Le génie pour l'industrie

2013

Système de prévision des étiages comme moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques

Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada
Canada

Fondsvert Québec

NOTE : Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.

ETS-DRAME-RT–2013-021

Système de prévision des étiages comme moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques

RAPPORT TECHNIQUE ÉTS

Préparé par :

FRANCOIS BRISSETTE Ing., Ph.D.
JIE CHEN, Ph.D.
PHILIPPE GATIEN, Ing. Jr
RICHARD ARSENAULT, Ing. Jr, MScA
ZHI LI, Ph.D.

MONTRÉAL, SEPTEMBRE 2012

SOMMAIRE

Les situations d'étiages sévères semblent devenir de plus en plus critiques au Québec et plusieurs études portent à croire que les changements climatiques pourraient amplifier cette problématique.

Le gouvernement du Québec s'est doté, il y a quelques années, d'un système de prévision hydrologique à court terme. Ailleurs, d'autres organismes ont mis en place des systèmes de prévision à moyen terme (1 à 3 mois) pour pallier à des problèmes de gestion, incluant les étiages. Ces systèmes sont basés sur la prévision hydrologique d'ensemble qui lie un modèle hydrologique et un ensemble de séries climatiques possibles couvrant l'horizon de la prévision. Ces prévisions hydrologiques couvrent donc un horizon probabiliste de débits futurs sur l'horizon temporel considéré. La motivation derrière ces systèmes est de donner des outils aux gestionnaires leur permettant de faire face à des situations critiques qui peuvent être exacerbées par les changements climatiques.

Conséquemment, l'objectif principal de ce travail était de:

Mettre en place d'un prototype de système de prévision des étiages sur un horizon de 3 mois de manière à alimenter des projets d'application pour lesquels la prévision des étiages peut être utile à titre de moyen d'adaptation face à l'impact des changements climatiques. Ce système repose sur la prévision hydrologique d'ensemble couplée à un générateur stochastique de climat.

Les objectifs spécifiques étaient les suivants:

1. Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution projetée du climat, tout en incluant la variabilité naturelle.
2. Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble.
3. Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système.
4. Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques.

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

Le concept de l'utilisation d'un générateur stochastique de climat au centre d'un système de prévision hydrologique d'ensemble a été démontré avec succès. Le générateur stochastique de climat développé performe très bien, autant en validation directe (reproduction des

précipitations et des températures) qu'indirecte (simulation de l'hydrologie), et ce aux pas de temps journalier, mensuel, annuel et interannuel. Le générateur de climat s'intègre bien aux prévisions météorologiques d'ensemble et présente plusieurs avantages comparativement au ré-échantillonnage des séries historiques passées. Le générateur stochastique de climat peut de plus être facilement forcé en fonction du signal de changement climatique anticipé.

L'incertitude liée à la modélisation hydrologique a été regardée par une approche de combinaison multi-modèle et multi-calibration. Cette approche a donné des résultats de modélisation significativement supérieurs à ceux issus d'une approche mono-modèle traditionnelle. Des 9 méthodes de combinaison étudiées, les méthodes utilisant des poids non contraints ont été les plus performantes. La méthode Granger-Ramanathan (type C) s'est imposée par sa grande simplicité, et par une performance équivalente ou supérieure à des approches complexes telles que le moyennage Bayésien. Les résultats ont démontré qu'il n'est pas nécessaire de multiplier les combinaisons modèle-calibration. Le choix de quelques modèles performants est meilleur qu'une multiplication débridée des combinaisons. De même, l'utilisation de modèles hydrologiques différents est supérieure à l'utilisation d'un seul modèle sous différentes calibrations.

Finalement, le potentiel d'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble a été clairement démontré dans le cadre de cette étude. Les prévisions météorologiques d'ensemble sont incontournables pour améliorer la qualité de la prévision hydrologique sur un horizon pouvant aller jusqu'à 10 jours. Par contre les prévisions météorologiques d'ensemble souffrent de biais et de sous-dispersion et doivent être corrigées. Les approches de correction telles que le moyennage Bayésien et la régression logistique ont été jugées non appropriées pour le prototype de prévision opérationnel envisagé. Une approche nouvelle et intégrée au générateur de climat a été développée et mise en place. Cette approche corrige le biais et la sous-dispersion des prévisions météorologiques d'ensemble avec succès. La validation indirecte sur les débits confirme la valeur des prévisions météorologiques d'ensemble sur un horizon de 7 jours.

Le prototype a été mis en place sur le bassin de la rivière Yamaska Sud-Est.

REMERCIEMENTS

Une telle étude est impossible sans l'apport de plusieurs personnes.

Merci à René Roy et Richard Turcotte pour leur confiance envers notre équipe à l'ETS. Une partie des écrits de la demande de subvention provient de texte initialement couché par Richard Turcotte. Une partie de ces écrits a été recyclée dans l'introduction et la mise en contexte du présent rapport.

Vincent Fortin a fourni son archive personnelle de prévisions météorologiques d'ensemble, ainsi que de nombreux conseils et informations sur les systèmes de prévision d'Environnement Canada.

Mélanie Trudel a contribué à plusieurs aspects de ce travail, notamment au niveau d'Hydrotel et de la base de données de l'université de Sherbrooke, commune à ce projet et à celui mené à Sherbrooke.

Finalement, merci à Ouranos pour avoir fourni les données du MRCC utilisées dans le cadre de cette étude.

Ce projet a fait l'objet d'un soutien financier du Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX IX

LISTE DES FIGURES X

1 INTRODUCTION 12

2 CONTEXTE / OBJECTIFS 13

3 MÉTHODOLOGIE 18

3.1 Objectif spécifique 1 : Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle. 18

3.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble. 20

3.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système. 21

3.4 Objectif spécifique 4 : Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques. 22

4 RÉSULTATS 23

4.1 Objectif spécifique 1 : Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle. 23

4.1.1 Mettre en place un générateur stochastique de climat le plus performant possible sur le bassin de la rivière Yamaska; 23

4.1.2 Tester la performance du générateur stochastique de climat au niveau de son habileté à reproduire les séries de précipitation et température passées, ainsi que l'hydrologie qui en découle; 25

4.1.3 Représenter la variabilité naturelle à l'intérieur du générateur stochastique de climat, notamment avec l'aide d'indices de circulation atmosphérique; 29

4.1.4 Représenter le signal du changement climatique à l'intérieur du générateur stochastique de climat, en le liant avec le modèle climatique régional canadien. 33

4.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble. 38

4.2.1 Approches d'assignation des poids 39

4.2.2 Modèles et calibration des modèles 41

4.2.3 Résultats 43

4.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système. 48

4.3.1 Méthode existantes de corrections de biais 48

4.3.2 Données pour la mise en place des approches de correction 49

4.3.3 Approche retenue 49

4.4 Objectif spécifique 4 : Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques. 55

5 ANALYSE ET DISCUSSION 57

5.1 Prototype 57

5.1.1 Étapes préalables 57

5.1.2 Étapes journalières 58

5.1.3 Visualisation 60

5.2 Discussion par objectif spécifique 62

5.2.1 Objectif spécifique 1 : Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle. 62

5.2.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble. 63

5.2.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système. 64

5.3 Arrimage avec le projet PACC-26 de l'université de Sherbrooke 66

6 CONCLUSIONS 68

6.1 Objectif spécifique 1 68

6.2 Objectif spécifique 2 69

6.3 Objectif spécifique 3 69

7 RECOMMANDATIONS 70

8 RÉFÉRENCES 72

ANNEXE 1 – PUBLICATIONS ISSUES DE CE TRAVAIL 77

ANNEXE 2 – DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT ET DES PROGRAMMES DU PROTOTYPE DE PRÉVISION HYDROLOGIQUE 79

Étape 1 – Mise à jour des fichiers hydrométéorologiques 79

Étape 2 – Exécution des programmes matlab pour le calcul des prévisions hydrologiques 80

Étape 3 – Mise à jour de l'affichage du site Web 80

Structure des fichiers 81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 Erreur relative moyenne sur les débits maximum annuel, hiver et été, ainsi que pour les étiages – débit minimal sur 7 jours aux périodes de retour 2 et 10 ans, sur le bassin Chute-du-Diable (rivière Péribonka). 26

Tableau 4-2 Erreur relative moyenne sur les débits maximum annuel, hiver et été, ainsi que pour les étiages – débit minimal sur 7 jours aux périodes de retour 2 et 10 ans, sur le bassin de la rivière Yamaska. 27

Tableau 4-3 Corrélations saisonnières entre 12 indices de télé connexion et les précipitations et températures sur le bassin de la rivière Yamaska. 31

Tableau 4-4 Corrélations saisonnières entre 12 indices de télé connexion et les précipitations et températures sur le bassin de la rivière Yamaska. Les corrélations sont avec un 'lag' saisonnier, c'est-à-dire que les indices pour une saison sont corrélés avec les observations sur la saison suivante. 32

Tableau 4-5 Critères de calibration pour les modèles globaux 42

Tableau 4-6 Critères de calibration pour Hydrotel 42

Tableau 4-7 Valeurs du CRSP (Continuous ranked probability score) et RPSS (Rank probability skill score) 54

LISTE DES FIGURES

Figure 4-1 Schéma du générateur stochastique de climat WeaGETS. 24

Figure 4-2 Hydrogrammes moyens reproduits par le modèle hydrologique HSAMI avec les données observes et simulées avec les données de WeaGETS sur les bassins de Chute-du-Diable (rivière Péribonka) et Yamaska (à Saint-Hyacinthe – 3300 km^2) 25

Figure 4-3 Performance des fonctions de distribution, par quantile (rivière Yamaska) 28

Figure 4-4 Corrélation entre les précipitations et l'indice de téléconnection PNA..... 30

Figure 4-5 Corrélation entre les précipitations et l'oscillation Atlantique Nord (NAO) 30

Figure 4-6 Évolution des paramètres d'un générateur de climat tel que vus par deux modèles climatiques au centre du Québec..... 35

Figure 4-7 Schéma du système de modification des paramètres du générateur de climat..... 37

Figure 4-8 Comparaison des enveloppes de débits annuels sur l'horizon 2050 selon la méthode proposée (gauche) et selon la méthode des deltas (droite) pour le bassin de Manic 5. 38

Figure 4-9 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 32 combinaisons de modèles et critères de calibration. 44

Figure 4-10 Fourchette des poids pour les 32 combinaisons de modèles et critères. 45

Figure 4-11 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 12 meilleures combinaisons de modèles et critères de calibration. 46

Figure 4-12 Fourchette des poids pour les 12 meilleures combinaisons de modèles et critères. 46

Figure 4-13 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 5 combinaisons d'Hydrotel. 47

Figure 4-14 Fourchette des poids pour les 5 combinaisons d'Hydrotel. 47

Figure 4-15 Probabilité de précipitation en fonction de la moyenne de la prévision d'ensemble (prévision à 1 et 3 jours) 51

Figure 4-16 Histogrammes de rang pour un *lag* de une journée, montrant la bonne performance de l'approche de correction. 52

Figure 4-17 Relation entre les températures observées et la moyenne des PME, avant et après correction (lag 1) 53

Figure 4-18 Histogrammes de rang pour un lag de une journée, montrant la bonne performance de l'approche de correction. 54

Figure 5-1 Schéma du fonctionnement du prototype sur le bassin versant de la rivière Yamaska. 59

Figure 5-2 Quantiles de la prévision d'ensemble et valeurs historiques (min, median, max). La fenêtre de l'horizon est ajustable sur 90 jours. Les valeurs et légendes s'affichent en pointant la souris. 60

Figure 5-3 Visualisation alternative. 61

Figure 5-4 Détails journaliers. 61

1 INTRODUCTION

Les situations d'étiages sévères semblent devenir de plus en plus critiques au Québec et plusieurs analyses portent à croire que les changements climatiques pourraient amplifier cette problématique. Au cours des 10 dernières années, des étiages sévères sur les rivières St-Charles et des Mille-Îles ont menacé l'approvisionnement en eau des villes de Québec et de la couronne Nord de Montréal. En particulier, en 2010, la situation a été critique dans la rivière des Mille-Îles avec des bas niveaux historiques dès le mois de juin.

Le gouvernement du Québec, via le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), s'est doté, il y a quelques années, d'un système de prévision hydrologique à court terme (5 jours) servant dans le contexte de l'aide à la gestion des barrages gouvernementaux québécois. L'une des motivations derrière ce système est de donner des outils aux gestionnaires leur permettant de faire face à des situations critiques qui peuvent être exacerbées par les changements climatiques. Ailleurs, plusieurs organismes ont mis en place des systèmes de prévision à moyen terme (1 à 3 mois) pour pallier à des problèmes de gestion, incluant les étiages. Ces systèmes sont basés sur la prévision hydrologique d'ensemble qui lie un modèle hydrologique et un ensemble de séries climatiques possibles couvrant l'horizon de la prévision. Ces prévisions hydrologiques couvrent donc un horizon probabiliste de débits futurs sur l'horizon temporel considéré.

L'objectif principal de ce projet vise la mise en place d'un prototype de système de prévision des étiages sur un horizon de 3 mois de manière à alimenter des projets d'application pour lesquels la prévision des étiages peut être utile à titre de moyen d'adaptation face à l'impact des changements climatiques. Ce système repose sur la prévision hydrologique d'ensemble couplée à un générateur stochastique de climat. Les bases de ce système probabiliste de prévision des étiages visent à alimenter tous les intervenants interpelés par la gestion des ressources hydriques, notamment au CEHQ, chez Hydro-Québec, Rio-Tinto-Alcan et au sein de plusieurs municipalités.

Ce rapport est divisé en 7 chapitres distincts. Une mise en contexte est présentée au chapitre 2. La méthodologie est par la suite détaillée au chapitre 3 et les résultats occupent le chapitre 4. L'analyse et la discussion suivent au chapitre 5. Les conclusions et recommandations sont énoncées aux chapitres 6 et 7. Les références et annexes suivent.

2 CONTEXTE / OBJECTIFS

Les situations d'étiages sévères semblent devenir de plus en plus critiques au Québec et plusieurs analyses portent à croire que les changements climatiques amplifieront cette problématique. À ce sujet, Larouche et al. (2008) montrent que les étiages d'été ou d'automne observés de 1993 à 2007, sur plus de cinquante stations hydrométriques du Québec, ont été en moyenne 11% plus sévères et ont duré 3 jours de plus que ceux observés de 1978 à 1992. Bien que ces changements ne soient pas statistiquement significatifs, ils sont compatibles avec la plupart des projections hydrologiques pour le Québec qui laissent entrevoir que les changements climatiques auront aussi pour effet d'augmenter la sévérité des étiages. Par exemple, Quilbé et al. (2008) ont évalué, pour un horizon aussi prochain que 2010-2039, que les étiages pourraient être en moyenne de 7 à 29% plus sévères, selon l'indicateur et la projection choisis, sur un bassin versant typique du sud du Québec (celui de la rivière Chaudière) par rapport à la période 1970-1999.

Devant pareilles constatations, il s'avère pertinent d'entamer immédiatement l'adaptation des pratiques dans les domaines vulnérables en situation d'étiage en s'intéressant notamment aux outils supportant cette pratique. C'est dans ce contexte que la présente activité propose l'étude de la pertinence et l'étude des caractéristiques essentielles d'un système de prévisions d'étiages comme outil de support à une prise de décision qui, à l'heure actuelle, se fait généralement sur une base intuitive sans l'aide d'outil permettant une analyse objective. L'accroissement anticipé du nombre de problèmes pratiques associés à des étiages plus nombreux et plus sévères permet de moins en moins que l'on se passe d'information sur l'évolution prévisionnelle des apports en eau pour supporter la prise de décision.

Deux éléments contextuels permettent de renforcer cet argumentaire. D'une part, certaines grandes municipalités du Québec et leurs collaborateurs dans le domaine de l'hydrologie ont vécu récemment des étiages qui ont exigé des décisions urgentes et la mise en œuvre de solutions inhabituelles pour limiter l'impact de faibles débits sur leur alimentation en eau potable.

À titre d'exemple, la ville de Québec au début de l'automne 2002 a subi les conséquences d'une sécheresse importante et a, de manière exceptionnelle, procédé à la dérivation d'une petite partie des eaux de la rivière Jacques-Cartier vers le bassin versant de la rivière Saint-Charles qui lui sert de source d'approvisionnement en eau potable. Compte tenu du temps nécessaires pour effectuer les travaux, la ville de Québec a dû, sur les bases des meilleures connaissances disponibles alors, pondérer le risque de manquer d'eau avec le risque associé à l'exécution non essentielle de travaux alors qu'une fin prochaine de la période sèche pouvait régler le problème.

Autre exemple, les municipalités s'approvisionnant dans la rivière des Mille-Îles ont en 2001, 2002, 2004 et particulièrement en 2010 (voir ici-bas), obtenu le support de réservoirs du bassin de la rivière des Outaouais, réservoirs desquels des quantités d'eau supplémentaires ont été soutirées pour supporter le débit de la rivière des Mille-Îles, de manière à éviter tous problèmes éventuels dans la production d'eau potable. Les impacts locaux importants associés à la vidange des réservoirs et les délais d'écoulement

des eaux depuis les réservoirs jusqu'à la rivière des Mille-Îles (au minimum cinq jours pour le réservoir le plus près) obligent à une prise de décision rationnelle qui gagne grandement à s'appuyer sur des prévisions.

Les étiages records du mois de juin 2010 ont mené à la mise en place d'une solution de soutien aux étiages critiques tel qu'iI avait été envisagé auparavant (CEHQ, 2005) Un creusage du lit de la rivière a été effectué de façon à y augmenter le débit provenant du Lac des deux Montagnes.

Ainsi, pour ces deux exemples comme pour plusieurs autres, le recours à une approche d'analyse systématique basée sur des prévisions de débits sur un horizon à moyen terme (de un à trois mois) aurait fourni des informations judicieuses pour la prise de décision.

Le gouvernement du Québec, via le CEHQ s'est doté, il y a quelques années, d'un système de prévision hydrologique (Turcotte et al., 2004a) à court terme (5 jours) servant dans le contexte limité mais critique de l'aide à la gestion des barrages gouvernementaux québécois. L'une des raisons pour la mise en place du système est de mettre à disposition des outils permettant de prendre des décisions plus éclairées dans des situations hydrologiques se distinguant des cas classiques, bien connues des gestionnaires de barrages, comme celles que peuvent provoquer les changements climatiques (Turcotte et al., 2004b). Bien qu'ayant besoin de l'ajout de nombreuses composantes pour en faire un système de prévision d'étiage s'étendant sur plusieurs bassins versants du sud du Québec, ce système peut servir de structure de base pour l'étude des besoins et des propriétés associés aux outils de prévision d'étiage. La conjoncture actuelle est favorable puisque l'une des composantes les plus coûteuses en termes d'effort à déployer est la mise en place d'un modèle hydrologique sur les bassins versants d'intérêt. Or, il s'avère qu'une partie significative du territoire québécois le plus densément peuplé, la portion du bassin versant du Saint-Laurent situé en territoire québécois jusqu'à Trois-Rivières (exclusivement), est en cours de modélisation dans l'action 25a du Plan d'Action sur les Changements Climatiques (PACC). Si on ajoute, les bassins versants déjà disponibles pour la prévision de crue, plusieurs des bassins versants problématiques en étiage au Québec ont la possibilité d'être couvert par un outil de prévision.

Les changements climatiques sont le nouvel élément qui rend la prévision encore plus importante, mais qui en contrepartie complique la mise en place d'un tel système de prévision. Par exemple Hydro-Québec utilise déjà une prévision hydrologique d'ensemble (PHE) sur un horizon de trois mois pour la gestion de certains de ses ouvrages. La PHE consiste à produire une multitude de séries hydrologiques sur l'horizon considéré, chacune représentant un futur possible. Hydro-Québec utilise une approche classique de ré-échantillonnage des données météorologiques historiques (approche inspirée de Day, 1985). Toutefois, dans une perspective de changement climatique, l'utilisation de données historiques passées soulève de nombreuses interrogations quant à leur pertinence dans un contexte prévisionnel.

Du point de vue de la pratique, il est à souligner que plusieurs organismes diffusent de l'information sur les conditions d'étiage en recourant uniquement aux observations hydrométriques, dans certains cas mises en relief avec les valeurs historiques passées (par exemple : la province du Québec via le CEHQ) ou en y ajoutant de l'information prévisionnelle dans d'autres cas (prévision d'ensembles du US National

Weather Service par exemple) via la PHE. Ceci illustre l'existence d'un marché d'utilisateurs pour qui l'information en étiage est cruciale.

De façon générale, en contexte de changement climatique, on peut considérer que le climat en un moment donné est le résultat de la tendance lourde résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (saisie par les modèles climatiques), sur laquelle se superpose la variabilité climatique naturelle.

À un moment donné t, un système simple de PHE sur un horizon donné consiste à ré-échantillonner toutes les N périodes historiques disponibles sur le même horizon et à produire N séries de débits à partir d'un modèle hydrologique opérationnel au temps t (Day, 1985). L'incorporation d'un facteur d'erreur de modélisation au temps t permet de généraliser la palette d'incertitude pour tenir compte de l'incertitude liée à la modélisation hydrologique. Cette approche repose intrinsèquement sur la stationnarité du climat et peut sous-estimer l'incertitude si les séries historiques disponibles sont trop courtes. En contrepartie, cette approche peut surestimer l'incertitude réelle pour de très longues séries historiques puisque ces séries n'ont pas toutes la même probabilité d'occurrence dû aux variations interannuelles auxquelles sont liées les probabilités conditionnelles de précipitation (Chen et al, 2010a,b).

Une approche plus rationnelle pourrait consister à assigner des poids sur les séries historiques passées. L'application de poids basés sur la similitude entre les séries passées et les prévisions météorologiques au moment présent a reçu beaucoup d'attention (Stedinger et Kim, 2002,2010 ; Croley, 2003). Toutefois, en plusieurs endroits, les prévisions météorologiques ont un pouvoir prédictif supérieur à la moyenne climatique sur un horizon d'une dizaine de jours seulement (Smith and Weber, 2003), et il serait difficile d'appliquer cette méthode sur un horizon de 3 mois. De plus, même si cette approche peut tenir compte de la variabilité climatique naturelle, elle ne peut que partiellement compenser l'effet du changement climatique. Cette limite s'applique également à d'autres techniques de ré-échantillonnage tel que celle du plus proche analogue qui a été couramment utilisée pour des applications en hydrologie (Yates et al, 2003, Gobena et Gan, 2009). Une approche avec beaucoup de potentiel repose sur l'utilisation de prévisions météorologiques d'ensemble (PME) ce qui permet d'éliminer le recours au passé historique en fournissant un ensemble de séries météorologiques cohérentes avec le climat au moment de la prévision (voir Cloke et Pappenberger, 2009 pour une revue). Cette approche souffre toutefois de la même lacune énoncée plus haut, soit un horizon temporel de prédiction limité. La majorité des études ont fait du 'hindcasting' sur un seul événement et sur une durée temporelle de quelques jours seulement (Cloke et Pappenberger, 2009). Les PME souffrent aussi de problèmes de biais et de dispersion (Velasquez et al. 2009) ainsi que d'une résolution spatiale limitée, demandant potentiellement de recourir à des approches de mise à l'échelle (Renner et al., 2009). Malgré le potentiel évident des PME, plusieurs défis concernant l'amélioration des modèle numériques (résolution, réduction des biais et de la dispersion, augmentation du nombre de membres de l'ensemble – Cloke et Pappenberger, 2009), et une meilleure compréhension de l'incertitude liée aux PME (telle qu'identifié par le projet HEPEX - Schaake et al., 2007) restent à envisager pour une utilisation opérationnelle, particulièrement en ce qui a trait à un horizon prédictif dépassant le court terme.

Néanmoins, les prévisions météorologiques d'ensemble sont amenées à s'améliorer considérablement dans le futur : au fur et à mesure que les modèles s'améliorent, que la puissance de calcul grandit, et que les données et techniques d'assimilation s'améliorent. Un système de prévision des débits modernes devrait les utiliser.

Les générateurs de climat ont été couramment utilisés en hydrologie (voir par exemple Dubrovsky et al., 2004 ; Minville et al., 2008 ; Caron et al., 2008). Ils ont aussi été utilisés pour la PHE (Hobson, 2005 ; Entre autres, Kuchment et Gel'fan (2007) ont trouvé un avantage à l'utilisation d'un générateur stochastique de climat pour la prévision saisonnière. Les générateurs de climat peuvent être perturbés de façon à représenter la variabilité naturelle (Chen et al., 2010a). Un de avantages intéressant des générateurs de climat consiste en la possibilité de lier leurs paramètres à des sorties de modèles de circulation générale - GCM (Wilby et al., 2002) ou à de l'information climatique à grande échelle. L'idée d'incorporer de l'information climatique à large échelle (tels que les anomalies de température) n'est pas nouvelle (Grantz et al., 2005; Opitz-Stapleton et al., 2007; Timilsena et al., 2009) mais le gain dépend largement du lien entre les prédicteurs choisis et le climat local. Entre autres, l'utilisation de données de neige permet des gains prédictifs intéressants à moyen terme (Bracken et al., 2010 par exemple) qui pourraient être utiles pour la prévision des étiages d'été. Des gains prédictifs sur un horizon à moyen terme ont été notés par Gobena et Gan (2010). L'utilisation de données provenant de modèles de circulation générale a aussi été étudiée pour la prévision hydrologique à moyen terme (Ryu et al, 2009). Finalement, les travaux récents de Chen et al. (2010b) indiquent qu'il est relativement simple de lier l'évolution des paramètres d'un générateur de climat à ceux d'un modèle climatique, résultant en un générateur de climat non-stationnaire lié aux sorties de modèles globaux ou régionaux. Ces travaux indiquent qu'il y a un fort potentiel à explorer en ce qui a trait à l'utilisation des générateurs stochastiques de climat pour la prévision hydrologique d'ensemble en contexte de changement climatique.

Conséquemment, l'objectif principal de ce travail est défini comme suit :

Mettre en place d'un prototype de système de prévision des étiages sur un horizon de 3 mois de manière à alimenter des projets d'application pour lesquels la prévision des étiages peut être utile à titre de moyen d'adaptation face à l'impact des changements climatiques. Ce système repose sur la PHE couplée à un générateur stochastique de climat.

Aux fins de pouvoir répondre à l'objectif principal, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

1. Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle.
2. Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble.

3. Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système.
4. Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques.

La méthodologie de travail est énoncée au prochain chapitre.

3 MÉTHODOLOGIE

Ce projet vise la mise en place d'un prototype de système de prévision des étiages sur un horizon de 3 mois. Ce système repose sur la prévision hydrologique d'ensemble couplée à un générateur stochastique de climat. Cette section présente les aspects méthodologiques principaux du projet.

Ce projet s'est concentré sur le bassin versant de la rivière Yamaska. Le choix du bassin versant de la rivière Yamaska s'est fait naturellement compte tenu qu'un autre projet de la programmation PACC-26 s'y attarde (*Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska, de façon à pouvoir prédire et prévenir les impacts des CC sur les étiages et leurs conséquences sur les divers approvisionnements en eau, tout en protégeant la biodiversité*). Drainant une superficie de près de 4800 km2, la rivière Yamaska est une des rivières les plus polluées du Québec. Cette pollution (d'origine agricole en bonne partie) se combine à de fréquents problèmes d'étiages (en particulier à Granby) contribuant ainsi à en faire une rivière problématique en été. Le sous-bassin de la Rivière Yamaska Sud-Est a été choisi pour la mise en place du système. Ce sous-bassin a une superficie de 210 km^2 à la station hydrométrique 030314.

Les sections suivantes décrivent les aspects méthodologiques principaux liés à chaque objectif scientifique.

3.1 Objectif spécifique 1 : Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle.

Les étapes principales sont les suivantes :

1- Mettre en place un générateur stochastique de climat le plus performant possible sur le bassin de la rivière Yamaska;
2- Tester la performance du générateur stochastique de climat au niveau de son habileté à reproduire les séries de précipitation et température passées, ainsi que l'hydrologie qui en découle;
3- Représenter la variabilité naturelle à l'intérieur du générateur stochastique de climat, notamment avec l'aide d'indices de circulation atmosphérique;
4- Représenter le signal du changement climatique à l'intérieur du générateur stochastique de climat, en le liant avec le modèle régional de climat canadien.

Il s'agit donc de générer un ensemble de prévisions de séries climatiques (Tmax, Tmin et Précipitation) sur un horizon de trois mois, à l'aide d'un générateur de climat. Les générateurs de climat utilisent normalement des paramètres fixes établis suivant une analyse statistique sur une période de plusieurs années (20 années et plus). Cette approche ne permet pas de saisir la variabilité climatique naturelle et

les générateurs sous-estiment la variabilité inter mensuelle et interannuelle (Chen et al., 2009, 2010a). Il faut donc spécifiquement considérer des approches spécifiques pour inclure cette dernière (Wang et Nathan, 2007, Chen et al., 2010a). Conceptuellement, les paramètres du générateur de climat ainsi que leur variabilité seront dynamiquement liés à l'évolution du climat projeté (telle que prévue par les modèles climatiques) et à la variabilité naturelle (basés sur le climat des mois et années précédant la prévision d'ensemble ainsi que sur des indices climatiques à grande échelle). La variabilité naturelle consiste en une déviation de certaines variables climatiques par rapport à leur moyenne et qui peut s'exercer à l'échelle mensuelle, annuelle ou décadale. Certaines composantes de cette variabilité sont relativement bien documentées (comme par exemple l'oscillation El-Nino), alors que d'autres apparaissent aléatoires.

Les travaux récents de Chen et al. (2010b) ont permis de lier les paramètres d'un générateur de climat au MRCC. Il est donc proposé d'utiliser les résultats du MRCC pour fixer la valeur de base des paramètres du générateur de climat selon une moyenne climatique de 30 ans centrée au moment de la prévision. La moyenne des paramètres du générateur de climat provenant des simulations du MRCC (piloté par les 5 membres de MCCG3) sera utilisée en suivant l'approche de Chen et al. (2010b). Les valeurs des paramètres de base du générateur de climat seront ainsi exemptes du biais qui en résulterait si elles étaient issues de la climatologie passée. Bien que cette correction ne résultera probablement pas en une modification majeure des paramètres par rapport à la climatologie passée (l'impact de cette modification sera évalué dans ce projet), il en résulte toutefois que l'approche ainsi développée est directement utilisable en mode 'changement climatique' et l'outil développé peut donc être aisément utilisé pour des études d'impacts en climat futur, ce qui est un avantage non-négligeable. Un prototype a d'ailleurs déjà utilisé par Chen et al. (2010b) en tant qu'approche de mise à l'échelle. Le générateur de climat ainsi modifié sera tributaire du signal climatique anticipé par le modèle climatique choisi.

Autrement dit, alors qu'un générateur de climat se base sur la moyenne climatique des données historiques (par exemple sur la moyenne des données des 50 dernières années), l'utilisation d'un modèle climatique permet de forcer la moyenne climatique en fonction du signal prédit pas un modèle climatique. Par exemple, si le modèle climatique indique que le climat de 2013 (défini sur la période 1998-2028) est de 0.5 degrés plus chaud que celui définit sur la moyenne historique (1970-2010 par exemple) ce signal est intégré au générateur de climat. La variabilité naturelle, composante importante, reste définie sur la période historique.

La variabilité naturelle du climat à différentes échelles de temps a un impact majeur sur hydrologie des bassins versants. Par exemple, le lien entre les précipitations et les températures et certains indices à grande échelle (ENSO, NAO, SST etc..) a été établi dans de nombreuses études. Nous entrons dans un nouveau paradigme en hydrologie (Wagener et al. (2010) et ne pas tenir compte de cette variabilité (et du changement de cette variabilité dans le futur) à l'intérieur du générateur de climat limitera forcément l'habileté prédictive de cet outil.

Deux approches seront testées pour incorporer la variabilité climatique au générateur de climat.

La première suivra l'approche spectrale de Chen et al. (2010a) pour évaluer la déviation par rapport à la moyenne climatique sur l'année et la saison précédant la prévision d'ensemble. Cette approche est bases sur le principe que les années (ou saisons) humides, sèches, chaudes ou froides ne se succèdent pas de manière aléatoire. Les bases de données décrites précédemment seront toutes mises à contribution (mondes réel et idéal) pour établir les liens et incertitudes (au niveau de la déviation des paramètres du générateur par rapport à la moyenne climatique) liés à cette approche

La seconde approche vise à incorporer l'information provenant d'indices à grande échelle pour perturber les paramètres du générateur de climat. Bien que les liens entre ces indices et les anomalies de précipitation et température soient relativement faibles dans les régions extratropicales, Lin et al. (2008) ont tout de même démontré un pouvoir prédictif statistiquement significatif en utilisant les liens tirés de 5 MCG dans une étude sur les précipitations hivernales. Leur approche sera testée sur le bassin choisi. La possibilité de lier les anomalies aux moyennes de variables climatiques extraites du MRCC sera aussi étudiée.

3.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble.

Cet objectif vise d'abord à quantifier puis à corriger, si possible, l'incertitude liée au processus de modélisation hydrologique. La dégradation progressive des PHE est due non seulement aux séries météorologiques, mais aussi aux biais des modèles hydrologiques qui peuvent dégrader à eux seuls la prévision. Ceci est particulièrement critique pour une étude sur les étiages puisque les modèles hydrologiques y sont souvent moins performants.

Deux visions sont possibles. La première vise l'utilisation d'un seul modèle et la perturbation des variables internes du modèle de manière à produire plusieurs séries hydrologiques qui représenteront l'incertitude due à la modélisation hydrologique au temps présent et sa propagation vers le futur. Une seconde approche consiste à utiliser plusieurs modèles hydrologiques et à représenter l'incertitude à partir des différentes séries hydrologiques produites.

Dans ce travail la seconde approche a été retenue pour les raisons suivantes :

- L'utilisation d'un seul modèle va vraisemblablement sous-estimer la variabilité due à la modélisation hydrologique puisque la modification raisonnable des variables internes d'un seul modèle ne peut compenser la composante d'incertitude liée à différentes structures de modèles hydrologiques. Par exemple, si un modèle exhibe un biais constant (négatif ou positif) lors des faibles débits il sera très difficile d'y compenser alors qu'une approche multi-modèle saura combiner des modèles ayant des biais positifs et négatifs pour mieux cerner l'incertitude, et proposer un débit probable mieux approprié à la prévision hydrologique;

- La modification des variables internes d'un modèle demande un accès au code source du modèle hydrologique ce qui peut devenir très complexe et même impossible dépendant du modèle retenu.

Une approche 'multi-modèle' et 'multi-calibration' sera donc privilégiée. Quatre modèles hydrologiques seront utilisés sur le bassin de la rivière Yamaska Sud-Est. Le CEHQ utilise de façon opérationnelle les modèles Mohyse (global) et Hydrotel (distribué) sur plusieurs de ses bassins. De plus, les modèles globaux HSAMI (Hydro-Québec) et HMETS (développé à l'ÉTS) seront ajoutés. Tous ces modèles seront calés selon plusieurs différentes métriques, en visant des approches annuelles (critère de Nash, erreur RMS par exemple) et saisonnières, notamment sur la période de l'été (Nash des débits d'été par exemple).

Cette approche permettra d'établir à quel point le choix d'un modèle plutôt qu'un autre puisse résulter en des prévisions hydrologiques d'ensemble différentes, et, surtout, si cette incertitude est suffisamment grande pour qu'il soit nécessaire de la considérer.

Finalement, différentes approches de détermination des poids de modèles hydrologiques seront considérées à des fins d'amélioration de la prévision hydrologique. Les approches testées, au nombre de neuf, vont de la simple moyenne arithmétique jusqu'aux approches complexes comme la moyenne de Bayes (Bayesian Model Averaging).

3.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système.

Tel que discuté à la section 2.2, les prévisions météorologiques d'ensemble (PME) sont attirantes pour un tel projet puisqu'elles constituent une source complètement différente et indépendante de données. Ces dernières souffrent toutefois de divers problèmes, tel qu'énoncé précédemment. De plus, un problème majeur se pose quant à l'archive de données de PME d'Environnement Canada qui ne couvre que trois années et donc un spectre d'étiages limité.

Ce projet vise d'abord à examiner le potentiel des PME et à comparer leur performance par rapport à l'approche développée basée sur le générateur de climat.

En particulier, dans le contexte de la prévision des étiages, la prévision de la probabilité de précipitation pour les jours à venir est critique. Or, l'utilisation du seul générateur de climat (ou du ré-échantillonnage des séries météorologiques passées) équivaut à assigner une probabilité de précipitation égale à la probabilité historique pour une journée de l'année. Il en résultera donc une mauvaise estimation du

risque d'étiage au cours des prochains jours si le climat est en évolution. Il est possible d'utiliser une prévision météorologique déterministe, mais cette dernière ne peut représenter l'incertitude de cette prévision, et le risque d'étiage peut de nouveau être mal déterminé.

Les prévisions météorologiques d'ensemble sont donc la meilleure approche (et même incontournables) pour tout système prévisionnel probabiliste, notamment lorsque le court terme est important. Tel que mentionné précédemment, les PME ont le désavantage (pour diverses raisons) de souffrir de biais et de sous-dispersion. Il faudra donc les corriger pour pouvoir les utiliser.

De plus, puisque les méthodes actuelles de correction des PME résultent en la reconstitution de la distribution probabiliste des variables de la prévision en un temps donné (température et précipitation dans le cadre de cette étude), il faudra établir une approche permettant de lier ces distributions d'un horizon de temps au suivant (pas de temps journalier dans cette étude) de façon logique (les températures étant liées aux précipitations par exemple).

Les étapes principales sont les suivantes :

1- Évaluation de l'horizon de temps sur lequel les PME démontrent une aptitude prévisionnelle ('*skill*') supérieure à celle du générateur de climat;
2- Mise en place d'une méthode de correction du biais et de la sous-dispersion des PME;
3- Développement d'une approche permettent de créer des prévisions probabilistes au pas de temps journaliers à partir des distributions corrigées des précipitations et températures des PME.

3.4 Objectif spécifique 4 : Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques.

Pour les agences qui utilisent déjà le ré-échantillonnage des données historiques, le changement climatique impose une nouvelle façon de faire. À défaut de revoir complétement leurs approches de prévision à moyen terme, une solution compatible et dans la continuité de cette pratique est d'assigner des poids aux sériés historiques. Ceci permettrait donc à la fois d'améliorer la PHE, mais aussi de tenir compte de la réalité du changement climatique.

Les étapes principales sont les suivantes :

1- Étudier le lien entre les indices de circulation atmosphérique et les températures et précipitations sur un horizon 0-3 mois (très similaire à l'étape 3 de l'objectif spécifique 1);
2- Utiliser l'information des PME pour les lier aux poids à assigner aux séries historiques;
3- Assigner les poids en fonction des séries générées par le générateur stochastique de climat;

4 RÉSULTATS

4.1 OBJECTIF SPÉCIFIQUE 1 : ÉTABLIR UN COUPLAGE DYNAMIQUE ENTRE LES PARAMÈTRES D'UN GÉNÉRATEUR DE CLIMAT ET L'ÉVOLUTION DU CLIMAT PROJETÉ, TOUT EN INCLUANT LA VARIABILITÉ NATURELLE.

Les résultats sont présentés selon les 4 étapes décrites dans la section précédente.

4.1.1 Mettre en place un générateur stochastique de climat le plus performant possible sur le bassin de la rivière Yamaska;

Le générateur de climat utilisé pour cet étude est un hybride des modèles WGEN (Richardson, 1981, Richardson et Wright, 1984) et CLIGEN (Hanson et al., 1994). Le modèle WGEN est utilisé comme base mais la génération des températures suit l'approche de CLIGEN. Ceci permet de corriger la variance trop faible des températures générées par WGEN qui a un impact néfaste sur la simulation des hydrogrammes.

Le générateur de climat mis en place est en grande partie celui développé par Chen et al. (2010,2011). La version finale du code telle que raffinée et utilisée dans ce projet est celle de Chen et al. (2012a). Des tests supplémentaires ont été produits sur de multiples autres stations et bassins. Tout le code développé pour le générateur de climat est disponible en licence 'Open source' sur le site de partage de Marthworks (http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29136-stochastic-weather-generator-weagets)

La figure 4.1 présente le schéma de fonctionnement du générateur stochastique WeaGETS ainsi que les options disponibles. Les détails peuvent être retrouvés dans Chen et al. (2012a). De manière générale le générateur utilise une chaine de Markov pour générer l'occurrence des précipitations et une distribution paramétrique pour la génération des précipitations. Pour la génération des températures, WeaGETS peut utiliser les schémas de WGEN ou de CLIGEN. WeaGETS permet la correction de la sous-estimation de la variabilité interannuelle de précipitation selon Chen et al. (2010a).

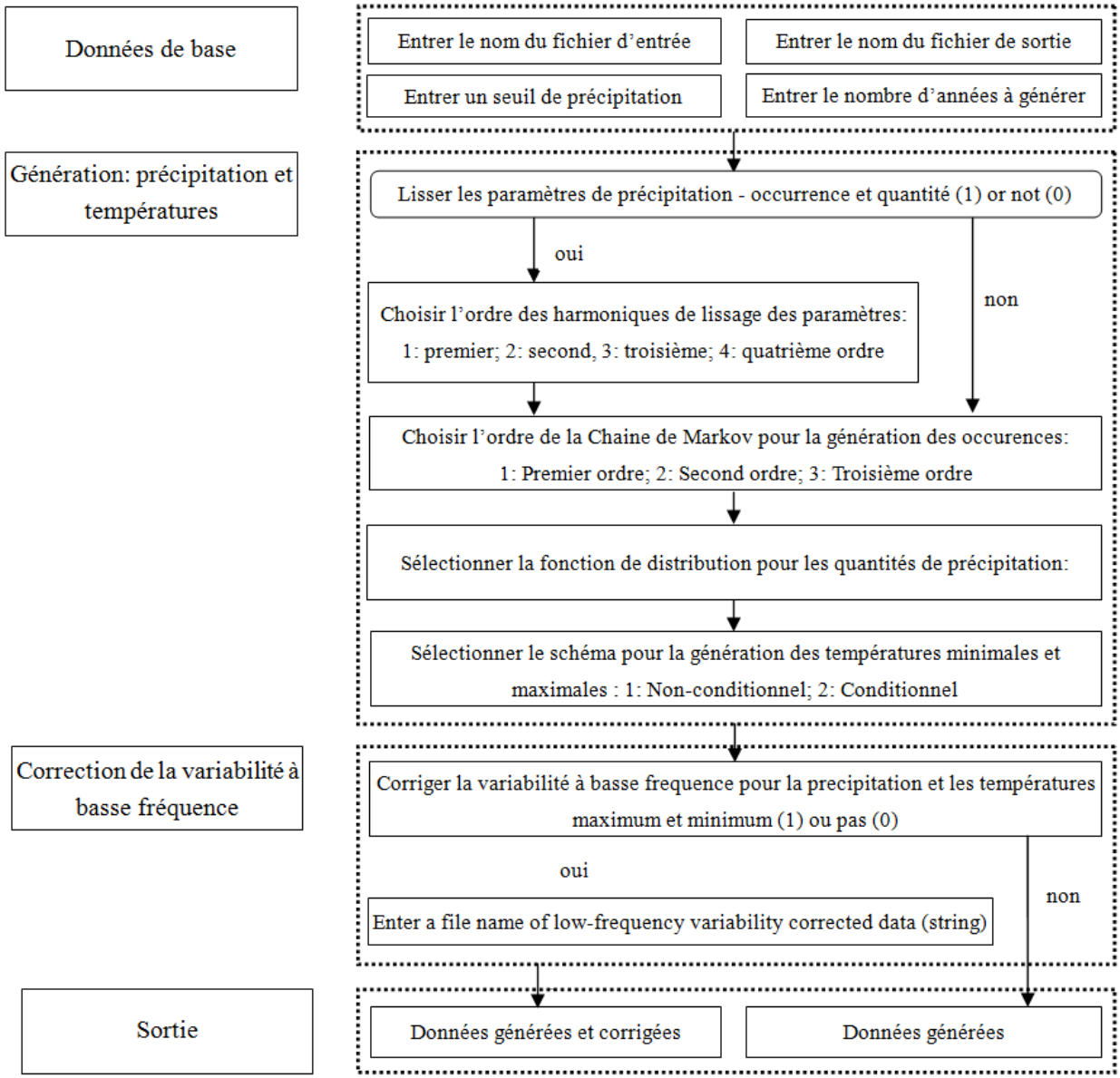

Figure 4-1 Schéma du générateur stochastique de climat WeaGETS.

4.1.2 Tester la performance du générateur stochastique de climat au niveau de son habileté à reproduire les séries de précipitation et température passées, ainsi que l'hydrologie qui en découle;

Cette approche a été testée sur plusieurs bassins au Québec et les séries insérées à l'intérieur d'un modèle hydrologique permettent de bien reproduire les hydrogrammes observés. Il s'agit de bien valider l'habileté du générateur de climat à bien reproduire la climatologie passée et les hydrogrammes via l'utilisation d'un modèle hydrologique. Du travail de validation supplémentaire sur de nombreuses stations de différents climats a été mené dans le cadre de ce projet et publiés ou soumis (Chen, 2012a,b). De ces articles, seulement quelques résultats sont présentés ici.

Il importe de noter que bien que le prototype présenté dans le cadre de ce travail ne porte que sur le bassin de la rivière Yamaska, le générateur de climat a été testé avec succès sur de nombreuses stations et bassins.

Sur le bassin de la rivière Yamaska, les précipitations et températures utilisées furent celles de la base de données NLWIS (Environnement Canada). Ces dernières ont été moyennées au-dessus du bassin de la Rivière Yamaska Sud-Est. Le débit utilisé pour la calibration des modèles provient de la station hydrométrique 030314. À ce point le bassin fait 210 km^2.

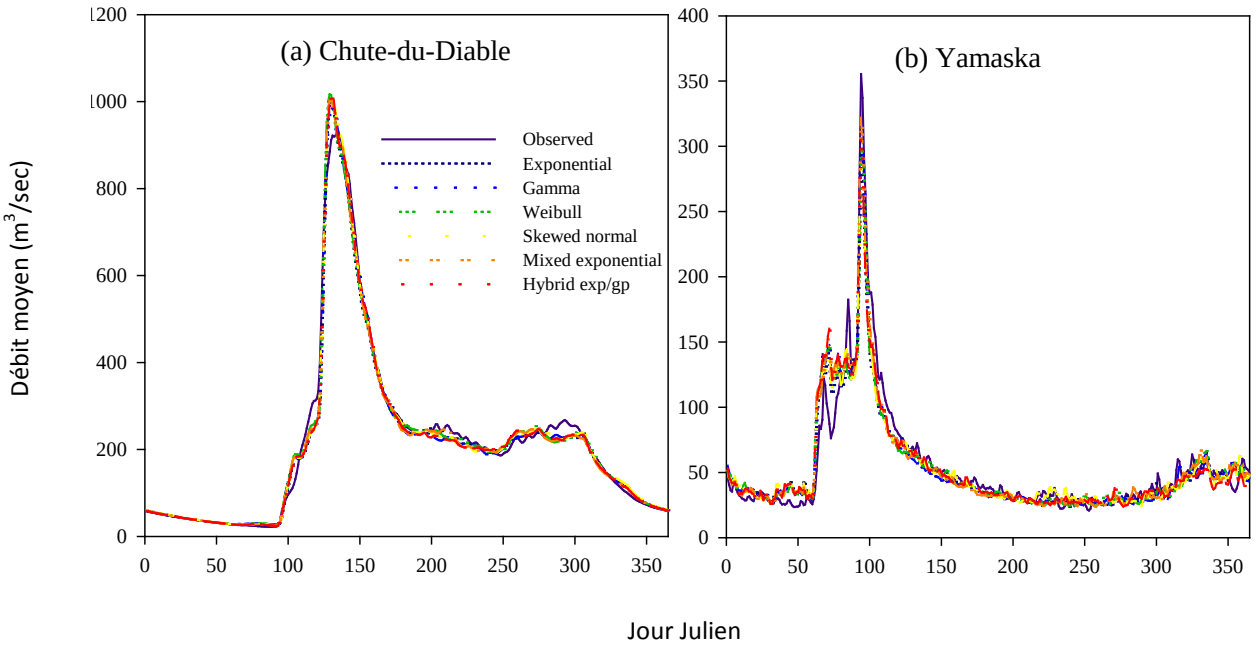

Figure 4-2 Hydrogrammes moyens reproduits par le modèle hydrologique HSAMI avec les données observes et simulées avec les données de WeaGETS sur les bassins de Chute-du-Diable (rivière Péribonka) et Yamaska (à Saint-Hyacinthe – 3300 km^2)

La Figure 4.2 montre les hydrogrammes moyens reproduits par le modèle hydrologique HSAMI avec les données observées et simulées avec les données de WeaGETS sur les bassins de Chute-du-Diable (rivière Péribonka) et Yamaska (à Saint-Hyacinthe – 3300 km2). Cette Figure indique que les séries produites par WeaGETS permettent de bien reproduire l'hydrologie de ces deux bassins versant. Cette validation indirecte est importante parce qu'un générateur peut en apparence bien reproduire les caractéristiques des séries de précipitation et température mais avoir des problèmes au niveau des débits, suite aux complexes interactions non-linéaires dues au modèle hydrologique.

WeaGETS reproduit très bien toutes les caractéristiques moyennes et leur variance, et ce peu importe la distribution de précipitations choisie (résultats non-montrés). Des différences apparaissent toutefois au niveau de statistiques sur les extrêmes. Les Tableaux 4.1 et 4.2 présentent l'erreur relative moyenne pour les variables extrêmes, pour les bassins de Chute-du-Diable et Yamaska, respectivement. L'erreur relative moyenne est calculée entre les simulations hydrologiques à partir de la météo observée et celles simulées par le générateur de climat. Au niveau des valeurs extrêmes, les distributions de précipitation à 3 paramètres performent nettement mieux, alors qu'au niveau des étiages, elles se valent toutes. Ceci n'est guère surprenant puisque les étiages sont liés à l'absence de précipitations et le biais, si présent est fortement lié au biais du modèle hydrologique.

Tableau 4-1 Erreur relative moyenne sur les débits maximum annuel, hiver et été, ainsi que pour les étiages – débit minimal sur 7 jours aux périodes de retour 2 et 10 ans, sur le bassin Chute-du-Diable (rivière Péribonka).

	Période de retour années	**Bassin de Chute-du-Diable (%)**					
		Exponential	Gamma	Weibull	Skewed normal	Mixed exponential	Hybrid exp/gp
Annuel	20	-4	1	-2	0	**0**	-1
	100	-5	1	-3	-1	**1**	-2
Max_w	20	-9	-8	-5	-6	**-6**	3
	100	-11	-12	-4	-8	**-8**	10
Max_s	20	2	5	8	4	**-1**	8
	100	18	14	28	19	**0**	16
7Q2	2	-4	-5	-2	-5	**-2**	-1
7Q10	10	-9	-11	-10	-10	**-8**	-11

Tableau 4-2 Erreur relative moyenne sur les débits maximum annuel, hiver et été, ainsi que pour les étiages – débit minimal sur 7 jours aux périodes de retour 2 et 10 ans, sur le bassin de la rivière Yamaska.

	Période de retour années	Bassin Yamaska (%)					
		Exponential	Gamma	Weibull	Skewed normal	Mixed exponential	Hybrid exp/gp
Annuel	20	-7	-6	-5	-4	-6	**-1**
	100	-10	-8	-7	-6	-9	**-1**
Max_w	20	-12	1	-3	-7	11	**0**
	100	-19	-3	-9	-11	12	**-2**
Max_s	20	-30	-21	4	3	**-3**	4
	100	-31	-22	22	8	**11**	21
7Q2	2	5	5	0	1	**1**	0
7Q10	10	9	9	-1	10	**3**	10

La Figure 4.3 indique pourquoi les fonctions de distribution à 1 ou 2 paramètres sous-estiment généralement les extrêmes. Ces fonctions reproduisent moins bien les quantiles supérieurs et surestiment les quantiles inférieurs. Les moyennes sont bien respectées, mais les crues extrêmes, qui sont corrélées aux précipitations extrêmes (même l'hiver), sont quant à elles sous-estimées.

Parmi les résultats principaux on peut noter :

- Le générateur stochastique de climat développé performe très bien, autant en validation directe (reproduction des précipitations des températures) qu'indirecte (simulation de l'hydrologie), aux pas de temps journalier, mensuel, annuel et interannuel;
- Au niveau de la précipitation, la majorité des fonctions de distribution a une bonne performance au niveau de la moyenne et de la variance, mais les fonctions à 3 paramètres permettent une meilleure reproduction des extrêmes;
- Le choix de la fonction de distribution a peu ou pas d'impact ou niveau de la simulation des étiages, tel que représentés par les variables 7Q2 et 7Q10. Les étiages étant en bonne partie le résultat de longues séries sèches, les écarts constants entre les débits observés (modélisés) et simulés à partir des données WeaGETS sont principalement dus au biais du modèle hydrologique.

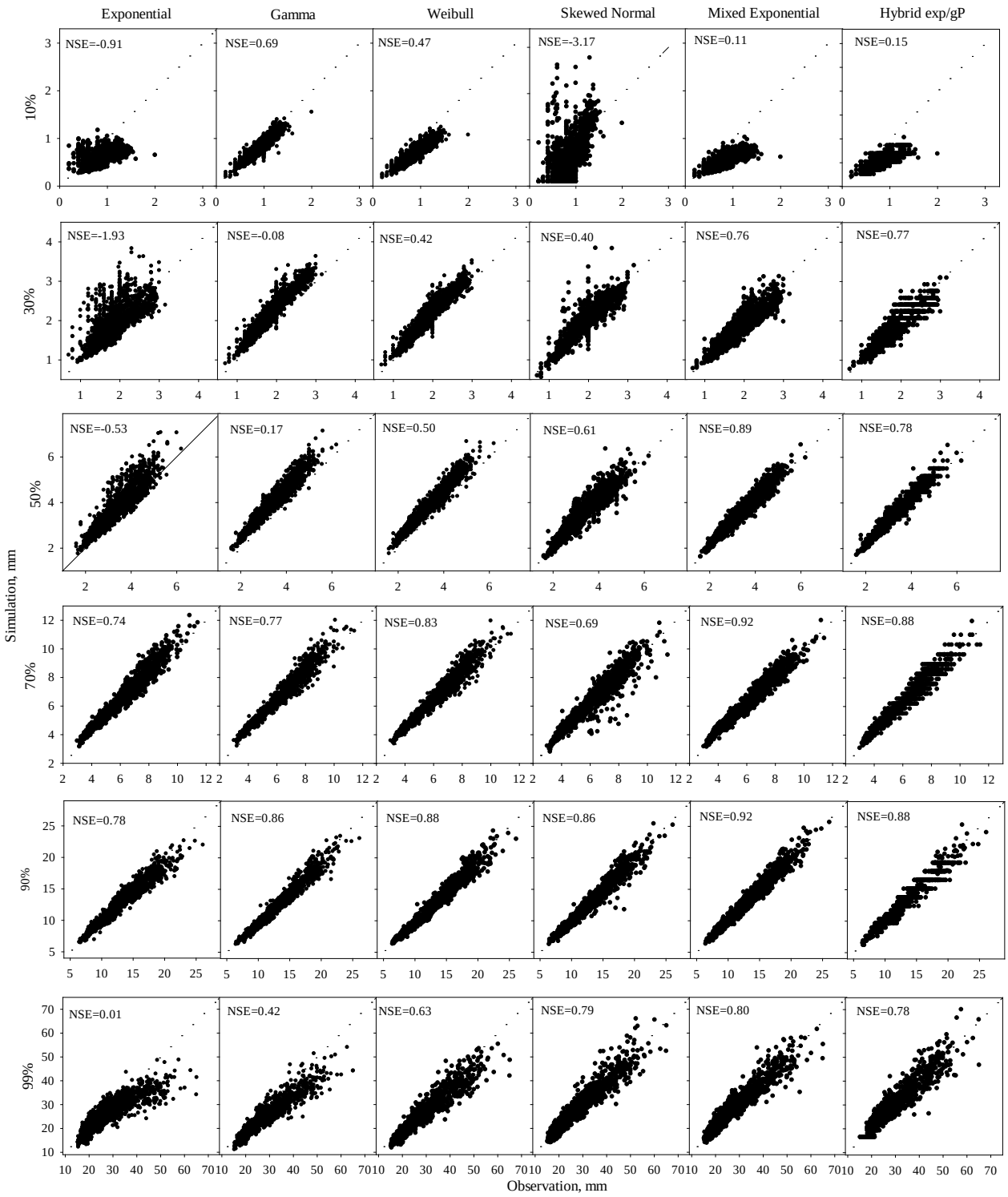

Figure 4-3 Performance des fonctions de distribution, par quantile (rivière Yamaska). NSE=Critère d'efficience de Nash-Sutcliffe

- Pour la simulation de l'occurrence des précipitations, particulièrement critique en ce qui a trait à la simulation des étiages, une chaîne de Markov du premier ordre est suffisante pour bien reproduire le climat tempéré du Québec.
- Tout le code développé pour le générateur de climat est disponible en licence 'Open source' sur le site de partage de Mathworks .

4.1.3 Représenter la variabilité naturelle à l'intérieur du générateur stochastique de climat, notamment avec l'aide d'indices de circulation atmosphérique;

Un lien entre des indices de circulation atmosphérique et le climat a été établi en de nombreux endroits sur la planète. À certains endroits, ce lien peut servir pour améliorer les prévisions saisonnières. Si un tel lien peut être établi pour le sud du Québec, par exemple entre une anomalie de température ou de précipitation, cette anomalie peut facilement être intégrée au générateur de climat pour forcer les sorties vers l'anomalie anticipée.

Au Canada par exemple, le patron Pacifique-Amérique du Nord (Pacific–North American télé connexion pattern - PNA) et l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) ont un impact sur le climat canadien (Lin et al., 2008). Aux fins de reproduire les résultats de ces derniers une analyse entre la précipitation et ces indices a été effectuée sur le Canada complet. Les résultats sont présentés aux Figures 4.4 et 4.5.

Ces résultats reproduisent fidèlement ceux de Lin et al. (2008) même si la méthodologie employée ici était légèrement différente. Ils confirment le lien entre ces indices et la température (en particulier pour PNA) sur plusieurs régions du Canada. Cependant, pour le centre et le sud du Québec, il n'existe aucune corrélation significative, et ce en aucun endroit, entre les précipitations et les indices PNA et NAO.

Une étude exhaustive a donc été faite entre les corrélations de température et de précipitation, et 12 indices de télé connexion pour les bassins de Chute-du-Diable et de Yamaska. Les résultats sont similaires pour les deux bassins et seuls ceux pour la rivière Yamaska sont présentés aux Tableaux 4.3 et 4.4. Les corrélations saisonnières et mensuelles ont été calculées mais seules les corrélations saisonnières sont présentées puisqu'elles sont systématiquement supérieurs aux mensuelles. Il faut noter que le nombre de chiffres significatifs dans ces tableaux témoigne d'une fausse précision compte tenu de la taille de l'échantillon. Ceci n'affecte toutefois pas les conclusions.

Le Tableau 4.3 recense plusieurs corrélations statistiquement significatives entre divers indices et les températures, mais aucune pour les précipitations. Les coefficients de corrélations demeurent toutefois relativement faibles (<0.4). Néanmoins, cette première étude confirme le lien entre le climat et la circulation atmosphérique, et ce même pour le sud du Québec, un climat continental, du moins au niveau des températures.

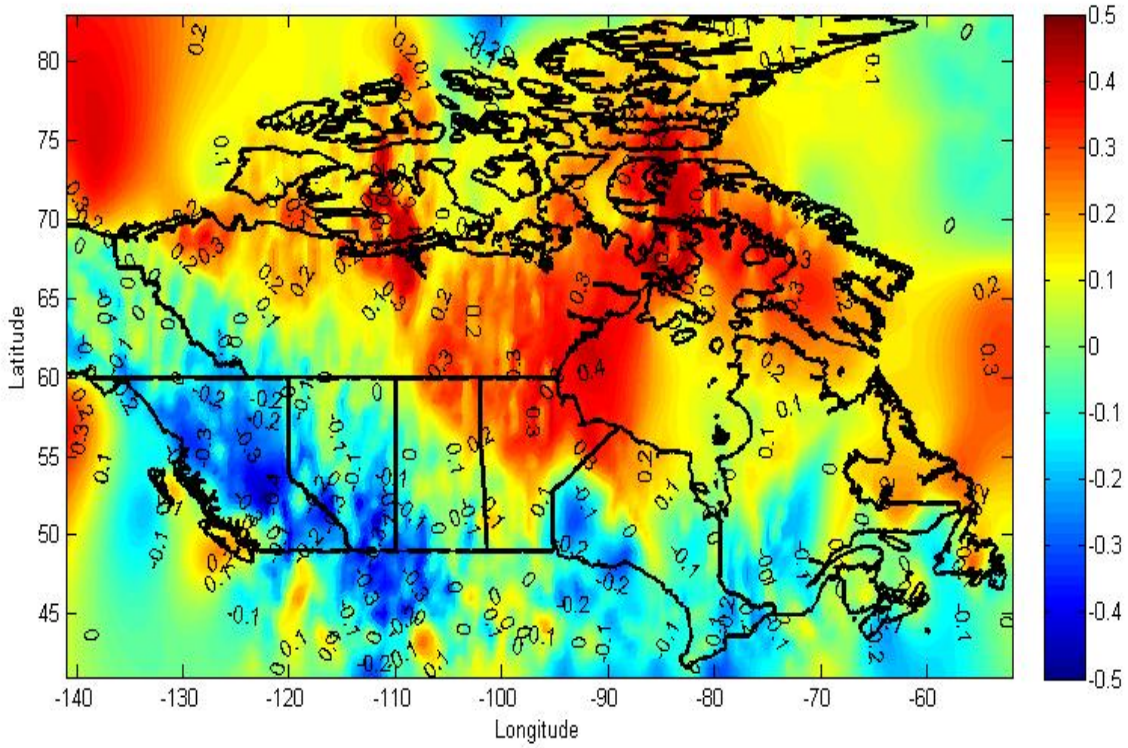

Figure 4-4 Corrélation entre les précipitations et l'indice de téléconnection PNA

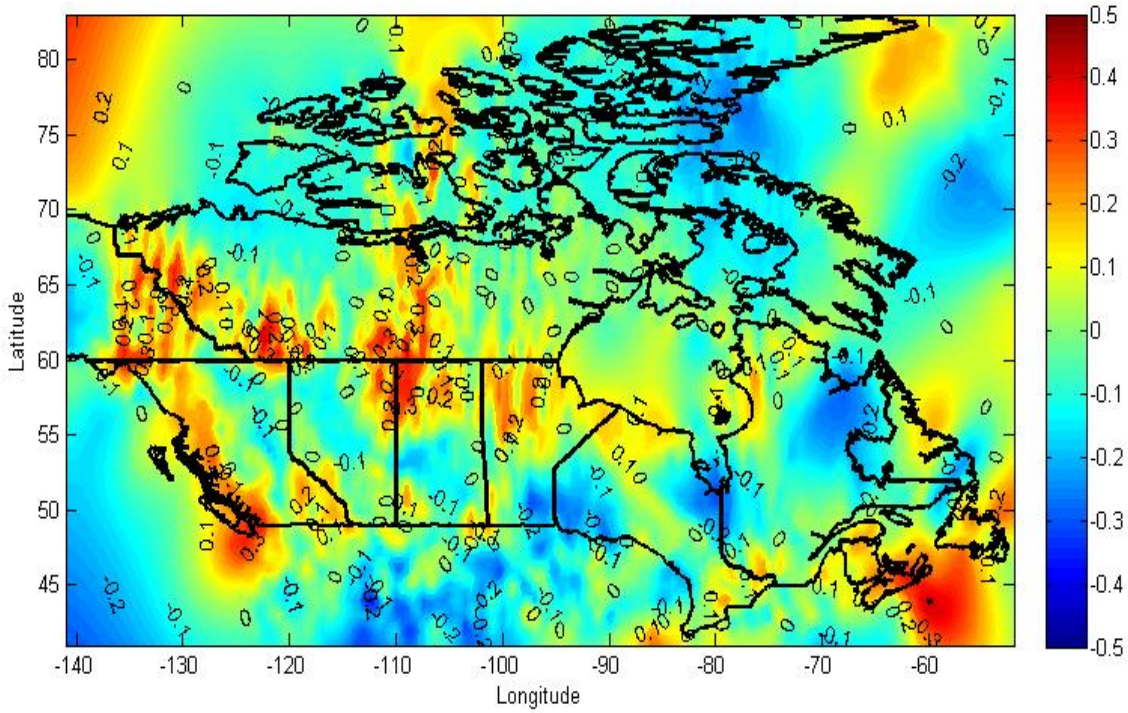

Figure 4-5 Corrélation entre les précipitations et l'oscillation Atlantique Nord (NAO)

Tableau 4-3 Corrélations saisonnières entre 12 indices de télé connexion et les précipitations et températures sur le bassin de la rivière Yamaska.

	coefficient de corrélation					**Valeur de P**				
Indices	saisonnier, pre				annuel, pre	saisonnier, pre				annuel, pre
	JFM	AMJ	JAS	OND		JFM	AMJ	JAS	OND	
NAO	0.203	0.321	-0.135	-0.347	0.058	0.292	0.090	0.486	0.065	0.765
EA	-0.084	0.061	-0.249	0.059	-0.097	0.666	0.753	0.193	0.762	0.616
WP	0.147	-0.229	-0.200	-0.037	-0.259	0.446	0.233	0.299	0.850	0.175
EP/NP	-0.047	0.135	0.269	-0.076	0.010	0.809	0.484	0.158	0.694	0.958
PNA	0.064	-0.040	-0.001	-0.173	-0.002	0.742	0.839	0.996	0.369	0.990
EA/WR	0.147	-0.045	0.024	-0.246	-0.238	0.448	0.816	0.900	0.198	0.214
SCA	-0.236	0.120	0.223	-0.103	0.125	0.218	0.535	0.246	0.596	0.519
ENSO	0.232	0.022	0.043	-0.171	-0.052	0.226	0.909	0.824	0.374	0.787
SST	0.189	-0.015	-0.269	0.158	0.054	0.327	0.939	0.158	0.414	0.782
PDO	-0.030	0.272	-0.160	-0.092	0.053	0.879	0.154	0.406	0.633	0.783
AMO	0.090	-0.167	-0.267	0.207	-0.036	0.644	0.387	0.162	0.280	0.855
SLP	-0.245	0.013	-0.027	0.126	0.067	0.200	0.946	0.888	0.514	0.729
	coefficient de corrélation					Valeur de P				
Indices	saisonnier, tmax				annuel, tmax	saisonnier, tmax				annuel, tmax
	JFM	AMJ	JAS	OND		JFM	AMJ	JAS	OND	
NAO	0.281	0.222	-0.181	0.450	0.059	0.139	0.247	0.347	**0.014**	0.763
EA	0.093	0.091	0.248	0.189	0.323	0.630	0.640	0.195	0.325	0.087
WP	0.338	0.308	-0.179	0.482	0.241	0.073	0.104	0.353	**0.008**	0.208
EP/NP	-0.381	-0.214	-0.291	-0.529	-0.551	**0.041**	0.266	0.125	**0.003**	**0.002**
PNA	0.260	-0.022	0.147	-0.372	0.255	0.173	0.911	0.447	**0.047**	0.181
EA/WR	0.132	-0.388	0.010	0.091	-0.278	0.494	**0.038**	0.958	0.637	0.144
SCA	-0.330	-0.445	-0.096	0.026	-0.543	0.080	**0.015**	0.621	0.892	0.002
ENSO	0.274	-0.066	-0.524	-0.022	-0.211	0.150	0.734	**0.004**	0.909	0.271
SST	0.439	0.366	0.216	0.203	0.515	**0.017**	0.051	0.261	0.290	**0.004**
PDO	-0.011	-0.030	-0.161	-0.457	-0.182	0.956	0.879	0.404	**0.013**	0.344
AMO	0.355	0.499	0.378	0.208	0.628	**0.059**	**0.006**	**0.043**	0.278	**0.000**
SLP	-0.249	0.019	0.496	-0.038	0.176	0.192	0.924	**0.006**	0.845	0.360
	coefficient de corrélation					Valeur de P				
Indices	saisonnier, tmin				annuel, tmin	saisonnier, tmin				annuel, tmin
	JFM	AMJ	JAS	OND		JFM	AMJ	JAS	OND	
NAO	0.089	0.362	-0.299	0.360	-0.048	0.645	0.054	0.115	0.055	0.804
EA	0.199	0.051	0.179	0.213	0.277	0.299	0.793	0.353	0.268	0.146
WP	0.311	0.245	-0.117	0.492	0.193	0.101	0.201	0.546	**0.007**	0.316
EP/NP	-0.372	-0.167	-0.192	-0.469	-0.574	**0.047**	0.386	0.318	**0.010**	**0.001**
PNA	0.345	-0.046	-0.015	-0.246	0.265	0.067	0.812	0.938	0.199	0.165
EA/WR	-0.016	-0.412	0.126	-0.190	-0.306	0.932	**0.026**	0.513	0.324	0.106
SCA	-0.185	-0.326	0.238	0.009	-0.341	0.338	0.084	0.213	0.961	0.070
ENSO	0.307	-0.092	-0.551	-0.103	-0.234	0.105	0.633	**0.002**	0.596	0.223
SST	0.451	0.336	0.096	0.254	0.429	**0.014**	0.075	0.622	0.184	**0.020**
PDO	0.031	-0.057	-0.373	-0.388	-0.215	0.872	0.768	**0.046**	**0.038**	0.262
AMO	0.353	0.364	0.207	0.301	0.512	**0.060**	**0.052**	0.282	0.112	**0.005**
SLP	-0.265	0.093	0.520	0.067	0.226	0.164	0.631	**0.004**	0.729	0.238

Tableau 4-4 Corrélations saisonnières entre 12 indices de télé connexion et les précipitations et températures sur le bassin de la rivière Yamaska. Les corrélations sont avec un 'lag' saisonnier, c'est-à-dire que les indices pour une saison sont corrélés avec les observations sur la saison suivante.

	coefficient de corrélation			**Valeur de P**		
Indices		pre			pre	
	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND
NAO	0.119	0.097	-0.014	0.537	0.617	0.944
EA	-0.068	-0.164	0.091	0.725	0.396	0.639
WP	-0.149	0.073	-0.067	0.442	0.705	0.729
EP/NP	0.003	-0.195	-0.222	0.989	0.310	0.246
PNA	0.044	0.022	0.312	0.821	0.908	0.100
EA/WR	-0.145	0.302	-0.153	0.453	0.111	0.429
SCA	0.118	0.057	0.098	0.542	0.768	0.614
ENSO	0.011	-0.080	-0.110	0.956	0.681	0.571
SST	-0.130	-0.167	0.193	0.502	0.387	0.315
PDO	0.087	-0.339	0.201	0.653	0.072	0.296
AMO	-0.227	-0.267	0.238	0.236	0.162	0.213
SLP	-0.073	0.096	0.102	0.707	0.622	0.598
	coefficient de corrélation			Valeur de P		
Indices		tmax			tmax	
	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND
NAO	-0.091	-0.093	-0.017	0.637	0.630	0.930
EA	-0.016	0.038	0.300	0.935	0.844	0.114
WP	0.597	-0.073	0.111	**0.001**	0.707	0.565
EP/NP	0.031	-0.084	-0.055	0.872	0.666	0.776
PNA	0.317	0.222	0.184	0.094	0.247	0.338
EA/WR	0.019	-0.331	0.090	0.921	0.079	0.644
SCA	-0.088	0.068	-0.309	0.650	0.726	0.102
ENSO	0.156	-0.296	-0.063	0.420	0.119	0.746
SST	0.392	0.218	0.178	**0.035**	0.255	0.356
PDO	0.198	-0.089	-0.292	0.303	0.646	0.124
AMO	0.421	0.388	0.068	**0.023**	**0.038**	0.727
SLP	-0.141	0.311	0.044	0.464	0.100	0.819
	coefficient de corrélation			Valeur de P		
Indices		tmin			tmin	
	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND	JFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND
NAO	-0.028	-0.034	-0.079	0.885	0.862	0.685
EA	-0.003	-0.073	0.337	0.989	0.708	0.073
WP	0.568	-0.146	0.045	**0.001**	0.450	0.818
EP/NP	-0.044	-0.240	-0.126	0.823	0.210	0.513
PNA	0.182	0.283	0.259	0.344	0.137	0.174
EA/WR	0.097	-0.167	0.062	0.618	0.386	0.750
SCA	-0.032	0.146	-0.245	0.870	0.451	0.200
ENSO	0.213	-0.357	-0.103	0.268	**0.057**	0.597
SST	0.344	0.136	0.235	**0.068**	0.480	0.220
PDO	0.026	-0.248	-0.216	0.891	0.195	0.261
AMO	0.240	0.176	0.157	0.209	0.361	0.416
SLP	-0.190	0.320	0.097	0.325	0.091	0.615

Par contre, pour que le lien soit utile, il faut qu'il existe en mode prévision, c'est-à-dire que l'indice doit être corrélé non pas avec les valeurs de précipitation et température aux mêmes mois, mais avec celles des mois suivants. Le Tableau 4.4 présente ces corrélations au niveau saisonnier. Les corrélations sont toujours non-significatives pour la précipitation, et diminuent systématiquement pour les températures minimale et maximale. En fait, en mode prévision, les corrélations sont presque toute non significatives. Pour l'été, une seule corrélation est significative pour la température minimale (ENSO) et une seule pour la température maximale (AMO). Par contre, compte tenu que les valeurs de ces deux corrélations significatives sont faibles, et seulement présentes pour une des deux valeurs de température (et pas pour l'autre), il est très possible qu'elles soient dues à la chance.

On peut donc noter :

- Aucune corrélation significative entre les précipitations et 12 indices de télé connexion n'a pu être trouvée pour le centre-sud du Québec;
- Des corrélations significatives existent entre plusieurs indices et les températures minimales et maximales. Par contre, en mode prévision (indice vs précipitation et température futures sur un horizon de 3 mois) toutes les corrélations sont fortement diminuées, et aucun lien intéressant n'a pu être décelé;
- L'avenue visant à lier les tendances saisonnières des températures et de la précipitation sont donc abandonnées dans le cadre de ce projet;
- Ceci ne signifie pas que ces corrélations n'existent pas ailleurs au Québec. Hydro-Québec les utilise d'ailleurs dans le Grand Nord Québécois pour la prévision saisonnière. Le climat de cette région (notamment sur le bassin de la Rivière Churchill) est beaucoup plus influencé par l'océan. Ceci se reflète d'ailleurs aux Figures 4.4 et 4.5.

4.1.4 Représenter le signal du changement climatique à l'intérieur du générateur stochastique de climat, en le liant avec le modèle climatique régional canadien.

Sur un horizon de trois mois, les précipitations et températures à venir sont principalement contrôlées par la variabilité naturelle qui agit par-dessus le signal climatique. Le ré-échantillonnage des données passées engendre toutefois un biais potentiel au niveau de la représentativité de l'historique vis-à-vis des conditions présentes. En d'autres mots, bien que le signal du changement climatique soit lent, sur un horizon de 30 ans ce signal est suffisamment important pour résulter en des biais. Et donc, tel que mentionné précédemment, l'utilisation de données historiques passées peut résulter en un biais des prévisions hydrologiques.

Le même problème existe au niveau du générateur de climat puisque ce dernier doit être calibré sur les données historiques passées. Bien que le générateur de climat puisse représenter la variabilité naturelle beaucoup mieux que le ré-échantillonnage des données historiques (notamment lorsque l'historique est

de durée restreinte), les valeurs moyenne restent toujours basées sur le climat des années sur lequel il a été calibré.

Pour contourner cette réalité, les paramètres du générateur de climat peuvent être facilement perturbés pour représenter les modifications anticipées au climat, telles que représentées par les modèles climatiques. L'approche est présentée dans Chen et al. (2012c) est résumée ici.

Les paramètres qui contrôlent le générateur de climat sont au nombre de 8 (ou 9) :

- les probabilités de transition de la chaîne de Markov P_{01} et P_{11}
- les deux (ou 3) paramètres caractérisant la distribution de précipitation
- les moyennes journalières et écart-type des températures minimale et maximale

Il s'agit donc de modifier ces paramètres en les rattachant au modèle climatique (Le modèle régional de climat canadien -CRCM- dans ce cas-ci).

La modification suit une approche qui s'apparente à celle de la méthode des deltas. Les paramètres du générateur de climat sont modifiés en fonction du changement observé par le modèle. Les futures températures moyennes sont modifiées selon :

$$\overline{T}_{adj,\,fut} = \overline{T}_{obs} + (\overline{T}_{CM,\,fut} - \overline{T}_{CM,ref})$$

alors que les moyennes mensuelles des précipitations ainsi que les écarts-type des précipitations et températures sont modifiées suivant l'équation suivante :

$$X_{adj,\,fut} = X_{obs} \times (X_{CM,\,fut} / X_{CM,ref})$$

Dans ce travail, les probabilités de transition de la chaîne de Markov P_{01} et P_{11} sont exprimées en fonction de la probabilité de précipitation absolue et en fonction de l'autocorrélation des précipitations (lag-1) :

$$\pi = \frac{P_{01}}{1 + P_{01} + P_{11}}$$

$$r = P_{11} - P_{01}$$

Selon cette notation, la précipitation moyenne par jour humide μ_d est égale à

$$\mu_d = \frac{\mu_m}{N_d \pi}$$

où N_d est le nombre de jours du mois, $N_d \pi$ est le nombre moyen de jours humides dans un mois et μ_m est la précipitation moyenne.

Pour faire la perturbation au sein du générateur de climat, il s'agit de suivre l'évolution de ces variables telles que représentées au sein des modèles climatiques. Un exemple est présenté à la Figure 4.6.

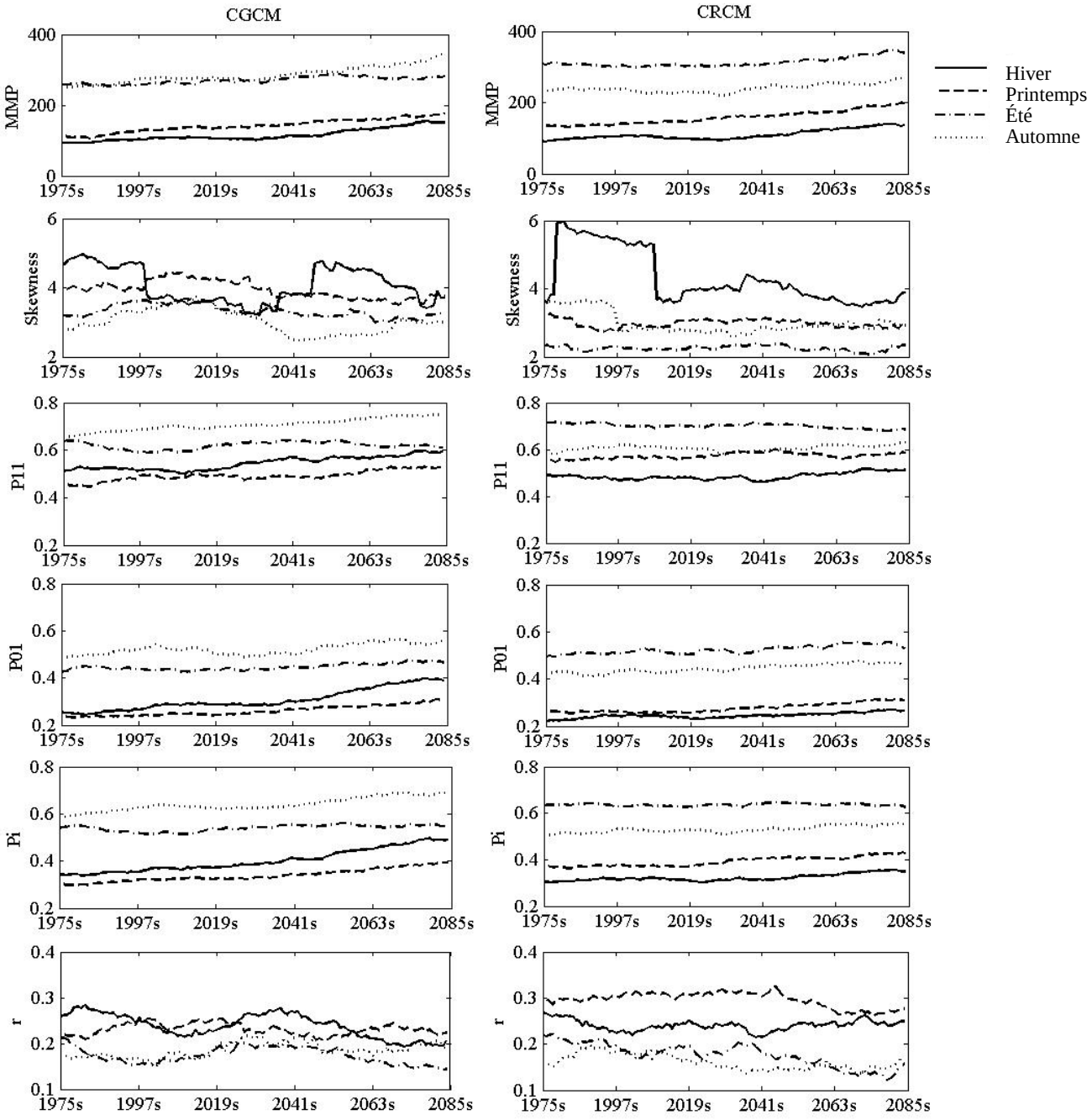

Figure 4-6 Évolution des paramètres d'un générateur de climat tel que vus par deux modèles climatiques au centre du Québec

Puisqu'il s'agit de moyennes climatiques les valeurs sont calculées sur la base d'une moyenne mobile de 30 années. Par exemple, cette Figure montre clairement que la moyenne mensuelle des précipitations (MMP) est constamment à la hausse. De même, les probabilités de transition de la chaîne de Markov P_{01} et P_{11} sont elles aussi à la hausse. Ces deux modèles prévoient donc une augmentation du nombre de jours pluvieux et de la quantité totale de précipitation au cours du siècle.

En regardant le premier diagramme en haut à gauche (précipitation moyenne mensuelle), entre les horizons 1975 (1960-1990) sur lequel un générateur de climat serait normalement calibré (pour des données historiques 1950-2000), et l'horizon 2012 (celui pour lequel on veut faire des prévisions), une hausse de 15% des précipitations printanières et de 10% de la probabilité d'un jour pluvieux est prévue dû au forçage anthropique. Ne pas incorporer ce signal au sein du générateur de climat pourrait se traduire par une sous-estimation importante de la quantité de pluie printanière.

La Figure 4.7 présente un schéma qui décrit les étapes nécessaires pour perturber le générateur de climat en fonction des changements climatique anticipés. Prenons un cas concret ou les données disponibles existent sur la période 1950-2012. La calibration du générateur de climat résulte donc en un système calé sur une fenêtre centrée sur 1981, et donc représentative du climat de 1981. Sans cette modification, des erreurs de prévision sont fort possibles.

L'approche proposée peut aussi être utilisée pour les études en contexte de changement climatique. Même si elle est inspirée de la méthode des deltas, cette approche permet une modification explicite de la variance et de séries d'occurrence de précipitation permettant de bien représenter les séries sèches et humides, critiques pour la création des étiages. L'application de cette méthode à la Figure 4.8 permet de prédire des baisses de débits estivaux comparativement à la méthode des deltas qui voit plutôt un status quo.

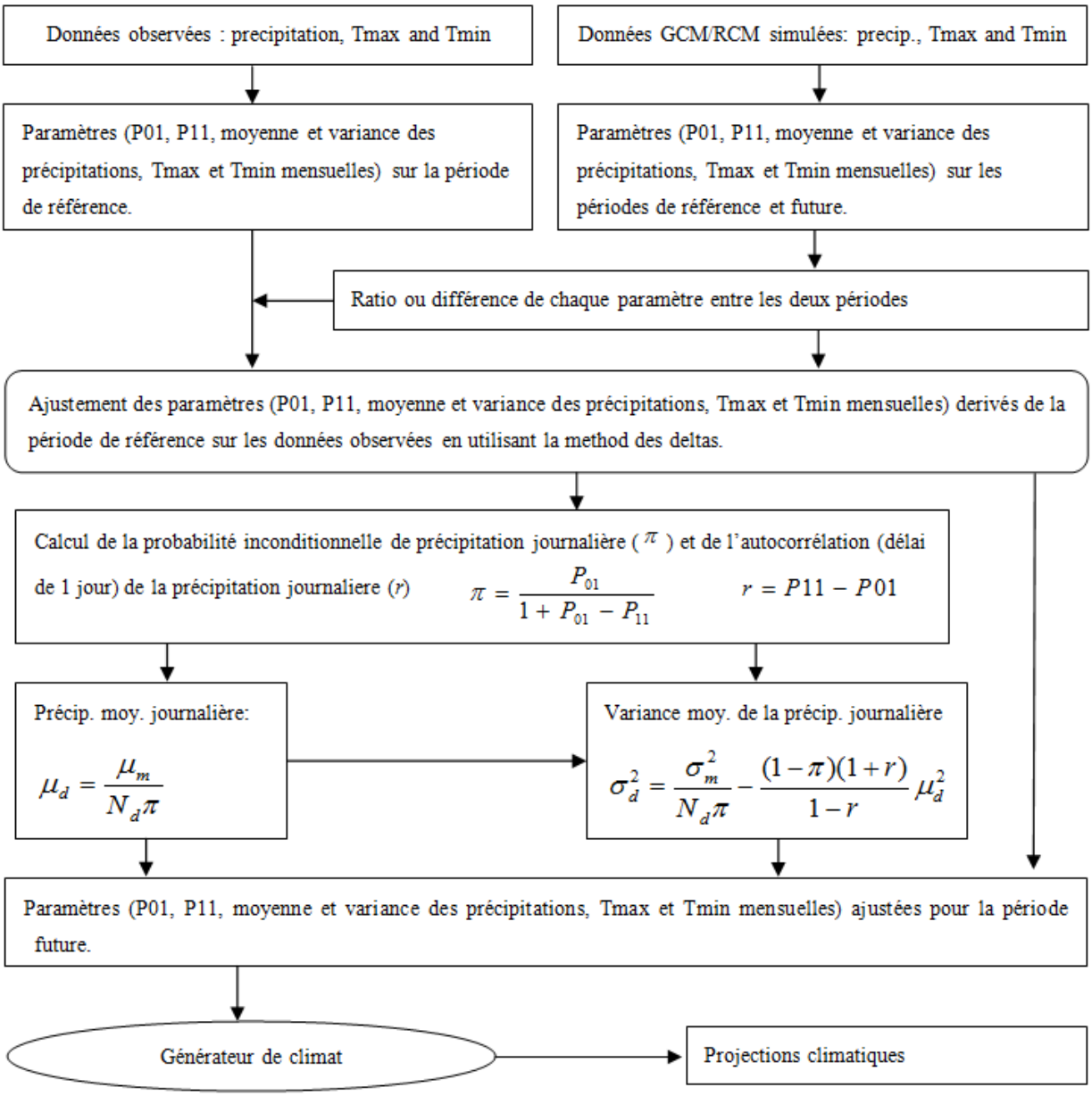

Figure 4-7 Schéma du système de modification des paramètres du générateur de climat

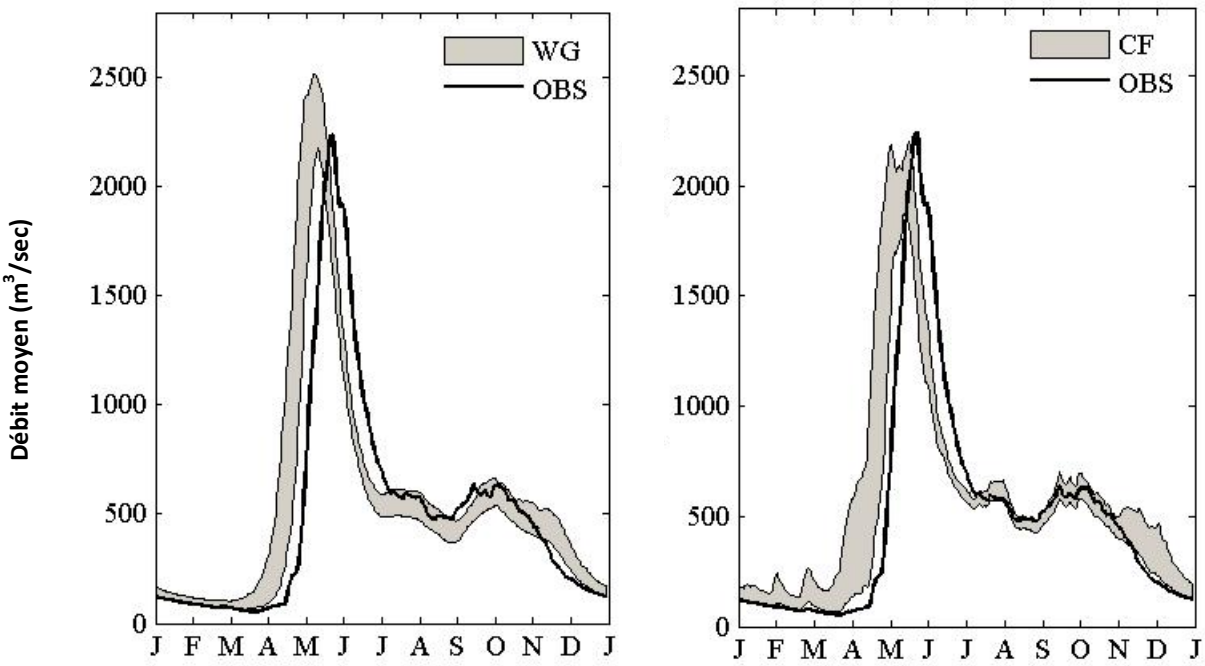

Figure 4-8 Comparaison des enveloppes de débits annuels sur l'horizon 2050 selon la méthode proposée (gauche) et selon la méthode des deltas (droite) pour le bassin de Manic 5.

4.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble.

Tel que discuté précédemment, une approche 'multi-modèle' et 'multi-calibration' est privilégiée. Quatre modèles hydrologiques seront comparés en mode multi-calibration. Les modèles Mohyse Hydrotel, HSAMI et HMETS sont utilisés. Tous ces modèles sont calés selon plusieurs métriques basées sur des approches annuelles et saisonnières, notamment sur la période de l'été.

Cette approche permettra d'établit l'influence de la structure d'un modèle sur l'incertitude des prévisions. L'assignation de poids aux différentes combinaisons modèle/calibration permettra de produire le meilleur estimé possible.

L'approche sera testée sur plusieurs bassins versants et sera par la suite appliquée au prototype sur le bassin de la rivière Yamaska

La section suivante décrit les approches d'assignation de poids utilisées dans cette étude. Des informations supplémentaires sont fournies dans Gatien et al. (2012);

Les poids seront attribués selon trois bases différentes :

- sur une base annuelle – les poids sont constants
- sur une base saisonnière - les poids varient selon les saisons
- sur une base quantitative – les poids varient selon le débit

Les approches pas saison (notamment pour l'été) et par débits (notamment sur les faibles débits) visent à maximiser la performance dans le cas des étiages.

4.2.1 Approches d'assignation des poids

Les méthodes de combinaison décrites ci-dessous permettent de calculer les poids (Wx) assignés à chaque combinaison modèle hydrologique/calibration. La série de débit combinée (Qx) est ensuite assemblée à partir de ces poids et de la matrice des séries simulées (Qsim). L'approche décrite ici est inspirée des travaux de Diks et Vrugt (2012).

$$Q_x = Q_{sim} * W_x$$

4.2.1.1 MOYENNE ARITHMÉTIQUE (EWA)

Cette méthode consiste à faire une moyenne non pondérée de chaque modèle/calibration. Quoique simpliste, elle sera utilisée comme point de référence pour évaluer la performance des autres méthodes de combinaison. Elle consiste à attribuer un poids égal au n modèles de l'ensemble.

$$W_{EWA} = (\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})$$

4.2.1.2 MOYENNE DE BAYES (BMA)

Les différentes applications du BMA sont décrites dans Neuman (2003), Ye et al. (2004), Raftery et al. (2005), Gneiting et al. (2005), Vrugt & Robinson (2007) et Vrugt et al. (2007). Dans cette méthode, les poids attribué doivent être positifs et totaliser 1 ($W_{BMA}|Wi\geq 0$ & $\Sigma W_{BMA}=1$).

Ces poids sont attribués en moyennant les fonctions de densité de probabilité de chaque modèle sur la période de calibration.

4.2.1.3 MOYENNE GRANGER-RAMANATHAN – MÉTHODE A (GRA)

Cette méthode (Granger and Ramanathan, 1984) attribue des poids basés sur une évaluation du moindre carré. Cette méthode a pour effet de produire une combinaison minimisant le RMSE. La série résultante va avoir tendance à être biaisée s'il n'y a pas correction du biais de l'ensemble préalablement.

$$W_{GRA} = ({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} {Q_{sim}}^T Q_{obs}$$

Ici, Q_{obs} sont les données pour la série de calibration.

4.2.1.4 MOYENNE GRANGER-RAMANATHAN – MÉTHODE B (GRB)

La méthode B (Granger and Ramanathan, 1984) est comme la méthode A, mais en forçant l'unité des poids (somme de 1).

$$W_{GRB} = ({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} {Q_{sim}}^T Q_{obs} + 2\boldsymbol{\lambda}({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} * l$$

4.2.1.5 MOYENNE GRANGER-RAMANATHAN – MÉTHODE C (GRC)

Ici, les poids ne sont pas contraints à l'unité (somme de 1) mais un terme constant est présent. Comme la méthode A, la méthode C (Granger and Ramanathan, 1984) minimise le RMSE mais produit une série non-baisée ce qui est un avantage significatif pour de nombreuses applications.

$$W_{GRC} = ({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} {Q_{sim}}^T Q_{obs} - W_0({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} {Q_{sim}}^T l$$

$$W_0 = \frac{l^T * erreur_GRA}{n - \theta}$$

$$\theta = l^T Q_{sim}({Q_{sim}}^T Q_{sim})^{-1} {Q_{sim}}^T l$$

$$Q_x = Q_{sim} * W_{GRC} + W_0 l$$

4.2.1.6 MOYENNE DE BATES-GRANGER (BGA)

Cette méthode, initialement proposé par Bates & Granger (1969), vise à produire un ensemble combiné avec la plus petite RMSE. Par contre, la technique repose sur les hypothèses de bases que les données n'ont pas de biais et que leurs erreurs sont non corrélées. Le poids de chaque modèle est estimé par $1/\sigma^2_i$ où σ^2_i est la variance estimée du modèle en question.

$$W_{BGA} = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{n} 1/\sigma_i^2}$$

4.2.1.7 MOYENNE PAR OPTIMISATEUR SCE-UA (SCA)

Ici, l'algorithme d'optimisation par complexe (Shuffle Complex Evolution-UA) est utilisé non pas pour optimiser les paramètres des modèles hydrologiques, mais pour établir les poids pour la période de calibration. L'optimisateur cherche à minimiser le critère de Nash.

4.2.1.8 CRITÈRES D'INFORMATION DE AKAIKE ET BAYES (AICA & BICA)

Ces méthodes (Buckland et al. 1997; Burnham and Anderson 2002; Hansen 2008), offrent la probabilité optimale de chaque modèle avec un terme de pénalité appliqué. Ce terme de pénalité varie entre les deux méthodes (AICA et BICA).

$$W_{AICA-BICA} = \frac{exp\left(-I_i/2\right)}{\sum_{i=1}^{n} exp\left(-I_j/2\right)}$$

4.2.2 Modèles et calibration des modèles

Cette section détaille brièvement selon quels critères les différents modèles hydrologiques ont été calibrés. Les Tableaux 4.5 (modèles globaux) et 4.6 (Hydrotel) énumèrent ces critères.

4.2.2.1 HSAMI, HMETS ET MOHYSE

Chacun des modèles globaux a été calibré à l'aide de neuf métriques différentes, produisant ainsi neuf séries distinctes par modèle pour chaque bassin. La calibration est effectuée sur la première moitié des données disponibles, donc entre 1975 et 1989 pour les bassins américains et entre 1988 et 1992 pour les bassins québécois. Ils ont tous été calibrés à l'aide d'un optimisateur par complexe (SCE-UA) dans le but de minimiser les métriques. Un pas de temps journalier est utilisé dans tous les cas.

Tableau 4-5 Critères de calibration pour les modèles globaux

Métrique	Formule
Biais et biais d'été	$BIAS = \frac{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{n} - Q_{sim}^{n})}{\sum_{n=1}^{N} Q_{obs}^{t}}$
RMSE du logarithme naturel et RMSE du logarithme naturel d'été	$LN\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(\log Q_{obs}^{n} - \log Q_{sim}^{n})^2}{N}}$
Nash, Nash d'été et Nash sur les 30 plus faibles débits d'été	$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - Q_{sim}^{t})^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^2}$
RMSE et RMSE d'été	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{n} - Q_{sim}^{n})^2}{N}}$

4.2.2.2 HYDROTEL

Hydrotel a été calibré à l'aide de 5 métriques différente. La calibration est effectuée avec la période entre 2000 et 2009. Les données de la calibration ont été utilisées pour produire des séries entre 1979 et 1999. La calibration a été automatique avec l'algorithme SCE-UA.

Tableau 4-6 Critères de calibration pour Hydrotel

Métrique	Formule
Biais	$BIAS = \frac{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{n} - Q_{sim}^{n})}{\sum_{n=1}^{N} Q_{obs}^{t}}$
RMSE du logarithme naturel	$LN\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(\log Q_{obs}^{n} - \log Q_{sim}^{n})^2}{N}}$
Nash	$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - Q_{sim}^{t})^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^2}$
RSR (RMSE/écart-type)	$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{n} - Q_{sim}^{n})^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^2}}$
Nash + RSR + RMSE du logarithme naturel (été)	Eq. X+Y+Z

4.2.3 Résultats

Les résultats sont présentés au sein des Figures 4.9 à 4.14. Les Figures 4.11 et 4.12 comportent les résultats lorsque les 12 meilleures combinaisons (modèle-calibration) sont considérées. Finalement, les Figures 4.13 et 4.14 présentent les résultats pour Hydrotel seulement (5 calibration).

Les Figure 4.9, 4.11 et 4.13 présentent les poids impartis à chaque modèle (combinaison modèle-calibration) lors de la calibration de chaque méthode. Les Figures 4.10, 4.12 et 4.14 présentent ces même poids sous forme graphique pour mieux visualiser les modèles qui ressortent avec de forts poids.

Pour les Figure 4.9, 4.11 et 4.13, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe et de l'erreur RMSE sont présentées en validation pour chaque modèle-calibration (deux avant-dernières colonnes). Les valeurs des mêmes critères sont aussi présentées pour les 9 approches de combinaisons de modèles (deux dernières rangées).

La Figure 4.9 indique qu'en fonction du critère de Nash, les meilleurs modèles en validation sont HSAMI-NASH (0.739) et Hydrotel-BIAS-BSR (0.727). HMETS-NASH suit (0.467) devant MOHYSE-LNRMSE (0.174). La mauvaise performance de HMETS et MOHYSE s'explique relativement facilement. MOHYSE est un modèle simple qui a été conçu pour l'enseignement alors que HMETS est un modèle développé pour simuler la neige, et un modèle performant d'infiltration-évaporation n'y a pas encore été implanté.

Les résultats montrent que toutes les méthodes de combinaisons (sauf les deux premières) performent mieux que le meilleur modèle individuel. Les gains sont appréciables avec des critères de NASH légèrement supérieurs à 0.8 en validation. Les approches de combinaison réduisent aussi l'erreur RMSE considérablement.

Plusieurs modèles se voient attribuer des poids très faibles indiquant que ces derniers sont peu utiles. La méthodologie a donc été répétée en gardant les 12 modèles les plus performants tel que représentés à la Figure 4.10. Les résultats sont présentés aux Figures 4.11 et 4.12. En éliminant les modèles les moins performants, et donc en gardant 12 modèles sur 32, les combinaisons de modèles performent encore mieux. Les valeurs de NASH atteignent maintenant 0.84 ce qui est une augmentation très appréciable par rapport au meilleur modèle individuel.

EWA	Wbga	Wbma	Waica	Wbica	Wgra	Wgrb	Wgrc	Wsca	Nash for eac	RMSE for each model	
0.03125	0.40967365	0	2.799E-103	3.86E-206	0.03509893	0.02486979	-0.22263022	-0.04577274	0.11236612	28.0501007	HMETS BIAS
0.03125	0.03732528	0	6.3728E-94	2.001E-187	-0.06811012	-0.06988722	-0.09092956	-0.05129725	0.14593214	15.3288834	HMETS BIAS SUMMER
0.03125	0.01386625	1.3452E-10	5.063E-105	1.263E-209	-0.00325526	-0.00253864	-0.00568466	-0.03116241	0.30255159	30.540709	HMETS LN RMSE
0.03125	0.01893938	0	6.738E-109	2.237E-217	0.06841998	0.07028584	0.12718784	0.08143931	0.07814926	49.4810579	HMETS LN RMSE SUMMER
0.03125	0.02673485	0.04163636	1.7419E-71	1.495E-142	0.84053352	0.8263846	0.77901159	0.135954	0.46706553	27.4894311	HMETS NASH
0.03125	0.00444445	0	2.618E-240	0	0.03968797	0.0388025	0.03562687	0.04277273	-1.43863795	5.60303536	HMETS NASH SUMMER
0.03125	0.00726424	0	3.53E-189	0	-0.01776644	-0.01664808	-0.01022964	-0.01608969	-0.52610379	46.8611207	HMETS NASH LF 30
0.03125	0.02684424	0.0008745	2.3977E-70	2.833E-140	-0.80482629	-0.79193623	-0.74656205	-0.0689689	0.46742486	29.2224039	HMETS RMSE
0.03125	0.00423103	0	1.26E-244	0	-0.06865248	-0.06829615	-0.06528406	-0.07640682	-1.53309815	5.683982	HMETS RMSE SUMMER
0.03125	0.05084654	0.01840368	8.7631E-71	4.549E-144	-0.04541632	-0.04420566	-0.04113414	-0.0351246	0.29921424	39.168938	HSAMI BIAS
0.03125	0.02245252	0.01051542	6.9601E-67	2.87E-136	0.11308705	0.11067986	0.11521722	0.16880124	0.35436645	77.4754179	HSAMI BIAS SUMMER
0.03125	0.01403157	5.864E-216	5.7729E-61	1.974E-124	0.08301049	0.08629772	0.08380273	0.00171012	0.48538911	52.1703048	HSAMI LN RMSE
0.03125	0.01405384	0.01941157	2.7731E-51	4.555E-105	0.010492	0.00802529	0.02148899	0.0637457	0.54542579	44.0321757	HSAMI LN RMSE SUMMER
0.03125	0.02092864	0.13394133	0.80021562	0.00037933	2.23833301	2.23873789	2.2608792	0.85289307	0.73920291	25.2171161	HSAMI NASH
0.03125	0.0183862	1.6531E-92	5.4531E-25	1.7615E-52	-0.34338363	-0.34987312	-0.3348718	-0.43751251	0.66014766	39.5831515	HSAMI NASH SUMMER
0.03125	0.00759227	0	1.93E-166	0	0.04453004	0.04500808	0.04050496	0.02915511	-0.54381524	91.7958069	HSAMI NASH LF 30
0.03125	0.02144009	0.07656843	0.19819211	2.3269E-05	-1.84332426	-1.84311571	-1.88529183	-0.37707978	0.7405118	20.3827878	HSAMI RMSE
0.03125	0.01790268	0.11630429	9.3537E-16	5.1828E-34	0.5080243	0.51586428	0.50448295	0.57212014	0.69072505	25.3426662	HSAMI RMSE SUMMER
0.03125	0.01172746	0	8.775E-171	0	-0.05304981	-0.05298432	-0.06533762	-0.06647182	-0.66777365	44.2427715	MOHYSE BIAS
0.03125	0.00350118	0	3.69E-276	0	-0.00347618	-0.0037127	-0.00310483	-0.00092764	-2.45767136	85.6527696	MOHYSE BIAS SUMMER
0.03125	0.01878447	0	7.1377E-85	1.147E-162	-0.19648551	-0.19249749	-0.19242826	-0.17746574	0.17449376	61.8820977	MOHYSE LN RMSE
0.03125	0.03333857	0.00275399	2.9441E-79	1.951E-151	-0.0476032	-0.04870709	-0.07491386	-0.10353731	0.16350491	95.647172	MOHYSE LN RMSE SUMMER
0.03125	0.0223875	4.149E-282	1.0824E-78	2.637E-150	0.01157521	-0.00151472	0.05310676	-0.15318078	0.17030365	144.510648	MOHYSE NASH
0.03125	0.0238353	0	1.7452E-86	6.854E-166	-1.00438646	-1.00503879	-0.90367321	-0.65796744	0.13865351	144.442113	MOHYSE NASH SUMMER
0.03125	0.00716449	0	5.419E-207	0	-0.00963188	-0.00927802	-0.00908333	-0.0016784	-1.18143425	13.5643689	MOHYSE NASH LF 30
0.03125	0.02244795	2.04E-219	1.0206E-71	2.344E-136	0.18362479	0.19305441	0.12125777	0.24661485	0.24364859	36.0794432	MOHYSE RMSE
0.03125	0.0231941	0	2.5283E-87	1.439E-167	0.86525464	0.86350386	0.79831283	0.64811675	0.13541769	144.623334	MOHYSE RMSE SUMMER
0.03125	0.02157775	0.07287795	1.0202E-05	4.204E-05	-6.21325126	-6.37149264	-6.70500515	0.16214028	0.72737215	11.1402118	HYDROTEL BIAS BSR
0.03125	0.02159365	0.14518444	8.9862E-06	3.2617E-05	6.81955363	6.97496377	7.31946716	0.53052339	0.72728097	11.6439656	HYDROTEL LN RMSE
0.03125	0.0189806	1.5955E-29	2.9887E-17	3.608E-28	-0.26202887	-0.26167039	-0.27280768	-0.23700507	0.70883807	9.24052397	HYDROTEL NASH
0.03125	0.0201304	0.30233092	0.00157308	0.99952275	-0.02919001	-0.02546517	-0.02143691	-0.18643192	0.732167	9.00965672	HYDROTEL NASH RSR LN RMSE
0.03125	0.01437886	0.05919713	3.8699E-90	6.049E-174	0.14142077	0.14000095	0.14624374	0.14473683	0.32131454	10.6048664	HYDROTEL RSR
0.63704404	0.45689264	0.81328065	0.76782511	0.77322318	0.80575993	0.8057568	0.80414974	0.80168386	<-validation		
38.3495807	34.6151713	5.04980587	24.6572636	10.8342504	3.577847	2.70416946	0.49551411	3.38027854	<-validation RMSE		

Figure 4-9 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 32 combinaisons de modèles et critères de calibration.

Finalement, l'exercice est répété avec seulement les 5 combinaisons d'Hydrotel (Figures 4.13 et 4.14). Dans ce cas, l'amélioration n'est pas aussi notable (le critère de NASH passe de 0.73 à 0.77). Ceci semble indiquer que la multi-calibration d'un seul modèle est moins efficace que l'utilisation de plusieurs structures de différents modèles hydrologiques. Des travaux additionnels seront nécessaires pour mieux tester cette observation, compte tenu qu'il n'est pas parfaitement correct de comparer une combinaison de 12 modèles avec une à 5 modèles. Néanmoins, même les modèles les moins performants (HMETS et MOHYSE) peuvent avoir leur place au sein d'un tel système de combinaison de modèles.

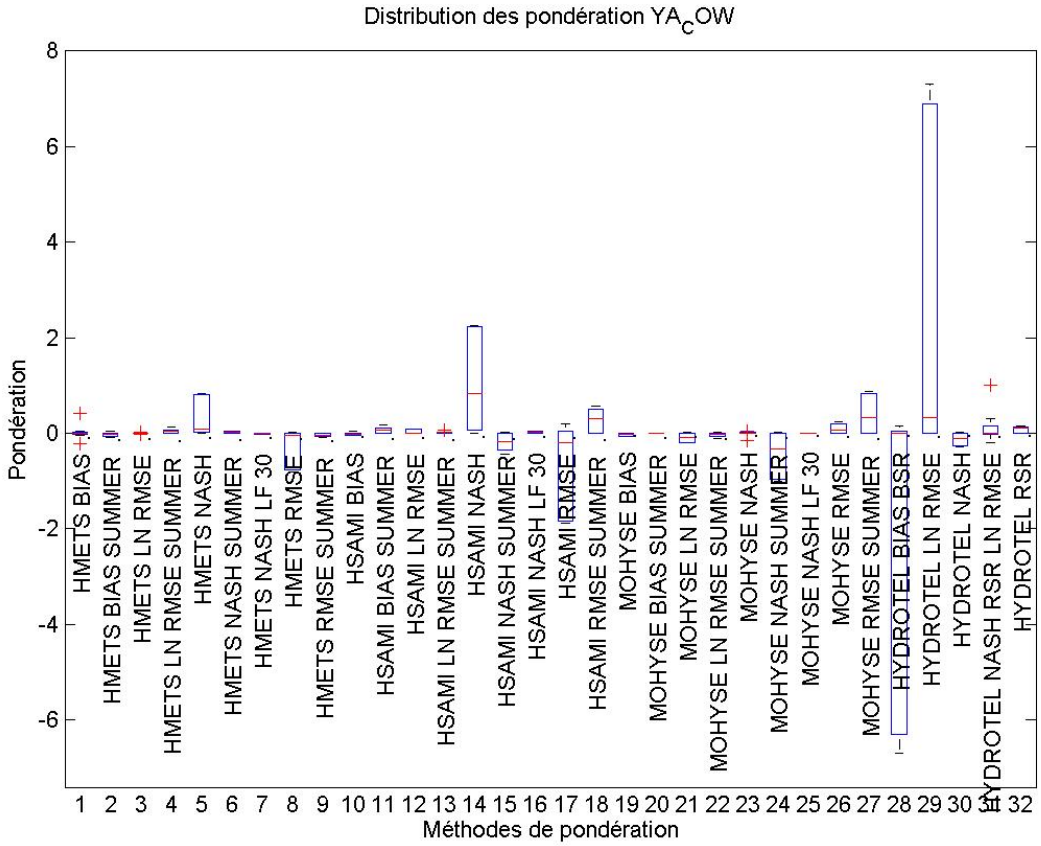

Figure 4-10 Fourchette des poids pour les 32 combinaisons de modèles et critères.

EWA	Wbga	Wbma	Waica	Wbica	Wgra	Wgrb	Wgrc	Wsca	Nash for e	RMSE for each model	
0.083333	0.102218	0.021679	1.74E-71	1.5E-142	0.474615	0.447655	0.490007	0.523685	0.467066	27.48943	HMETS NASH
0.083333	0.102636	0.02947	2.4E-70	2.8E-140	-0.46722	-0.44573	-0.47971	-0.51652	0.467425	29.2224	HMETS RMSE
0.083333	0.080018	0.224208	0.800216	0.000379	1.958856	1.929905	1.934634	0.99989	0.739203	25.21712	HSAMI NASH
0.083333	0.070297	1.59E-75	5.45E-25	1.76E-52	-0.11367	-0.11583	-0.11386	-0.04876	0.660148	39.58315	HSAMI NASH SUMMER
0.083333	0.081974	0.043661	0.198192	2.33E-05	-1.54931	-1.52748	-1.51999	-0.58758	0.740512	20.38279	HSAMI RMSE
0.083333	0.068449	0.125026	9.35E-16	5.18E-34	0.368665	0.386303	0.36446	0.306233	0.690725	25.34267	HSAMI RMSE SUMMER
0.083333	0.091131	0	1.75E-86	6.9E-166	-0.90007	-0.93504	-0.89894	-0.99976	0.138654	144.4421	MOHYSE NASH SUMMER
0.083333	0.08868	0	2.53E-87	1.4E-167	0.756834	0.770989	0.757518	0.830189	0.135418	144.6233	MOHYSE RMSE SUMMER
0.083333	0.0825	0.297145	1.02E-05	4.2E-05	-9.71822	-9.69481	-10.0126	0.444169	0.727372	11.14021	HYDROTEL BIAS BSR
0.083333	0.082561	0.079606	8.99E-06	3.26E-05	10.02956	9.956923	10.34306	-0.13625	0.727281	11.64397	HYDROTEL LN RMSE
0.083333	0.07257	8.76E-59	2.99E-17	3.61E-28	-0.01354	0.018689	-0.02683	-0.02305	0.708838	9.240524	HYDROTEL NASH
0.083333	0.076966	0.179206	0.001573	0.999523	0.154249	0.169913	0.149965	0.182788	0.732167	9.009657	HYDROTEL NASH RSR LN RMSE
0.753333	0.741344	0.818221	0.767825	0.773223	0.834578	0.834501	0.834818	0.833563	<-validation		
30.78596	32.60132	3.297768	24.65726	10.83425	2.838978	0.569512	1.670796	4.260041	<-validation RMSE		

Figure 4-11 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 12 meilleures combinaisons de modèles et critères de calibration.

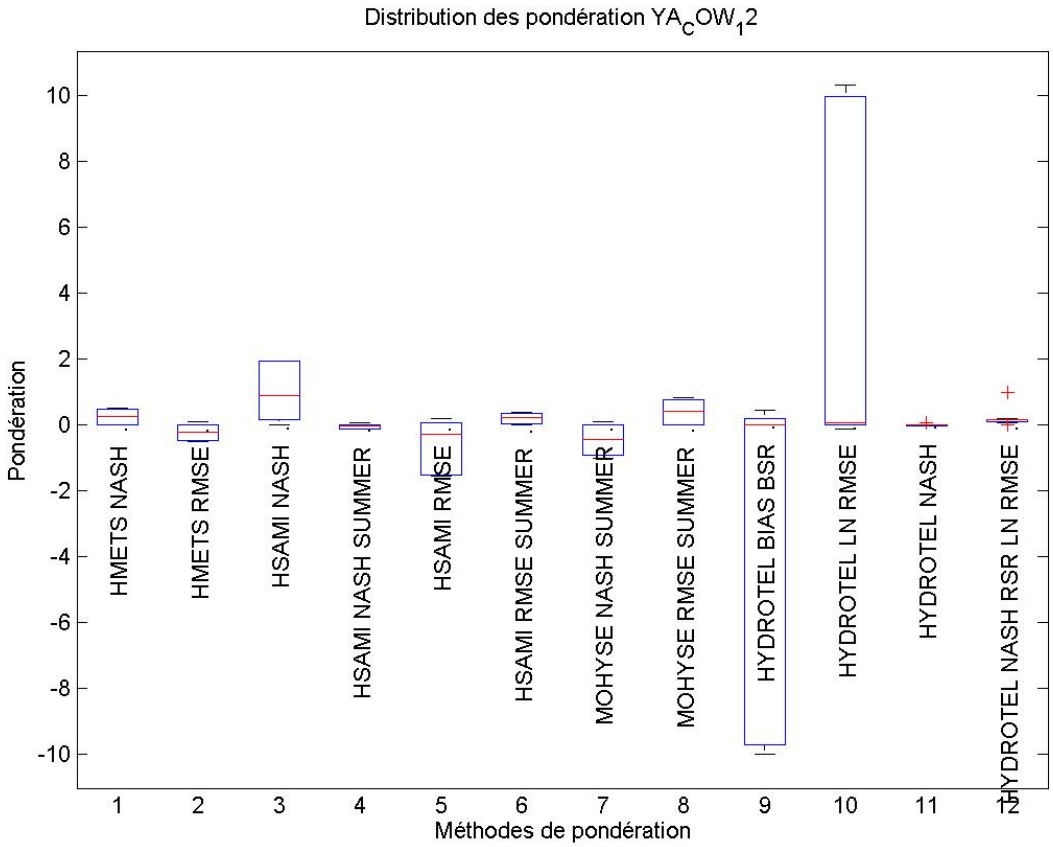

Figure 4-12 Fourchette des poids pour les 12 meilleures combinaisons de modèles et critères.

EWA	Wbga	Wbma	Waica	Wbica	Wgra	Wgrb	Wgrc	Wsca	Nash for e	RMSE for each model		
0.2	0.223231	0.213865	0.006407	4.21E-05	11.92588	11.33695	12.37976	0.999836	0.727372	11.14021	HYDROTEL BIAS BSR	
0.2	0.223395	0.212578	0.005644	3.26E-05	-11.3553	-10.7935	-11.8391	-0.5079	0.727281	11.64397	HYDROTEL LN RMSE	
0.2	0.196362	0.156262	1.88E-14	3.61E-28	-0.2861	-0.27663	-0.26473	-0.18876	0.708838	9.240524	HYDROTEL NASH	
0.2	0.208257	0.232351	0.987949	0.999925	0.620872	0.624483	0.621504	0.60359	0.732167	9.009657	HYDROTEL NASH RSR LN RMSE	
0.2	0.148755	0.184945	2.43E-87	6.1E-174	0.076705	0.072755	0.075826	0.069081	0.321315	10.60487	HYDROTEL RSR	
0.760677	0.766771	0.762581	0.773129	0.773147	0.770528	0.771672	0.770726	0.772002	<-validation			
7.390413	8.489097	8.20765	10.9047	10.84878	6.833886	2.643086	9.112333	7.98838	<-validation RMSE			

Figure 4-13 Résultats de l'approche multi-modèle en utilisant les 5 combinaisons d'Hydrotel.

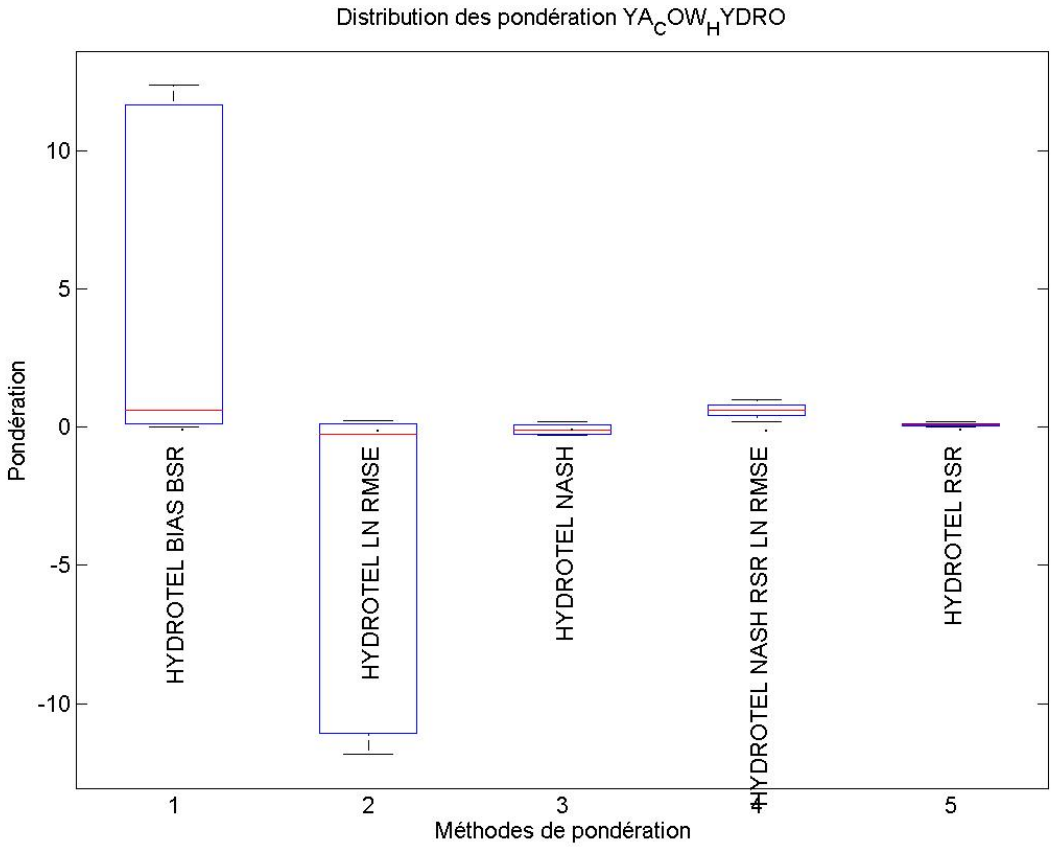

Figure 4-14 Fourchette des poids pour les 5 combinaisons d'Hydrotel.

Les analyses ont aussi été faites avec des calibrations saisonnières et par classe de débits. Ces résultats ne sont pas présentés puisque n'ayant pas mené à une amélioration des performances multi-modèles en

validation, et ce peu importe la métrique considérée. Autrement dit, l'assignation des poids en fonction des faibles débits n'améliore pas la performance en période d'étiage.

Suite à l'analyse des résultats, les principales conclusions de cette section sont les suivantes :

- Les trois méthodes de pondération les plus efficaces sont le BMA, SCEUA et GRC. Les résultats obtenus par les trois méthodes sont équivalents;
- La méthode GRC est de loin la plus simple d'utilisation. Elle ne requiert aucun algorithme complexe, est extrêmement rapide et produit des séries non-biaisées. Le BMA est l'approche la plus complexe, autant au niveau des algorithmes que du temps de calcul. Ces résultats confirment ceux de Diks et Vrugt (2012). La méthode GRC est donc celle qui sera favorisée;
- Les analyses par saisons ou par classes de débits n'apportent aucune amélioration notable par rapport à l'approche annuelle;

4.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système.

Tel que discuté précédemment, les prévisions météorologiques d'ensemble sont une méthode incontournable pour tout système prévisionnel probabiliste. Un système prévisionnel moderne se doit d'incorporer ces données. Plusieurs problèmes se dressent au niveau de leur utilisation :

- les prévisions météorologiques d'ensemble (PME) sont biaisées;
- les PME souffrent de sous-dispersion, c'est-à-dire qu'elles ne couvrent pas le spectre réel des probabilités;
- Il existe peu de méthodes existantes de correction des PME, ces méthodes sont complexes, et elles visent toutes à reconstruire la distribution sous-jacente de laquelle sont issues les prévisions. Or, lors d'une prévision météorologique sur plusieurs jours consécutifs, il n'est pas suffisant de simplement connaitre la fonction de distribution des précipitations et des températures, il faut aussi trouver une façon de produire des séries journalières (à partir de ces fonctions de distribution) et qui respecte certaines règles telles que l'autocorrélation des séries et la dépendance des températures sur les précipitations.

4.3.1 Méthode existantes de corrections de biais

Au cours des dernières années un certain nombre de méthodes de correction des PME ont été proposées. Ces approches sont basées sur l'histogramme de rang (Hamill and Colucci 1998; Eckel and Walters 1998, Wilks 2006), les approches d'habillage – *ensemble dressing* (Roulston and Smith 2003;

Wang and Bishop 2005; Wilks and Hamill, 2007; Brocker 2008), le moyennage de Bayes (BMA) (Raftery et al. 2005, Vrugt et al. 2006; Wilson et al. 2007; Sloughter et al. 2007; Soltanzadeh et al. 2011), la régression logistique (Hamill et al. 2006; Wilks and Hamill, 2007; Hamill et al. 2008), les méthodes d'analogues (Hamill et al. 2006; Hamill and Whitaker 2007), et les régressions gaussienne non-homogène-NGR (Gneiting et al. 2005; Wilks and Hamill, 2007; Hagedorn et al. 2008). Parmi ces méthodes, la régression logistique est souvent utilisée pour les précipitations et températures alors que les approches de BMA et NGR sont utilisées pour les températures (Raftery et al. 2005; Hagedorn et al. 2008; Hamill et al. 2008). Plus récemment, l'approche de BMA a été étendue aux précipitations. (Sloughter et al. 2007; Schmeits and Kok 2010).

4.3.2 Données pour la mise en place des approches de correction

Sur la recommandation de Vincent Fortin, chercheur à Environnement Canada, il a été décidé de développer les approches de correction en utilisant les données GFS produites par NOAA (Hamill et al., 2006).

L'avantage et que ces PME ont été ré-analysées dans le passé à partir de 1979 et donnent donc les longues séries nécessaires à la calibration des approches de correction. En comparaison, Environnement Canada ne procède pas à des ré-analyses pour leur système de PME et fait pas d'archivage de ces dernières. Deux années d'archives des PME d'Environnement Canada ont été fournies via l'archive personnelle de Vincent Fortin.

Les données de PME GFS consistent en 15 membres sur une période totale de 15 jours.

4.3.3 Approche retenue

Le plan initial était de reconstituer les distributions sous-jacentes aux PME, et de se servir du générateur de climat pour faire le lien entre ces distributions et les séries de précipitation.

La première étape a été d'établir les corrélations entre les moyennes des PME (précipitation et température) et les valeurs observées historiques. De cette étude (résultats non présentés), sont ressorties les conclusions suivantes :

1- Les précipitations des PME ont montré une habileté qui va jusqu'à 7 jours en moyenne. C'est-à-dire que les précipitations issues des PME sont meilleures que le ré-échantillonnage du passé ou l'utilisation du générateur de climat;
2- Les températures issues des PME ont montré une habileté qui va jusqu'à 12 jours. Ces dernières sont donc meilleures que le ré-échantillonnage du passé ou l'utilisation du générateur de climat;

3- Ces conclusions tirées pour les PME GFS (NOAA) correspondent sensiblement aux habiletés des PME d'Environnement Canada, selon Vincent Fortin (Communication personnelle, 2011);
4- Dans le prototype développé ici, les PME sur un horizon de 7 jours seront utilisées. Un horizon plus lointain aurait pu être utilisé, mais pour des raisons de simplicité opérationnelle, il est préférable que les précipitations et les températures soient sur un même horizon de temps.

La seconde étape fut de mettre en place les approches de BMA et de régression logistique qui avaient été établies comme étant les plus prometteuses. La boîte d'outil BMA disponible sur la plate-forme 'R' été utilisée. Pour la régression logistique, les algorithmes ont été programmés sur Matlab. Après un travail considérable (résultats non présentés), les conclusions suivantes se sont imposées :

1- L'approche de BMA est onéreuse au plan du temps de calcul. La boîte d'outil BMA disponible sur la plate-forme 'R' est complexe d'utilisation et les algorithmes sont parfois instables.
2- Malgré ces limites, le problème principal de l'approche BMA consiste en la grande quantité de données nécessaires à la calibration de l'approche.
3- L'approche de la régression logistique se prête bien à l'établissement de probabilité de dépassement de quantiles. Cependant, lorsque plusieurs quantiles sont utilisés, des impossibilités mathématiques peuvent résulter entre les quantiles. Wilks (2009) propose une approche pour contourner ce problème. Cette approche a été implémentée mais il en résulte un lissage qui dégrade les résultats à moins de disposer d'une très longue série de données, comme dans le cas de l'approche Bayésienne.

Malgré ces résultats décevants, l'expertise ainsi acquise nous a mis sur une piste de solution originale et qui s'est avérée simple et efficace. Des liens ont été établis entre les paramètres du générateur de climat et une statistique descriptive des PME. La moyenne de la prévision d'ensemble a été utilisée comme statistique descriptive pour les températures et les précipitations.

La Figure 4.15 présente ces liens pour la précipitation, à la fois pour l'occurrence et les quantités, pour les bassins de Chute-du-Diable et Yamaska. Les précipitations ont été regroupées en classes (basées sur la moyenne de la prévision d'ensemble) et comparées aux probabilités et quantités de précipitation issues de l'historique des données.

Les deux graphiques de gauche indiquent le lien très clair entre la moyenne de la prévision d'ensemble et la probabilité réelle de précipitation.

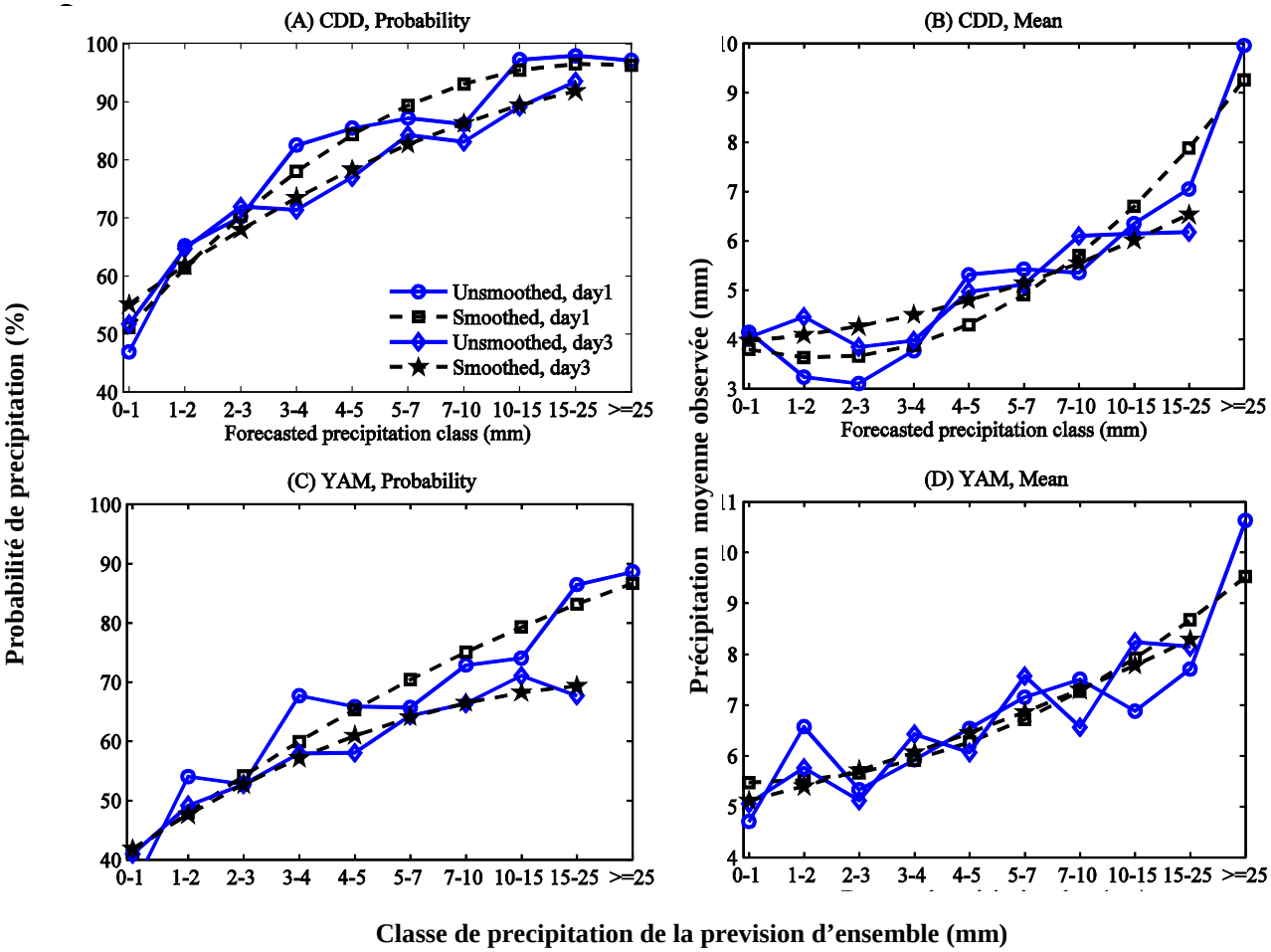

Figure 4-15 Probabilité de précipitation (%) en fonction de la moyenne de la prévision d'ensemble (mm) - prévision à 1 et 3 jours.

Lorsque la moyenne de la prévision d'ensemble est dans la classe 0-1, la probabilité de précipitation réelle est d'environ 50% (pour 1 et 3 jours). Dans la classe >25mm, la probabilité réelle de précipitation approche les 100%. Les probabilités sont plus élevées à 1 jour qu'à 3 jours, indiquant que la qualité de le PME diminue. À 7 jours (non montré), les courbes sont presque horizontales, indiquant que l'habileté des PME est presque nulle.

Les graphiques de droite montrent la moyenne des précipitations observées comparativement à la moyenne de la prévision d'ensemble. La courbe a une pente positive indiquant que la PME a une habileté claire. Plus la moyenne de la PME est grande, plus la moyenne de la prévision observée est grande. Les observations correspondant à chaque classe de la PME suivent toutes des distributions classiques qui peuvent être modélisées avec l'aide d'une fonction gamma ou exponentielle. Une fois ces graphiques construits, il est aisé de construire un ensemble de séries de de précipitations sur une durée de 7 jours. La moyenne de la PME est calculée pour les *lags* 0 à 7. La probabilité de précipitation et la

moyenne des précipitations sont tirées des graphiques. Ces données sont utilisées par le générateur de climat pour produire une grande quantité de séries sur 7 jours, non biaisées et avec la bonne dispersion.

La figure 4.16 présente les histogrammes de rang résultant de l'approche de correction. Les graphiques de gauche indiquent un biais faible mais une grande sous-dispersion.

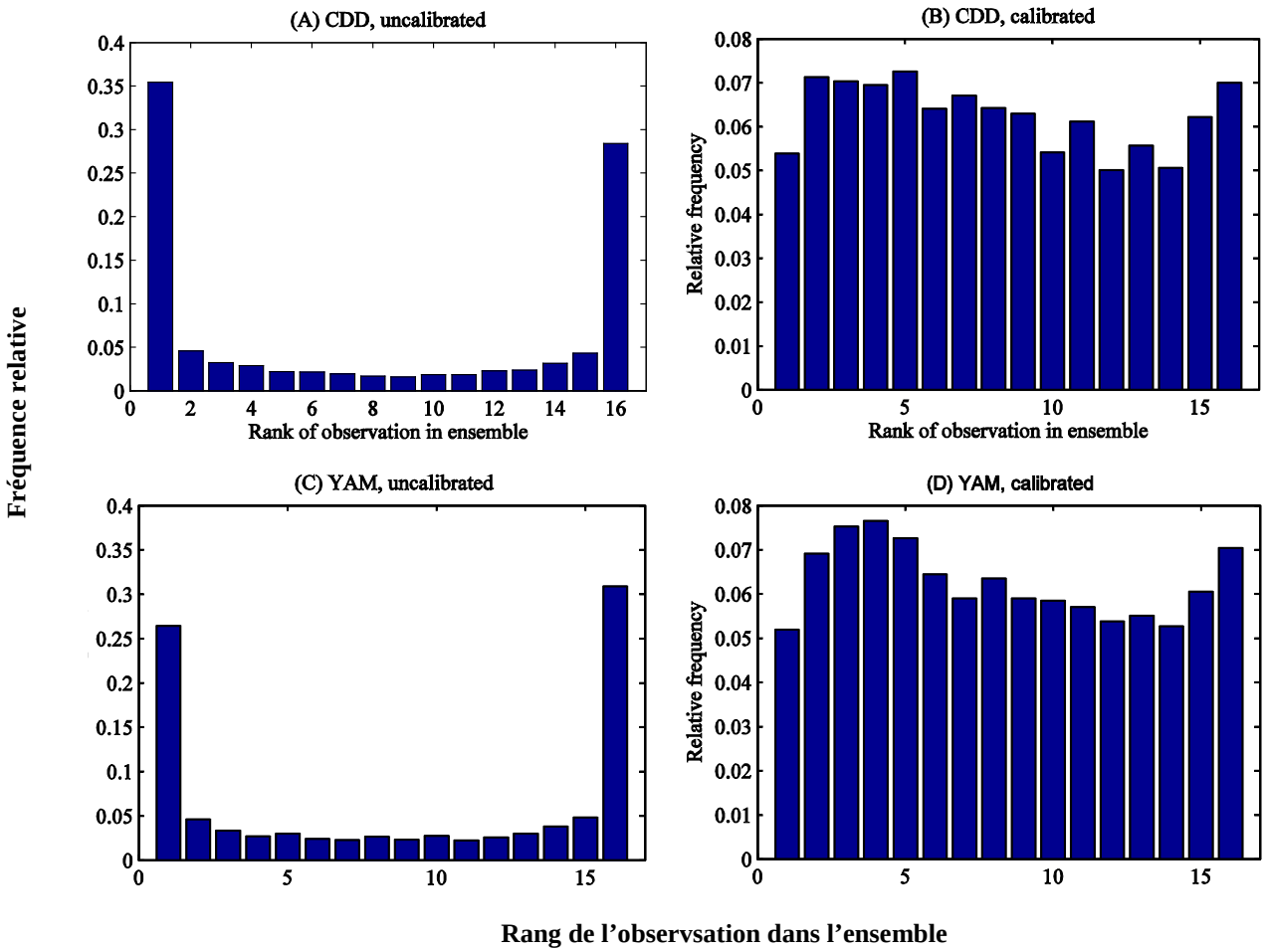

Figure 4-16 Histogrammes de rang pour un *lag* de une journée, montrant la bonne performance de l'approche de correction.

L'approche pour corriger les températures est basée sur la correction du biais. La Figure 4.17 montre un biais froid de 1 à 3 degrés. Ce biais est corrigé linéairement et la moyenne de température de la PME est directement utilisée dans le générateur de climat. L'écart-type des précipitations pour un jour julien donné fait déjà partie du générateur de climat. Ce dernier corrige donc directement la sous-dispersion de la PME.

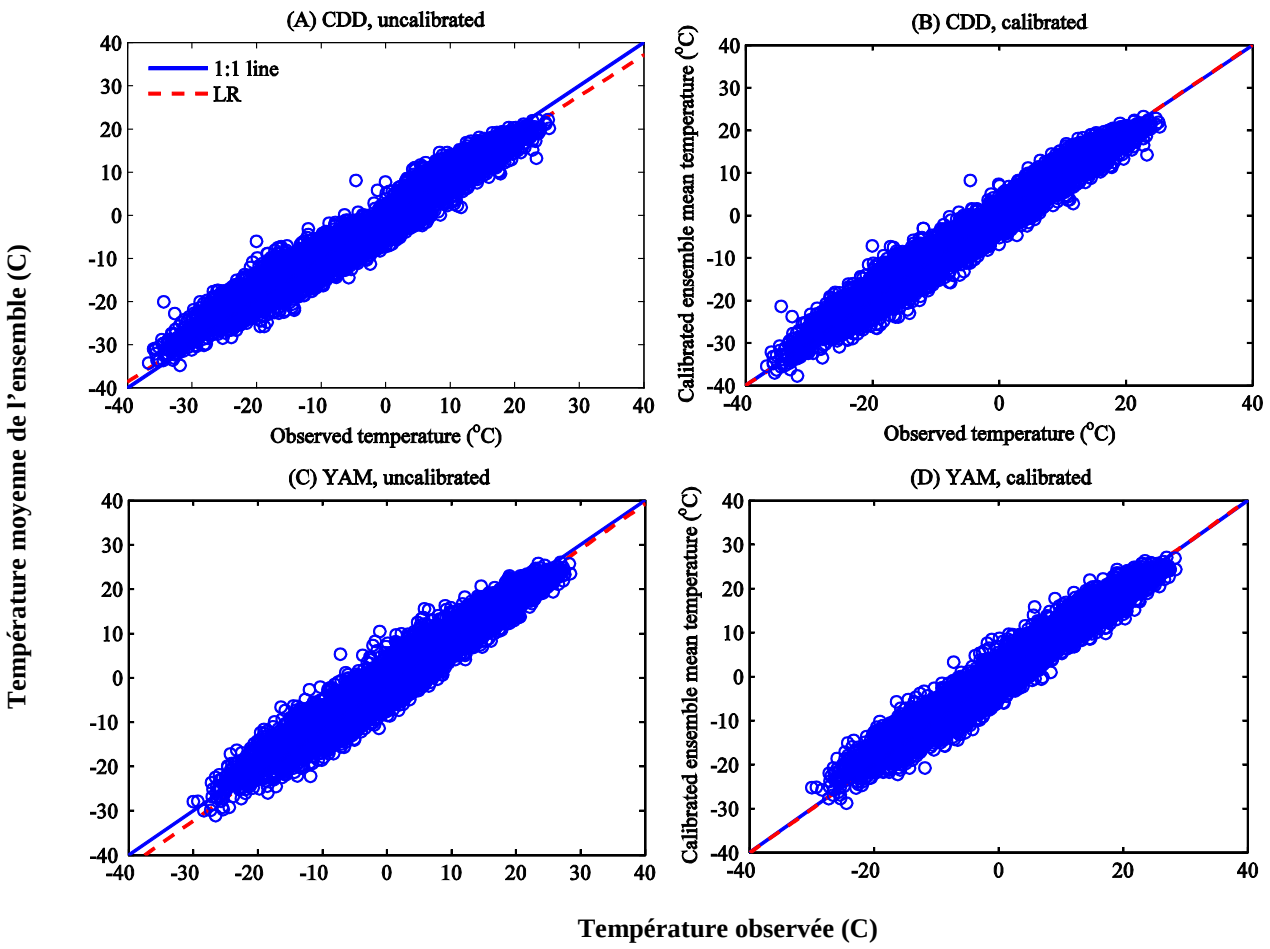

Figure 4-17 Relation entre les températures observées et la moyenne des PME, avant et après correction (lag 1)

La Figure 4.18 présente les histogrammes de rang de la température pour un *lag* d'une journée. Les graphiques de gauche indiquent le biais froid et la sous-dispersion de la PME. Les valeurs corrigées sont bien calibrées.

La performance des PME comparativement à l'utilisation du générateur de climat (ré-échantillonnage de l'historique) été testée sur une période de 25 années. Une compilation des résultats est présentée au Tableau 4.7. Ces résultats confirment en moyenne l'habileté des PME sur l'horizon de 7 jours. Les valeurs moyennes des RPSS et CRPS sur 7 jours sont toutes inférieures à celles obtenues à celles du générateur de climat. Les deux valeurs convergent vers 7 jours témoignant de la limite prédictive des PME à cette durée.

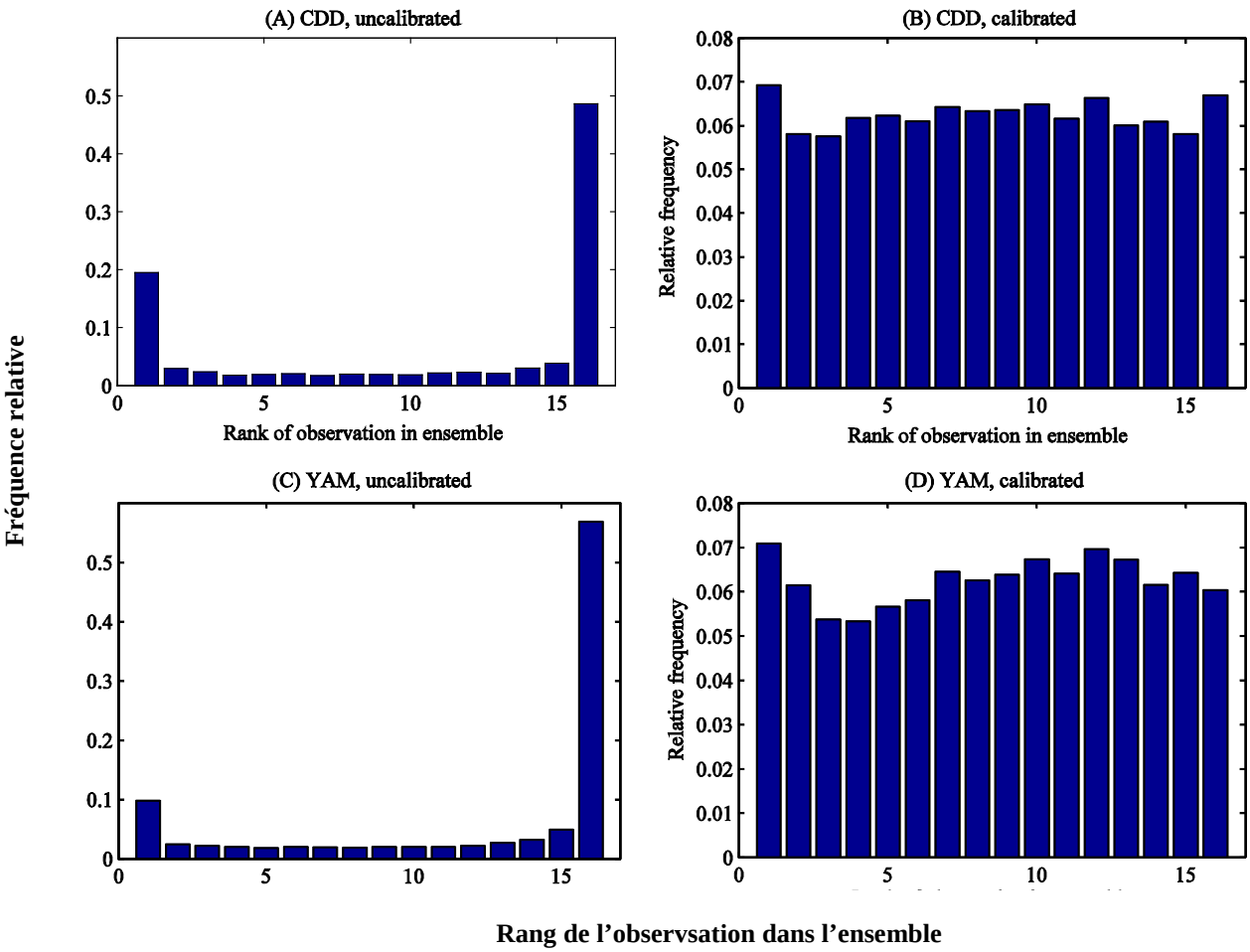

Figure 4-18 Histogrammes de rang pour un lag d'une journée, montrant la bonne performance de l'approche de correction.

Tableau 4-7 Valeurs du CRSP (Continuous ranked probability score) et RPSS (Rank probability skill score) en function de l'horizon de la prévision

Bassin	Score	Générateur de climat	Prévision corrigée							
			0 jour	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
CDD	CRPS	78.01	65.65	68.59	69.01	74.36	75.54	76.97	76.38	76.74
	RPSS	76.04	52.37	57.69	56.98	65.09	67.21	72.00	70.59	70.59
Yamaska	CRPS	18.92	15.94	16.25	16.24	15.97	16.25	16.07	16.21	16.25
	RPSS	60.99	51.13	53.35	53.80	53.01	55.13	54.04	55.61	55.15

En conclusion de cette section on peut donc noter les points suivants:

- Les précipitations des PME ont montré une habileté qui va jusqu'à 7 jours en moyenne;
- Les températures issues des PME ont montré une habileté qui va jusqu'à 12 jours;
- Ces conclusions tirées pour les PME GFS (NOAA) correspondent sensiblement aux habiletés des PME d'Environnement Canada, selon Vincent Fortin (Communication personnelle, 2011);
- Suite à leur implémentation, les approches de correction de BMA et de régression logistique ont été jugées non appropriées pour système de prévision opérationnel envisagé;
- Une approche nouvelle bien intégrée au générateur de climat a été développée et mise en place;
- Cette approche corrige le biais et la sous-dispersion des PME avec succès;
- La validation indirecte sur les débits confirme la valeur des PME sur un horizon de 7 jours.

4.4 Objectif spécifique 4 : Lier l'approche stochastique proposée avec un ré-échantillonnage pondéré des conditions météorologiques historiques.

Après une mûre réflexion il a été décidé de ne pas s'engager dans cette partie du projet. Cette décision a été basée sur deux raisons. La première est de nature logistique : en rétrospectif, le projet était ambitieux et sa durée trop limitée (moins de 20 mois) pour s'attaquer efficacement à tous les objectifs. La seconde raison, la plus importante, est que les résultats obtenus dans le cadre de ce travail nous ont convaincus que l'approche de ré-échantillonnage des conditions historiques (pondéré ou pas) n'était pas une approche optimale. Les raisons à la base de cette réflexion sont énoncées ici :

- Les conditions historiques ne sont plus représentatives des conditions actuelles. Ce constat est bien sûr à la base de l'idée de pondérer les séries historiques. Ceci est d'autant plus vrai si l'historique est long. Par exemple, un historique sur la période 1950-2010 est centré autour de l'année 1980, soit il y a plus de 30 ans. Les changements hydrologiques observés au Québec (comme le devancement des crues) sont plus récents que 1980. On peut donc considérer que l'historique est biaisé. L'assignation de poids peut réduire ce biais mais ne peut l'éliminer totalement. La section 4.1.4 démontre comment ce décalage entre l'horizon couvert par l'historique et le futur rapproché par les changements climatiques peut se traduire par des erreurs au niveau des quantités et fréquence des précipitations ;

- L'assignation de poids ne permet pas de tenir compte des changements anticipés au cours des prochaines années. Par exemple, l'augmentation du nombre de journées humides prévu par les modèles ne pourra pas être reproduite en ré-échantillonnant le passé. De la même manière, l'augmentation prévue des précipitations annuelles dans le centre et le nord du Québec ne peut pas non plus être bien représentée. Il serait relativement facile d'assigner des poids plus élevés aux années plus récentes de l'historique, mais ceci revient essentiellement à limiter l'information

présente dans la base de données. Autrement dit, pour forcer l'historique vers la réalité attendue du changement climatique, il faut sacrifier certaines années qui contiennent pourtant de l'information utile (sur la variabilité naturelle pas exemple);

- L'assignation de poids est une approche tout à fait défendable s'il est possible de lier les poids à la circulation atmosphérique tel que proposé par Nafaji et al. (2011) par exemple. Or dans le cas du centre et du sud du Québec, tel que clairement démontré précédemment, ces liens sont absents. Dans le Nord du Québec, et particulièrement vers le Nord-Est du Québec, il est possible que des liens exploitables existent. Hydro-Québec exploite d'ailleurs un de ces liens au sein du logiciel Présage pour la prévision des apports à moyen terme;

- L'approche méthodologique proposée, qui vise à calculer les poids à partir des séries du générateur de climat est certainement valide, mais cette méthodologie est un peu naïve, a posteriori. La force du générateur de climat est son habileté à combiner l'information de l'historique du climat (variabilité naturelle interannuelle et intra-annuelle), la possibilité de créer des séquences qui ressortent des conditions historiques, et la facilité de le pousser vers un changement anticipé. Ainsi donc, en l'absence de prévisions météorologiques saisonnières démontrant une habileté prédictive (*skill*), et en l'absence de tout lien avec des indices de circulation atmosphérique, le générateur de climat est vraisemblablement le meilleur outil pour générer des prévisions hydrologiques d'ensemble saisonnières. D'utiliser cet outil pour générer des poids visant le ré-échantillonnage du passé constitue une approche nettement inférieure à l'utilisation directe des sorties du générateur de climat;

- Même si de l'information provenant des prévisions météorologiques saisonnières démontrait une habileté prédictive (une simple probabilité d'avoir des précipitations ou des températures supérieures à la moyenne par exemple), cette information serait beaucoup plus facilement intégrable à l'intérieur d'un générateur de climat, plutôt qu'au sein d'un système d'assignation de poids aux séries historiques. Une telle information pourrait être intégrée quantitativement à l'intérieur du générateur de climat, alors que l'assignation de poids comportera toujours une partie qualitative.

5 ANALYSE ET DISCUSSION

Ce chapitre présente l'analyse des données recueillies ainsi que des résultats des divers essais effectués dans cette étude. Cette analyse sera organisée en partie en fonction du prototype développé. Il Importe donc en premier lieu de décrire ce prototype en détail.

5.1 PROTOTYPE

La Figure 5.1 présente le schéma de fonctionnement du prototype sur le bassin de la Yamaska Sud-Est. Le schéma est séparé en étapes préalables, opérations journalières et visualisation.

5.1.1 Étapes préalables

Les étapes préalables sont celles nécessaires au fonctionnement du prototype, mais de nature non-répétitive. Ces étapes pourraient être actualisées sur une base annuelle en fonction des nouvelles données accumulées. Les étapes préalables sont les suivantes :

5.1.1.1 CALIBRATION DU MODÈLE DE CORRECTION DES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES D'ENSEMBLE

À partir de l'historique des données de précipitation et températures sur le bassin et de l'historique des PME sur la même période, établir les courbes de correction des biais et de la sous-dispersion. Outre la disponibilité des données, cette approche est relativement simple et sans complexité au niveau du calcul.

5.1.1.2 CALIBRATION DU GÉNÉRATEUR DE CLIMAT SUR L'HISTORIQUE

Cette étape est automatisée et ne requiert qu'environ une minute de calcul avec les algorithmes développés et tous disponibles sur le site de partage de Mathworks. Suite à cette étape, le générateur de climat peut reproduire des séries de précipitation et température qui représentent les caractéristiques de l'historique passé.

5.1.1.3 PERTURBATION DU GÉNÉRATEUR DE CLIMAT EN FONCTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Cette approche vise à pousser le générateur de climat à produire des séries qui dévient de l'historique en fonction des changements climatiques anticipés selon l'approche décrite au chapitre précédent. Dans le prototype, l'évolution du changement climatique est selon le MRCC v.4.2.0, piloté par CGCM3 v.3.1 sous le scénario A2.

5.1.2 Étapes journalières

Les étapes journalières sont celles qui sont effectuées à chaque jour pour actualiser la prévision sur l'horizon de 90 jours en fonction des nouvelles données disponibles. Ces nouvelles données sont : le débit observé de la dernière journée, les données des stations météorologiques de la dernière journée ainsi que les prévisions météorologiques d'ensemble.

5.1.2.1 IMPORTATION DES DONNÉES MÉTÉO DE LA DERNIÈRE JOURNÉE (EC)

Les données météo de la dernière journée sont la précipitation et la température pour les stations d'intérêt. Ces données sont directement importées à partir du site d'Environnement Canada. Ces valeurs sont ajoutées à la base de données de l'Université de Sherbrooke développée dans le cadre du projet projet PACC-26 '*Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska, de façon à pouvoir prédire et prévenir les impacts des CC sur les étiages et leurs conséquences sur les divers approvisionnements en eau, tout en protégeant la biodiversité'*. Cette base de données est commune aux deux projets.

5.1.2.2 IMPORTATION DU DÉBIT OBSERVÉ (CEHQ)

Le débit observé est importé à parti du site du CEHQ. Ce débit permet de faire la mise à jour de l'historique et des graphiques.

5.1.2.3 MISE À JOUR DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Il s'agit de faire avancer le modèle hydrologique d'un pas de temps pour tout ramener au temps présent, au moment de faire la prévision.

5.1.2.4 IMPORTATION ET CORRECTION DES PME

Les PME sont importées du site d'Environnement Canada. Les fichiers de format Grib2 sont lus et les prévisions d'ensemble sont extraites aux points de grille d'intérêt sur l'horizon de 7 jours. Les prévisions sont agrégées à un pas de temps journalier et archivées dans la base de données.

Les prévisions sont corrigées en fonction de la moyenne de la PME pour chaque jour, selon l'approche développée au chapitre précédent.

5.1.2.5 GÉNÉRATION DE 1000 SÉRIES SUR L'HORIZON DE 90 JOURS

Le générateur de climat est utilisé pour générer 1000 séries climatiques d'une durée identique de 90 jours. Pour les 7 premiers jours, le générateur de climat est mené par les PME. Pour les 83 jours suivants, le générateur retombe en '*mode climat'*. La génération de 1000 séries vise simplement à produire des quantiles lissés.

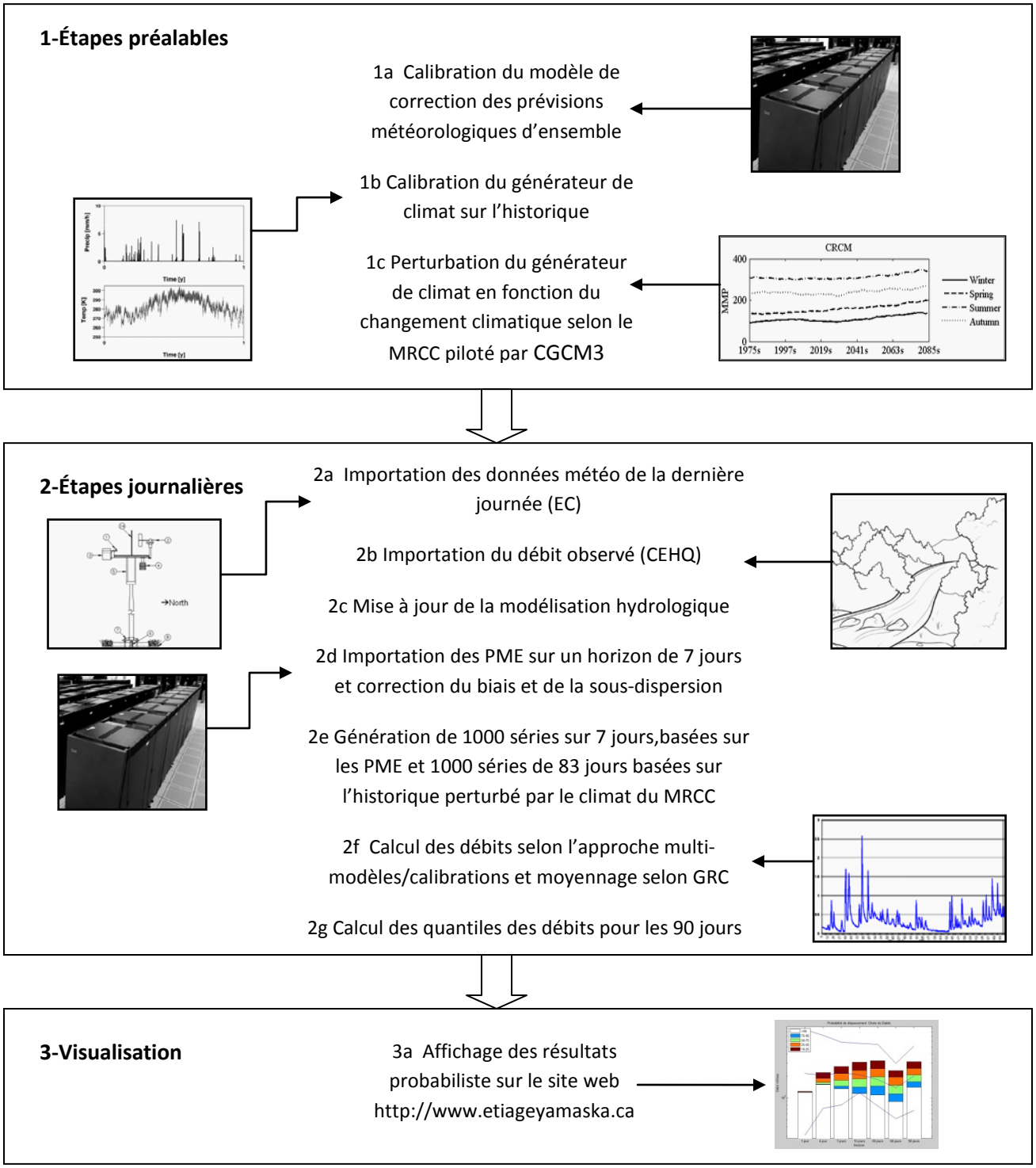

Figure 5-1 Schéma du fonctionnement du prototype sur le bassin versant de la rivière Yamaska.

5.1.2.6 CALCUL DES DÉBITS

Les 1000 séries climatiques de 90 jours sont introduites à l'ensemble multi modèle/calibration. Tel que discuté précédemment, 32 modèles hydrologiques sont éxécutés. En tout, 2.9 millions de jours sont simulés. Cette opération prend moins de 5 minutes sur le bassin de la Rivière Yamaska Sud-Est. Les débits sont moyennés selon l'approche GRC (Granger-Ramanathan – C) tel que discuté au chapitre 4.

5.1.2.7 CALCUL DES QUANTILES

A partir des 2.9 millions de jours simulés, les quantiles sont calculés pour chacune des 90 journées. Ces quantiles permettent de tracer l'évolution des probabilités de dépassement des débits au cours de la période prévisionnelle. L'utilisation de 1000 séries permet un traçage lisse sans variation brusque, tel qu'il en résulterait d'une précipitation extrême sur une journée donnée.

5.1.3 Visualisation

Les quantiles sont utilisés pour faire l'affichage des prévisions d'ensemble sur le site web http://www.etiageyamaska.ca. Les graphiques sont produits avec l'aide des outils *google charts*. Ces outils permettent la création et la modification rapide de graphiques sur des pages web. Des exemples de sorties graphiques possible sont présentées sur le site web. Au moment d'écrire ce rapport, le site était toujours en évolution.

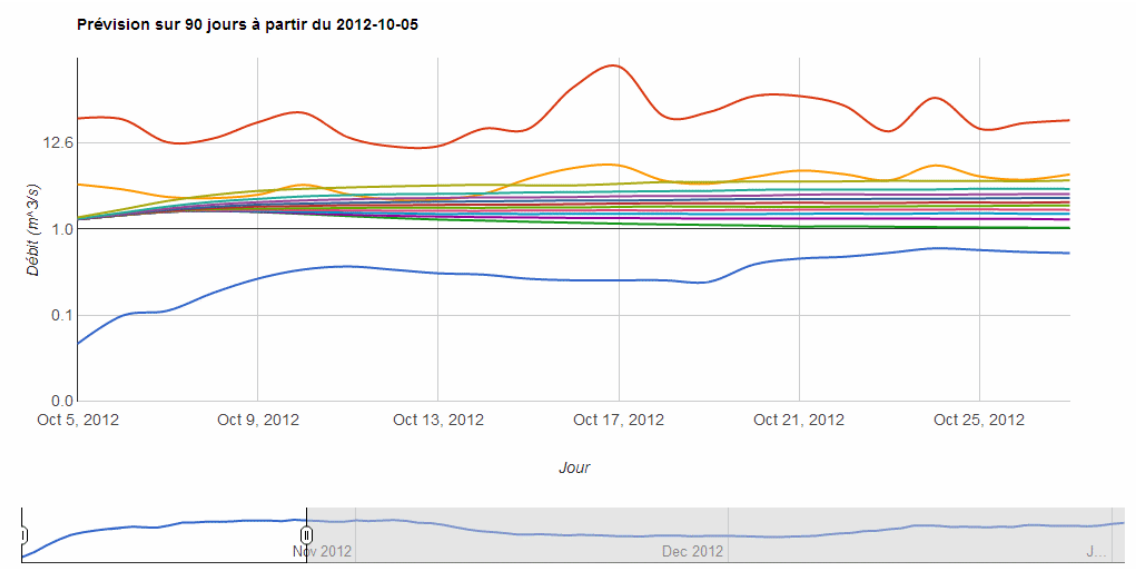

Figure 5-2 Quantiles de la prévision d'ensemble et valeurs historiques (min, median, max). La fenêtre de l'horizon est ajustable sur 90 jours. Les valeurs et légendes s'affichent en pointant la souris.

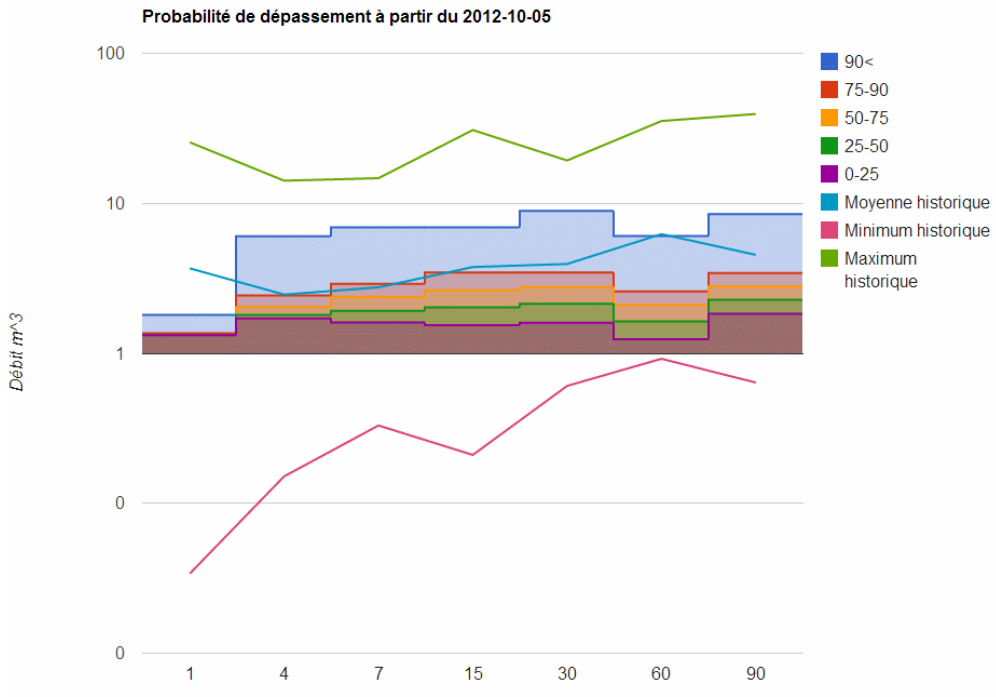

Figure 5-3 Visualisation alternative.

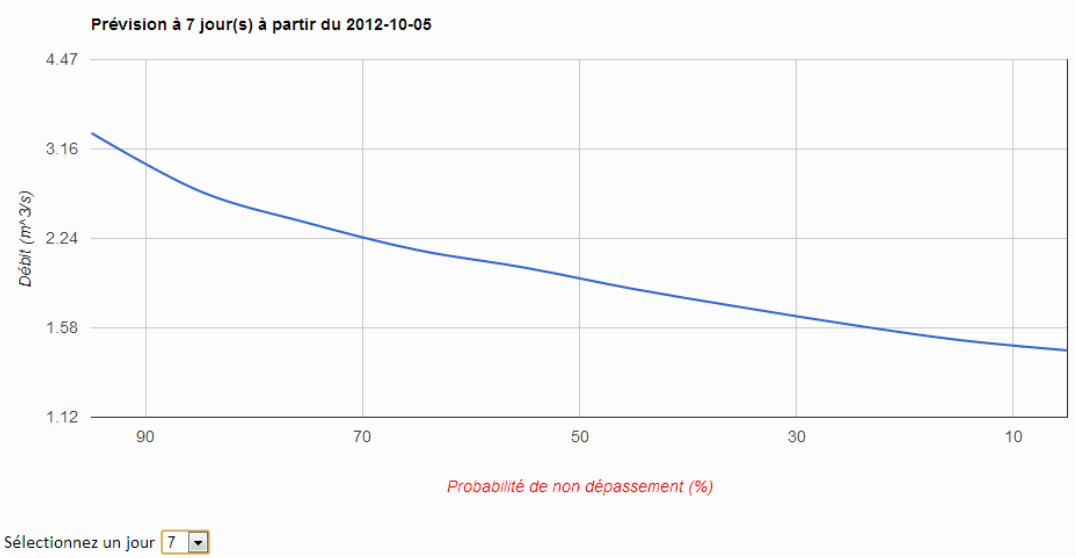

Figure 5-4 Détails journaliers.

5.2 Discussion par objectif spécifique

Les points qui portent à analyse sont discutés pour chaque objectif spécifique.

5.2.1 Objectif spécifique 1 : Établir un couplage dynamique entre les paramètres d'un générateur de climat et l'évolution du climat projeté, tout en incluant la variabilité naturelle.

Le générateur stochastique de climat développé et raffiné dans le cadre de cette étude performe très bien, autant en validation directe (reproduction des précipitations des températures), qu'indirecte (simulation de l'hydrologie). Ces conclusions s'appliquent tout autant en considérant une échelle journalière, mensuelle, annuelle et interannuelle.

Les générateurs de climat permettent de sortir en dehors des conditions bornées par les données historiques. Ils permettent de fournir des probabilités de dépassement de débit lissées suite à la génération de milliers de séries et peuvent être perturbés en fonction du signal climatique anticipé. Par contre, il est important de noter que tous les générateurs de climat ne sont pas égaux. Les générateurs de climat disponibles n'incorporent pas la variabilité naturelle. Un générateur de climat qui n'inclut pas spécifiquement la variabilité interannuelle résultera en une prévision hydrologique sous-dispersée. Un générateur de climat non-paramétrique pourra de plus difficilement être perturbé en fonction du climatique. WeaGETS est un générateur de climat paramétrique robuste qui inclut la variabilité naturelle. Les avantages de l'utilisation de ce dernier sont largement supérieurs au ré-échantillonnage du passé historique.

Au niveau de la précipitation, la majorité des fonctions de distribution a montré une bonne performance au niveau de la moyenne et de la variance, mais les fonctions à 3 paramètres permettent une meilleure reproduction des extrêmes de précipitation, et, conséquemment, des extrêmes de haut débit. Par contre, le choix de la fonction de distribution a peu ou pas d'impact ou niveau de la simulation des étiages, tel que représentés par les variables 7Q2 et 7Q10. Les étiages étant en bonne partie le résultat de longues séries sèches, on peut en conclure que la représentation adéquate des séries d'occurrence est la variable critique. Pour les bassins testés, une chaine de Markov de premier a donné des résultats adéquats. L'utilisation d'une chaîne de second ou troisième ordre (options incluses dans WeaGETS) n'a pas amélioré la simulation des faibles débits (résultats non montrés). Il faut donc conclure que les différences entre observations et débits dans les périodes d'étiage sont principalement dues au biais des modèles hydrologiques.

5.2.2 Objectif spécifique 2 : Quantifier la portion d'incertitude liée à la modélisation hydrologique dans la prévision hydrologique d'ensemble.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que la variabilité inter-modèle est plus grande que la variabilité due aux approches de calibration différentes. Autrement, dit, il serait préférable d'utiliser deux modèles hydrologiques différents plutôt que le même modèle calibré selon deux métriques différentes. L'importance de la variabilité structurale due à l'utilisation de différents modèles hydrologiques a été soulignée par d'autres études en climat actuel et en climat futur (i.e. Poulin et al., 2011).

Le potentiel de l'approche multi-modèle est clairement démontré pour le bassin Yamaska Sud-Est avec une performance multi-modèle nettement supérieure en validation (Nash = 0.84) par rapport aux meilleurs modèles selon leur calibration optimale (Nash = 0.74 pour Hydrotel et HSAMI). La taille du bassin Yamaska Sud-Est étant petite, la représentation des débits l'été et l'automne y est beaucoup plus importante que pour des bassins plus gros et plus nordiques, où l'hydrogramme est dominé par la fonte de la neige. Il est probable que l'approche multi-modèle donne des résultats un peu moins spectaculaires sur ce genre de bassin, étant donné que la fonte des neiges est normalement bien représentée par ces modèles. En ce sens, l'approche multi-modèle est particulièrement adaptée à la simulation des étiages, où les modèles hydrologiques performent normalement beaucoup moins bien.

Les travaux démontrent également qu'il n'est pas nécessaire de multiplier les calibrations différentes pour maximiser les résultats de l'approche multi-modèle. Garder les meilleures combinaisons permet non-seulement de conserver la performance d'un plus grand ensemble, mais aussi de les améliorer. Les critères de calibration les plus robustes sont les paramètres annuels classiques comme le critère de Nash-Sutcliffe et l'erreur RMSE. L'utilisation de critères de calibration saisonniers (i.e. Nash d'été) n'a pas aidé du tout. Les simulations sont améliorées en calibration mais pas en validation. Ceci indique vraisemblablement que les modèles d'hydrologie sont moins robustes lors de la simulation des débits d'été et que de forcer les simulations vers ces valeurs est une erreur. L'approche multi-modèle donne de meilleurs résultats, sans avoir à forcer un modèle vers des débits observés qu'il ne peut pas reproduire compte tenu des limites de sa structure interne.

En approche multi-modèle, il n'est pas nécessaire de considérer le biais en tant que critère de calibration, puisque l'ensemble multi-modèle sera non-biaisé, en autant que la méthode de Granger-Ramanathan (approche C) est favorisée. Les résultats de cette étude confirment ceux de Diks et Vrugt (2012). Le moyennage de Granger-Ramanathan présente des avantages majeurs (moyenne non biaisée, minimise l'erreur RMS, calcul très simple) et cela sans inconvénient.

L'absence d'amélioration lorsque l'approche multi-modèle a été appliquée par saisons ou par classe de débits est surprenante. Une vérification de cette étonnante conclusion devrait être effectuée sur d'autres bassins. Ces résultats sous-entendent que la calibration de modèles par saisons est inutile. Le

fait qu'elle soit inutile en approche multi-modèle sous-entend qu'elle le soit tout autant en approche mono-modèle. Les résultats de ce travail montrent que la performance en validation des calibrations saisonnières de chaque modèle hydrologique ne dépasse pas celle obtenue par le même modèle en validation lorsque calibré sur une base annuelle. Encore une fois, ceci implique que les modèles hydrologiques ont de la difficulté à bien représenter les processus menant aux étiages. Ceci n'implique pas que les modèles soient inefficaces dans leur représentation des étiages, mais simplement que la calibration spécifique sur les étiages n'apporte pas de gain en validation.

Lorsque les 12 meilleures combinaisons (sur 32) modèle-calibration ont étés retenues, les quatre modèles hydrologiques ont été représentés, et ce même si HMETS et particulièrement MOHYSE sont beaucoup moins performants sur une base individuelle. Dans les faits HMETS et MOHYSE sont représentés deux fois chacun alors que HSAMI et Hydrotel le sont quatre fois chacun. Ceci indique que la sélection de structures de modèles différentes jour un rôle important pour l'amélioration de la prévision multi-modèle, et ce même si le modèle est peu performant individuellement. On doit aussi noter que le moins bon modèle (MOHYSE), est le seul pour lequel des calibrations spécifiques pour l'été ont été retenues.

Un point intéressant à noter (voir Figure 4.14) est que les poids assignés aux modèles hydrologiques viennent par paires de grandeurs relativement égales. Lorsque les poids sont forcés entre 0 et 1, il est impossible de voir cette association. Les approches ou les poids ne sont pas contraints entre 0 et 1 sont les plus performantes mais il n'est pas clair pourquoi les poids se retrouvent ainsi. La différence entre deux combinaisons de modèle-calibration semble receler une information intéressante. D'autres travaux sont nécessaires pour mieux comprendre ce comportement.

Finalement, la question de l'erreur de modélisation au temps 0 n'a pas été considérée en grand détail. Lorsque l'erreur est petite elle peut être corrigée et l'erreur de correction peut être relaxée sur quelques jours. Autrement, une correction sur les données météorologiques est possible, ce qui sous-entend que l'erreur vient des données d'entrée, ou alternativement, en agissant directement sur les variables internes du modèle hydrologique , ou sur les paramètres du modèle. C'est une problématique qui a reçu peu d'attention du point de vue scientifique et qui mériterait d'être étudiée. Même les techniques complexes telles que SODA – Vrugt et al., (2006) ne traitent pas du problème prévisionnel opérationnel où l'erreur entre le modèle et l'observation doit être minimale au moment de la prévision, et non pas seulement minimisée sur l'ensemble de l'intervalle prévisionnel.

5.2.3 Objectif spécifique 3 : Évaluer l'apport de l'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada au sein du système.

L'apport des prévisions météorologiques d'ensemble était initialement un objectif secondaire de nature exploratoire. Suite à cette étude, nous sommes fortement convaincus que les prévisions météorologiques d'ensemble sont maintenant un outil incontournable pour la prévision hydrologique, et

ce particulièrement pour le sud du Québec où aucun lien simple avec la circulation atmosphérique n'a pu être démontré. Même si le climat était fortement lié aux indices de circulation atmosphérique, le lien avec la circulation atmosphérique ne permet que d'établir des relations par rapport aux tendances des moyennes climatiques (i.e.: précipitations supérieures à la moyenne, températures sous les normales). Sur un horizon de 10 jours, probablement l'horizon le plus important pour la majorité des gestionnaires, les prévisions météorologiques d'ensemble ont un potentiel réel d'améliorer la justesse des prévisions hydrologiques d'ensemble. Ces travaux ont montré que l'habileté des prévisions météorologiques d'ensemble s'étendait sur 7 jours en moyenne pour les précipitations et 12 jours pour les températures.

Sans l'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble, les deux options disponibles sont la prévision déterministe et l'utilisation du générateur de climat sur l'ensemble de la durée de l'horizon prévisionnelle. La première est certainement préférable à la seconde. Cependant, la prévision déterministe n'est disponible que sur 4 jours (pour Environnement Canada), et d'un point de vue philosophique, nous croyons qu'un système de prévision probabiliste devrait l'être sur la durée totale de l'horizon prévisionnel, et non pas seulement sur une partie.

En conséquence, un effort important a été mis dans ce travail pour maximiser le potentiel de ces prévisions. En contrepartie les problèmes d'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble sont multiples :

1. Il faut corriger leur biais et leur sous-dispersion;
2. Il faut établir une façon de lier ces prévisions issues à des intervalles de temps discrets en des séries corrigées continues qui peuvent servir d'intrants à des modèles hydrologiques;
3. Lorsque les prévisions hydrologiques doivent être faites sur un intervalle de temps *T* qui dépasse celui des prévisions météorologiques d'ensemble, il faut créer des séries continues sur ce même intervalle de temps *T.* Ces séries ne doivent pas être discontinues sinon un risque existe de propager ces discontinuités aux prévisions de débit.

Ces travaux apportent une solution originale intégrée relativement simple à implémenter. Les deux autres approches testées, soient le moyennage bayésien (BMA) et la régression logistique permettent de solutionner le problème 1 mais ne permettent pas de résoudre simplement les deux autres problèmes. Les deux approches demandent une grande quantité de données historique pour la calibration. En particulier le BMA est très demandant au niveau de longueur de l'historique des données et relativement complexe d'utilisation. La calibration avec le BMA demande un temps de calcul important (plusieurs heures) mais puisque l'opération doit être faite une seule fois par année lors de la réactualisation des données, ce n'est pas un problème majeur. Le vrai problème demeure la quantité de données nécessaire à la calibration. Même avec 25 années de prévisions d'ensemble il aura fallu utiliser plusieurs points de grilles de GFS et plusieurs stations pour avoir des résultats stables.

La régression logistique, jugée supérieure au BMA dans plusieurs études est aussi très demandante pour obtenir des résultats qui sont cohérents d'un quantile à l'autre.

Bien que la méthode développée dans cette étude soit la plus robuste et qu'elle demande moins d'années pour établir les courbes de correction, un minimum doit être disponible. En se basant sur les données GFS, 10 années sont minimalement requises pour établir les relations nécessaires à la correction des prévisions météorologiques d'ensemble. Vingt années seraient préférables pour de relations mieux définies. Environnement Canada ne garde pas d'archives de ses prévisions météorologiques d'ensemble et ne fait pas de prévisions à rebours (*reforecasts*) lorsque son système de prévision est modifié. Sans ces opérations, aucune méthode ne saura corriger les prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada pour une utilisation opérationnelle. Les deux années de prévisions météorologiques d'ensemble récupérées de l'archive personnelle de Vincent Fortin ne sont pas d'une longueur suffisante pour être utilisées d'une manière adéquate.

En conséquence, bien que le prototype développé utilise les prévisions d'ensemble d'EC, ces prévisions sont pour le moment arbitrairement corrigées avec les équations dérivées à partir des prévisions météorologiques d'ensemble GFS. Le prototype ainsi développé présente donc une démonstration de principe de l'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement Canada. Ce point sera repris lors des recommandations.

5.3 Arrimage avec le projet PACC-26 de l'Université de Sherbrooke

Parallèlement au présent projet, l'Université de Sherbrooke a aussi mené un projet sur le bassin versant de la rivière Yamaska. Mené par Bertrand Côté, ce projet a aussi fait partie du Plan d'Action sur les Changements Climatiques (PACC) du gouvernement du Québec. Ce projet s'intitule '*Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska, de façon à pouvoir prédire et prévenir les impacts des CC sur les étiages et leurs conséquences sur les divers approvisionnements en eau, tout en protégeant la biodiversité.*

Les deux projets s'intéressent aux étiages mais sont complémentaires au niveau de l'aspect prévisionnel. Dans le cadre de leur projet, l'université de Sherbrooke a développé un système prévisionnel à court terme (4 jours), déterministe, et mono-modèle. Ce système prévisionnel a deux composantes. La première est la prévision du modèle Hydrotel sur un horizon de 4 jours en utilisant la prévision météorologique déterministe d'Environnement Canada. La seconde utilise l'historique des courbes de récession aux fins de définir la prévision pessimiste, c'est-à-dire la récession des débits en l'absence de toute précipitation. Le système n'est fonctionnel qu'à partir d'un débit minimum cible. Ce système est simple, robuste et facilement utilisable par les gestionnaires sur le bassin de la rivière Yamaska.

Le système de prévision développé dans le cadre de ce travail vise des objectifs beaucoup plus vastes. Entre autres :

- il introduit la prévision probabiliste et la prévision multi-modèle
- il étend l'horizon de prévision de 4 à 90 jours
- il est utilisable toute l'année

Il est fondamental de souligner que le système prévisionnel développé dans ce projet n'est pas 'meilleur' que celui de Sherbrooke, il est seulement différent et répond à des besoins et contraintes différents.

De manière générale, le système développé dans le cadre de ce travail étend l'horizon de prévision et introduit l'incertitude de la prévision. Si on compare les deux systèmes, la prévision du 50ième quantile du système probabiliste sera similaire à la prévision déterministe sur un horizon de 4 jours. Alors que le système de Sherbrooke propose deux scénarios (déterministe et pessimiste), le système développé dans ce travail permet en plus la détermination de la probabilité d'obtenir le scénario pessimiste.

Cette information, bien que très attrayante, ne sera d'aucune utilité si les gestionnaires ne savent pas comment utiliser de l'information probabiliste. Les deux projets sont donc fortement complémentaires puisque les systèmes prévisionnels sont en fait aux deux extrêmes en termes de complexité. Un système est simple, robuste et facilement compréhensible par les gestionnaires, alors que l'autre incorpore des aspects complexes à la fine pointe de la connaissance scientifique dans le domaine de la prévision hydrologique. Les efforts des deux équipes établissent un excellent cadre pour la mise en place d'un système prévisionnel sur d'autres bassins versants.

Les données nécessaires aux deux systèmes ont été intégrées au sein de la même base de données à l'université de Sherbrooke.

6 CONCLUSIONS

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

6.1 OBJECTIF SPÉCIFIQUE 1

- Le générateur stochastique de climat développé performe très bien, autant en validation directe (reproduction des précipitations des températures) qu'indirecte (simulation de l'hydrologie), autant au niveau journalier, mensuel, annuel et interannuel;
- Au niveau de la précipitation, la majorité des fonctions de distribution ont une bonne performance au niveau de la moyenne et de la variance, mais les fonctions à 3 paramètres permettent une meilleure reproduction des extrêmes;
- Le choix de la fonction de distribution a peu ou pas d'impact ou niveau de la simulation des étiages, tel que représentés par les variables 7Q2 et 7Q10. Les étiages étant en bonne partie le résultat de longues séries sèches, les écarts constants entre les débits observés (modélisés) et simulés à partir des données WeaGETS sont principalement dus aux biais des modèles hydrologiques;
- Pour la simulation de l'occurrence des précipitations, particulièrement critique en ce qui a trait à la simulation des étiages, une chaine de Markov du premier ordre est suffisante pour bien reproduire le climat tempéré du Québec;
- Une approche pour forcer le générateur de climat en fonction du signal du changement climatique anticipé (selon le Modèle Régional de Climat Canadien) a été développée. Cette méthode est simple et robuste;
- Tout le code développé pour le générateur de climat est disponible en licence 'Open source' sur le site de partage de Mathworks (http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29136-stochastic-weather-generator-weagets);
- Aucune corrélation significative entre les précipitations et 12 indices de télé connexion n'a pu être trouvée pour le centre-sud du Québec;
- Des corrélations significatives existent entre plusieurs indices et les températures minimales et maximales ont été relevées. Par contre, en mode prévision (indice vs précipitation et température futures sur un horizon de 3 mois) toutes les corrélations sont fortement diminuées, et aucun lien exploitable n'a pu être décelé;
- L'avenue visant à lier les tendances saisonnières des températures et de la précipitation n'est pas réalisable pour le centre et le sud du Québec. Ceci ne signifie pas que ces corrélations n'existent pas ailleurs au Québec. Hydro-Québec les utilise d'ailleurs dans le Grand Nord Québécois pour la prévision saisonnière.

6.2 Objectif spécifique 2

- L'approche de combinaison multi-modèle et multi-calibration résulte en des prévisions hydrologiques qui sont clairement meilleures que celles du modèle individuel le plus performant;
- Les trois méthodes de pondération les plus efficaces sont le BMA, SCEUA et GRC. Les résultats obtenus par les trois méthodes sont similaires autant en calibration qu'en validation;
- La méthode GRC est de loin la plus simple d'utilisation. Elle ne requiert aucun algorithme complexe, est extrêmement rapide et produit des séries hydrologiques non-biaisées. Le BMA est l'approche la plus complexe, autant au niveau des algorithmes que du temps de calcul. Ces résultats confirment ceux de Diks et Vrugt (2010). La méthode GRC est la meilleure à tous les points de vue;
- Il n'est pas nécessaire de multiplier les combinaisons modèle-calibration. Le choix de quelques modèles performants est meilleur qu'une multiplication débridée des combinaisons;
- L'utilisation de modèles hydrologiques différents est supérieure à l'utilisation d'un seul modèle sous différentes calibrations;
- Les analyses par saisons ou par classes de débits n'apportent aucune amélioration notable par rapport à l'approche annuelle;

6.3 Objectif spécifique 3

- L'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble est incontournable dans un système prévisionnel moderne;
- Les précipitations des prévisions météorologiques d'ensemble ont montré une habileté qui va jusqu'à 7 jours en moyenne;
- Les températures issues des prévisions météorologiques d'ensemble ont montré une habileté qui va jusqu'à 12 jours;
- Ces conclusions tirées pour les prévisions météorologiques d'ensemble GFS (NOAA) correspondent sensiblement aux habiletés des PME d'Environnement Canada, selon Vincent Fortin (Communication personnelle, 2011);
- Suite à leur mise en oeuvre, les approches de correction de BMA et de régression logistique ont été jugées non appropriées pour le prototype de prévision opérationnel envisagé;
- Une approche nouvelle bien intégrée au générateur de climat a été développée et mise en place;
- Cette approche corrige le biais et la sous-dispersion des prévisions météorologiques d'ensemble avec succès;
- La validation indirecte sur les débits confirme la valeur des prévisions météorologiques d'ensemble sur un horizon de 7 jours;

7 RECOMMANDATIONS

Les résultats de cette étude et le prototype développé montrent clairement que les prévisions météorologiques d'ensemble et la modélisation hydrologique multi-modèle peuvent être incorporées à un système de prévision hydrologique et en améliorer significativement la performance. Ces deux approches étant à la fine pointe de la connaissance scientifique, d'autres travaux pourraient continuer à améliorer la performance d'un tel système. Les recommandations suivantes donnent des pistes d'amélioration possibles.

La recommandation la plus importante de cette étude concerne les prévisions météorologiques d'ensemble. Le potentiel d'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble a été clairement démontré dans le cadre de cette étude. Les prévisions météorologiques d'ensemble sont incontournables pour améliorer la qualité de la prévision hydrologique sur un horizon pouvant aller jusqu'à 10 jours. Cet horizon devrait lentement s'allonger dans le futur avec la mise en place de modèles de prévision météorologique et méthodes d'assimilation plus performants. Il existe toutefois une limite théorique de prédictibilité due à la nature chaotique du système atmosphérique et il ne faudrait pas non plus s'attendre à des améliorations spectaculaires dans le futur. Toutefois l'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble requiert un historique d'une longueur minimale pour la calibration des méthodes de post-traitement visant la correction des biais et de la sous-dispersion des prévisions météorologiques d'ensemble. En conséquence, le choix de la provenance des prévisions météorologiques d'ensemble devra être basés sur la disponibilité d'une archive historique minimale. Étant donné que les prévisions météorologiques d'ensemble sont relativement récentes, la disponibilité de cette archive sera largement tributaire d'opérations de prévisions à rebours (*reforecasts*). Une archive de longue durée n'existe pas chez Environnement Canada au moment d'écrire ce rapport et la volonté d'Environnement Canada de procéder à des prévisions à rebours n'est pas clairement établie. Avant que le CEHQ ne s'engage dans la voie d'utiliser les prévisions météorologiques d'ensemble à des fins opérationnelles, ces questions devront être résolues avec le fournisseur de service choisi.

Cette étude a porté sur le seul bassin de la rivière Yamaska Sud-Est. Il avait été initialement prévu de porter cette étude sur deux autres bassins, soient les bassins de la rivière Péribonka et de la rivière du Lièvre. Pour diverses raisons, en partie hors de notre contrôle, la durée limitée du projet a limité l'embauche d'étudiants gradués, et deux chercheurs postdoctoraux ont été les principaux porteurs du projet. Il a donc été décidé de concentrer le travail de ces deux chercheurs sur des défis scientifiques de plus grande envergure plutôt que sur la réplication de ces travaux sur deux autres bassins, travail qui aurait été mieux adapté à des étudiants à la maîtrise. Bien qu'il ne devrait pas y avoir aucune problématique ou défi particuliers à étendre ces travaux à d'autres bassins versants, il serait néanmoins logique de tester l'approche proposée sur un ou plusieurs autres bassins versants.

L'approche de modéliser l'incertitude hydrologique par une approche multi-modèle et multi-calibration a été étudiée dans le cadre de ce travail. Les résultats ont montré que l'approche améliore significativement la prévision hydrologique. Les approches optimales consistent en des poids dont la somme et la grandeur ne sont pas contraints. L'utilisation de plusieurs structures est supérieure à l'utilisation d'un seul modèle sous plusieurs calibrations. Néanmoins, dans un contexte opérationnel, ce projet n'a pas statué sur un bon nombre de questions intéressantes : Quel est le nombre optimal de modèles pour la prévision hydrologique multi-modèle au Québec ? Quels sont les critères de calibration optimaux ? Pourquoi est-ce que les calibrations spécifiques à l'été sont peu utiles ? En contexte multi-modèle, il est possible que plusieurs conclusions tirées sur la base d'une approche classique mono-modèle ne s'appliquent pas. Par exemple, les modèles MOHYSE et HMETS ne seraient pas retenus selon une approche mono-modèle, parce que pas assez performants. Pourtant, MOHYSE et HMETS sont retenus en approche multi-modèle démontrant que l'information qui en est tirée est exploitable. Bref, tous ces aspects mériteraient d'être étudiés en plus grand détail dans le cadre spécifique d'une étude sur d'autres bassins.

Finalement, l'étude présentée ici est basée sur l'utilisation d'un générateur de climat uni-site, c'est-à-dire que le générateur génère des séries de données en un seul point. Cette approche est valable pour des bassins de petite et moyenne taille, où on peut considérer que les conditions météorologiques sont relativement homogènes. Si le bassin devient trop grand, il est nécessaire de considérer une approche de génération multi-site. Les approches multi-site existent et il suffirait de les intégrer au prototype actuel. Il importe de noter que durant la période où le générateur de climat est forcé par les prévisions météorologiques d'ensemble, une approche multi-site n'est vraisemblablement pas nécessaire puisque le caractère spatial des patrons de précipitation et température sera pris en compte par les prévisions météorologiques d'ensemble.

8 RÉFÉRENCES

Bracken, C., Rajagopalan, B.et Prairei, J., 2010, A multisite seasonal ensemble streamflow forecasting technique. Water Resources Research, 46, W03532-W03543.

Brissette, F.P., Khalili, M. et Leconte, R., 2007, Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data. Journal of Hydrology, 345, 121-133.

Carney, M and Cunningham, P. ,2006, Evaluating density forecasting models.Computer Science Technical Report, University of Dublin, Report TCD-CD-2006-21, 12 pp.

Caron, A., Leconte, R.et Brissette, F.P., 2008, Calibration and validation of a stochastic weather generator for climate change studies. Canadian Water Resources Journal, 33(3), 233-256.

CEHQ, 2005, Rivière des Mille îles: Étude des solutions de soutien des étiages critiques. Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs. ISBN : 2-550-45152-X, 241 p.

Chen, J., F. Brissette, R. Leconte, A. Caron, 2012a. A versatile weather generator for daily precipitation and temperature. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55(3): 895-906.

Chen J., F. Brissette, C. Li, 2012b. Review and evaluation of different models in generating daily precipitation amount for various climates across the world. Submitted to Agricultural and Forest Meteorology.

Chen, J., F. Brissette, R. Leconte, 2012c. Downscaling of weather generator parameters for quantifying the hydrological impacts of climate change. Climate Research, doi: 10.3354/cr01062.

Chen, J., F. Brissette, R. Leconte, 2011. Assessment and improvement of stochastic weather generators in simulating maximum and minimum temperatures. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 54 (5): 1627-1637.

Chen, J., Brissette, F.P. et Leconte, R., 2010a, A daily stochastic weather generator for preserving low-frequency of climate variability. Journal of Hydrology, 388, 480–490.

Chen, J., Brissette, F.P. et Leconte, R., 2010b, Uncertainty of downscaling methods in quantifying the impact of climate change on hydrology. Soumis - Journal of Hydrology.

Chen, J., Zhang, X.C., Liu, W.Z.et Li, Z., 2009, Evaluating and extending CLIGEN precipitation generation for the Loess Plateau of China. Journal of the American Water Resources Association, 45(2), 378–396.

Cloke, H.L.et Pappenberger, F., 2009, Ensemble Flood Forecasting: a review. Journal of Hydrology, 375, 613-626.

Croley, T, 2003, Weighted-Climate Parametric Hydrologic Forecasting. Journal of Hydrologic Engineering, 8(4), 171-180.

Day, G.N., 1985. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. Journal of Water Resources Planning and Management, 111(2), 157–170.

Diks, C.G.H., and Vrugt, J.A., 2012, Comparison of point forecast accuracy of model averaging methods in hydrologic applications. Stoch Environ Res Risk Assess. DOI 10.1007/s00477-010-0378-z

Dubrovský, M., Buchtele, J. et Zalud, Z., 2004, High-frequency and low-frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modelling. Climatic Change, 63(1-2), 145-179.

Eckel, F. A., and M. K. Walters, 1998: Calibrated probabilistic quantitative precipitation forecasts based on the MRF ensemble. Wea. Forecasting, 13, 1132–1147.

Gatien, P., Brissette, F.P., Arsenault, R., et Poulin, A., 2012; A multi-model multi-calibration approach for flow forecasting. En préparation.

Gobena, A.K. et Gan, T.Y., 2010, Incorporation of seasonal climate forecasts in the ensemble streamflow prediction system. Journal of Hydrology, 385, 336-352.

Gobena, A.K. et Gan, T.Y., 2009, Statistical ensemble seasonal streamflow forecasting in the South Saskatchewan River Basin by a modified nearest neighbors resampling scheme. Journal of Hydrologic Engineering, 14(6), 628-639.

Grantz, K., Rajagopalan, B., Clark, M. et Zagona, E., 2005, A technique for incorporating large-scale climate information in basin-scale ensemble streamflow forecasts. Water Resources Research, 41, W10410-1-W10410

Gneiting, T., A. E. Raftery, A. H. Westveld III, and T. Goldman, 2005: Calibrated Probabilistic Forecasting Using Ensemble Model Output Statistics and Minimum CRPS Estimation. Mon. Wea. Rev., 133, 1098-1118.

Hagedorn, R., T. Hamill, and J. S., Whitaker, 2008: Probabilistic Forecast Calibration Using ECMWF and GFS Ensemble Reforecasts. Part I: Two-Meter Temperatures. Mon. Wea. Rev., 136, 2608-2619.

Hamill, T. M., and J. S. Whitaker, 2006: Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: Theory and application. Mon. Wea. Rev., 134, 3209–3229.

Hamill, T. M., and J. S. Whitaker 2007: Ensemble calibration of 500-hPa geopotential height and 850-hPa and 2-m temperatures using reforecasts. Mon. Wea. Rev., 135, 3273–3280.

Hamill, T. M., and S. J. Colucci, 1998: Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts. Mon. Wea. Rev., 126, 711–724.

Hamill, T. M., J. S. Whitaker, and S. L. Mullen, 2006: Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 33–46

Hanson, C.L., Cumming, K.A., Woolhiser, D.A. et Richardson, C.W., 1994. Microcomputer Program for Daily Weather Simulations in the Contiguous United States. USDA-ARS Publ. ARS-114, Washington, DC, 38 pp.

Hobson, A.,N., 2005, Use of a stochastic weather generator in a watershed model for streamflow simulation. M.Sc. Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Colorado , Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, 55 pp.

Kuchment, L.S. et Gel'fan, A.N., 2007, Long-Term Ensemble Forecast of Snowmelt Runoffwith the Help of the Physics-Based Models of Runoff Generation. Russian Meteorology and Hydrology, 32(2), 126-134.

Larouche, W., Turcotte, R., Cyr, J.F. et Fortin, L.G., 2008, Étude sur les tendances des débits journaliers moyens aux stations hydrométriques du Québec, Rapport interne, Centre d'expertise hydrique du Québec, 13 pp. + annexes.

Li Z., F. Brissette, J. Chen, 2012. Finding the most appropriate precipitation frequency distribution for stochastic weather generation and hydrological modeling in Nordic watersheds. Hydrological Processes. Published online in Wiley Online Library. DOI: 10.1002/hyp.9499

Lin, H., G. Brunet et Derome, J., 2008, Seasonal forecasts of Canadian winter precipitation by post-processing GCM integrations. Monthly Weather Review, 136, 769-783.

Minville, M., Brissette, F. et Leconte, R., 2008, Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. Journal of Hydrology, 358, 70-83.

Nafaji, M.R., Moradkhani, H., and Piechota, T., 2011, Improved Ensemble Streamflow Prediction Using a New ESP Weighting Scheme. World Environmental and Water Resources Congress 2011, Palm Springs, California, United States, May 22-26, 2011

Neuman, S.P., 2003, Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. Volume 17, Number 5, 291-305, DOI: 10.1007/s00477-003-0151-7

Opitz-Stapleton, S., Gangopadyay, S., Rajagopalan, B., 2007, Generating streamflow forecasts for the Yakima River Basin using large-scale climate predictor. Journal of Hydrology, 341, 131-143.

Poulin, A., Brissette, F., Leconte, R., Arsenault, R., et Malo, J.S., 2011, Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies, Journal of hydrology. v409(3-4), 626-636.

Quilbé R., Rousseau, A.N., Moquet, J-S., Bao Trinh, N., Dibike, Y., Gachon, P. and Chaumont, D., 2008, Assessing the Effect of Climate Change on River Flow Using General Circulation Models and Hydrological Modelling: Application to the Chaudière River, Québec, Canada. Canadian Water Resources Journal, 33, 73-94.

Raftery, A. E., T. Gneiting, F. Balabdaout, and M. Polakowski, 2005: Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. Mon. Wea. Rev., 133, 1155-1174.

Richardson, C.W., 1981, Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research, 17, 182–190.

Richardson, C.W. et Wright, D.A., 1984, WGEN: A model for generating daily weather variables. US Dept. Agric., Agricultural Research Service. Publ. ARS-8, 83 pp.

Renner, M., Werner, M. G. F., Rademacher, S. et Sprokkereef, E., 2009, Verification of ensemble flow forecast for the River Rhine. Journal of Hydrology, 376, 463–475.

Roulston, M. S., and L. A. Smith, 2003: Combining dynamical and statistical ensembles. Tellus, 55A, 16–30.

Ryu, J.H, Palmer, R.N., Wiley, M.W., Jeong, S., 2009, Mid-Range Streamflow Forecasts Based on Climate Modeling – Statistical Correction and Evaluation. Journal of the American Water Resources Association, 45(2), 355-368.

Schaake, J.C., Hamill, T.H., Buizza, R., Clark, M., 2007, HEPEX – the hydrological ensemble prediction experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 88 (10), doi:10.1175/BAMS-88-10-1541.

Schmeits, M. J., and K. J. Kok, 2010: A Comparison between Raw Ensemble Output, (Modified) Bayesian Model Averaging, and Extended Logistic Regression Using ECMWF Ensemble Precipitation Reforecasts. Mon. Wea. Rev., 138, 4199-4211.

Sloughter, J. M., A. E. Raftery, T. Gneitting, and C. Fraley, 2007: Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasting Using Bayesian Model Averaging. Mon. Wea. Rev., 135, 3209-3220.

Smith, S. et Weber, F., 2003, Using ensemble streamflow prediction for water supply forecasting in British-Columbia - Practicalities and pitfalls. Proceedings of the 71st Annual Western Snow Conference, April 22-25, Scottsdale, Arizona, 10 pp.

Soltanzadeh, I., M. Azadi, and G. A. Vakili, 2011: Using Bayesian Model Averaging (BMA) to calibrate probabilistic surface temperature forecasts. Ann. Geophys., 29, 1295–1303.

Stedinger, J.R. et Kim, Y.-O., 2010, Probabilities for ensemble forecasts reflecting climate information, Journal of Hydrology, sous presse.

Stedinger, J. R. et Kim, Y.-O., 2002, Updating ensemble probabilities based on climate forecasts. Proceedings of the World Water & Environmental Resources Congress, American Society of Civil Engineers, May 19-22, Roanoke, Virginia (CD-Rom).

Timilsena, J.,Piechota, T., Tootle, G. et Ashok, A., 2009, Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term colorado river basin streamflow. Journal of Hydrology, 365, 289-301.

Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C. et Villeneuve, J.-P. (2004a). Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. Revue canadienne de génie civil, 31(2), 308-320.

Turcotte, R., Lafleur, J., Picard, F., Lacombe, P., Latraverse, M. et Tremblay, D. (2004b). La mise en place de systèmes de prévision hydrologique et d'aide à la gestion des barrages publics du Québec comme mesure d'adaptation face aux conditions hydrologiques extrêmes. 57 ième congrès annuel de l'Association canadienne des ressources hydriques, Association canadienne des ressources hydriques, 16-18 Juin 2004, Montréal, Canada.

Velazquez, J.A., Petit, A., Lavoie, Boucher M.-A., Turcotte, R., Fortin, V, et Ancti, F., 2009, An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting. Hydrology and Earth System Sciences, 13, 2221–2231.

Vrugt, J. A., M. P. Clark, C. G. H. Diks, Q. Duan, and B. A. Robinson, 2006: Multi-objective calibration of forecast ensembles using Bayesian model averaging. Geophys. Res. Lett., 33, L19817, doi:10.1029/2006GL027126.

Vrugt, J. A. and B. A. Robinson Treatment of uncertainty using ensemble methods: Comparison of sequential data assimilation and Bayesian model averaging. Water Resources Research 43 (1), W01411

Vrugt, J. A., Gupta, H., Nuallain, B.O., Bouten, W., 2006, Real-Time Data Assimilation for Operational Ensemble Streamflow Forecasting. Journal of Hydrometeorology, v7, 548-565.

Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., McGlynn, B.L., Harman, C.J., Gupta, H.V., Kumar, P, Rao, P.S.C., Basu, N.B. et Wilson, J.S., 2010, The future of hydrology: An evolving science for a changing world, Water Resources Research, 46, W05301-W05310.

Wang, Q.J. et Nathan, R.J., 2007, A method for coupling daily and monthly time scales in stochastic generation of rainfall series. Journal of Hydrology, 346, 122–130.

Wilby, R.L., Conway, D. et Jones, P.D, 2002, Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. Hydrological Processes, 16(6), 1215-1234.

Wilks, D. S., 2005: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Academic Press, Third edition, New York, pp. 467.

Wilks, D. S., 2009: Extending logistic regression to provide full-probability-distribution MOS forecasts. Meteorol. Appl., 16, 361–368.

Wilks, D. S., and T. M. Hamill, 2007: Comparison of Ensemble-MOS Methods Using GFS Reforecasts. Mon. Wea. Rev., 137, 2379-2390.

Wilks, D. S., 2006: Comparison of ensemble-MOS methods in the Lorenz '96 setting. Meteorol. Appl., 13, 243–256.

Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B. et Strzepek, K., 2003, A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. Water Resources Research 39, WR001769-WR001783.

Ye, M., Neuman, S.P., and Meyer, P.D., 2004, Maximum likelihood Bayesian averaging of spatial variability models in unsaturated fractured tuff. Water Resources Research. VOL. 40, W05113, doi:10.1029/2003WR002557

ANNEXE 1 – PUBLICATIONS ISSUES DE CE TRAVAIL

Les articles de recherche et communications suivants sont issus entièrement ou en partie de ce projet. De plus amples détails supplémentant le présent rapport pourront y être trouvés. Ce projet nous aura permis d'explorer des domaines de recherche nouveaux et plusieurs problématiques directement liées à ce projet continuent d'être explorées. De nouvelles publications s'ajouteront donc prochainement à celles énoncées dans cette liste :

Articles publiés récemment :

Chen, J., F. Brissette, R. Leconte, A. Caron, 2012. A versatile weather generator for daily precipitation and temperature. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55(3): 895-906.

Chen, J., F. Brissette, R. Leconte, 2012. Downscaling of weather generator parameters for quantifying the hydrological impacts of climate change. Climate Research, doi: 10.3354/cr01062.

Li Z., F. Brissette, J. Chen, 2012. Finding the most appropriate precipitation frequency distribution for stochastic weather generation and hydrological modeling in Nordic watersheds. Hydrological Processes. Published online in Wiley Online Library. DOI: 10.1002/hyp.9499

Article acceptés

Chen J., F. Brissette, C. Li, 2012. Review and evaluation of different models in generating daily precipitation amount for various climates across the world. Soumis à: Agricultural and Forest Meteorology, sept. 2012.

Articles soumis ou en préparation:

Chen J., F. Brissette, Z. Li, 2012. Post-processing of ensemble weather forecasts using a stochastic weather generator. Monthly Weather Review. En révision finale avant soumission.

Chen J., F. Brissette, 2012. Combining stochastic weather generation and ensemble weather forecast for short to medium term streamflow prediction over Quebec, Canada. Water Resources Research. En préparation avancée.

Gatien, P., Brissette, F.P., Arsenault, R., et Poulin, A., 2012; A multi-model multi-calibration approach for flow forecasting. En préparation.

Brissette, F.P., Chen, J., Arsenault,R., and Gatien, P., 2013. An operational multi-model ensemble flow forecasting system over a Nordic watershed. Journal of Hydrologic Engineering

Conférences internationales:

Brissette F., J. Chen, Z. Li, R. Turcotte, Combining stochastic weather generation and ensemble streamflow predictions for short to medium term flow forecasting over Quebec, Canada. European Geosciences Union General Assembly 2012, Vienna, Austria, April, 22-27, 2012.

Chen J., F. Brissette, R. Leconte, 2012. WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. Procedia Environmental Sciences, 13, 2222–2235. 18th Biennial ISEM

Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural System, Beijing, China, Sep. 20-23, 2011.

Brissette, F.P., 2012, Système de prévision des étiages comme moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques. 5e Synposium Scientifique d'Ouranos, 19-21 Novembre 2012, Montréal.

Gatien, P, Brissette, F.P., Arsenault, R., Prévision hydrologique multi-modèle sur le bassin versant de la rivière Yamaska. La recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques. Québec 25-26 avril 2013 (soumis)

Chen, J., Brissette, F.P., Arsenault, R., Gatien, P., Roy, P.O., et Turcotte, R. Probabilistic streamflow predictions combining ensemble meterological forecasts and a multi-model approach. European Geosciences Union General Assembly 2013, Vienna, Austria, April 2013 (soumis)

ANNEXE 2 – DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT ET DES PROGRAMMES DU PROTOTYPE DE PRÉVISION HYDROLOGIQUE

Trois étapes sont nécessaires pour le fonctionnement du prototype:

1. Mise à jour des fichiers hydrométéorologiques;
2. Exécution des programmes Matlab pour le calcul des prévisions hydrologiques d'ensemble;
3. Mise à jour de l'affichage du site Web.

Ces trois étapes sont décrites ici-bas :

ÉTAPE 1 – MISE À JOUR DES FICHIERS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

Le prototype s'exécute chaque jour avec une tâche planifiée à 11h00. L'ordre d'appel des fichiers importants ets le suivant :

Voici l'ordre d'appel des fichiers, chacun de ces fichiers appelle le suivant :

Lancer_mise_a_jour.sh : Un bash file Linux qui permet le passage des matrices Matlab et d'exécuter le premier des 4 fichiers python suivants.

*Mise_a_jour.py :*Mise à jour des données GRIB2 (GEM)

MAJ_Grib2_ETS_YAMASKA.py : Va chercher les données de prévisions d'ensemble d'Environnement Canada et les indexe dans la base de données de l'Université de Sherbrooke.

MAJ_Grib2_ETS_DETERMINISTE.py : Va chercher les données de la prévision déterministe de 4 jours d'Environnement Canada et les indexe dans la base de données de l'Université de Sherbrooke.

creer_fichier_matlab.py : Ce fichier va chercher les données dans la base de données de l'Université de Sherbrooke (incluant les données de débit pour la journée présente ainsi que l'historique des débits qui sont annexés dans la base de données via le projet PACC-26 mené par Bertrand Côté de l'Université de Sherbrooke), et les transforme en un fichier Matlab (.mat) qui sera utilisé pour la suite des opérations.

Ce fichier est appelé *donnees_yamaska_De_PEO.mat* et contient les données nécessaires pour procéder aux prévision hydrologiques d'ensemble.

Étape 2 – Exécution des programmes Matlab pour le calcul des prévisions hydrologiques

À cette deuxième étape, toutes les opérations nécessaires à la production de la prévision hydrologique sont effectuées. Le programme *Main_Low_Flow_Project.m* est celui qui gère les opérations suivantes :

1. Lecture du fichier *donnees_yamaska_De_PEO.mat* produit à l'étape précédente;
2. Correction du biais et de la sous-dispersion de la prévision météorologique d'ensemble;
3. Génération de 1000 séries météorologiques pour les 90 prochains jours en utilisant le générateur stochastique de climat;
4. Les 32 combinaisons de modèle/calibration sont initialisées. Pour chacune de ces combinaisons, les 1000 séries météorologiques des 90 prochains jours sont exécutées, pour produire 1000 séries de débits de 90 jours. Un total de 2.88 millions de débits journaliers sont ainsi estimés à chaque jour (1000x90x32);
5. La série multi-modèle moyennée selon l'approche de Granger-Ramanathan (variante C) est produite.
6. Les quantiles sont calculés pour la série multi-modèle (fichier Matlab *GRC.mat*), ainsi que les médianes pour les 12 meilleures combinaisons modèle/calibration (fichier Matlab *model_quantiles.mat).*

Les opérations 2, 3 et 4 font appel à près de 200 fichiers matlab différents. Ces fichiers ne sont pas décrits ici mais leur opération est entièrement gérée à partir du programme Matlab *Main_Low_Flow_Project.m.* Ces fichiers sont bien commentés.

Étape 3 – Mise à jour de l'affichage du site Web

Suite à l'étape 2, deux matrices Matlab (en format *.mat*) ont été créées :

GRC.mat : Une matrice de dimension 101x90 qui contient les 101 quantiles (0 à 100) de la prévision multimodèle moyennée selon l'approche Granger-Ramanathan de type C, et ce pour chaque jour de l'horizon de prévision de 90 jours.

model_quantiles.mat : Il s'agit d'une matrice de dimension 13x90 qui contient la médiane de la prévision probabiliste pour chacune des 12 combinaisons modèle/calibration les plus performantes, ainsi que la médiane de la prévision multimodèle GRC. Ce graphique permet la comparaison entre les différents modèles.

Les deux fichiers suivants permettent alors de générer les graphiques :

Generer_graphiques.sh - Un bash file Linux qui permet le passage des matrices Matlab et d'excuter le fichier suivant.

Graphiques_yamaska.py – Le fichier Python qui lit les fichiers Matlab GRC et model_quantiles et envoie les graphiques sur le site web)

STRUCTURE DES FICHIERS

Le lien suivant permet d'accéder aux fichiers. Ces derniers sont présentés sous 3 répertoires : Etape 1, Etape 2, Etape 3 selon les éléments décrits ici-haut.

Voici la taille de chacun des répertoires :

ÉTAPE 1 : 8.2 Mb

ÉTAPE 2 : 748 Mb avec les 4 sous-répertoires suivants :

- *GPP_ESP_system* 17.9 Mb (correction des prévisions météorologiques d'ensemble et génération des 1000 séries météorologiques avec le générateur de climat;
- *HYDROTEL_Yamaska* 644 Mb (fichiers pour les 5 versions du modèle Hydrotel)
- *phil hydrotel* 86 Mb (fichiers Matlab servant à appeler et exécuter les 5 versions du modèle Hydrotel)
- *Run Models Average* 0.32 Mb (fichiers contrôlant l'exécution des modèles HSAMI, HYDROTEL et MOHYSE, et qui crée la série multi-modèle)

ÉTAPE 3 : 0.11 Mb

Lien pour les fichiers

https://www.dropbox.com/sh/v4jn8igjf1kug34/sgLgapkQxc

NOTE : L'exécutable utilisé pour HSAMI n'est pas inclus. Nous avons la permission de l'utiliser à des fins de recherche, mais pas de le distribuer.