilité)
- Avoir participé au Projet d'intercomparaison des modèles CMIP2
- Avoir une résolution d'au moins 4° en latitude.
- Avoir un schéma de surface à plus d'une couche

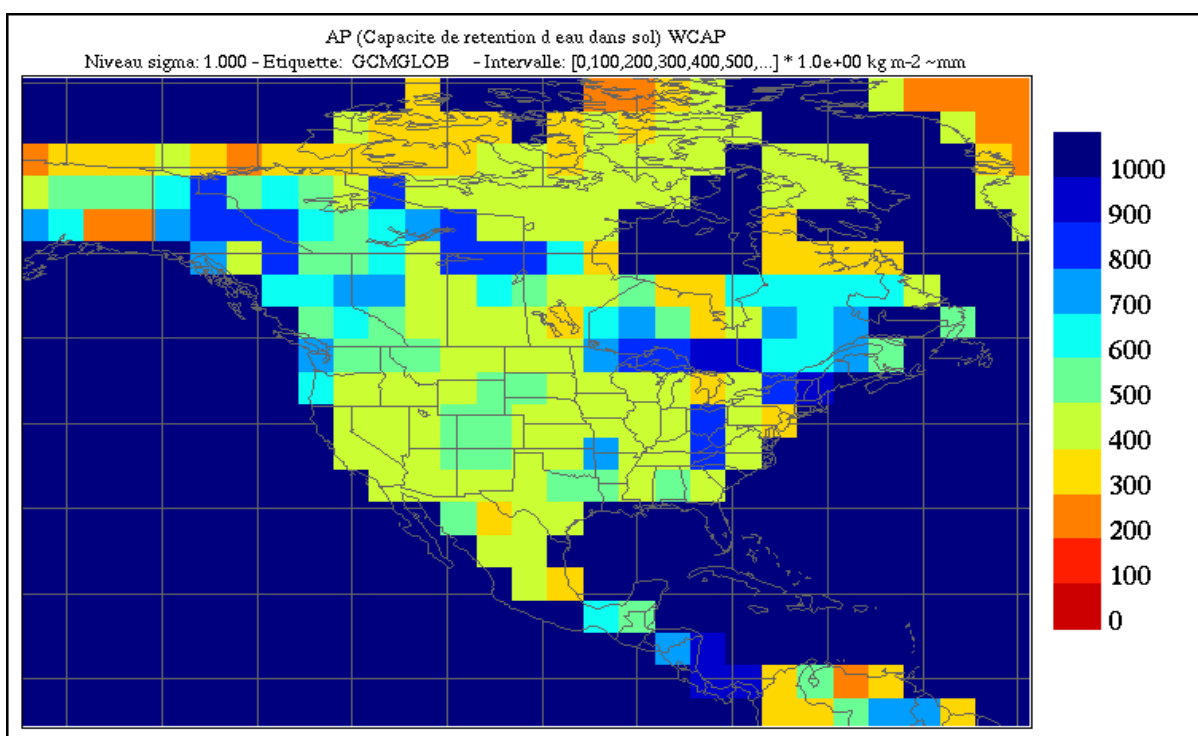
Les quatre premiers critères ont été proposés dans Parry (2002) et sont des incontournables reconnus par le GIEC. Le cinquième critère ayant trait à la résolution est recommandé par le GIEC et, puisque nous travaillons à l'échelle régionale, nous considérons qu'il est important. Quant au dernier critère concernant le schéma de surface, il a été considéré à cause du climat et des propriétés du sol de la région à l'étude. Certains modèles de circulation générale, tels le modèle canadien MCGC2 et le modèle américain GFDL-R30, comportent un schéma de surface à une couche qui entraîne d'importants biais dans la reconstitution et la simulation des processus de surface (Crossley, *et al.* 2000). Verseghy (1996) a montré que ce phénomène peut avoir d'importantes répercussions sur les températures de surface à l'arrivée du dégel printanier et du gel automnal dans le MCGC2. Ce modèle considère une température uniforme du sol qui tarde à atteindre le point de congélation à l'automne, ayant pour effet d'émettre de la chaleur et de maintenir la température de l'air autour de 0°C. Ainsi, en début d'hiver, les températures oscillent autour de 0°C pendant quelques semaines à plus d'un mois (voir figure 5). Ce phénomène est d'autant plus marqué si la capacité de rétention d'eau dans le sol, tel que considérée par le modèle, est grande. Dès que le modèle considère que le sol et son contenu en eau sont gelés uniformément, ce qui est plus long si le modèle reconnaît une grande quantité d'eau dans le sol, les températures de l'air sont à nouveau à la baisse. Le phénomène inverse se



**Figure 5 :** Températures quotidiennes minimum et maximum simulées par le MCGC2 pour la tuile 46, 39°N et 75°W.

produit au printemps. Il va sans dire que le calcul des deltas de ce modèle durant les saisons de gel et de dégel comporte d'importants biais là où la capacité de rétention en eau dans le sol est grande. De plus, avec le réchauffement des températures, le blocage des températures se déplace progressivement vers les périodes plus froides et les deltas entre la période de référence et les horizons futurs sont fortement biaisés.

La capacité de rétention d'eau du sol exprimée en mm d'eau telle que perçue par le MCGC2 est présentée à la figure 6. D'importantes différences spatiales sont estimées sur le continent nord-américain et la partie méridionale du Québec est dans une zone où la capacité de rétention d'eau du sol est relativement importante dans le modèle. Sachant que le problème relatif aux températures de l'air durant les périodes de gel et de dégel est lié à la capacité du sol à retenir de l'humidité, combinée à un schéma de surface trop simple, nous avons choisi de ne pas utiliser le modèle MCG2. Outre son schéma de surface à une couche, le modèle GFDL-R30 a aussi été rejeté parce que seules les températures moyennes sont diffusées alors que le modèle hydrologique requiert les températures minimales et maximales.

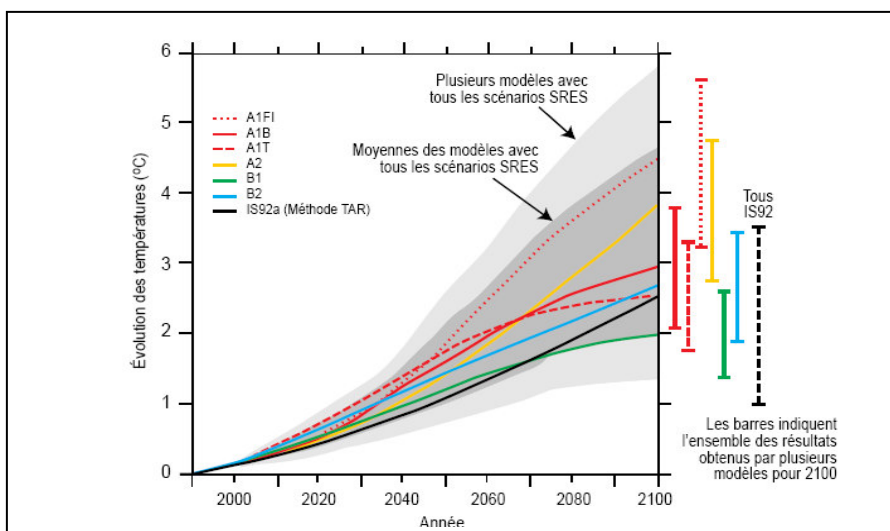


**Figure 6 :** Capacité de rétention d'eau dans le sol telle que perçue par le MCGC2

Une fois les MCG choisis, il reste à sélectionner les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES). Sachant que les GES proviennent essentiellement de l'utilisation de combustibles fossiles, on s'efforce d'anticiper l'évolution des conditions démographiques, économiques et technologiques à venir. À partir des scénarios d'émissions, on calcule les scénarios de concentrations de GES qui ont pour effet de modifier l'énergie rayonnante propre au système Terre-atmosphère aussi appelée le « forçage radiatif ». On peut ainsi

anticiper l'évolution du climat en considérant différents scénarios d'évolution de la physique de l'atmosphère. À la demande du GIEC, un *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES; Nakicenovic *et al.*, 2000) a été produit où sont présentés une quarantaine de scénarios desquels six scénarios ont été choisis par le GIEC à titre indicatif. La figure 7<sup>4</sup> présente l'évolution des températures à l'échelle planétaire selon les six différents scénarios d'augmentation de concentrations de GES. À titre comparatif, les résultats avec le scénario IS92a sont aussi montrés. Ce dernier qui représente le statut quo était celui qu'utilisaient le plus souvent les spécialistes des répercussions et de la modélisation climatique avant l'avènement des scénarios d'émissions SRES.

On réalise qu'à partir du milieu du 21<sup>e</sup> siècle, les écarts de température selon les scénarios d'émissions de GES se font plus importants. Par contre, avant cette période, les différences entre les simulations climatiques seront surtout tributaires du MCG tel que nous le verrons plus loin lors de la présentation des résultats. Puisque les centres de modélisation du climat ont tous au minimum fourni des simulations avec les scénarios d'émissions de GES A2 et B2, nous avons utilisé les simulations climatiques produites par ces scénarios d'émissions de GES. Ce choix nous permet de représenter de façon équitable tous les modèles et d'éviter de fausser les valeurs médianes par une surreprésentation d'un MGC donné.



**Figure 7** Évolution de la température moyenne mondiale pour les six scénarios indicatifs SRES, dérivée au moyen d'un modèle climatique simple.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Source : Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, Rapport du Groupe de travail I du GIEC, *Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, page 66

Le tableau 2 présente les modèles retenus de même que quelques-unes de leurs caractéristiques. Au total, 6 réalisations ont servi à l'élaboration des scénarios climatiques. Il est important de noter qu'à l'exception du modèle ECHAM4, toutes les sorties des MCG ont été tirées du site internet du CDD mentionné plus haut. À cause de problèmes rencontrés dans les sorties du modèle ECHAM4 diffusées sur CDD, nous avons utilisé les données quotidiennes diffusées via le CERA (Climate and Environmental Retrieving and Archiving) (<http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html>) pour ensuite calculer les moyennes mensuelles. Trois simulations du modèle HadCM3 ont été forcées avec le scénario d'émission de GES A2 et deux simulations ont été produites avec B2. Nous avons calculé les deltas de température et les ratios des précipitations pour les trois simulations et avons retenu les simulations A2b et B2b parce qu'elles nous fournissaient une plus grande fourchette en terme de couverture de scénarios climatiques probables.

La plupart des MGC simule une importante variabilité interdécennale, ce qui rend difficile la différenciation entre le signal de changement climatique et le bruit de fond du modèle (Barrow *et al.* 2004) ; aussi, le GIEC (2001) recommande d'utiliser des moyennes de 30 ans pour le calcul des deltas. La division standard a été adoptée : trois horizons temporels sont analysés soit les décennies 2020 (2010-2039), 2050 (2040-2069) et 2080 (2070 -2099).

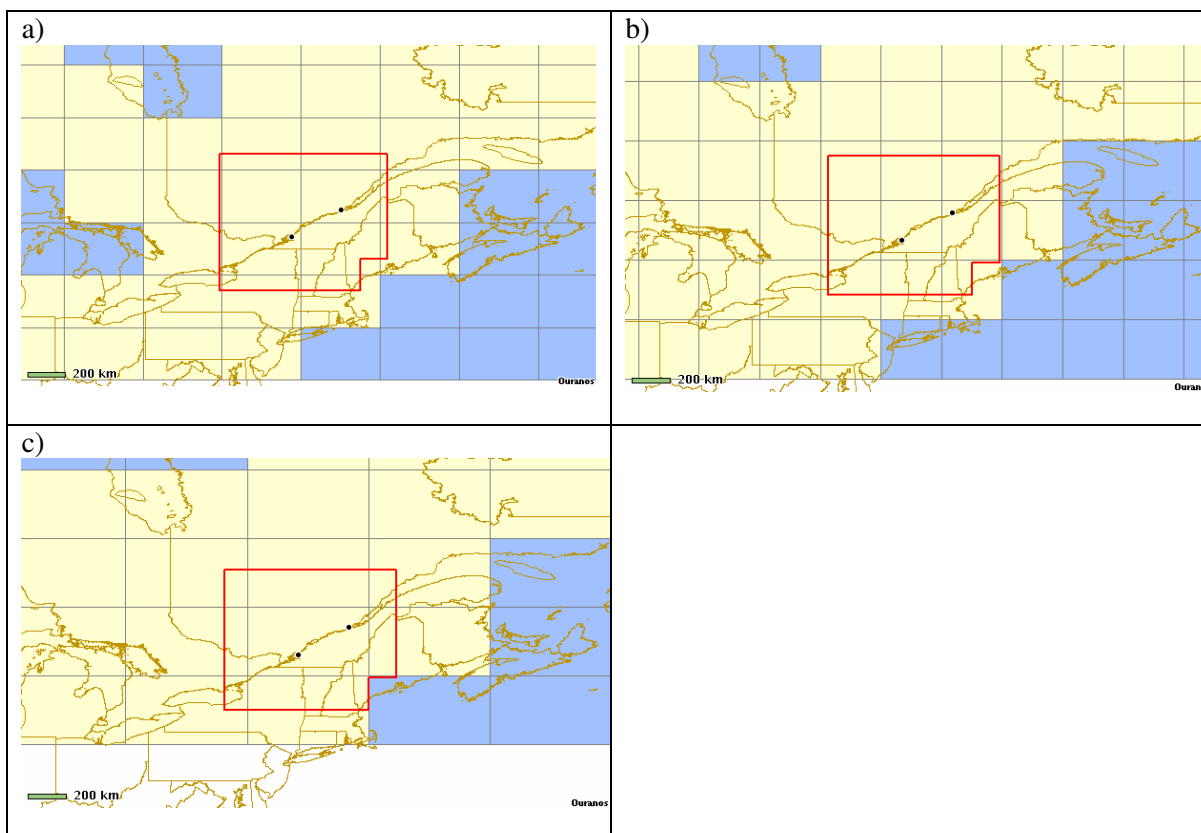
**Tableau 2** Modèles de climat globaux et scénarios SRES utilisés lors de l'élaboration des scénarios climatiques.

MCG	Pays	Résolution (lat X long)	SRES
<a href="#">CSIRO-Mk2</a>	Australie	3,2° X 5,6°	A2 et B2
<a href="#">ECHAM4</a>	Allemagne	2,8° X 2,8°	A2 et B2
<a href="#">HadCM3</a>	Royaume-Uni	2,25°X 3,75°	A2b et B2b

### 3.3.3 Région de référence

Il est connu que l'information provenant d'un MCG doit être considérée le plus possible à partir d'au moins quatre points de grille et non pas uniquement à partir d'un seul point de grille le plus souvent considéré comme non représentatif physiquement. Les deltas et ratios ont donc été calculés sur des régions couvrant au moins quatre points de grille des modèles ayant une résolution moyenne. C'est ce qu'on appelle la région de référence de calcul des deltas. L'utilisation d'une région de référence offre l'avantage de toujours considérer le même territoire quel que soit la grille du MCG. De plus, nous avons noté que les deltas régionaux offrent une variabilité temporelle plus lissée comparée à celle des deltas du point de grille le plus près, ce qui peut s'avérer préférable.

Les grilles des MCG retenus superposées à la région de référence sont présentées à la figure 8. La région est délimitée par les latitudes 43°N et 49,5°N et par les longitudes 69°O et 77°O. Dans le calcul des deltas régionaux, la valeur de chaque point de grille est pondérée en fonction de la surface occupée dans la région. On remarque une échancrure dans le coin sud-est de la zone, celle-ci est due à la présence d'un point océanique dans la grille du modèle CSIRO, qui n'a pas été pris en compte.



**Figure 8 :** Grilles des MCG retenus (couleur grise) et région de référence pour le calcul des deltas (couleur rouge). a) HadCM3, b) ECHAM4 et c) CSIRO.

### 3.4 Avantages et inconvénients de la méthode

Les avantages et les faiblesses de la méthode des deltas de même que du modèle HSAMI sont présentés dans le tableau 3. La capacité de construire plusieurs scénarios afin de couvrir un éventail de climats futurs possibles de même que le fait que la méthode soit opérationnelle à Ouranos constituent sans aucun doute les principaux avantages de la méthode. À l'opposé, avec la méthode des deltas, on émet l'hypothèse que le biais des MCG calculé durant la période de référence sera conservé dans le futur ce qui peut s'avérer erroné. De plus, dans la réalisation des séries climatiques futures, la variabilité (ex. fréquence des précipitations) et la distribution des extrêmes climatiques est entièrement basée sur les observations durant la période de référence. Or il est fort probable que ces

caractéristiques des précipitations soient modifiées dans le climat futur ce qui aura un effet évident sur l'hydrologie. Par exemple, des redoux hivernaux plus fréquents entraîneraient une diminution du couvert de neige et la crue printanière serait moins importante. Des changements de fréquence et d'intensité de précipitations auraient des répercussions sur l'hydrologie au printemps, en été et en automne ; des précipitations plus intenses peuvent modifier considérablement la dynamique sédimentaire alors que des événements moins fréquents combinés aux hausses de température projetées entraîneront une baisse du contenu en eau dans le sol qui pourrait modifier sensiblement le ruissellement et l'écoulement de l'eau dans le sol. Toutefois, les méthodes de simulation de la variabilité et des extrêmes de précipitations demandent encore du temps pour être validées. Nous avons donc choisi de nous en tenir à la méthode des deltas pour la production des scénarios hydrologiques. Il est important de noter que compte tenu que la période hivernale jusqu'à la crue printanière en est une principalement d'accumulation de neige, il est probable que la méthode que nous utilisons soit moins défaillante pour les crues printanières comparativement à l'hydrologie des autres saisons puisque la variabilité durant l'accumulation de la neige importe moins que la quantité de neige accumulée.

**Tableau 3:** Avantages et inconvénients de la méthode des deltas

<b>Avantages</b>	<b>Faiblesses</b>
<b>Méthode des deltas</b>	
Plusieurs MCG et scénarios d'émissions disponibles et reconnus par la communauté scientifique	Hypothèse que les biais du MCG calculés pour la période 1961-1990 sont les mêmes pour les périodes futures
Méthode opérationnelle à Ouranos	Changement calculé à une résolution spatiale grossière
Information physiquement cohérente	Variabilité climatique et distribution des extrêmes basées sur la période actuelle
Simulations de long terme	Biais peuvent être importants surtout dans les régions physiographiques complexes (zones côtières, montagneuses)
<b>HSAMI</b>	
Modèle facilement accessible et largement testé	Intrants moyennés au bassin et non-distribués spatialement
Modèle demandant peu d'intrants	Impossibilité d'étalonner le modèle en tenant compte des relevés de neige observés puisque ces données ne sont pas disponibles pour les simulations futures
Optimisation automatique des paramètres	Projection à long terme basée sur un étalonnage qui est effectué uniquement sur les données actuelles

## 4. DESCRIPTION DES RÉSULTATS

---

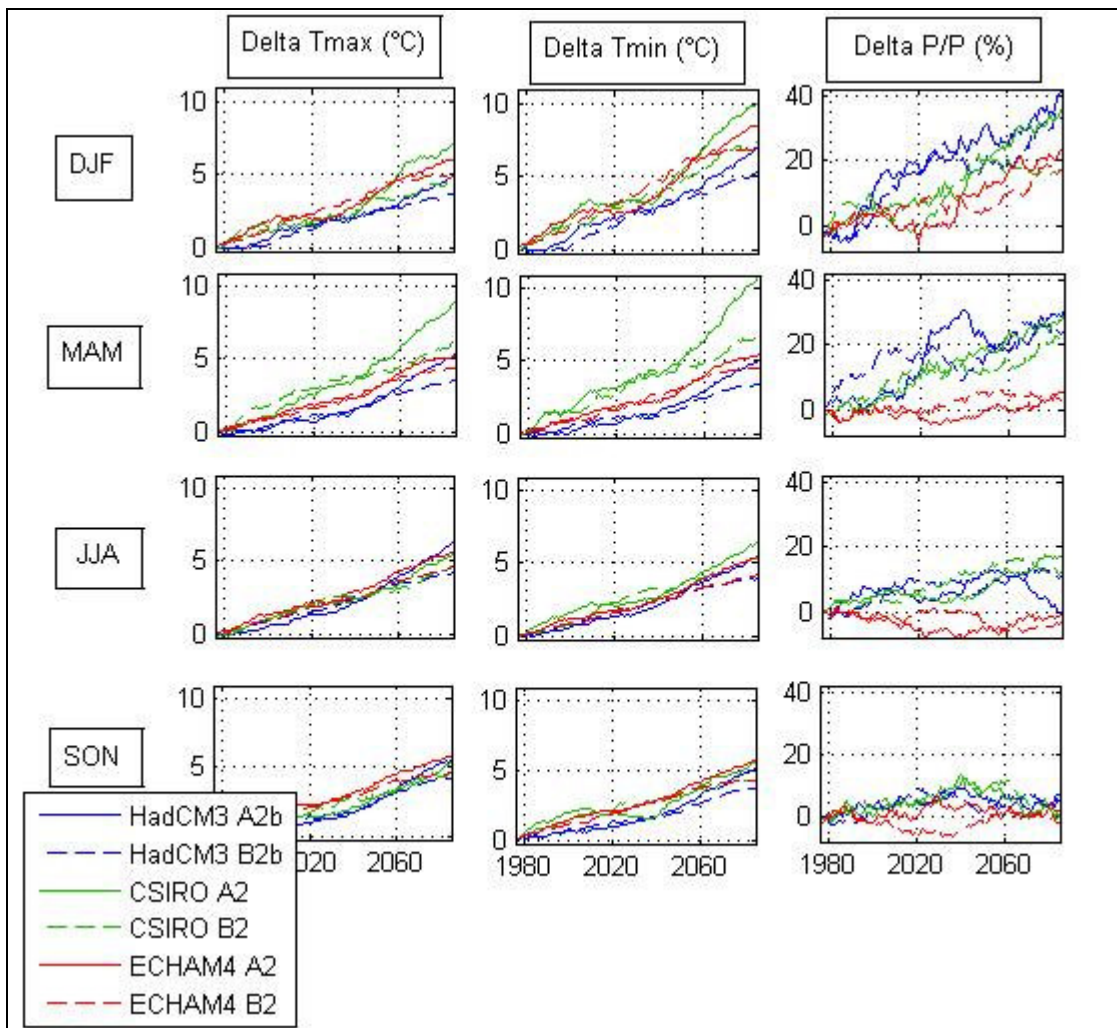
### 4.1 Scénarios climatiques

La figure 9 montre l'évolution saisonnière des températures maximum et minimum de même que des précipitations de 1975 à 2085 pour les 6 réalisations. Quel que soit le modèle et le scénario d'émissions, les températures sont à la hausse pour toutes les saisons. De plus, tous les modèles prévoient un réchauffement hivernal et printanier plus important que celui durant les saisons estivales et automnales, ceci est particulièrement claire pour la température minimale. Par contre, en ce qui a trait aux précipitations, la tendance est moins nette : en hiver, toutes les réalisations projettent une augmentation, au printemps, le HadCM3 et le CSIRO projettent des augmentations alors que ECHAM4 prévoit très peu de changement ; durant l'été et l'automne, les modèles oscillent entre de légères augmentations et des diminutions par rapport à la période 1961-1990.

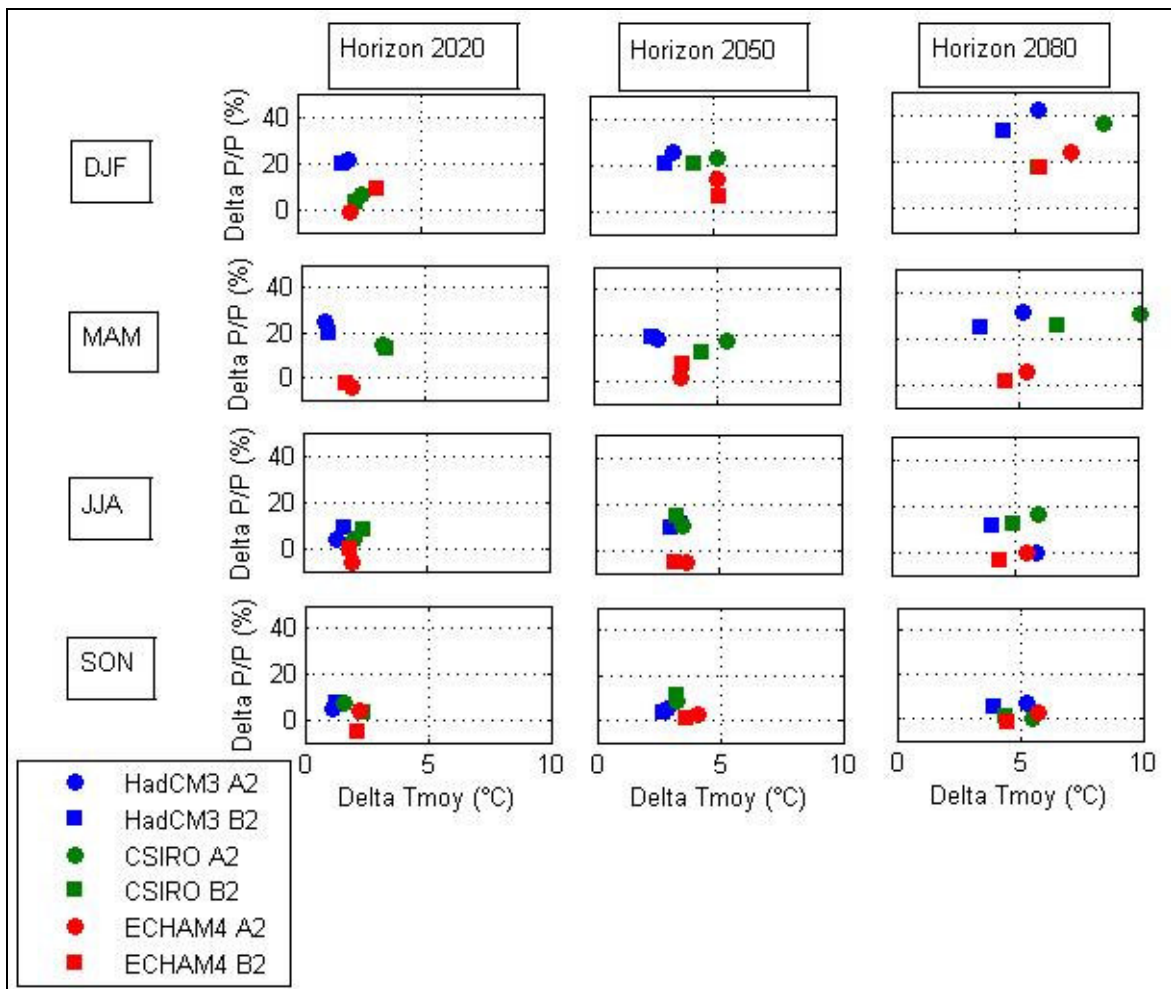
En analysant la dispersion des courbes de tendance, il est possible de qualifier les incertitudes liées aux changements prévus. Nous notons que pour la température, les écarts entre les modèles sont plus grands l'hiver et le printemps comparativement à l'été et l'automne, il y a donc plus d'incertitudes associées aux changements de température durant les deux premières saisons. Les incertitudes associées aux changements de température tendent à augmenter dans le temps l'hiver et le printemps. Par contre, l'été et l'automne, la dispersion des courbes demeure assez constante. En ce qui a trait aux précipitations, on observe que les écarts entre les modèles sont plus importants l'hiver, le printemps et l'été.

Dans l'analyse des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie, il est intéressant de mettre en relation les changements de température avec ceux des précipitations (fig. 10). Pour les trois horizons étudiés, cette relation nous montre qu'en terme de disponibilité de l'eau, le modèle ECHAM4 est en général plus pessimiste que les autres modèles prévoyant en général peu de changement dans les quantités de précipitations et une hausse des températures moyenne à élevée comparativement aux autres modèles. À l'opposé, le HadCM3 est en général plus optimiste, le modèle anglais prévoyant souvent la plus forte hausse des précipitations et le plus faible changement des températures. Le CSIRO se situe souvent entre les deux pôles.

La figure 10 fait aussi ressortir que pour les deux premiers horizons, les différences sont plus importantes entre les MCG qu'entre les scénarios d'émissions de GES. Ceci est en accord avec la figure 8 qui montre qu'à l'échelle planétaire, les écarts entre les scénarios d'émissions de GES commencent à apparaître au milieu du 21<sup>e</sup> siècle.



**Figure 9:** Moyenne mobile de 30 ans des changements de températures minimum et maximum et des précipitations des 6 réalisations de 1975 à 2085 dans la région à l'étude. DJF pour décembre-janvier-février; MAM pour mars-avril-mai; JJA pour juin-juillet-août et SON pour septembre-octobre-novembre. Les changements sont calculés par rapport à la période 1961-1990.



**Figure 10 :** Diagramme de dispersion des changements de précipitations et de températures moyennes pour les trois horizons d'intérêt.

## 4.2 Scénarios hydrologiques

### 4.2.1 Hydrogrammes annuels moyens et débits module

Les figures 11 à 15 montrent pour chaque bassin et pour chaque horizon, l'hydrogramme moyen obtenu pour chacune des 6 réalisations. Cet hydrogramme est une moyenne journalière des 30 années de débits simulés pour chaque horizon. Pour chaque bassin, une quatrième figure présente le débit module annuel moyen pour l'ensemble des 6 modèles et des 3 horizons (vignette d). Le débit module annuel moyen est la moyenne des débits journaliers, exprimé en  $m^3/s$ .

Les hydrogrammes annuels moyens montrent en général que les crues seront devancées et que leurs pointes seront diminuées. Le devancement de la crue serait attribuable, entre autres, au fait que les températures plus chaudes dans les scénarios futurs feront devancer la date de la fonte au printemps. Le devancement du début de la fonte printanière combinée au retardement de la date du début de l'accumulation de la neige au sol à l'automne donnerait lieu à des hivers plus courts, à une moins grande période d'accumulation de la neige au sol et à une pointe de crue diminuée. Toutefois, pour l'horizon 2020, les simulations réalisées avec le modèle HadCM3 suggèrent une hausse des pointes de crue dans tous les bassins. Dans le bassin de la St-Maurice, la hausse de la pointe de crue pour les simulations basées sur le modèle HadCM3 est parfois présente jusqu'en 2080 (scénario B2b). Tel que le montre la figure 10, les simulations avec le modèle HadCM3 sont en général les plus fraîches et humides parmi celles que nous avons analysées. Il semble donc que pour l'horizon 2020, la hausse des précipitations hivernales projetée par le modèle HadCM3 soit suffisante pour entraîner une hausse des pointes de crue malgré le raccourcissement de la période d'accumulation de neige causée par la hausse des températures. Par contre, en 2050, le HadCM3 projette peu de changement des précipitations comparé à 2020 mais une plus importante hausse des températures. La diminution de la période d'accumulation de neige devient alors suffisante pour entraîner une baisse du pic de crue.

Les hydrogrammes annuels moyens de la rivière Richelieu présentent un portrait différent des autres tributaires (figure 15). En effet, pour tous les horizons, on observe une hausse de la pointe de crue pour les simulations effectuées avec les modèles HadCM3 et CSIRO. Les résultats avec le modèle ECHAM4 suggèrent toujours une baisse de la pointe, mais par contre, en proportion, la baisse est moins importante que sur les autres bassins. Afin de comprendre le comportement différent du bassin de la Richelieu, nous avons comparé le changement moyen dans la quantité de précipitations neigeuses cumulée par année dans le bassin. Toutefois, les différences dans le temps pour le bassin de la Richelieu sont du même ordre que celles des autres bassins. Le comportement particulier de ce bassin demeure donc difficile à expliquer.

En ce qui a trait aux changements futurs des volumes annuels représentés par les débits modules (vignette d des figures 11 à 15), nous observons que les modèles HadCM3 et CSIRO projettent une augmentation pour tous les bassins et tous les horizons, à la fois

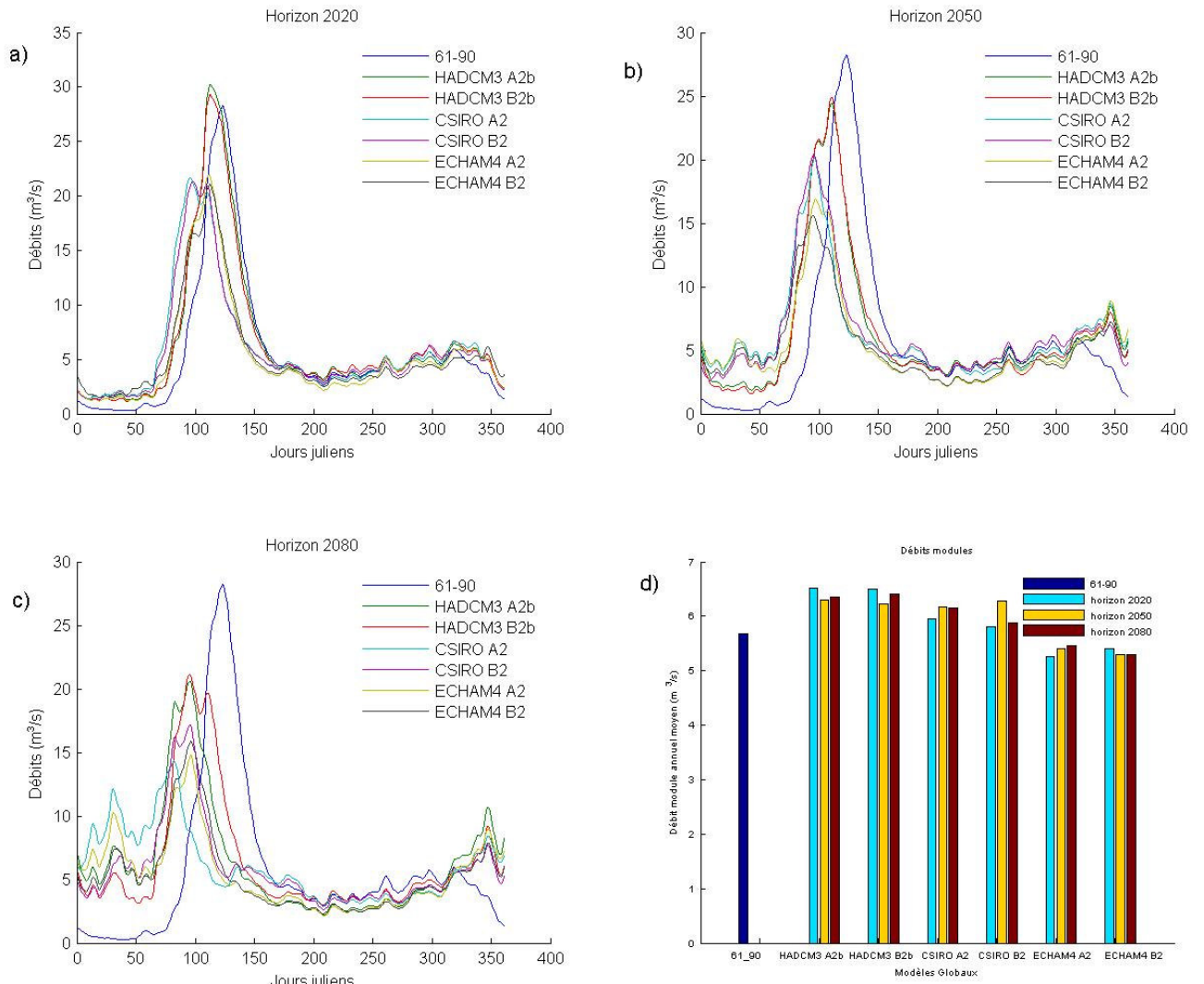
pour les scénarios A2 et B2. Cependant, le modèle ECHAM4 (modèle pessimiste) prévoit une diminution des débits modules annuels moyens, également pour tous les horizons et pour les scénarios A2 et B2. Dans les diagrammes de dispersion des variables climatiques (figure 10), on voyait que ECHAM4 était le seul modèle qui prévoyait relativement peu ou pas d'augmentation des précipitations l'hiver, très peu d'augmentation au printemps, à l'été et à l'automne et parfois même de légères diminutions durant ces trois saisons. La hausse des températures fait donc augmenter les pertes en eau par évapotranspiration et le peu de changement des précipitations projetés par ECHAM4 résulte en une baisse de volume sur une base annuelle.

Le tableau 5 résume l'ensemble des variations moyennes annuelles obtenues pour les bassins étudiés pour chacun des horizons et des scénarios. Il est intéressant de mettre en parallèle l'effet des changements climatiques sur les tributaires du Saint-Laurent avec les changements obtenus par Croley (2003) dans le bassin des Grands-Lacs. Les résultats de Croley projettent une baisse de 4 à 24% du débit annuel en 2050 alors que sur les tributaires, la présente étude projette des variations allant de -12,4 % à 11,5 %. Les différences entre les deux études peuvent provenir de diverses sources dont : 1) la sélection des modèles de circulation générale qui diffère entre les deux études, 2) les caractéristiques physiques du bassin des Grands Lacs sont très différentes de celles des cinq tributaires, 3) les modèles hydrologiques diffèrent et 4) les changements de température et précipitations ne sont pas identiques dans les deux régions. Notons que pour la même réalisation (HadCM3 B2b) Croley (2003) obtient un changement du débit annuel de -4% alors que nous obtenons une hausse variant de 6,6 % à 9,5% selon le tributaire. Les changements climatiques de température et de précipitations projetés par HadCM3 B2b ne sont pas très différents entre les deux régions (voir <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cgi-bin/ddcvis/gcmcf>). Il semble donc que pour des changements climatiques semblables, les changements hydrologiques pourraient être considérablement différents dans le bassin des Grands-Lacs en comparaison à ceux des tributaires du fleuve Saint-Laurent. Il est probable que les phénomènes d'évaporation à la surface des Grands Lacs expliquent en grande partie ces différences.

**Tableau 4** Variations des débits modules selon les réalisations et les horizons climatiques

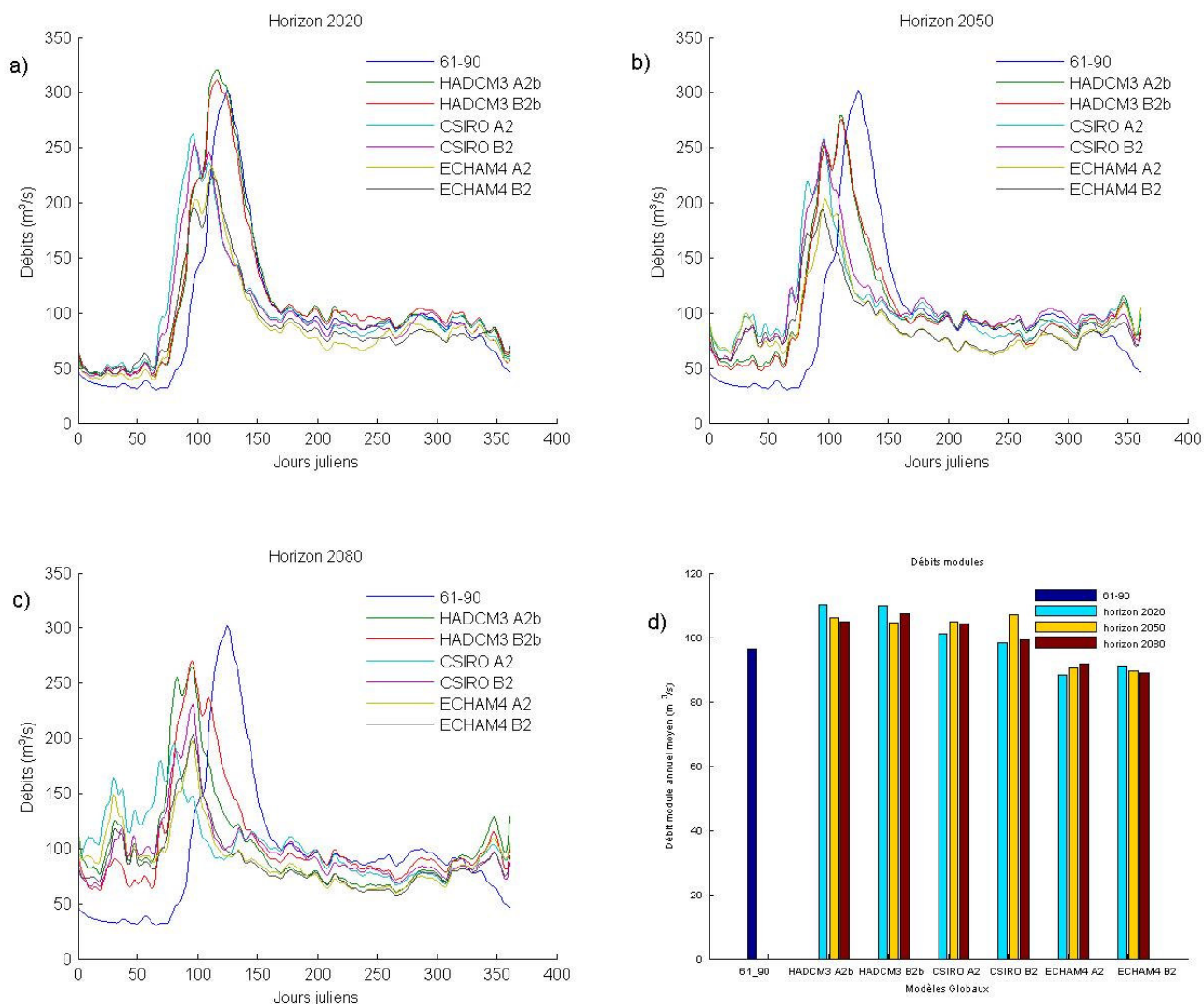
	Simulation 1961-1990	H 2020		H 2050		H 2080	
	débits (m <sup>3</sup> /s)	débits (m <sup>3</sup> /s)	% variation	débits (m <sup>3</sup> /s)	% variation	débits (m <sup>3</sup> /s)	% variation
Batiscan							
HadCM3 A2b	97.00	110.16	13.57	106.06	9.35	105.00	8.24
HadCM3 B2b	97.00	109.96	13.37	104.42	7.65	107.41	10.73
CSIRO A2	97.00	101.19	3.83	104.99	7.72	104.06	6.77
CSIRO B2	97.00	98.34	1.39	107.02	10.33	99.21	2.28
ECHAM4 A2	97.00	88.32	-8.95	90.57	-6.63	91.58	-5.59
ECHAM4 B2	97.00	91.15	-6.03	89.53	-7.71	88.91	-8.34
Yamachiche							
HadCM3 A2b	5.69	6.52	14.71	6.29	10.62	6.36	11.82
HadCM3 B2b	5.69	6.50	14.33	6.22	9.46	6.41	12.68
CSIRO A2	5.69	5.96	4.82	6.18	8.68	6.14	8.07
CSIRO B2	5.69	5.80	1.96	6.27	10.31	5.87	3.27
ECHAM4 A2	5.69	5.27	-7.39	5.40	-5.04	5.46	-3.94
ECHAM4 B2	5.69	5.40	-4.98	5.29	-6.90	5.29	-6.94
St-Maurice							
HadCM3 A2b	13.48	15.50	15.05	14.68	8.96	14.73	9.29
HadCM3 B2b	13.48	15.38	14.17	14.46	7.31	14.93	10.82
CSIRO A2	13.48	13.96	3.57	14.47	7.42	14.24	5.70
CSIRO B2	13.48	13.45	-0.16	14.74	9.41	13.55	0.54
ECHAM4 A2	13.48	12.07	-10.41	12.41	-7.92	12.56	-6.82
ECHAM4 B2	13.48	12.51	-7.17	12.24	-9.20	12.14	-9.91
St-François							
HadCM3 A2b	196.10	223.55	14.00	212.07	8.15	211.31	7.76
HadCM3 B2b	196.10	223.11	13.77	209.06	6.61	214.39	9.33
CSIRO A2	196.10	201.11	2.55	207.03	5.57	202.75	3.39
CSIRO B2	196.10	194.24	-0.95	211.59	7.90	193.50	-1.33
ECHAM4 A2	196.10	173.52	-11.51	175.35	-10.58	177.37	-9.55
ECHAM4 B2	196.10	179.01	-8.71	171.76	-12.41	172.23	-12.17
Richelieu							
HadCM3 A2b	437.18	514.43	17.67	487.65	11.55	497.62	13.82
HadCM3 B2b	437.18	508.55	16.33	476.23	8.93	498.85	14.11
CSIRO A2	437.18	455.35	4.16	470.30	7.58	460.34	5.30
CSIRO B2	437.18	432.79	-1.00	475.23	8.70	435.18	-0.46
ECHAM4 A2	437.18	386.71	-11.54	397.91	-8.98	405.43	-7.26
ECHAM4 B2	437.18	402.33	-7.97	387.88	-11.28	391.66	-10.41

## Bassin de la rivière Yamachiche



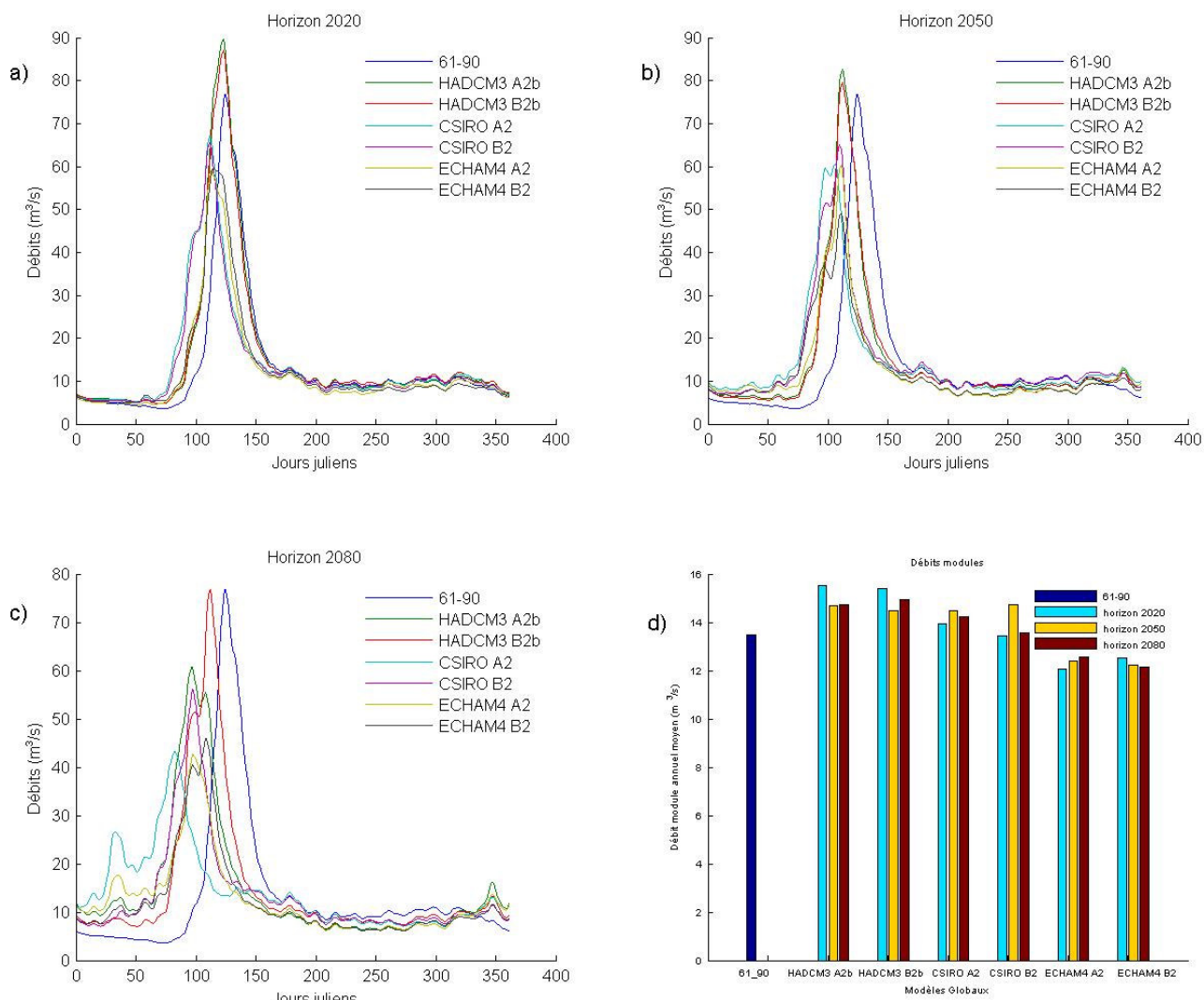
**Figure 11:** Rivière Yamachiche : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.

## Bassin de la rivière Batiscan



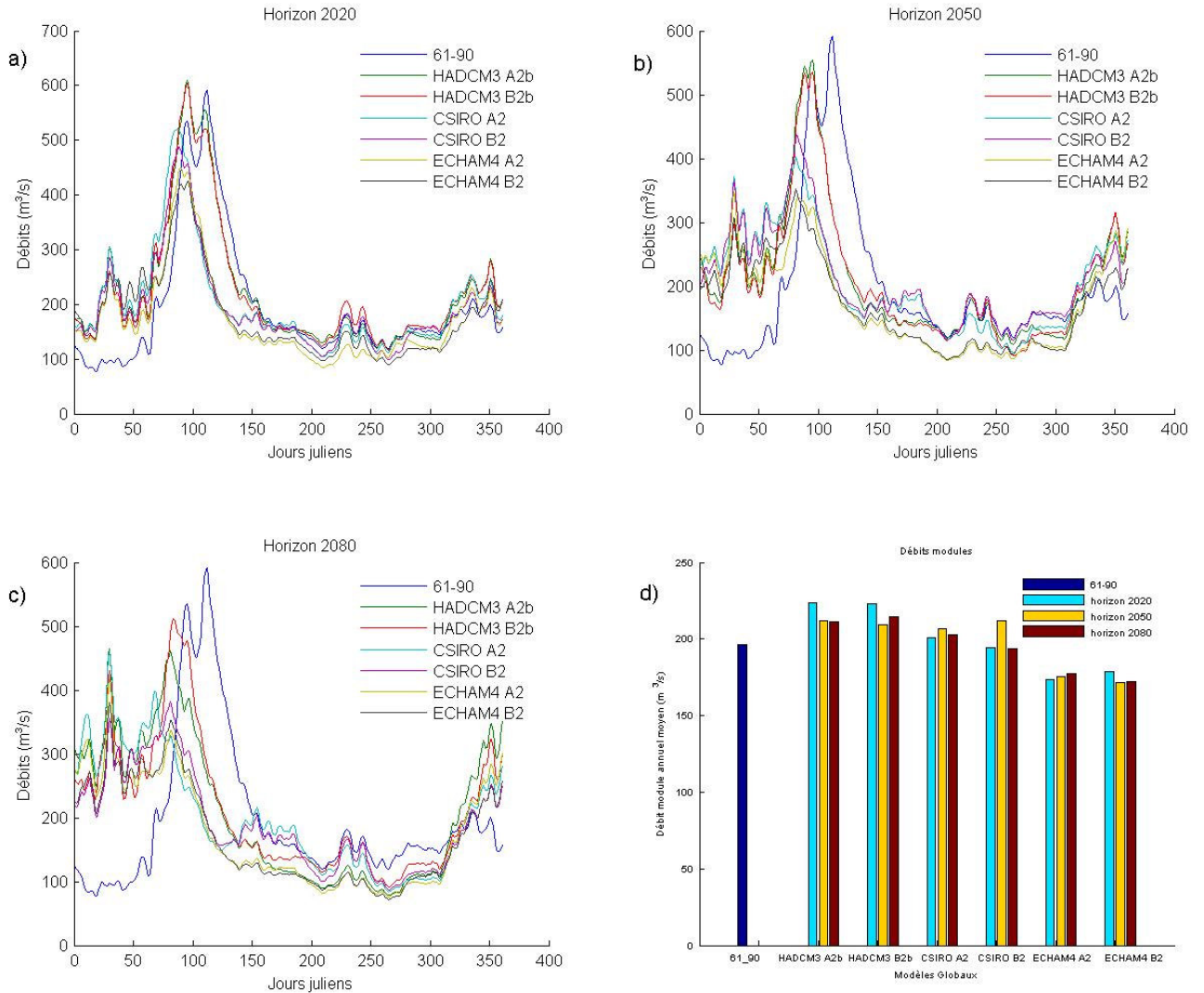
**Figure 12:** Rivière Batiscan : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.

## Bassin de la rivière St-Maurice



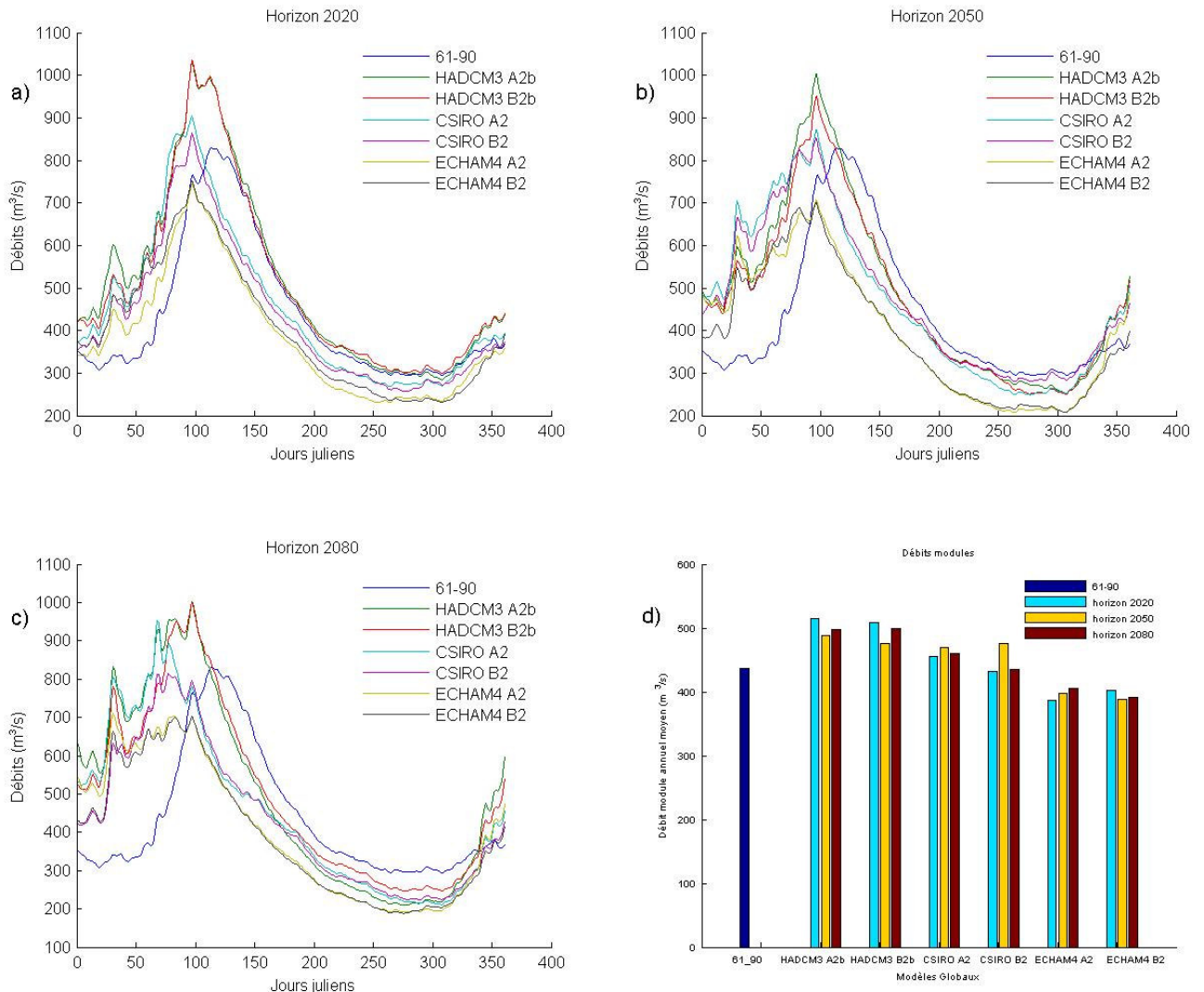
**Figure 13:** Rivière St-Maurice : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.

## Bassin de la rivière St-François



**Figure 14:** Rivière St-François : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.

## Bassin de la rivière Richelieu

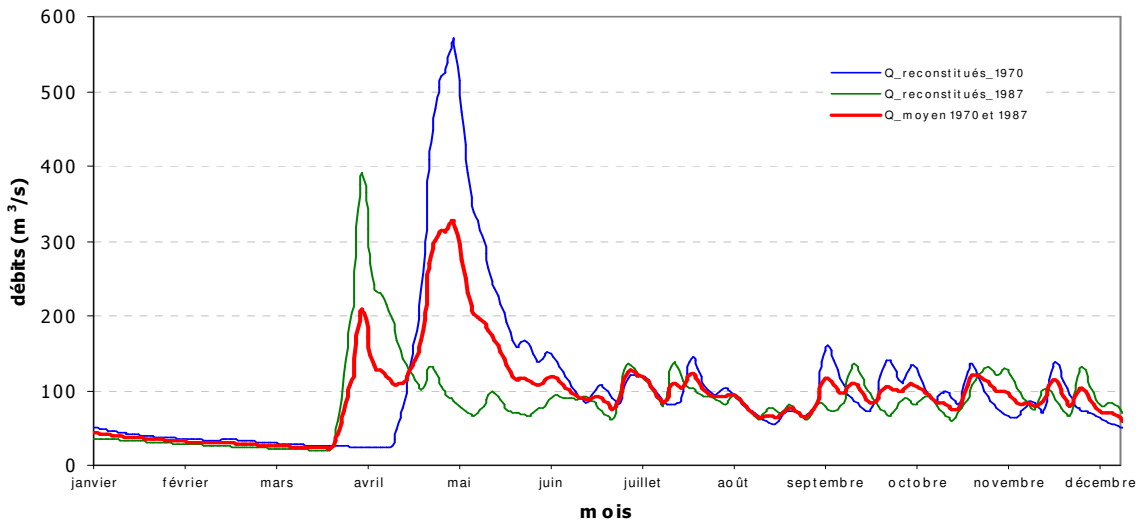


**Figure 15:** Rivière Richelieu : hydrogrammes moyens selon les 6 scénarios pour les horizons a) 2020, b) 2050 et c) 2080 ; d) débits modules pour chaque horizon.

#### 4.2.2 La bi-modalité des crues futures

Le régime de crue des 5 bassins à l'étude est, de façon générale, uni-modale. Cependant, en observant les graphiques des hydrogrammes moyens pour les différents bassins et les 3 horizons futurs, certaines courbes suggèrent que les crues pourraient prendre une allure bi-modale dans le futur. Ce phénomène pourrait effectivement se produire dans certains cas, entre autres en raison des températures plus chaudes au printemps qui pourraient engendrer des redoux et provoquer ce type de crue. Néanmoins, l'allure bi-modale des crues que nous voyons sur ces graphiques est essentiellement provoquée par le calcul de la moyenne annuelle sur plusieurs années. En effet, pour plusieurs bassins, la date de l'arrivée de la crue varie à chaque année et peut même parfois être décalée d'un mois d'une année à l'autre. En effectuant la moyenne annuelle sur 30 ans, les données sont lissées et nous obtenons une crue moyenne qui semble bi-modale.

Pour mieux visualiser le phénomène, la figure 16 montre deux années distinctes reconstituées pour le bassin de la rivière Batiscan. On peut observer sur ce graphique un décalage de la crue selon l'année. En conséquence, l'hydrogramme moyen pour ces deux années semble montrer que la crue est bi-modale. Le calcul de l'hydrogramme annuel moyen pour un horizon donné permet un premier regard sur la tendance générale des résultats attribuables à un scénario donné mais il ne peut remplacer une analyse des débits annuels approfondie, nécessaire à une bonne compréhension des phénomènes de changements climatiques.



**Figure 16:** Débits reconstitués pour les années 1970 et 1987, bassin de la rivière Batiscan

## Conclusion

---

L'ensemble des modèles climatiques globaux utilisés dans cette étude proposent différentes combinaisons de températures et de précipitations qui ont permis de déterminer de quelle façon les débits des tributaires pourraient être affectés par les changements climatiques. Les résultats montrent que les débits seront vraisemblablement changés dans le futur toutefois, les changements hydrologiques diffèrent selon les bassins et les simulations climatiques. Afin de conserver un niveau d'analyse le plus rigoureux possible, il est prudent de considérer chacun des scénarios présentés dans ce rapport comme étant équiprobables et par conséquent, d'évaluer un ensemble de résultats possibles et non un scénario unique.

Pour toutes les simulations climatiques, une augmentation de la température est projetée alors que les changements dans les précipitations sont plus incertains. Certains modèles suggèrent une hausse relativement importante des précipitations alors que d'autres projettent peu de changement en terme de quantité de précipitations. De façon générale, on s'aperçoit que l'augmentation du volume des précipitations augmente la valeur des débits sur les tributaires étudiés alors que des changements plus faibles dans les précipitations entraînent une baisse du volume annuel. En ce qui a trait au pic de crue, on note qu'il est en général plus hâtif et plus faible.

L'étude réalisée dans le cadre de ce projet utilise des méthodes reconnues par la littérature et nous permet de poser un premier diagnostic raisonnable sur les effets probables des changements climatiques. Les modèles climatiques sont en amélioration constante et des adaptations ou des vérifications ayant trait à la robustesse des modèles hydrologiques dans un contexte de changement climatique permettront de raffiner les méthodes de construction de scénarios hydrologiques et de consolider ou de modifier ces premières conclusions. Il sera également possible, dans de prochaines études, de substituer les résultats des modèles de circulation générale par ceux de modèles régionaux qui nous permettront d'obtenir une appréciation plus juste des changements régionaux auxquels nous serons exposés. La considération du changement dans la variabilité et les extrêmes climatiques par l'utilisation des modèles climatiques à des échelles temporelles plus fines nous permettra aussi de raffiner le portrait tracé.

## Références

---

- Barrow E., B. Maxwell et P.Gachon (Eds) (2004). La variabilité et le changement climatique au Canada: Le passé, le présent et le future, DSCA Séries d'évaluation scientifique no 2, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Toronto, Ontario, 114 p.
- Bouchard, A. et J. Morin (2000). Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998. Environnement Canada, Service Météorologique du Canada, Monitoring et Technologies, Section Hydrologie, Rapport Technique RT-101, 71 p.
- Croley II T.E. (2003). Great Lakes climate change hydrologic impact assessment. I.J.C. Lake Ontario-St.Lawrence River regulation study. *NOAA Technical Memorandum GLERL-126*. 84p.
- Crossley, J.F., J. Polcher, P.M. Cox, N. Gedney et S. Planton (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Clim. Dynamics*, **16**, 949-961.
- Fortin, V. (2000). *Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application*, Rapport de recherche, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.
- Gachon, P., A. St-Hilaire, T. Ouarda, VTV Nguyen, C. Lin, J. Milton, D. Chaumont, J. Goldstein, M. Hessami, T.D. Nguyen, F. Selva, M. Nadeau, P. Roy, D. Parishkura, N. Major, M. Choux et A. Bourque (2005) : A first evaluation of the strength and weakness of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada, Final report, Montréal, Québec, Canada, 209 pp.
- GICC-Rhône, 2002. Projet GICC-Rhône, tranche I, rapport-final, décembre 2002, 71p.
- GIEC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. et Johnson, C.A.(dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, N.Y., É.-U., 881p.
- Laprise, R., D. Caya, A. Frigon et D. Paquin (2003): Current and perturbed climate as simulated by the second-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM-II) over northwestern North America. *Clim. Dynamics*, **21**, 405-421
- Mearns, L.O., Hulme, M., Carter, T.R., Lal, M., Leemans, R. and Whetton, P.H. (2001) Climate scenario development. In : Climate Change 2001 : The Scientific Basis, Chapitre 13. Contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 741-768.
- Morin J. et Bouchard, A. (2000). Les basses de la modélisation du tronçon Montréal – Trois-Rivières. Rapports scientifiques RS-100 du SMC, Région du Québec – hydrologie, Environnement Canada, Sainte-Foy, 56 pages.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. et Dadi, Z. (2000) : Emissions Scenarios. Rapport special du Groupe de Travail III du Groupe

d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, 599 p.

Parry, M. (2002): Scenarios for climate impact and adaptation assessment. *Global Environmental Change*, **12**, 149-153.

Verseghy, D.L. (1996): Local climates simulated by two generations of Canadian GCM land surface schemes. *Atmos. Ocean*, **34**, 435-456.

Site Internet du GIEC: [http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/sres/gcm\\_data.html](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/sres/gcm_data.html)

Site Internet du CERA (Climate and Environmental Retrieving and Archiving) (<http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html>)

Site Internet de Environnement Canada, Archives climatiques nationales [En ligne], <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca>, (Page consultée le 1 septembre 2005)

Données météorologiques d'Environnement Canada, données disponibles sur le site Internet de Environnement Canada

Données hydrométriques d'Environnement Canada, Réseau HYDAT, données disponibles sur le site Internet de Environnement Canada

Site Internet du National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) [En ligne], <http://www.noaa.gov/>, (Page consultée le 1 septembre 2005)

Données hydrométriques du National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), données disponibles sur le site Internet du NOAA.

## Annexes

### Stations météorologiques Environnement Canada

Stations utilisées pour le bassin de la rivière Yamachiche

Stations choisies	Latitude	Longitude	Élévation (m)	Début	Fin
7013100	46.67	-72.62	-	1963-05-01	xxxx-xx-xx
7013678	46.67	-72.87	259	1964-01-01	1978-06-01
7014332	46.25	-72.93	-	1967-01-01	xxxx-xx-xx
7014630	46.23	-73.02	15	1957-06-01	1958-12-01
7016816	46.43	-73.15	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7017220	46.45	-72.80	107	1957-06-01	1960-12-01
7017435	46.27	-73.10	-	1973-08-01	xxxx-xx-xx
7017555	46.58	-72.93	168	1978-06-01	xxxx-xx-xx
7017640	46.42	-73.02	167	1950-12-01	1991-05-31
7017757	46.37	-72.78	53	1980-11-01	1991-10-31
7017760	46.75	-72.65	142	1920-05-01	1985-01-31
7018000	46.57	-72.72	-	1902-07-01	xxxx-xx-xx
7018564	46.37	-72.60	53	1934-11-01	1986-08-31
701HE63	46.38	-72.62	55	1974-09-01	xxxx-xx-xx

xxxx-xx-xx : Station toujours en service

Stations utilisées pour le bassin de la rivière **Batiscan**

Stations choisies	Latitude	Longitude	Élévation (m)	Début	Fin
7010480	47.17	-71.62	494	1949-08-01	1960-10-01
7011290	46.47	-72.33	-	1980-11-01	xxxx-xx-xx
7011600	46.87	-71.87	152	1949-08-01	1982-03-01
7012070	46.67	-71.75	11	1918-07-01	1964-08-01
7012071	46.68	-71.73	46	1952-12-01	xxxx-xx-xx
7012240	46.87	-71.65	166	1935-09-01	xxxx-xx-xx
7013100	46.67	-72.62	-	1963-05-01	xxxx-xx-xx
7013102	46.85	-72.47	177	1926-08-01	1978-09-01
7013642	47.63	-72.27	364	1963-05-01	1975-09-01
7013678	46.67	-72.87	259	1964-01-01	1978-06-01
7016560	46.98	-72.18	-	1949-08-01	xxxx-xx-xx
7016675	46.98	-71.83	213	1966-01-01	1994-07-18
7016800	46.70	-72.08	-	1949-09-01	xxxx-xx-xx
7016840	46.58	-72.20	-	1949-08-01	xxxx-xx-xx
7016932	46.85	-71.62	152	1964-09-01	xxxx-xx-xx
7017000	46.83	-71.93	-	1950-08-01	1991-10-31
7017422	46.92	-72.68	-	1973-07-01	xxxx-xx-xx
7017555	46.58	-72.93	168	1978-06-01	xxxx-xx-xx
7017585	46.55	-72.45	-	1973-07-01	xxxx-xx-xx
7017760	46.75	-72.65	142	1920-05-01	1985-01-31
7017767	46.68	-72.32	-	1963-01-01	1964-08-01
7018000	46.57	-72.72	-	1902-07-01	xxxx-xx-xx

7018564	46.37	-72.60	53	1934-11-01	1986-08-31
7068696	47.95	-72.17	394	1963-05-01	1972-05-01
7070450	47.38	-73.03	206	1942-06-01	1967-03-01
7072816	47.10	-72.93	119	1982-07-01	xxxx-xx-xx
7074240	47.45	-72.80	-	1911-09-01	xxxx-xx-xx
7076360	47.80	-72.97	277	1931-01-01	1975-01-01
707DBDD	47.43	-72.78	-	1963-05-01	1991-09-30

---

xxxx-xx-xx : Station toujours en service

Stations utilisées pour le bassin de la rivière **St-Maurice**

<b>Stations choisies</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Élévation (m)</b>	<b>Début</b>	<b>Fin</b>
7013100	46.67	-72.62	-	1963-05-01	XXXX-XX-XX
7016816	46.43	-73.15	-	1984-03-01	XXXX-XX-XX
7017422	46.92	-72.68	-	1973-07-01	XXXX-XX-XX
7017760	46.75	-72.65	142	1920-05-01	1985-01-31
7018000	46.57	-72.72	-	1902-07-01	XXXX-XX-XX
7018564	46.37	-72.60	53	1934-11-01	1986-08-31
7070456	46.85	-73.65	366	1929-11-01	1982-12-01
7072816	47.10	-72.93	119	1982-07-01	XXXX-XX-XX
7073652	46.98	-73.18	320	1973-06-01	1982-07-01
7077570	46.68	-73.92	-	1923-05-01	XXXX-XX-XX
701HE63	46.38	-72.62	55	1974-09-01	XXXX-XX-XX
701LEEH	46.87	-72.40	160	1964-09-01	XXXX-XX-XX

Stations utilisées pour le bassin de la rivière **St-François**

<b>Stations choisies</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Élévation (m)</b>	<b>Début</b>	<b>Fin</b>
7020305	46.03	-71.92	-	1969-10-01	xxxx-xx-xx
7020360	45.77	-71.95	229	1948-05-01	1987-04-30
7020560	46.20	-70.77	160	1913-08-01	1987-04-30
7020828	45.40	-72.27	297	1967-01-01	xxxx-xx-xx
7020860	45.50	-71.97	130	1957-06-01	1993-09-20
7020885	45.47	-71.48	-	1970-06-01	1994-06-17
7021840	45.13	-71.80	-	1949-09-01	1994-06-17
7021954	45.80	-72.02	-	1871-10-01	xxxx-xx-xx
7022000	45.95	-71.28	-	1908-01-01	1991-05-31
7022160	45.88	-72.48	82	1913-09-01	xxxx-xx-xx
7022300	45.07	-71.50	-	1949-09-01	1994-06-17
7022596	45.83	-71.38	251	1963-01-01	1994-06-21
7023677	45.58	-70.87	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7024000	45.83	-71.08	-	1915-05-01	1994-06-21
7024280	45.37	-71.83	-	1888-11-01	xxxx-xx-xx
7024440	45.27	-72.15	-	1948-07-01	xxxx-xx-xx
7024920	45.58	-71.12	482	1949-10-01	xxxx-xx-xx
7025440	46.25	-72.60	-	1913-08-01	xxxx-xx-xx
7026915	46.05	-70.80	305	1965-09-01	1994-07-14
7027200	46.07	-70.97	312	1929-01-01	xxxx-xx-xx
7027277	45.87	-70.62	282	1965-09-01	1994-07-14
7027302	45.88	-72.77	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7027309	45.87	-70.87	506	1965-09-	1991-07-

				01	31
7027361	45.62	-72.97	-	1964-04-01	xxxx-xx-xx
7027516	45.75	-70.67	-	1964-10-01	xxxx-xx-xx
7027520	45.20	-71.50	-	1949-09-01	xxxx-xx-xx
7027802	45.37	-71.53	346	1961-10-01	xxxx-xx-xx
7028124	45.43	-71.68	-	1962-04-01	xxxx-xx-xx
7028200	46.03	-73.10	15	1914-06-01	xxxx-xx-xx
7028280	45.02	-72.10	320	1948-06-01	1991-05-31
7028441	46.10	-71.37	-	1956-03-01	xxxx-xx-xx
7028890	45.38	-72.50	198	1968-06-01	1991-05-31

---

Stations utilisées pour le bassin de la rivière **Richelieu**  
Canada

Stations choisies	Latitude	Longitude	Élévation (m)	Début	Fin
7020040	45.03	-72.67	149	1950-12-01	1985-01-31
7020828	45.40	-72.27	297	1967-01-01	xxxx-xx-xx
7020833	45.25	-72.85	91	1968-07-01	1972-05-01
7020840	45.17	-72.60	-	1875-06-01	xxxx-xx-xx
7022245	45.10	-72.82	204	1961-12-01	1962-06-01
7022320	45.30	-72.93	-	1917-06-01	xxxx-xx-xx
7022325	45.25	-72.97	59	1963-05-01	1974-07-01
7022375	45.80	-73.00	31	1967-01-01	xxxx-xx-xx
7022560	45.03	-73.92	-	1954-07-01	1985-07-31
7022580	45.05	-72.87	113	1960-04-01	1965-07-01
7022720	45.15	-72.25	-	1951-09-01	xxxx-xx-xx
7022800	45.38	-72.70	-	1948-06-01	xxxx-xx-xx
7023073	45.05	-73.58	85	1963-01-01	1965-10-01
7023075	45.05	-73.65	-	1960-07-01	xxxx-xx-xx
7023240	45.08	-74.18	-	1870-01-01	xxxx-xx-xx
7023270	45.33	-73.25	31	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7023530	45.22	-72.48	-	1958-10-01	1982-03-01
7024100	45.42	-73.48	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7024440	45.27	-72.15	-	1948-07-01	xxxx-xx-xx
7024627	45.43	-73.15	-	1960-06-01	xxxx-xx-xx
7025328	45.58	-73.18	31	1976-05-01	1979-06-01
7025332	45.55	-73.17	210	1967-09-01	1974-06-01
7025745	45.12	-74.03	-	1962-11-	xxxx-xx-

				01	xx
7026040	45.03	-73.07	53	1950-12-01	xxxx-xx-xx
7026700	45.45	-73.07	-	1955-05-01	1985-01-31
7026734	45.22	-73.20	38	1975-09-01	xxxx-xx-xx
7026818	45.67	-73.30	41	1980-05-01	xxxx-xx-xx
7026916	45.02	-73.42	-	1973-07-01	xxxx-xx-xx
7026918	45.32	-73.07	47	1977-09-01	1982-03-01
7027085	45.37	-73.58	31	1972-09-01	1982-03-01
7027302	45.88	-72.77	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7027360	45.63	-72.95	31	1890-05-01	1979-12-01
7027361	45.62	-72.97	-	1964-04-01	xxxx-xx-xx
7027390	45.30	-73.27	-	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7027517	45.62	-73.13	-	1979-07-01	xxxx-xx-xx
7027540	45.25	-73.80	38	1963-01-01	xxxx-xx-xx
7027560	45.35	-73.53	31	1948-09-01	1982-03-01
7027690	45.28	-73.60	53	1963-01-01	1991-07-31
7028200	46.03	-73.10	15	1914-06-01	xxxx-xx-xx
7028280	45.02	-72.10	320	1948-06-01	1991-05-31
7028290	45.12	-72.62	180	1960-09-01	1972-09-01
7028295	45.15	-72.63	213	1963-01-01	1985-01-31
7028890	45.38	-72.50	198	1968-06-01	1991-05-31

---

États-Unis

	Stations choisies	Latitu de	Longitu de	Élévati on (m)	Début	Fin
		44.033	-		1986-07-	XXXX-XX-
	benton_5_SW	3	71.9333	1200	11	XX
		43.882	-		1999-01-	XXXX-XX-
	bethel_4_N	8	72.6353	660	29	XX
_ap	burlington_wso	44.468	-		1996-02-	XXXX-XX-
		1	73.1503	330	01	XX
		43.383	-		1994-08-	XXXX-XX-
	cavendish	3	-72.6	800	18	XX
			-		1999-03-	XXXX-XX-
	chazy	44.88	73.4331	170	02	XX
am	conklingville_d	43.320	-		1997-10-	XXXX-XX-
		3	73.9256	808	16	XX
		43.970	-		1998-11-	XXXX-XX-
	cornwall	6	73.2311	400	12	XX
		44.720	-		1999-03-	XXXX-XX-
	dannemora	6	73.7236	1340	02	XX
		44.252	-		1999-03-	XXXX-XX-
	elisabethtown	2	73.5772	620	02	XX
		44.864	-		1998-10-	XXXX-XX-
	enosburg_falls	7	72.8089	420	15	XX
		43.341	-		2001-07-	XXXX-XX-
	glens_falls_ap	1	73.6103	320	18	XX
m	glens_falls_far	43.333	-		1987-08-	XXXX-XX-
		3	73.7333	504	25	XX
			-		1989-12-	XXXX-XX-
	hanover	43.7	72.2833	603	01	XX
sw	indian_lake_2_		-		1991-10-	XXXX-XX-
		43.75	74.2833	1660	04	XX
		44.941	-		1997-01-	XXXX-XX-
	jay_peak	1	72.5094	1875	27	XX
s	lake_placid_2_	44.246	-		1999-03-	XXXX-XX-
		7	73.9908	1940	02	XX
		44.848	-		1998-10-	XXXX-XX-
	malone	9	74.3144	880	15	XX
		44.203	-		1996-06-	XXXX-XX-
	montpellier_ap	3	72.5794	1126	18	XX
sw	morrisville_4_s	44.516	-		1995-11-	XXXX-XX-
		7	72.6294	760	01	XX
ld	mount_mansfie	44.531	-		1999-01-	XXXX-XX-
		4	-72.815	3950	28	XX
		43.965	-		1999-03-	XXXX-XX-
	newcomb_3E	8	74.1814	1620	02	XX
		43.383	-		1988-08-	XXXX-XX-
	newport	3	72.1833	790	10	XX
		44.166	-		1999-02-	XXXX-XX-
	northfield	7	72.6625	670	18	XX

		43.266			1990-03-	XXXX-XX-
	peru	7	-72.9	1700	01	XX
		44.566	-		1996-08-	XXXX-XX-
	peru_2_wsw	7	73.5731	510	07	XX
		44.666	-		1999-01-	XXXX-XX-
	plattsburgh_afb	7	73.4667	156	01	XX
		44.296	-		1999-03-	XXXX-XX-
	ray_brook	1	74.1028	1620	03	XX
		43.862	-		1994-12-	XXXX-XX-
	rochester	8	72.8075	830	01	XX
		43.616	-		1988-11-	XXXX-XX-
	rutland	7	72.9667	620	30	XX
	saint_johnsbur	4	-		1998-07-	XXXX-XX-
y		4	72.0192	699	15	XX
		43.931			1997-07-	XXXX-XX-
	salisbury_2N	1	-73.1	420	07	XX
		44.633	-		1996-11-	XXXX-XX-
	south_hero	1	73.3064	110	01	XX
		44.078	-		1996-08-	XXXX-XX-
	south_lincoln	1	72.9686	1370	22	XX
	union_village_	2	-		1997-10-	XXXX-XX-
dam		2	72.2636	460	24	XX
		44.183	-		1992-02-	XXXX-XX-
	waitsfield_2W	3	72.8833	1028	04	XX
	west_danville_	7	-		1997-05-	XXXX-XX-
2		7	72.1953	1575	02	XX
	woodstock_2W	7	-		1998-02-	XXXX-XX-
SW		7	72.4544	600	01	XX

## **Stations hydrométriques Environnement Canada (Réseau HYDAT)**

Batiscan : 02PA003 (1931-1994)

Yamachiche ; utilisation de la station sur la rivière Maskinongé : 02OC002 (1925-2000) et utilisation d'un rapport de bassin versant où :

débit Yamachiche =  $0.369 \times$  débit Maskinongé (Morin J. et Bouchard A., 2000)

St-François : 02OF002 1925-1994

St-Maurice : 02NG005 1924-1994

Richelieu : 02OJ007 1937\_2002