INRS-Eau, Terre et environnement

Analyse et comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de changements climatiques

Par

Mohamed Aymen Ben Aissia

Mémoire présenté pour l'obtention

du grade de Maître ès science (M. Sc.) en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne	:	Alain Rousseau, INRS-ETE
Directeur de recherche	:	Taha B.M.J. Ouarda, INRS-ETE
Co-directeur de recherche	:	Fateh Chebana, INRS-ETE
Examinateur externe	:	Saad Bennis, École de Technologie Supérieure, Département de génie de la construction

Juin 2009

Avant-propos

Ce mémoire par article compte d'abord, dans le chapitre I, une synthèse qui fait état de la problématique et de la pertinence de mon sujet de recherche, ainsi que de la contribution que j'ai apportée à ce travail de recherche. Le chapitre I contient également les principaux résultats obtenus ainsi que les conclusions et recommandations. De plus, les détails concernant ces travaux de recherche sont présentés dans l'article qui est soumis au journal « *Journal des Sciences Hydrologiques* ». L'article est présenté dans le chapitre II du présent document.

Le titre et les auteurs de l'article soumis sont les suivants :

Titre : Analyse et comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de changements climatiques.

Auteurs : Mohamed Aymen Ben Aissia, Taha B.M.J. Ouarda, Fateh Chebana, Luc Roy, Élaine Robichaud, Georges Desrochers et Isabelle Chartier.

Les contributions des auteurs sont divisées comme suit :

M. Aymen Ben Aissia : Contribution à la conception du projet et à l'élaboration de la méthodologie, réalisation de la revue de littérature, programmation informatique, production des résultats, interprétation des résultats, rédaction de l'article.

Taha B.M.J. Ouarda : Contribution à la conception du projet, à l'élaboration de la méthodologie, à l'interprétation des résultats et à la rédaction de l'article.

Fateh Chebana : Contribution à la conception du projet, à l'élaboration de la méthodologie, à l'interprétation des résultats et à la rédaction de l'article.

Luc Roy : Construction des bases des données météorologiques et celles de HSAMI, contribution au choix des scénarios des simulations futures et à l'interprétation des résultats.

Élaine Robichaud : Contribution à l'interprétation des résultats.

Georges Desrochers : Contribution au choix des scénarios des simulations futures et à l'interprétation des résultats.

Isabelle Chartier : Construction des bases des données de HYDROTEL.

Résumé

L'impact des changements climatiques (CC) sur les pointes des crues a fait l'objet de plusieurs travaux. Cependant, une crue est caractérisée non seulement par sa pointe, mais aussi par d'autres caractéristiques telles que la date de début, la date de fin, la date de pointe, la durée, le débit de pointe, le volume, le taux de montée et la forme de l'hydrogramme. Peu d'efforts ont été orientés vers l'étude de l'impact des CC sur ces caractéristiques. Le présent travail consiste à évaluer et à comparer les caractéristiques des crues dans un contexte de CC en se basant sur des données historiques, des résultats des réanalyses et des résultats des simulations à l'horizon 2050. La zone d'étude considérée est le bassin versant du réservoir « Baskatong ». Il représente le réservoir influant du bassin versant de la rivière « Gatineau ». Les résultats des simulations sont obtenus à partir des deux modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL. Les corrélations, la stationnarité, les dépendances et les points de rupture des séries des caractéristiques de crue ont été étudiés. Les lois marginales et copules des principales caractéristiques ont été obtenues. Les résultats montrent que, à différents sens et ampleurs, toutes les caractéristiques de crue pourraient être affectées par les CC.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas pu être menée à terme sans l'aide de plusieurs personnes. J'aimerais donc remercier ici tous ceux qui m'ont aidé et encouragé durant mes travaux de recherche.

Tout d'abord Monsieur Taha Ouarda, directeur de recherche, pour l'aide, le support et la confiance qu'il a manifesté à mon égard. Merci aussi à Monsieur Fateh Chebana, co-directeur de recherche, pour l'aide, le support et le temps qu'il m'a consacré. J'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille et à mes amis qui m'ont toujours aidé et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Je remercie plus spécifiquement ma fiancée qui m'a supporté durant ma maîtrise.

Finalement, j'exprime ma gratitude envers tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Table des matières

Avant-propos iii

Résumé v

Remerciement vii

Table des matières ix

Chapitre I : Synthèse 1

1. Introduction 3
2. Situation de la contribution de l'étudiant 5
3. Contribution de l'étudiant 7
4. Résultats et Conclusions 11
5. Références 15

Chapitre II : Article scientifique 19

Analyse et comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de changements climatiques 19

Résumé 23

Abstract 24

1. Introduction et revue de littérature 25
2. Zone d'étude et méthodologie 28
   - 2.1 Zone d'étude et données disponibles 28
   - 2.2 Évaluation des caractéristiques de crue 30
3. Résultats et discussion 33
   - 3.1 Analyse descriptive des résultats 33
   - 3.2 Étude des corrélations 37
   - 3.3 Étude de stationnarité 40
   - 3.4 Analyse Bayésienne des points de rupture 41
   - 3.5 Analyse multivariée 41
4. Conclusions 43

Remerciements 46
Liste des tableaux 55
Liste des figures 56
Les Tableaux 57
Les Figures 62

Chapitre I : Synthèse

1. Introduction

Les travaux de recherche, rapportés dans l'article présenté au chapitre II, concernent l'évaluation, la comparaison et la modélisation à plusieurs niveaux (corrélation, stationnarité, détection des points de ruptures et analyse multivariée) des caractéristiques des crues dans un contexte des changements climatiques (CC). Les CC, causés par l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre, ont des effets sur le cycle hydrologique. En effet, des variations sur les fréquences et les quantités des précipitations pourraient être prévues (Bates *et al.* 2008). De plus, la qualité des eaux pourrait se dégrader puisqu'elle est directement liée à la quantité d'eau disponible et aux rejets diffus et potentiels. Il est cependant important d'évaluer les effets des CC sur les caractéristiques des crues.

Une crue est caractérisée par quelques caractéristiques telles que la date de début, la date de fin, la date de pointe, la durée, le débit de pointe, le volume, le taux de montée et la forme de l'hydrogramme. Jusqu'à présent, la plupart des travaux antérieurs se sont concentrés sur l'impact des CC sur la pointe de la crue. Peu d'efforts ont été orientés vers l'étude des autres caractéristiques de crue. Par conséquent, il est pertinent d'étudier de manière plus complète les effets des CC sur les différentes caractéristiques des crues.

Une revue de littérature a d'abord été réalisée afin d'identifier les méthodes existantes de détermination des différentes caractéristiques de crues notamment la forme de l'hydrogramme. Ces méthodes ont été appliquées sur les données du bassin versant du réservoir Baskatong de la rivière Gatineau. Les séries de données concernent les débits observés ou simulés par les deux modèles hydrologiques HSAMI (e.g. Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000) et HYDROTEL (e.g. Fortin *et al.*, 1995). Ces derniers sont

alimentés par des données météorologiques issues des résultats de réanalyses (ERA 40) et de modèle climatique global (MCCG3), couplés avec le modèle climatique régional (MRCC 4.x :e.g. Music et Caya, 2007 et Brochu et Laprise, 2007). Les séries des simulations considérées représentent une période de référence (1971-2000) et une période future (2041-2070).

Une comparaison des caractéristiques de crue a été réalisée suivie par une étude concernant les corrélations, la stationnarité, la détection des points de rupture et la modélisation multivariée des séries des caractéristiques.

Ce chapitre « Synthèse » du mémoire de maîtrise est divisé de la façon suivante. La section 2 situe la contribution de l'étudiant par rapport à d'autres articles scientifiques traitants les effets des CC sur les caractéristiques des crues. La section 3 met l'accent sur la contribution de l'étudiant au sujet traité. Les résultats et les conclusions sont présentés dans la section 4.

2. Situation de la contribution de l'étudiant

L'impact des CC sur le régime hydrologique a fait l'objet d'étude depuis de nombreuses années à travers le monde. En premier lieu, des recherches multidisciplinaires ont commencé par la création des modèles climatiques globaux (Mitchell *et al.*, 1995 et Manabe et Hahn, 1997). Puis, l'intégration des méthodes de mise à l'échelle stochastiques (e.g. Semenov et Barraw, 1997), physiques (e.g. Laprise *et al.*, 1998) et statistiques (e.g. wilby *et al.*, 2002) ont permis de raffiner les résultats des modèles globaux. Les résultats des scénarios climatiques (e.g. température maximale, température minimale et précipitation) issus des modèles de circulations générales ou des modèles régionaux ont été employés comme des entrées pour les modèles hydrologiques. Les résultats de ces derniers sont alors étudiés dans le but de connaître les tendances générales des impacts des CC sur le régime hydrologique d'un bassin versant (Meritt *et al.*, 2005 et Kerkhoven et Gan, 2006).

La plupart des travaux (e.g. Bourque et Simonet, 2008 et Vescovi *et al.*, 2008) se sont concentrés sur l'impact des CC sur la pointe de la crue. Par contre, l'étude des autres caractéristiques de crue a attiré moins d'attention vue le volume de travail nécessaire pour les étudier. La contribution de ce travail de recherche consiste à évaluer et à comparer les différentes caractéristiques de crue observées et simulées dans un contexte de CC. Deux modèles hydrologiques (HSAMI : modèle conceptuel global et HYDROTEL : modèle distribué à base physique) ont été considérés pour évaluer la sensibilité de l'estimation des caractéristiques des crues au choix du modèle hydrologique. Enfin, une étude des corrélations, de stationnarité, et de détection des

points de rupture ainsi qu'une analyse multivariée des séries des caractéristiques de crue ont été réalisées.

3. Contribution de l'étudiant

Comme étape préliminaire, j'ai effectué une revue de littérature concernant les effets des CC sur le régime hydrologique au Québec et autres territoires aux climats similaires (pays scandinaves) à l'automne 2007 et l'hiver 2008. Les résultats de cette recherche sont présentés dans la partie « Introduction et revue de littérature » de l'article du deuxième chapitre.

J'ai ensuite travaillé sur l'identification des méthodes de détermination des caractéristiques des crues dès la fin de l'hiver 2008. Les caractéristiques de crue considérées dans cette étude sont la date de début, la date de fin, la date de pointe, la durée, le débit de pointe, le volume, le taux de montée et la forme de l'hydrogramme pour la crue printanière et la pointe pour la crue automnale.

La date de début et la date de fin de crue sont les deux caractéristiques les plus importantes puisqu'elles ont une influence sur la détermination des autres caractéristiques. Pour déterminer les dates de début et de fin d'une façon automatique, j'ai utilisé le programme de Pacher (2006). Ce programme est basé sur l'analyse des hydrogrammes annuels cumulatifs en ajustant les pentes d'une approximation linéaire. J'ai modifié ce programme afin de tenir compte des années bissextiles. Une fois les dates de début et de fin déterminées, à titre d'exemples, la durée de crue est déduite directement par la différence entre ces deux dates et le volume est l'intégrale des débits entre ces deux dates également. Pour la détermination du débit de pointe, j'ai utilisé le même concept de l'approche QdF (Débit-Durée-Fréquence, e.g. Javelle *et al.*, 2002). En ce qui concerne la forme de l'hydrogramme, j'ai fait une revue des différentes méthodes utilisées pour la modélisation d'un hydrogramme. Cette étude a montré que les deux lois

Gamma et Beta sont les plus prometteuses. J'ai ajusté ces deux lois aux hydrogrammes et j'ai conclu que la loi Beta, à deux paramètres *a* et *b*, modélise mieux la forme des hydrogrammes des séries étudiées. Le lecteur peut se référer au Chapitre II pour plus de détails concernant les formulations de toutes les caractéristiques.

J'ai programmé les méthodes de détermination des différentes caractéristiques à l'aide du logiciel MATLAB (The MathWorks, Inc., 2005). À la fin de l'été 2008, j'ai déterminé toutes les caractéristiques par les méthodes retenues, et ce, pour toutes les séries considérées. Tous les éléments et principales étapes de ces travaux sont résumés à la section 2.2 de l'article (intitulée « Évaluation des caractéristiques de crue »)

À l'automne 2008, j'ai procédé à la comparaison des caractéristiques de crue en se basant sur les figures de type « Boxplot » et les tableaux des statistiques descriptives. Ensuite, j'ai réalisé l'étude des corrélations entre les différentes caractéristiques, entre séries historiques et simulées et entre les variables météorologiques et les caractéristiques de crue. Pendant la même période, j'ai étudié la stationnarité des séries des caractéristiques à l'aide du test de Mann-Kendall dans sa version originale et sous une version modifiée (Yue et Wang, 2002) qui tient compte des auto-corrélations dans les séries.

Pendant l'hiver 2009, j'ai étudié les points de rupture dans les séries de caractéristiques à l'aide d'une méthode Bayésienne. Cette méthode est basée sur un modèle de régression linéaire multiple (Seidou et Ouarda, 2007). Par la suite, j'ai effectué une analyse multivariée afin de modéliser les structures de dépendance entre des couples pointe-volume et volume-durée. Au cours de cette analyse, j'ai déterminé également les lois marginales des différentes séries à l'aide du logiciel HYFRAN (Chaire en hydrologie

statistique, 2002). Ensuite, j'ai ajusté les trois copules archimédiennes Gumbel, Clayton et Frank sur les couples pointe-volume et volume-durée pour les différentes séries.

L'interprétation, la discussion et les conclusions entourant l'ensemble des résultats qui se trouvent dans les sections 3 et 4 de l'article (« Résultats et discussion » et « Conclusion » respectivement) ont été réalisés pendant la session du printemps 2009. Les discussions que j'ai eues avec mon directeur et mon co-directeur de recherche ont permis de mieux préciser certains éléments de la conclusion.

À la fin du printemps 2009, j'ai rédigé la première version de l'article scientifique se trouvant dans le chapitre II de ce mémoire. J'ai apporté des corrections et modifications suite à des suggestions et commentaires du directeur et co-directeur de recherche.

Durant mon maîtrise, plusieurs réunion de travail on été organisées avec l'équipe d'Hyro-Québec afin d'identifier les différentes méthodes utilisées et de discuter les résultats obtenus.

4. Résultats et Conclusions

Dans la présente étude, une évaluation et une comparaison des caractéristiques de crue printanières ainsi que la pointe de la crue automnale ont été élaborées. La comparaison des caractéristiques est faite dans un contexte de CC. Les caractéristiques à comparer sont obtenues à partir des débits historiques, les débits simulés par les deux modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL. Ces derniers sont alimenter par les résultats du MRCC 4.x, piloté par les réanalyses ERA40 (e.g. ECMWF, 2009) et par le MCCG3 (e.g. Scinocca *et al.*, 2008), membre #4 suivant l'hypothèse d'une augmentation des gaz à effet de serre correspondant au scénario A2 (Bates *et al.* 2008). À partir de ces trois jeux de données, combinées avec deux modèles hydrologiques, on a extrait sept séries de débits. La zone d'étude est le bassin versant Baskatong, qui est un influant du bassin témoin Gatineau. Neuf caractéristiques des crues à comparer ont été considérées.

En analysant les crues simulées sur la période de référence, on a remarqué que les modèles hydrologiques ne parviennent pas à reconstruire certaines caractéristiques observées comme les pointes extrêmes (débits supérieurs à 2000 m^3s^{-1}). Par ailleurs, les crues simulées par les modèles hydrologiques sont en moyenne plus longues et ont des dates de fin plus tardives que celles observées. En moyenne, les volumes, les taux de montée et les pointes automnales des crues simulées sont moins importants que ceux observés

À l'horion 2050, les résultats montrent que les crues futures pourraient être plus précoces, et pourraient finir plus tard et ainsi plus longues que celles observées. D'autre part, les crues futures pourraient avoir des faibles débits de pointe. Les volumes et les taux de montée pourraient être plus faibles que ceux observés. Pour la forme de l'hydrogramme,

on remarque que les hydrogrammes sont presque symétriques et que HSAMI ne parvient pas à simuler les variations observées. Les taux de montée simulés par HYDROTEL sont plus grands et plus variables que ceux simulés par HSAMI.

Afin d'interpréter les résultats, les hydrogrammes des crues étudiées ont été superposés années par années. Une comparaison des ces hydrogrammes superposés nous a permis de conclure que pour les résultats de réanalyse, les crues simulées par HSAMI ont une pointe légèrement plus forte et plus tardive que celles simulées par HYDROTEL. Pour les simulations à partir des résultats du MCCG3, les pointes des crues simulées par HYDROTEL sont moins importantes que celles simulées par HSAMI et ont des durées de crues plus importantes et des dates de fin plus tardives. Généralement, les séries des caractéristiques des crues simulées par HYDROTEL possèdent des variances plus grandes que celles de HSAMI. Cette différence peut être expliquée par le fait que HYDROTEL intègre, dans le processus de simulation, plus de paramètres que HSAMI et que HSAMI est un modèle conceptuel global tandis que HYDROTEL est un modèls distribué à base physique.

Une étude de corrélation de différentes combinaisons a été réalisée (entre les différentes caractéristiques d'une même série, entre les différentes séries pour une même caractéristique et entre les données météorologiques et différentes caractéristiques des crues). À partir de cette étude, on a conclu qu'il y a une forte corrélation entre la date de début et la durée, et entre le volume et le débit de pointe. Les corrélations entre la date de début et le débit de pointe, et celles entre le volume et la durée ne sont pas significatives. Les séries déterminées à partir des résultats de réanalyses ne sont corrélées qu'avec celles déterminées à partir des données historiques. Chacune des caractéristiques des séries

simulées par HSAMI est corrélée avec sa contre partie de celles simulées par HYDROTEL.

Il résulte de l'étude de la stationnarité et de la détection des points de rupture que parmi 63 séries seulement quatre séries sont non stationnaires et huit séries présentent un point de rupture. Sur la période de référence, les points de rupture sont enregistrés autour de l'année 1985. L'analyse des hydrogrammes superposés montre que la période qui suit l'année 1985 est une période caractérisée par un faible apport hydrologique printanier.

L'analyse multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue montre que les lois marginales changent d'une série à l'autre. Généralement, la copule archimédienne de Gumbel convient mieux au couple pointe-volume. Tandis que la copule archimédienne de Clayton est plus appropriée pour ajuster la dépendance volume-durée.

Dans la présente étude, l'accent est mis sur la comparaison des caractéristiques de crue. Cette comparaison pourrait être étendue dans diverses directions. En effet, il est d'intérêt de considérer différents scénarios afin d'étudier la sensibilité des résultats obtenus au choix du scénario climatique. De plus, il est important de considérer d'autres bassins et de tenir compte des éléments communs en terme de l'évolution des caractéristiques de crue afin d'aboutir à des conclusions plus générales. D'autre part, au niveau de la méthode employée, l'utilisation d'une moyenne mobile permettrait d'étudier l'évolution des caractéristiques en fonction du temps.

5. Références

Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. et Palutikof, J.P. (2008). Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.

Bisson, J.L. et Roberge, F. (1983). Prévision des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. *Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit*, Toronto, novembre 1983.

Bourque, A. et Simonet, G. (2008). « Québec » dans vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007, Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et Bush, E. (éditeurs), *Gouvernement du Canada*, Ottawa (Ontario), pp. 171-226.

Brochu, R., et Laprise, R. (2007). Surface Water and Energy Budgets over the Mississippi and Columbia River Basins as Simulated by Two Generations of the Canadian Regional Climate Model. *Atmosphere.-Ocean*, vol. 45(1), pp. 19-35.

Chaire en hydrologie statistique (2002). HYFRAN. *Rapport technique*, INRS-ETE. Logiciel pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, version 1.1.

ECMWF, (2009). Centre européen de prévision météorologique à moyen terme. http://www.ecmwf.int/.

Fortin, J.P., R. Moussa, C. Bocquillon et J.P. Villeneuve (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau*, 8(1): 97-124.

Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application, *Rapport de recherche*, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.

Javelle, P., Ouarda, TBMJ., Lang, M., Bobee, B., Galea, G. and Gresillon, J. M. (2002). Development of regional flood-duration-frequency curves based on the indexflood method. *Journal of Hydrology*, 258(1-4):249-259.

Kerkhoven, E. et Gan, T.Y. (2006). A modified ISBA surface scheme for modeling the hydrology of Athabasca river basin with GCM-scale data. *Advanced in Water Resources*, 29, 808-826.

Laprise, R., Caya, D, Giguère, M., Bergeron, G., Côté, H., Blachet, J.P., Boer, G.J. et McFarlance, N. (1998). Climate and climate change in western Canada as simulated by Canadian regional climate model. *Atmosphere-Ocean*, 36, 119-167.

Manabe, S. et Hahn, D.G. (1977). Simulation of the tropical climate of an ice age. *Journal of geophysical research*, 15, 3889-3911.

Merritt, W.S., Jakeman, A. et Croke, B.F. (2005). Sensitivity testing of a model for exploring water resources utilization and management options. *Environmental modeling and software*, 20, 1013-1030.

Mitchell, J.F.B, Johnus, T.C., Gregory, J.M. et Tett, S.F.B. (1995). Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, 376, 501-504.

Music, B., and D. Caya, 2007: Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). J. Hydromet., 8(5), 969-988.

Pacher, G.W. (2006). Détermination objective des paramètres des hydrogrammes. (Note personnelle).

Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Lazare, M. Li, J. et Plummer, D. (2008). The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and* Physics Discussions. 8-2, 7883-7930.

Semenov, M.A. et Elaine, M.B. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic change*, 35, 397-414.

Seidou, O. et Ouarda, T.B.M.J. (2007). Recursion-based multiple change-point detection in multiple linear regression and application to river stream flows. *Water Resources Research*, 43, W07404, doi:10.1029/2006WR005021, 2007.

The MathWorks Inc. (2005). Version 7.0.4.365 (R14).

Vescovi, L., Cyr, J-F., Turcotte, R., Fortin, L-G., Ludwig, R., Braun, M. et May, I. (2008). Rapport final du projet: « Adaptation et inter comparaison d'outils québécois et bavarois de gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques » (AQAGI). 148 p.

Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M. (2002). SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling and Software*, 17, 147–159.

Yue, S. et Wang, C.Y. (2002). Applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water resources research*, 38: 1068, doi:10.1029/2001WR000861.

Chapitre II : Article scientifique

Analyse et comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de changements climatiques

Analyse et comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de changements climatiques

M.-A. Ben Aissia* [1]

F. Chebana [1]

T. B. M. J. Ouarda [1]

L. Roy [2]

G. Desrochers [2]

I. Chartier [2]

É. Robichaud [2]

[1] Chaire en hydrologie statistique Hydro-Québec/CRSNG

Chaire du Canada en estimation des variables hydrométéorologiques

INRS-ETE

490, de la Couronne

Québec (Québec) G1K 9A9, CANADA

[2] Hydro-Québec / Ouranos

550, rue Sherbrooke Ouest, 19e étage

Montréal (Québec)

* Auteur correspondant : mohamed.ben.aissia@ete.inrs.ca

Juin 2009

Résumé

L'impact des changements climatiques (CC) sur les pointes des crues a fait l'objet de plusieurs travaux. Cependant, une crue est caractérisée non seulement par sa pointe, mais aussi par d'autres caractéristiques comme le volume et la durée. Peu d'efforts ont été orientés vers l'étude de l'impact des CC sur ces caractéristiques. Le présent travail consiste à évaluer et à comparer les caractéristiques des crues dans un contexte de CC, dans le bassin versant de la rivière Baskatong (province de Québec, Canada), en se basant sur des données historiques, des résultats de réanalyses et des résultats de simulations à l'horizon 2050. Les résultats des réanalyses et des simulations sont obtenus à partir des deux modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL. Les corrélations, la stationnarité, les points de rupture et les caractéristiques multivariées des séries de crues ont été étudiés. Les résultats montrent que toutes les caractéristiques de crue pourraient être affectées par les CC à des niveaux différents.

Abstract

The impact of climate change (CC) on flood peaks has been the subject of several studies. However, a flood is characterized not only by its peak, but also by other characteristics such as its volume and duration. Little effort has been directed towards the study of the impact of CC on these characteristics. The aim of the present work is to evaluate and compare flood characteristics under a CC conditions, in the Baskatong river basin (Province of Quebec, Canada), based on historical data, the results of reanalysis and future simulations for the 2050 horizon. The results for reanalyses data and simulations are obtained for two hydrological models: HSAMI and HYDROTEL. Correlations, stationarity, change-points and multivariate characteristics of flood series were studied. The results show that, at various levels, all flood characteristics could be affected by CC.

Introduction et revue de littérature

Les gouvernements et les populations sont de plus en plus intéressés par les impacts probables du réchauffement climatique. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM., 2009), le nombre de phénomènes extrêmes a doublé au cours des dernières années. Parmi ces phénomènes on cite la forte croissance d'ouragans de catégorie 5 en 2005 et les canicules prolongées en Europe lors de l'été 2003 (Lorrain, 2007).

Les changements climatiques (CC), causés entre autres par l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre, ont des effets sur le cycle hydrologique. Des impacts sur les fréquences et les intensités des précipitations sont prévus. La qualité des eaux est également sensée être dégradée puisqu'elle est liée directement à la quantité d'eau disponible (Arnell, 1999; Warren, 2004).

Au Québec, de nombreux milieux et secteurs d'activités peuvent subir une variation importante en fonction de l'évolution du climat, parmi ceux-ci on cite : les pergélisols, les forêts, l'hydro-électricité, l'érosion côtière, les écosystèmes aquatiques, le fleuve Saint-Laurent, la gestion de l'eau, l'agriculture, la demande en énergie, le transport, la santé humaine et le tourisme (Environnement Canada, 1997).

Dans le but d'identifier et étudier les effets des CC sur le régime hydrologique au Québec et autres régions nordiques, les séries historiques des débits et de différentes variables hydrologiques ont fait l'objet de plusieurs travaux (e.g., Ouarda *et al.*, 1999; Déry *et al.*, 2005; Groleau *et al.*, 2007; Seidou *et al.*, 2007; Seidou et Ouarda, 2007; Assani *et al.*, 2008 ; Jones, 2008 et Saint-Laurent *et al.*, 2009). Ces travaux montrent l'existence de points de rupture, de tendances de la moyenne et/ou de la variance et d'évolutions cycliques dans certaines séries étudiées.

Autres travaux ont étudié les effets des CC sur le régime hydrologique, au Québec et à d'autres régions nordiques, en comparant les sorties des modèles climatiques globaux et les résultats des réanalyses avec les données historiques. Ces études ont porté sur diverses variables hydrologiques. Elles montrent qu'une augmentation des températures moyennes annuelles favorisera l'évaporation et augmentera l'apport des précipitations (e.g., Singh, 1987 ; Météoglobe Canada, 1989 ; Mortsch et Quinn, 1996 ; Bruce *et al.*, 2000 ; Guay *et al.*, 2004; Dankers et Christiensen, 2005 et Beldring *et al.*, 2008). D'autre part, les travaux concernant les effets des CC sur les précipitations solides montrent qu'il pourrait y avoir une diminution de la fraction des précipitations nivales (e.g., Bruce *et al.*, 2000 ; Guay *et al.*, 2004; Batternett *et al.*, 2005; Dankers et Christiensen, 2005; Dibike et Coulibaly, 2005 ; Mareuil *et al.*, 2007 et EEA., 2008). Pour le débit moyen annuel, les études prévoient qu'il pourrait être affecté (augmenter au diminuer) dans le futur (e.g., Morin et Slivitzky, 1992 ; Mortsch et Quinn, 1996 ; Mortsch *et al.*, 2000; Moulton et Cuthbert, 2000 ; Roy *et al.*, 2001; Lofgren *et al.*, 2002 ; Croley, 2003 ; D'Arcy *et al.*, 2005; Dibike et Coulibaly, 2005; Fagherazzi *et al.*, 2005 ; Lefaivre, 2005 ; Mareuil, 2005; Milly *et al.*, 2005; Lehner *et al.*, 2006; Minville *et al.*, 2006a; Graham *et al.*, 2007; Mareuil *et al.*, 2007; Bourque et Simonet, 2008 et EEA., 2008). Les effets des CC sur le débit moyen annuel sont plus importants dans le fleuve Saint-Laurent comparé au reste des rivières du Québec. Les études des effets des CC sur le débit d'étiage montrent qu'il pourrait être réduit dans le futur (e.g., Morin et Slivitzky, 1992 ; Guay *et al.*, 2004; Mortsch et Quinn, 1996 ; Fortin *et al.*, 2007; Lorrain, 2007 ; Minville *et al.*, 2008et Vescovi *et al.*, 2008). Morin et Slivitzky (1992), Mortsch et Quinn (1996), Fortin *et al.* (2007), Lorrain (2007), Minville *et al.* (2008) et Vescovi *et al.* (2008) ont étudié les effets

des CC sur les débits hivernal et printanier. Contrairement au débit d'étiage, ces derniers seraient soutenus durant les prochaines décennies concluent ces études.

L'étude des fréquences et des amplitudes des événements extrêmes a une grande importance dans le domaine de l'hydrologie, en particulier, suite à un réchauffement climatique (e.g., Morin et Slivitzky, 1992 ; Roy *et al.*, 2001; Mareuil, 2005 et Mareuil *et al.*, 2007). Ces études prévoient de fortes augmentations du volume d'écoulement, du débit maximum et du niveau d'eau. Les effets des CC sur la crue printanière pourraient être traduits par un avancement de sa date de début (e.g., Batternett *et al.*, 2005 ; Doré *et al.*, 2006; Minville *et al.*, 2006a,b; Graham *et al.*, 2007; Mareuil *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2007 ; Beldring *et al.*, 2008 et Vescovi *et al.*, 2008) et une diminution de la pointe (e.g., Roy *et al.*, 2001; Bergström *et al.*, 2001; Andréasson *et al.*, 2004; Dankers et Christiensen, 2005; Milly *et al.*, 2005; Mareuil, 2005; Doré *et al.*, 2006; Minville *et al.*, 2006a,b; Fortin *et al.*, 2007 et Minville *et al.*, 2008).

L'impact des CC sur les pointes des crues a fait l'objet de plusieurs travaux. Cependant, une crue est caractérisée non seulement par sa pointe (Q_p), mais aussi par d'autres caractéristiques soient : la date de début (d_s), la date de fin (d_e), la date de pointe (d_p), la durée (D), le volume de la crue (V), le taux de montée (T_m) et la forme de l'hydrogramme (F_h). Peu d'efforts ont été orientés vers l'étude de l'impact des CC sur l'ensemble de ces caractéristiques. L'objectif de la présente étude est d'évaluer et de comparer l'ensemble des caractéristiques des crues dans un contexte de CC. De plus, afin d'évaluer la sensibilité de l'estimation des caractéristiques des crues au choix du modèle hydrologique, deux modèles hydrologiques (HSAMI, e.g. Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000 et HYDROTEL, e.g. Fortin *et al.*, 1995)) sont considérés.

Dans la section 2, la zone d'étude et les données disponibles sont présentées suivis des définitions et des méthodes utilisées pour la détermination des caractéristiques de crue (section 3). La section 4 présente les résultats de l'étude. Elle est composée d'une analyse descriptive des résultats obtenus, étude de corrélation, de stationnarité, de détections de points de rupture de toutes les séries et une analyse multivariée des principales caractéristiques. Les conclusions sont présentées dans la section 5.

2. Zone d'étude et méthodologie

2.1 Zone d'étude et données disponibles

Le bassin versant étudié est celui de la rivière Baskatong (Figure 1). C'est l'un des cinq sous bassins versants de la rivière Gatineau située dans la région de l'Outaouais (Province de Québec, Canada). Le bassin versant Baskatong est le plan hydrographique le plus élevé dans le secteur, avec ses 220 m d'altitude moyenne, et certains sommets atteignent les 600 m. Il possède une superficie de 13 040 km^2 (Chartier, 2006).

Le barrage Mercier est l'ouvrage hydraulique le plus important dans le bassin versant. Sa construction, en 1929, jumelée à deux autres barrages et huit ouvrages de remblais ont gonflé les eaux du lac Baskatong pour ainsi créer le réservoir du même nom. Le réservoir Baskatong permet d'une part l'alimentation des trois centrales sur la rivière Gatineau (Paugan, Chelsea et Rapides-Farmers) et d'autre part la régularisation des débits en périodes de crues. Cette régularisation est sous le contrôle d'Hydro-Québec (Del Degan *et al.*, 2001).

Les caractéristiques de crue sont évaluées et comparées à partir de trois jeux de données du bassin versant Baskatong. Le premier est la série des débits observés du 1er janvier

1969 au 31 décembre 2000 (Figure 2). Dans le deuxième, il y a les deux séries de débits simulés par HSAMI et HYDROTEL, à partir des résultats du MRCC 4.x (e.g. Music et Caya, 2007 et Brochu et Laprise, 2007), piloté par les réanalyses ERA40 (e.g. ECMWF, 2009), sur la période du 1er janvier 1969 au 31 décembre 2000. Dans le troisième, on trouve deux séries de débits, sur la période du 1er janvier 1961 au 31 décembre 2070, simulées par HSAMI et HYDROTEL en utilisant la méthode directe, soit l'utilisation directe des données météorologiques d'un modèle de climat. Nous avons utilisé ici les résultats du MRCC 4.x piloté par le MCCG3 (e.g. Scinocca *et al.*, 2008), membre #4 suivant l'hypothèse d'une augmentation des gaz à effet de serre correspondant au scénario A2 (Bates *et al.* 2008).Le climat simulé par MCCG3 et ERA40 sur la période de référence n'est que globalement semblable au climat observé (i.e., il n'est pas le même). Ainsi, les comparaisons qui peuvent être effectuées sont globales et moyennées.

Pour la comparaison des caractéristiques dans un contexte de CC, on utilise deux périodes de trente ans :

- Période de référence : du 1er janvier 1971 au 31 décembre 2000;
- Période future : du 1er janvier 2041 au 31 décembre 2070.

Le choix de la durée de trente ans est expliqué par le fait que, sur trente années, l'étendue moyenne de la variabilité climatique interannuelle de basse fréquence (e.g. El Niño-Southern Oscillation, ENSO) dans les séries est prise en compte.

Il en résulte que pour les trois jeux des données on a sept séries de trente ans. La description de ces sept séries et des notations utilisées est présentée au Tableau 1.

2.2 Évaluation des caractéristiques de crue

Les dates de début « d_s » et de fin « d_e » (Figure 3) de crue sont les caractéristiques les plus importantes vu leur effet sur la détermination du reste des caractéristiques. Dans le cadre de cette étude, on utilise la méthode proposée par Pacher (2006). Elle se base sur l'analyse des hydrogrammes annuels cumulatifs en ajustant les pentes avec une approximation linéaire. Une fois les dates de début et de fin sont déterminées, la durée est définie par le nombre de jours entre la date de début et la date de fin.

Pour la détermination du débit de pointe « Q_p » on utilise la philosophie de l'approche QdF (Javelle *et al.*, 2002; Cunderlik et Ouarda, 2006). La méthode consiste à déterminer le débit de pointe du jour « i » associé à n=3 *ou* 7 jours comme la valeur maximale des moyennes des « n » débits de pointe centrée en « i ». Les résultats correspondant aux deux valeurs de « n » sont similaires au niveau des comparaisons des séries. Du point de vue pratique, il est plus raisonnable de prendre trois jours au lieu de sept jours. En effet, avec sept jours on s'éloigne de la notion de pointe vers la notion de volume. Donc, la valeur retenue de « n » est trois jours. Le débit de pointe correspondant à n=3 est déterminé alors à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_{p3} = \max\left\{q_{i3}, i = d_s, .., d_e\right\} \tag{1a}$$

où q_{i3} est le débit au jour i associé à *3* jours :

$$q_{i3} = moyenne\ (q_{i-1}, q_i, q_{i+1}) \tag{1b}$$

avec q_i est le débit moyen au jour « d_i ».

Pour la crue automnale, le débit de pointe « Q_{pa} » est la valeur maximale du débit entre le 1er juillet et le 31 décembre. Il est déterminé par l'équation suivante :

$$Q_{pa} = max\{q_i, i = d_1, d_2, ..., d_n\} \quad (2)$$

où d_1 et d_n représentent le 1er juillet et le 31 décembre respectivement.

La date de pointe « d_p » est la date à laquelle on enregistre le débit de pointe Q_{p3} (Figure 3).

Le volume V (Figure 3) est déterminé par l'équation suivante:

$$V = \sum_{i=d_s}^{d_e} q_i \quad (3)$$

avec q_i est le débit moyen au jour « d_i ».

Pour déterminer la forme de l'hydrogramme, on s'est basé sur la date du débit de pointe « d_p » et la date de mi-durée $\frac{D}{2} = d_c$ (Figure 4), où D=de-ds. On peut distinguer trois types de formes d'hydrogramme : asymétrie positive si $d_p < d_c$, symétrie si $d_p = d_c$ et asymétrie négative si $d_p > d_c$.

L'hydrogramme peut être modélisé par la méthode de l'hydrogramme unitaire traditionnel (Traditional Unit Hydrograph, *TUH*) (Chow *et al.*, 1988; Pilgrim et Cordery, 1993), la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique (Synthetic Unit Hydrograph, *SUH*) (Snyder, 1938; US-SCS, 1985), la méthode de l'hydrogramme typique (Typical Hydrograph, TH) (Nezhikhovsky, 1971) et enfin la méthode statistique (Statistical, S) (Ciepielowski, 1987; Haktanir et Sezen, 1990).

Les deux méthodes *TUH* et *SUH* sont basées sur des principes hydrologiques. En effet, la méthode *TUH* assume que l'écoulement issu d'une averse est constant dans le temps et que cet écoulement est linéaire en fonction de l'intensité de la pluie. La méthode *SUH* est basée sur des relations empiriques reliant les paramètres de l'hydrogramme et les caractéristiques physiques du bassin de drainage. En réalité, ces deux méthodes ne peuvent pas être utilisées pour décrire un hydrogramme réel dans les régions du nord, comme au Québec. En effet, dans les pays du nord, la majorité des crues ne sont pas dues aux pluies, mais essentiellement à la fonte de neige au printemps. La méthode *TH* considère l'hydrogramme de crue comme une réponse d'une seule averse historique. Elle n'utilise donc pas toute l'information disponible dans un échantillon d'hydrogramme. La méthode statistique *S* consiste à modéliser la forme d'un hydrogramme par une fonction de densité de probabilité, généralement une loi Gamma ou Beta.

La méthode statistique *S* a été utilisée dans la présente étude. La distribution Beta (à deux paramètres (*a* et *b*) a été utilisée. La méthodologie de modélisation de la loi Beta est expliquée dans l'article de Yue *et al.* (2002). La forme de l'hydrogramme est déterminée suivant le rapport a/b : asymétrie positive si $a/b < 1$, symétrie si $a/b = 1$ et asymétrie négative si $a/b > 1$.

Le taux de montée peut être déterminé par l'équation suivante (Young *et al.*, 1999) :

$$T_m = moyenne(t_i); i = d_s,..,d_p \qquad (4)$$

où t_i est le taux de montée élémentaire correspondant au jour *i*.

3. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont analysés à divers niveaux, à savoir : une analyse descriptive, une étude de corrélation, une étude de stationnarité, une analyse Bayésienne de détection des points de rupture et une analyse multivariée.

3.1 Analyse descriptive des résultats

Dans la présente section, on analyse les résultats de chacune des caractéristiques étudiées. Afin de vérifier la significativité des déférences entres les moyennes des séries comparées, on a utilisé le test de Mann–Whitney (Corder et Foreman, 2009) à une erreur de première espèce de 5%. Les résultats détaillés du test de Mann–Whitney sont présenter dans le rapport de Ben Aissia *et al.*, 2009. Les statistiques descriptives des séries des caractéristiques de crue sont présentées au tableau 2.

3.1.1 Date de début

L'analyse de la figure 5(a) montre que les dates de début des crues simulées à partir des séries RHS et RHY sont similaires en moyenne (test de Mann–Whitney) à celles observées, mais avec une variance plus importante. Les dates de début des crues pour les séries simulées SHS et SHY sont plus tardives que celles observées. Les dates de début des crues simulées à partir des séries SHSF et SHYF ont une grande variance.

3.1.2 Date de fin

À partir de la figure 5(b) on remarque que pour le modèle HSAMI, les dates de fin des crues simulées sur la période de référence SHS et RHS sont légèrement plus tardives que celles observées, tandis que celles simulées sur la période future (SHSF) ont une grande

variance. Pour le modèle HYDROTEL, les dates de fin des crues sont plus tardives que celles observées et ont une variance plus importante.

3.1.3 Durée

Les résultats présentés dans la figure 5(c) montrent qu'à l'exception de la série SHS, toutes les autres séries ont des durées de crues plus longues, en moyenne, que celle observée. Les séries de durée simulées par HYDROTEL ont des variances plus importantes que celles simulées par HSAMI. La différence de variance peut être expliquée par le fait que le modèle HYDROTEL possède plus de paramètres à estimer que le modèle HSAMI (Bisson et Roberge, 1983).

3.1.4 Débit de pointe

L'analyse de la figure 5(d) montre que le débit de pointe pourrait être plus faible et moins variable dans le futur. Les débits de pointe simulés par HSAMI sont plus importants que ceux simulés par HYDROTEL. Aucun des deux modèles hydrologiques n'est capable de simuler les crues à forte pointe observées dans la série des données historiques.

3.1.5 Date de pointe

À partir de la figure 5(e) on remarque qu'à l'exception de la série SHY, les séries des dates de pointe sont similaires (test de Mann–Whitney) sur la période de référence. Pour la période future, HSAMI prévoit que la date de pointe sera plus précoce tandis que HYDROTEL estime qu'elle sera plus variable.

3.1.6 Volume de crue

Les résultats de la figure 5(f) montrent que la série de volumes de crues simulées à partir des données de réanalyse RHS est l'unique à prévoir un volume de crue plus important que celui issu de la série de données observées. Les volumes de crues simulées par HSAMI sont plus importants que ceux simulés par HYDROTEL.

3.1.7 Forme de l'hydrogramme

L'analyse de la figure 5(g) montre que les coefficients de symétrie obtenus sont proches de 1, en moyenne, pour tous les modèles. Les coefficients de symétrie obtenus par HYDROTEL sont plus importants et plus variables que ceux obtenus par HSAMI. Le modèle hydrologique HSAMI n'arrive pas à simuler la variation dans la forme de l'hydrogramme puisqu'il utilise une loi fixe qui est la loi Gamma (Bisson et Roberge, 1983).

3.1.8 Taux de montée

Les résultats présentés dans la figure 5(h) montrent une diminution probable du taux de montée ainsi que de sa variation dans le futur. Une opposition dans le comportement des modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL entre les résultats avec réanalyse (RHS, RHY) et avec simulations (SHS, SHY et SHSF, SHYF) est observée. En effet, les résultats avec réanalyse montrent que les taux de montée simulés par HYDROTEL (RHY) sont plus importants que ceux simulés par HSAMI (RHS). L'inverse est observé à partir des résultats du MRCC 4.x piloter par le MCCG3.L'analyse des hydrogrammes superposés (Ben Aissia *et al.* 2009) montre que les pointes des crues simulées par HYDROTEL à partir des résultats du MRCC 4.x sont les moins élevées et dans certaines

cas elles disparue même dans la période de référence. Ce qui explique les valeurs faibles du taux de montée. Par contre, pour les résultats des réanalyses, les crues simulées par HYDROTEL ont des pointes, et donc taux de montée, proches de ceux des crues observées et simulées par HSAMI..

3.1.9 Pointe de la crue automnale

À partir de la figure 5(i) on remarque qu'à l'exception de la série SHYF, les débits de pointe des crues automnales simulées par HSAMI ou HYDROTEL sont plus faibles que ceux observés. Les débits de pointe des crues automnales simulés par HSAMI sont plus faibles que ceux simulés par HYDROTEL.

À partir des résultats de cette section, on conclu que les crues simulées à partir des réanalyses on des dates de pointe, durée et date de fin plus tardive. De plus, les taux de montée et les débits de pointe de crues printanières et automnales simulées à partir des réanalyses sont plus faibles que ceux observés. Pour les crues simulées à partir des résultats de MRCC 4.x piloter par le MCCG3, on remarque que, sur la période de référence (1971-2000), les crues commencent et finissent plus tard que celles observées et ayant des débits de pointe automnale et printanier, des volumes et des taux de montées inférieurs à ceux observés. Tandis que, sur la période future (2041-270), les crues pourraient commencer plut tôt et finirent plus tard que celles observées et pourraient avoir des débits de pointe, des volumes et des taux de montés plus faibles.

On remarque une opposition des comportements des modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL. En effet, pour les résultats de réanalyse (RHS, RHY), les crues simulées par HSAMI atteignent la pointe plus tard et finirent plus tard que celles simulées par

HYDROTEL, tandis que l'inverse est remarqué pour les résultats des simulations (SHS, SHYet SHSF, SHYF).

Pour expliquer ce comportement, on a superposé les hydrogrammes de crues pour chaque période et on a comparé les queux des crues (Ben Aissia *et al.* 2009). Il a été observé que pour les résultats des réanalyses (RHS, RHY), les crues simulées par HSAMI ont une pointe légèrement plus importante et plus tardive et une date de fin plus tardive que celles simulées par HYDROTEL. Pour les résultats des simulations SHS, SHY et SHSF, SHYF, la différence entre les deux modèles est principalement causée par les longues durées des crues simulées par HYDROTEL.

La comparaison des résultats des deux modèles montre que les sorties du modèle hydrologique HYDROTEL possèdent une variance plus importante que celles de HSAMI. Les volumes de crue simulés par HSAMI sont plus importants que ceux simulés par HYDROTEL. Tandis que, les débits de pointes des crues automnales simulés par HYDROTEL sont plus importants que ceux simulés par HSAMI. D'autre part, pour les résultats de réanalyse, les crues simulées par HSAMI ont des dates de début et des dates de fin plus tardives que celles des crues simulées par HYDROTEL. Tandis que, pour les simulations à partir des résultats du MCCG3 l'inverse a été remarqué.

3.2 Étude des corrélations

Trois types de corrélations sont étudiés. Le premier est la corrélation entre différentes caractéristiques pour la même série, le deuxième est la corrélation entre les différentes séries d'une même caractéristique et le dernier est la corrélation entre les données météorologiques et les différentes caractéristiques des crues. Dans cette section, les principales caractéristiques de crue sont étudiées soit : date de début « d_s », durée « D »,

débit de pointe « *Qp* » et volume de crue « *V* ». Pour chacune des valeurs de corrélations calculées, le *t*-test de coefficient de corrélation est appliqué pour vérifier si elle est significative (Kanji, 1993).

3.2.1 Corrélations entre les caractéristiques d'une même série

Le tableau 3 présente les corrélations entre les principales caractéristiques de crue indiquées ci-dessus pour chacune des séries (DH, RHS, RHY, SHS, SHY, SHSF et SHYF). Selon l'application du t-test, les corrélations significatives sont présentées en couleur grise.

On remarque une forte corrélation négative entre la date de début (d_s) et la durée (D) (entre -0,47 et -0,72) et une forte corrélation positive entre le volume (V) et le débit de pointe (Q_p) (entre 0,44 et 0,70). Tandis que les corrélations entre la date de début (d_s)et le débit de pointe (Q_p)et celles entre le volume (V) et la durée (D) sont moins fortes (de l'ordre de 0,3 à 0,4). Entre le volume (V) et la date de début (d_s), les corrélations sont faibles, généralement inférieures à 0,2, et considérées non significatives. Pour les corrélations entre la durée (D) et le débit de pointe (Q_p), trois des sept séries ont des corrélations moyennes (entre -0,38 et -0,51) tandis que les autres ont des corrélations faibles (<0,3). Généralement dans la littérature (Yue *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2003), on observe une corrélation entre (V, Q) et (V, D) et pas entre (Q, D), ce qui confirme nos résultats.

3.2.2 Corrélations entre les séries d'une même caractéristique

Pour chacune des quatre principales caractéristiques considérées, les corrélations entre les sept séries (DH, RHS, RHY, SHS, SHY, SHSF, et SHYF) définies dans le tableau 1 sont évaluées. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

On remarque que les séries des caractéristiques déterminées à partir des résultats des réanalyses ne sont corrélées qu'avec les séries observées. Chacune des caractéristiques des séries simulées par HSAMI est corrélée avec sa contre partie de celles simulées par HYDROTEL.

3.2.3 Corrélations entre les données météorologiques et quelques caractéristiques de crues

Les modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL ont été alimentés par 3 séries météorologiques: température minimale, température maximale et précipitation. Il pourrait donc y avoir des corrélations entre ces séries météorologiques et les caractéristiques de crues simulées. De plus, au Québec la crue printanière est causée principalement par la fonte de neige qui résulte de l'augmentation de la température durant le printemps. On s'attend donc à une corrélation significative entre la date de début et les températures maximales qui la précèdent et entre le volume et les précipitations. Au début, on s'intéresse aux corrélations entre les dates de début et les températures moyennes des 7, 10 ou 14 jours qui les précèdent. Puis on évalue les corrélations entre la précipitation et le volume de crue.

Les résultats des corrélations entre la date de début et la température maximale moyenne (Tableau 5) montrent que pour cinq des six séries (sauf RHY) la corrélation est autant

plus importante que le nombre de jours est élevé. Tandis que, pour la série des données simulées par HYDROTEL (RHY) plus le nombre de jours est important plus la corrélation est faible.

La corrélation entre le volume de crue et la somme cumulée des précipitations entre 15 décembre et le 15 mars (Tableau 6) est entre 0.3 et 0.5 pour la majorité des séries. La seule exception est celle de la série SHYF qui donne une valeur faible de corrélation.

3.3 Étude de stationnarité

Dans le but d'étudier la stationnarité de chacune des séries considérées, le test de Mann-Kendall a été appliqué sur les 63 séries (9 caractéristiques x 7 séries présentées dans le tableau 1). Si une série est jugée non stationnaire par le test de Mann-Kendall alors on applique, sur cette série, le test de Mann-Kendall modifié (Yue et Wang, 2002). Le test de Mann-Kendall modifié prend en compte la structure d'auto-corrélation de la série. Le tableau 7 ne présente que les séries non stationnaires selon le premier test. Il en résulte que, parmi les 63 séries étudiées, deux sont effectivement non-stationnaires : RHS et SHSF pour la pointe de la crue automnale. Pour chacune des séries non-stationnaires, on détermine la tendance associée. À cette fin, la méthode de régression polynomiale de premier ordre a été utilisée. La figure 6 présente les quatre séries non stationnaires ainsi que leurs droites des tendances. On remarque que les deux tendances trouvées sont croissantes. Les deux tendances de la pointe automnale sont plus fortes que celles de la forme de l'hydrogramme. Les deux séries proviennent des simulations par HSAMI, ce qui implique que ce modèle crée des tendances de la pointe automnale qui ne sont ni observées dans les séries historiques ni dans les séries simulées par HYDROTEL. Ces résultats peuvent être expliqué par le fait que HSAMI et un modèle de type

« météo-apport » et qui utilise des équations empiriques pour déterminer les apports en fonction des données météorologiques (Bisson et Roberge, 1983).

3.4 Analyse Bayésienne des points de rupture

Pour examiner l'existence des points de rupture dans les séries de caractéristiques, nous avons utilisé la méthode Bayésienne développée par Seidou et Ouarda (2007). Cette méthode détermine aussi bien le nombre des points de rupture que leurs emplacements ainsi que les tendances dans chacun des segments. Elle est appliquée sur les 63 séries des caractéristiques de crue. Six séries ont été identifiées avec un point de rupture. Il s'agit des séries : SHSF et SHYF pour la durée, RHY pour le volume, SHS et SHY pour la forme de l'hydrogramme, et DH pour la pointe de la crue automnale.

On remarque que sur la période de référence, les points de rupture sont enregistrés autour de la période de 1985-1990. L'analyse des hydrogrammes superposés montre que la période qui suit l'année 1985 est une période caractérisée par un apport hydrologique printanier faible. De plus, deux séries de durée (SHSF et SHYF) présentent un point de rupture en 2056. À partir de la figure 7 on conclut que l'amplitude de la rupture est très légère et causée, dans le cas de la série SHYF, par une valeur exceptionnelle enregistrée en 2055.

3.5 Analyse multivariée

Pour approfondir l'étude des caractéristiques de crue, les trois principales caractéristiques (la pointe *(Q_p)*, le volume *(V)* et la durée *(D)*) sont étudiées dans un contexte de modélisation multivarié. La copule est utilisée pour décrire la dépendance entre des variables aléatoires. Elle est indépendante des lois marginales. Par conséquent, les lois marginales peuvent appartenir à des classes de distribution différentes. La modélisation

fréquentielle dans le cadre multivarié se décompose en deux ajustements : un ajustement des lois marginales pour chaque variable et l'ajustement de la structure de dépendance entre les variables à travers les copules.

3.5.1 Ajustement des lois marginales

Pour déterminer les lois marginales les plus appropriées de la pointe, du volume et de la durée, nous avons utilisé le logiciel HYFRAN (Chaire en hydrologie statistique, 2002). HYFRAN permet d'ajuster les 15 lois de probabilité les plus utilisées en hydrologie. Les résultats sont présentés dans le tableau 8. Dans ce tableau, α représente le paramètre de position pour les lois : Gumbel, Weibull, des fuites, GEV et Log-Normale à deux paramètres et le paramètre de forme pour les lois : Gamma et Halphen de type B. Tandis que β représente le paramètre d'échelle pour les lois : Gumbel, Gamma, Weibull, GEV, Log-Normale à deux paramètres et Halphen de type B et le paramètre de forme pour la loi des fuites. Enfin, σ représente le paramètre de forme pour la loi GEV et Halphen de type B.

On remarque que plusieurs lois ajustent les séries en question et on ne peut pas tirer une conclusion générale sur l'ajustement d'une loi sur une caractéristique donnée.

3.5.2 Copule 2D

Une copule est une fonction de répartition C à p dimensions ($p \geq 2$) dont chacune des marges est uniforme sur l'intervalle [0, 1]. Étant donné une telle copule, on peut construire une loi multivariée F de marges $F_{X_1},..,F_{X_p}$ en posant

$$F(x_1,..,x_p) = C(F_{X_1}(x_1),..,F_{X_p}(x_p)) \qquad x_1,..,x_p \in IR \tag{5}$$

Il existe plusieurs familles de copules pour modéliser les structures de dépendance entre plusieurs variables. La classe des copules archimédiennes, introduite par Genest et MacKay (1986), est celle qui est le plus utilisée en hydrologie.

On dit qu'une copule C à p dimensions est archimédienne s'il existe une fonction continue $\varphi : [0, 1] \rightarrow [0, \infty]$ strictement décroissante satisfaisant la condition $\varphi(1) = 0$ telle que :

$$C_p(u_1,..,u_p) = \varphi^{-1}(\varphi(u_1) + .. + \varphi(u_p)) \qquad (6)$$

où φ^{-1} représente l'inverse du générateur φ.

Les classes les plus communes de copules archimédiennes sont les copules de *Gumbel*, de *Frank* et de *Clayton* qui sont utilisés dans la présente étude. Le test d'adéquation utilisé est le test graphique proposé par Genest et Rivest (1993).

Les résultats de l'ajustement sont présentés dans le tableau 9. On remarque que la copule de Gumbel modélise mieux le couple pointe-volume tandis que celle de Clayton modélise mieux le couple volume-durée. Ces résultats peuvent être utiles dans l'analyse fréquentielles des crues.

4. Conclusions

La présente étude s'est intéressée à l'évaluation et à la comparaison des caractéristiques des crues dans un contexte de CC en se basant sur des données de débits historiques, des données des réanalyses et des données des simulations à l'horizon 2050. Les données de débits sont simulés avec les modèles hydrologiques HSAMI (e.g. Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000) et HYDROTEL (e.g. Fortin *et al.*, 1995) alimentés à partir des

données météorologiques provenant de MRCC 4.x (e.g. Music et Caya, 2007 et Brochu et Laprise, 2007), piloté par les résultats des réanalyses (ERA40 : e.g. ECMWF, 2009) et du MCCG3 (e.g. Scinocca *et al.*, 2008). Après avoir évalué et présenté les différentes caractéristiques de crues associées aux séries de données considérées, une étude statistique a été réalisée. Cette étude comporte une analyse descriptive de chacune des caractéristiques, une étude des différentes corrélations, analyse de stationnarité, détection de points de rupture et une analyse fréquentielle multivariée des principales caractéristiques.

L'analyse des caractéristiques des crues futures montre que ces crues pourraient commencer plutôt et finir plus tard que celles observées et pourraient avoir des débits de pointe, des volumes et des taux de montées plus faibles. Les séries des caractéristiques des crues simulées par HYDROTEL possèdent une variance plus importante que celles simulées par HSAMI. Les corrélations observées entre les séries de caractéristiques observées sont conservées tant pour les séries des caractéristiques issues de réanalyses que pour celles issues de MCCG3. La majorité des séries des caractéristiques étudiées sont stationnaires. La méthode Bayésienne de détection des points de rupture a montré que huit des séries étudiées possèdent un point de rupture. Six de ces points de rupture sont dans la période 1985-1990. Pour toutes les séries étudiées, l'analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue montre que la copule de Gumbel convient mieux au couple pointe-volume. Tandis que la copule de Clayton convient mieux pour le couple volume-durée.

Malgré que dans le présent travail la plupart des caractéristiques de crue ont été considérés et l'étude a été réalisée à divers niveaux, certains éléments ne sont pas traités

et méritent d'être considérés. En effet, l'utilisation d'autres scénarios climatiques futurs et modèles hydrologiques peut clarifier les effets anticipés des CC sur les caractéristiques des crues. De plus, l'utilisation d'une moyenne mobile permettrait d'évaluer les effets des CC en fonction du temps. Enfin, les copules trivariées peuvent être utilisées pour modéliser les dépendances entre le débit de pointe, le volume et la durée.

Remerciements

Les auteurs remercient Hydro-Québec et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier.

Références

Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. et Lindström, G. (2004). Hydrological change-climate change impact simulations for Sweden. *Ambio*, 33(4-5): 228-234.

Arnell, N.W. (1999). *Climate* change and global water resources. *Global Environnemental change*, 9: S31-S49.

Assani, A.A., Lajoie, F., Vadnais, M.-E. et Beauchamp, G. (2008). Influence of the Arctic oscillation on the internannual variability of precipitation in the Saint-François river watershed (Québec, Canada) as determined by canonical correlation analysis. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(1) : 21-33.

Batternett, T.P., Adam, J.C. et Lettenmaier, D.P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature,* 438(7066): p. 303.

Beldring, B.S., Engen-Skaugen, T., Forland, E.J. et Roald, L.A. (2008). Climate change impacts on hydrological processes in Norway based on two methods for transferring regional climate model results to meteorological station sites. *Tellus*, 60(A) : 439-450.

Ben Aissia, M.A., Chebana, F., Ouarda, T.B.M.J., Roy, L., Desrochers, G., Chartier, I. et Robichaud, É. (2009). Analyse et comparaison des caractéristiques des crues historiques, résultats des réanalyses et simulées dans un contexte de changement climatique. *Rapport de recherche*, R-1074 INRS-ETE, Québec, Canada.

Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A. et Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden-assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modeling. *Climate Research*, 16: 101-112.

Bisson, J.L. et Roberge, F. (1983). Prévision des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. *Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit*, Toronto, novembre 1983.

Brochu, R., et Laprise, R. (2007). Surface Water and Energy Budgets over the Mississippi and Columbia River Basins as Simulated by Two Generations of the Canadian Regional Climate Model. *Atmosphere.-Ocean*, vol. 45(1), pp. 19-35.

Bourque, A. et Simonet, G. (2008). « Québec » dans vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007, Lemmen, F.J. Warren, J.Lacroix et Bush, E. (éditeurs), *Gouvernement du Canada*, Ottawa (Ontario), pp. 171-226.

Bruce, J., Burton, I., Martin, H., Mills, B. et Mortsch, L. (2000). Le secteur eau : vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques. Document de travail pour les ateliers régionaux préparé avec l'appui du Fonds d'action pour le changement climatique. *Ressources naturelles Canada.*

Chaire en hydrologie statistique (2002). HYFRAN. *Rapport technique*, INRS-ETE. Logiciel pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, version 1.1.

Chartier, I. (2006). Influence du modèle hydrologique sur la modélisation des apports dans une perspective de changement climatique : une application sur le bassin versant Baskatong. L'association canadienne des barrages. *Conférence annuelle*, Quebec. Octobre 2006.

Chow, V. T., Maidment, D. R., et Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, New York.

Ciepielowski, A. (1987). Statistical methods of determining typical winter and summer hydrographs for engaged watersheds. *Flood hydrology*, V. P. Singh, ed., Reidel, Dordrecht, The Netherlands, pp. 117– 124.

Corder, G.W. et Foreman, D.I. (2009). *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*.

Croley, T.E. (2003). Great Lakes Climate Change Hydrologic Assessment, I.J.C. Lake Ontario-St-Lawrence River Regulation Study, *National Oceanic and Atmospheric Administration*, Technical Memorandum GLERL-126, 2003.

Cunderlik, J.M., Ouarda, T.B.M.J., (2006). Regional flood-duration-frequency modeling in the changing environment. *Journal of Hydrology* 318 (1-4): 276-291.

Dankers, R. et Christensen, O. B. (2005). Climate change impact on snow coverage, evaporation and river discharge in the sub-arctic Tana Basin, Northern Fennoscandia. *Climate change*, 69(2-3): 367-392.

D'Arcy, P., Bibeault, J.-F. et Raffa, R. (2005). Changements climatiques et transport maritime sur le Saint-Laurent. Étude exploratoire d'options d'adaptation. Réalisé pour le Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent. 140 p.

Del Degan, M. *et al.*, (2001). Plan de développement intégré de la rivière Gatineau, Tome 1 : Connaissance du territoire. Québec, Rapport remis à la Société d'exploitation et d'aménagement de la rivière Gatineau (SEARG) 139 p. et annexes.

Déry, S.J., Stieglitz, M., McKenna, E.C. et Wood, E.F. (2005). Characteristics and trends of river discharge into Hudson, James, and Ungava Bays, 1964-2000. *Journal of Climate*, 18(14): 2540-2557.

Dibike, Y.B. et Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed Comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of hydrology*, 307 : 145-163.

Doré, I., Desrochers, G.-É., Roy, R. et Chaumont, D. (2006). Les effets anticipés des changements climatiques sur les caractéristiques de crues - application à la rivière Moisie. L'association canadienne des barrages. *Conférence annuelle*, Quebec. Octobre 2006.

ECMWF, (2009). Centre européen de prévision météorologique à moyen terme. http://www.ecmwf.int/.

EEA (2008). Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. *EEA Report.* No. 4/2008.

Environnement Canada, (1997). L'étude pan-canadienne, Tom V: Impacts et adaptation à la variabilité et au chagement du climat au Québec.

Fagherazzi, L., Guay, R. et Sassi, T. (2005). Climate change analysis of the Ottawa river system, rapport remis à la commission mixte international –Lake Ontario–St. *Lawrence river study on discharge regulation*, 72 p.

Fortin, J.P., R. Moussa, C. Bocquillon et J.P. Villeneuve (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau*, 8(1): 97-124.

Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application, *Rapport de recherche*, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.

Fortin, L.G., Turcotte, R., Plugin, S., Cyr, J.F. et Picard, F. (2007). Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aymer au Sud de Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8): 934-945.

Genest, C. et Mackay, R.J. (1986). Copule archimédiennes et familles de lois bidimensionnelles dont les marges sont données. *La revue canadienne de statistique*, 14: 145-159.

Genest, C. et Rivest, L-P. (1993). Statistical inference procedures for bivariate Archimedean copulas. *Journal of the American Statistical Association*, 88: 216-225.

Graham, L.P., Andréasson, J. et Carlsson, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - A case study on the Lule River basin. *Climate change*, 81: 293-307.

Groleau, A., Mailhot, A. et Talbot, G. (2007).Trend analysis of winter rainfall over southern Québec and New Brunswick (Canada). *Atmosphere - Ocean* 45(3): 153-162

Guay, R., Mathieu, C., Fagherazzi, L., Tremblay, D., Desrochers, G. et Sassi T. (2004). Analyse d'impacts des changements climatiques sur la rivière des Outaouais. *1er Symposium Ouranos sur les changements climatiques 9-10 juin 2004* http://www.ouranos.ca/symposium/resume_PDF/Guay.pdf [consultation: Novembre 2008].

Haktanir, T., and Sezen, N. (1990). Suitability of two-parameter gamma and three-parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in Anatolia. *Hydrological Science Journal*, 35(2): 167–184.

Javelle, P., Ouarda, T.B.M.J., Lang, M. Bobée, B., Galéa, G. et Grésillon, J.-M. (2002). Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method. *Journal of Hydrology,* 258: 249-259.

Jones, N.K. (2008). On the impact of recent climate change on seasonal Floods - A case study from a River Basin in Southern Quebec. *Canadian water resources journal,* 33(1): 55-72.

Kanji, G.K. (1993). *100 statistical tests*. Sage Publications, London, Thousand Oaks, New Delhi. 216 p.

Kim, T., Valdés, J.B. et Yoo, C. (2003). Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid region, *ASCE Journal of hydrologic Engineering*. 8: 237-246.

Lefaivre, D. (2005). Effet des changements climatiques sur les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec. Projections pour les années 2050, rapport préparé pour la comité de concentration navigation plan d'action Saint-Laurent phase 4, Institut Maurice Lamontagne, Direction des sciences océaniques, 2005, 34 p.

Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T. et Kaspar, F.(2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe : A continental, integrated analysis. *Climate change*, 75: 273-299.

Lofgren, B.M., Quinn, F.H., Clites, A. H., Assel, R. A., Eberhartd, A. J. et Luukkonnen, C. L. (2002). Evaluation of Potential Impacts on Great Lakes Water Resources Based on Climate Scenarios of Two GCMs, *International Association of Great Lakes Residents*. 28(4): 537–554.

Lorrain, K. (2007). Analyse des apports horizon 2050 pour les bassins Churchill Falls, Manic-5 et Caniapiscau, *Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure, Montréal* 6 juillet 2007.

Mareuil, A. (2005). Impact des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay. *Mémoire présentée à l'école de technologie supérieure, Montréal,* 27 juin 2005.

Mareuil, A., Leconte, R., Brissette, F. et Minville, M. (2007). Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Châteauguay River basin, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34: 1048-1060.

Météoglobe Canada (1989). Conséquence des scénarios de changement climatique sur les infrastructures liées à la production d'hydro-électricité au Québec, Préparé pour le Service de l'environnement atmosphérique, *Environnement Canada,* 147 p.

Milly, P.C.D, Dunne, K.A. et Vecchia. A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature,* 438 (7066): 347.

Minville. M., Brisette, F. et Leconte, R. (2006a). Évaluation des impacts hydrologiques des changements climatiques au bassin versant de la rivière Péribonka (Québec). *Conférence de l'Institut canadien des ingénieurs (ICI), Ottawa, Ontario*. Mai, 2006.

Minville. M., Brisette, F. et Leconte, R. (2006b). Évaluation des impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de deux bassins versants québécois. *Conférence annuelle de l'Association francophone pour le savoir (ACFAS)*, Montréal, Québec. Mai, 2006.

Minville. M., Brisette, 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.

Morin, G., et Slivitzky, M. (1992). Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique de la rivière Moisie. *Revue des sciences de l'eau,* 5(2): 179-195.

Mortsch, L.D. et Quinn, F.H. (1996). Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies, *Limnology and oceanography*, 41(5): 903-911.

Mortsch, L.D., Hengeveld, H., Lister, M., Lofgren, B., Quinn, F., Slivitzky, M. et Wenger, L. (2000). Climate change impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System. *Canadian water resources journal*, 25(2): 153-179.

Moulton, R. J. et Cuthbert, D. R. (2000). «Cumulative impacts/risk assessment of water removal loss from the Great Lakes – St. Lawrence River system». *Canadian Water Resources Journal*, 25(2): 181-208.

Music, B., and D. Caya, 2007: Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). J. Hydromet*.,* 8(5), 969-988.

Nezhikhovsky, R. A. (1971). Channel network of the basin and runoff formation, *Hydro meteorological*, Leningrad, Russia.

OMM., (2009). Organisation météorologique mondiale, http://www.wmo.int/pages/index_fr.html.

Ouarda, T.B.M.J., Rasmussen, P.F., Cantin, J.-F., Bobée, B., Laurence, R., Hoang, V.D. et Barabé, G. (1999). Identification of a hydrometric data network for the study of climate change over the province of Quebec [Identification d'un reseau hydrometrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Quebec]. Revue des sciences de l'eau, 12(2): 425-448.

Pacher, G.W. (2006). Détermination objective des paramètres des hydrogrammes.(Note personnelle).

Pilgrim, D. H., et Cordery, I. (1993). *Flood runoff. Handbook of hydrology*, D. R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York.

Roy, L., Leconte, R., Brissette, F.P. et Marche, C. (2001). The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec river basin. *Hydrological processes*, 15: 3167-3179.

Saint-Laurent, D., Mesfioui, M. et Even, G. (2009). Hydroclimatic variability and relation with flood events (Southern Québec, Canada). *Water Resources*, 36(1): 43-56.

Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Lazare, M. Li, J. et Plummer, D. (2008). The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and* Physics Discussions. 8-2 7883-7930.

Seidou, O., Asselin, J.J. et Ouarda, T.B.M.J. (2007). Bayesian multivariate linear regression with application to change point models in hydrometeorological variables. *Water Resources Research* 43(8): doi: 10.1029/2005WR004835.

Seidou, O. et Ouarda, T.B.M.J. (2007). Recursion-based multiple change-point detection in multiple linear regression and application to river stream flows. *Water Resources Research*, 43, W07404, doi:10.1029/2006WR005021, 2007.

Singh B. (1987). Prospectives d'un changement climatique dû à un doublement de CO2 atmosphérique pour les ressources naturelles du Québec, Rapport préparé pour le service de l'Environnement atmosphérique (région du Québec). *Environnement Canada*. 291 p.

Snyder, F. F. (1938). Synthetic unit-graphs. *Trans., Am. Geophys.Union*, 19, 447–454.

U.S. Soil Conservation Service US-SCS (1985). *National Engineering Handbook*, chap. Hydrology, U.S. Dep. of Agricul., Washington, D. C.

Vescovi, L., Cyr, J-F., Turcotte, R., Fortin, L-G., Ludwig, R., Braun, M. et May, I. (2008). Rapport final du projet intitulé : « Adaptation et inter comparaison d'outils québécois et bavarois de gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques » (AQAGI). 148 p.

Warren, F. J. (2004). Climate change impacts and adaptation program: a Canadian perspective. *Ressources naturelles Canada*, 201 p.

Young, W.J., Cuddy, S.M., Marston, F.M. et Farley, T.F.N. (1999) Environmental flows decision support system. Volume 1: system description. *CSIRO Land & Water Technical Report* N°11/99, April 1999.

Yue, S., Ouarda. T.B.M.J., Bobée, B., Legendre, P. et Bruneau, P. (1999). The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of hydrology,* 226: 88–100.

Yue, S., Ouarda, T. B. M. J., Bobée, B., Legendre, P., et Bruneau, P. (2002). Approach for Describing Statistical Properties of Flood Hydrograph. *Journal of hydrologic engineering,* 7(2): 147-153.

Yue, S. et Wang, C.Y. (2002). Applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water resources research*, 38(6) : 1068, doi:10.1029/2001WR000861.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Séries de données utilisées 57

Tableau 2: Statistiques descriptives des séries des caractéristiques de crues 58

Tableau 3 : Corrélations entre les différentes caractéristiques de crue 59

Tableau 4: Corrélations entre séries historiques et simulées 59

Tableau 5 : Corrélation entre la date de début et la température maximale moyenne. 60

Tableau 6 : Corrélation entre le volume de la crue et la somme des précipitations entre le 15 décembre et le 15 mars 60

Tableau 7 : Analyse de la stationnarité des caractéristiques de crue 60

Tableau 8 : Paramètres des lois marginales des séries de débit de pointe, volume et durée 61

Tableau 9 : Copules bivariées retenues pour pointe-volume et volume-durée 61

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant de la rivière Baskatong..... 62

Figure 2: Représentation des différentes séries de débit : observés, obtenu par réanalyses et obtenu par MCCG3 : (a) période de référence (b) période future et (c) toutes les données disponibles.....63

Figure 3 : Schéma illustrant les différentes caractéristiques d'un hydrogramme. 64

Figure 4 : Schéma illustrant les trois types de formes d'hydrogramme : (a) asymétrie positive; (b) symétrique; (c) asymétrie négative. 65

Figure 5: Diagramme en Hamac des séries des caractéristiques de crue. (a) : date de début, (B) : date de fin, (c) : durée, (d) : débit de pointe, (e) : date de pointe, (f) : volume, (g) : coefficient d'asymétrie, (h) : taux de montée et (i) : pointe automnale 66

Figure 6: Caractéristiques des crues non stationnaires et les tendances associées (a) RHS et (b) SHSF.....67

Figure 7: Différents points de rupture enregistrés 67

Les Tableaux

Tableau 1 : Séries de données utilisées

Série de débit	Modèle hydrologique	MCG	Période	Notation
Observé	-	-	Référence	DH
Simulé	HSAMI	ERA40	Référence	RHS
		MCCG3	Référence	SHS
			Future	SHSF
	HYDROTEL	ERA40	Référence	RHY
		MCCG3	Référence	SHY
			Future	SHYF

DH : **D**onnées **H**istoriques.

RHS : Simulées avec **HS**AMI à partir des résultats du MRCC piloté par les **R**éanalyses ERA40.

SHS : Simulées avec **HS**AMI à partir des résultats du MRCC piloté par les **S**imulations de MCCG3 sur la période de référence.

SHSF : Simulées avec **HS**AMI à partir des résultats du MRCC piloté par les **S**imulations de MCCG3 sur la période **F**uture.

RHY : Simulées avec **HY**DROTEL à partir des résultats du MRCC piloté par les **R**éanalyses ERA40.

SHY : Simulées avec **HY**DROTEL à partir des résultats du MRCC piloté par les **S**imulations de MCCG3 sur la période de référence.

SHYF : Simulées avec **HHY**DROTEL à partir des résultats du MRCC piloté par les **S**imulations de MCCG3 sur la période **F**uture.

Tableau 2: Statistiques descriptives des séries des caractéristiques de crues

	Séries	DH	RHS	RHY	SHS	SHY	SHSF	SHYF
Date de début	Moyenne	99	100	98	106	108	93	97
	Médiane	100	99	108	93	100	109	97
	Variance	91	123	146	151	86	167	220
	Valeur minimale	80	76	71	81	91	66	57
	Valeur maximale	115	118	120	130	125	117	128
Date de fin	Moyenne	143	150	146	149	160	143	159
	Médiane	144	149	151	145	145	160	158
	Variance	99	64	112	83	114	170	254
	Valeur minimale	116	130	123	128	146	114	113
	Valeur maximale	161	163	166	168	187	163	195
Durée	Moyenne	44	50	47	43	53	50	62
	Médiane	43	49	42	50	46	52	57
	Variance	133	55	180	148	232	155	314
	Valeur minimale	22	36	25	27	28	25	38
	Valeur maximale	66	65	85	81	79	81	125
Débit de pointe	Moyenne	1282	1169	1094	991	774	979	740
	Médiane	1149	1098	897	886	1011	668	648
	Variance	124820	45565	92538	77512	118980	83552	74343
	Valeur minimale	672	761	567	459	230	326	268
	Valeur maximale	2211	1576	1680	1678	1765	1641	1599
Date de pointe	Moyenne	117	119	117	119	134	108	118
	Médiane	119	121	122	109	117	135	116
	Variance	172	137	237	189	211	190	439
	Valeur minimale	91	91	75	90	99	76	76
	Valeur maximale	138	141	142	146	166	130	169
Volume	Moyenne	3101	3389	2535	2400	2016	2522	2216
	Médiane	3022	3147	2447	2487	2479	1844	2188
	Variance	585050	477310	487110	288440	485740	605370	663650
	Valeur minimale	1565	2415	1472	1053	953	1226	881
	Valeur maximale	5147	5105	3888	3175	4081	4321	3963
Coefficient d'asymétrie	Moyenne	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	0,9	1,0
	Médiane	1,1	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0
	Variance	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04
	Valeur minimale	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,5
	Valeur maximale	1,2	1,1	1,6	1,2	1,5	1,1	1,3
Taux de montée	Moyenne	25	21	23	28	28	10	14
	Médiane	27	21	24	26	30	9	13
	Variance	74	47	22	58	97	14	13
	Valeur minimale	7	9	12	15	9	3	8
	Valeur maximale	39	32	31	44	45	18	21
Pointe automnale	Moyenne	550	397	540	329	480	440	595
	Médiane	512	369	316	404	499	444	493
	Variance	68406	14801	32707	12892	16090	33967	79649
	Valeur minimale	204	182	275	172	301	196	262
	Valeur maximale	1402	655	1046	636	855	916	1453

Tableau 3 : Corrélations entre les différentes caractéristiques de crue

	D		*Q_p*		*V*	
d_s	-0.57		0.30		-0.03	
	-0.69	-0.66	0.33	0.22	0.06	-0.16
	-0.72	-0.72	0.58	0.39	0.14	-0.11
	-0.47	-0.53	0.11	-0.18	-0.13	-0.45
D	1		-0.28		0.46	
			-0.14	-0.38	0.32	0.46
			-0.46	-0.51	0.17	0.27
			-0.28	-0.15	0.36	0.60
Q_p	DH		1		0.61	
	RHS	RHY			0.68	0.44
	SHS	SHY			0.70	0.57
	SHSF	SHYF			0.68	0.55

Tableau 4: Corrélations entre séries historiques et simulées

	RHS		*RHY*		*SHS*		*SHY*		*SHSF*		*SHYF*	
DH	0.84	0.59	0.79	0.37	0.21	-0.07	0.12	-0.03	0.00	-0.13	-0.02	-0.17
	0.47	0.59	0.36	0.49	-0.02	-0.12	0.00	-0.03	0.10	-0.01	0.20	-0.21
RHS	1		0.95	0.85	0.13	0.15	0.04	-0.04	-0.03	-0.17	-0.18	-0.31
			0.69	0.88	0.23	0.21	0.38	0.08	0.26	-0.05	0.14	-0.04
RHY			1		0.10	0.15	-0.02	-0.09	-0.01	-0.13	-0.16	-0.20
					0.12	0.18	0.29	-0.05	0.31	-0.04	0.24	-0.02
SHS					1		0.91	0.53	-0.05	-0.23	0.05	-0.11
							0.86	0.56	0.24	0.17	0.19	0.13
SHY			d_s	D			1		-0.23	-0.13	-0.04	-0.17
			Q_p	V					0.21	-0.12	0.18	0.00
SHSF									1		0.73	0.31
											0.80	0.70

Tableau 5 : Corrélation entre la date de début et la température maximale moyenne.

Séries	Tmax(7jours)	Tmax(10jours)	Tmax(14jours)
RHS	0.26	0.37	0.54
SHS	0.44	0.59	0.69
SHSF	0.33	0.41	0.53
RHY	0.38	0.36	0.18
SHY	0.28	0.39	0.44
SHYF	0.33	0.39	0.44

Tableau 6 : Corrélation entre le volume de la crue et la somme des précipitations entre le 15 décembre et le 15 mars

Séries	Corrélation
RHS	0.42
SHS	0.31
SHSF	0.51
RHY	0.37
SHY	0.41
SHYF	0.17

Tableau 7 : Analyse de la stationnarité des caractéristiques de crue

		Mann-Kendall			Mann-Kendall modifié		
Caractéristique	Série	K	p-valeur	Conclusion	K	p-valeur	Conclusion
Taux de montée	DH	2.29	0.02	1	1.07	0.28	0
	RHS	2.56	0.01	1	1.50	0.13	0
	RHY	2.65	0.01	1	0.46	0.64	0
	SHSF	3.11	0.00	1	1.54	0.12	0
Pointe automnale	RHS	2.51	0.01	1	2.45	0.01	1
	SHSF	2.85	0.00	1	2	0.05	1

Tableau 8 : Paramètres des lois marginales des séries de débit de pointe, volume et durée

Caractéristique	*Série*	*Lois marginales*	*Paramètres*		
			α	β	σ
Q_p	HD	Gumbel	1123.0	275.5	
	RHS	Gamma	30.7	38.0	
	RHY	Weibull	4.1	1206.6	
	SHS	des Fuites	38.0	26.1	
	SHY	des Fuites	73.4	12.6	
	SHSF	des Fuites	42.6	23.0	
	SHYF	Gamma	8.0	96.0	
V	HD	Gamma	17.0	182.6	
	RHS	Gumbel	3077.6	538.7	
	RHY	Log-Normale à deux paramètres	606.1	0.7	
	SHS	Généralisée des Valeurs Extrêmes	2314.1	7.8	0.3
	SHY	Gumbel	1701.3	543.4	
	SHSF	des Fuites	116.6	21.6	
	SHYF	Gamma	7.4	298	
D	HD	des Fuites	1.5	30.1	
	RHS	Halphen de type B	49.4	2.0	14.71
	RHY	Gamma	12.7	3.7	
	SHS	Gumbel	37.9	8.8	
	SHY	Gamma	11.9	4.4	
	SHSF	Gamma	16.5	3.0	
	SHYF	Gumbel	54.0	11.6	

Tableau 9 : Copules bivariées retenues pour pointe-volume et volume-durée

	DH	RHS	RHY	SHS	SHY	SHSF	SHYF
Pointe-Volume	Gumbel	Gumbel	Fank	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Clayton
Volume-Durée	Clayton	Clayton	Fank	Clayton	Clayton	Gumbel	Gumbel

Les Figures

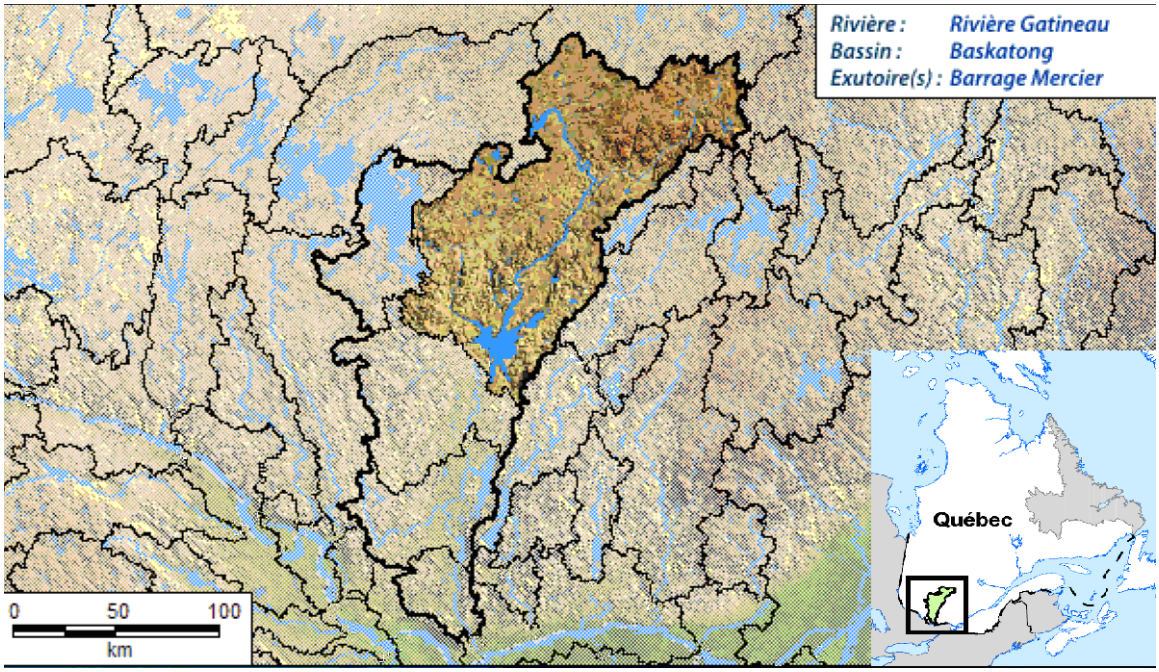

Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant de la rivière Baskatong.

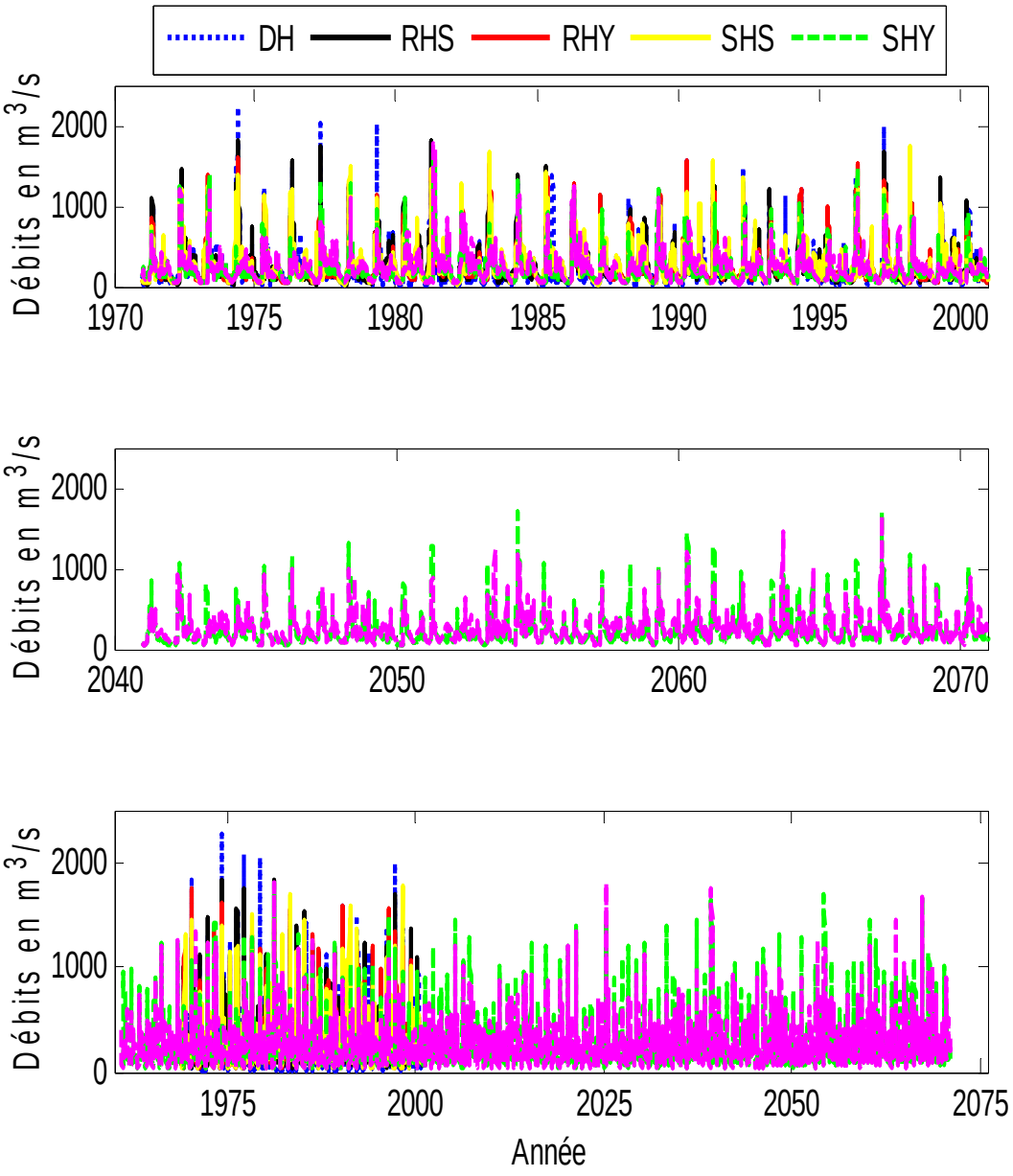

Figure 2: Représentation des différentes séries de débit : observés, obtenu par réanalyses et obtenu par MCCG3 : (a) période de référence (b) période future et (c) toutes les données disponibles

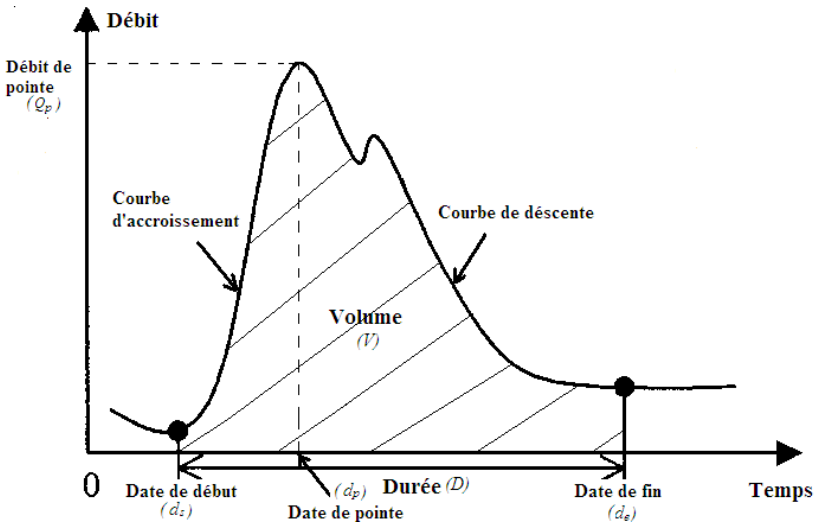

Figure 3 : Schéma illustrant les différentes caractéristiques d'un hydrogramme.

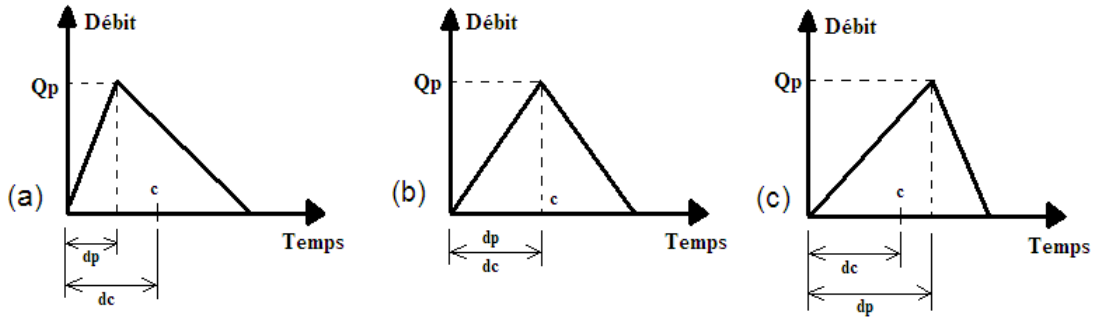

Figure 4 : Schéma illustrant les trois types de formes d'hydrogramme : (a) asymétrie positive; (b) symétrique; (c) asymétrie négative.

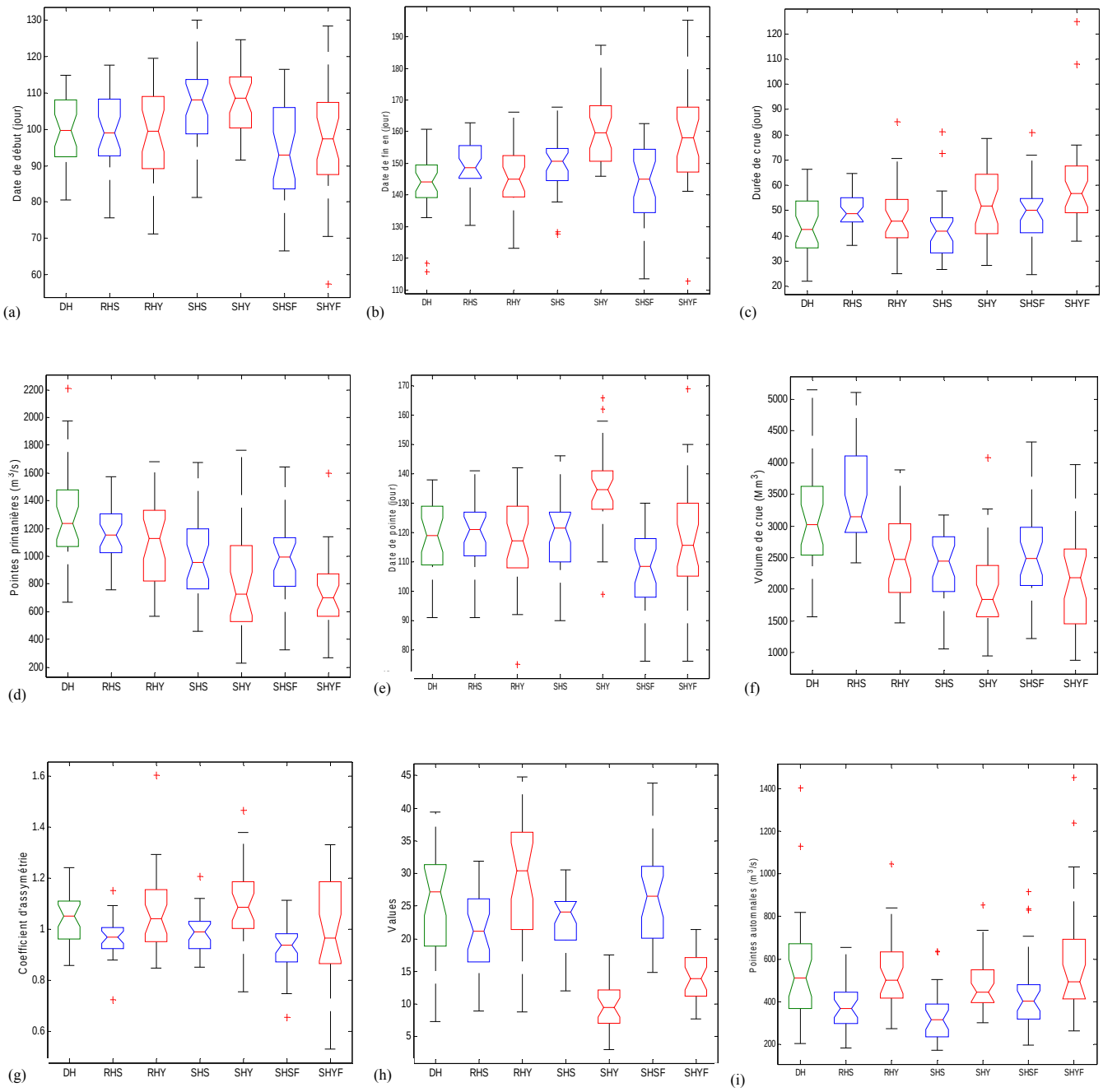

Figure 5: Diagramme en Hamac des séries des caractéristiques de crue. (a) : date de début, (B) : date de fin, (c) : durée, (d) : débit de pointe, (e) : date de pointe, (f) : volume, (g) : coefficient d'asymétrie, (h) : taux de montée et (i) : pointe automnale

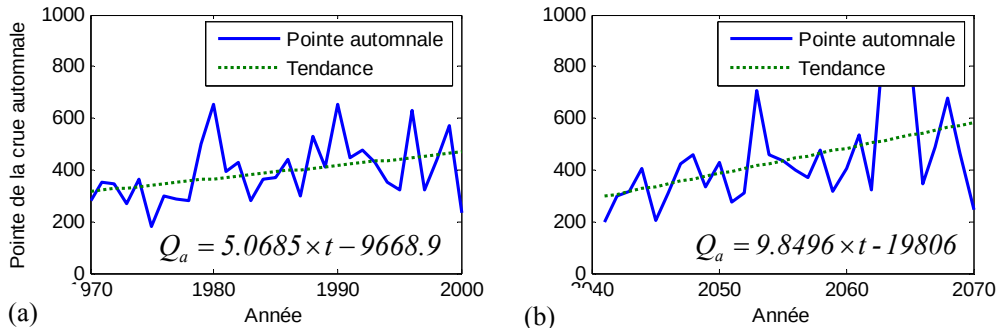

Figure 6: Caractéristiques des crues non stationnaires et les tendances associées (a) RHS et (b) SHSF

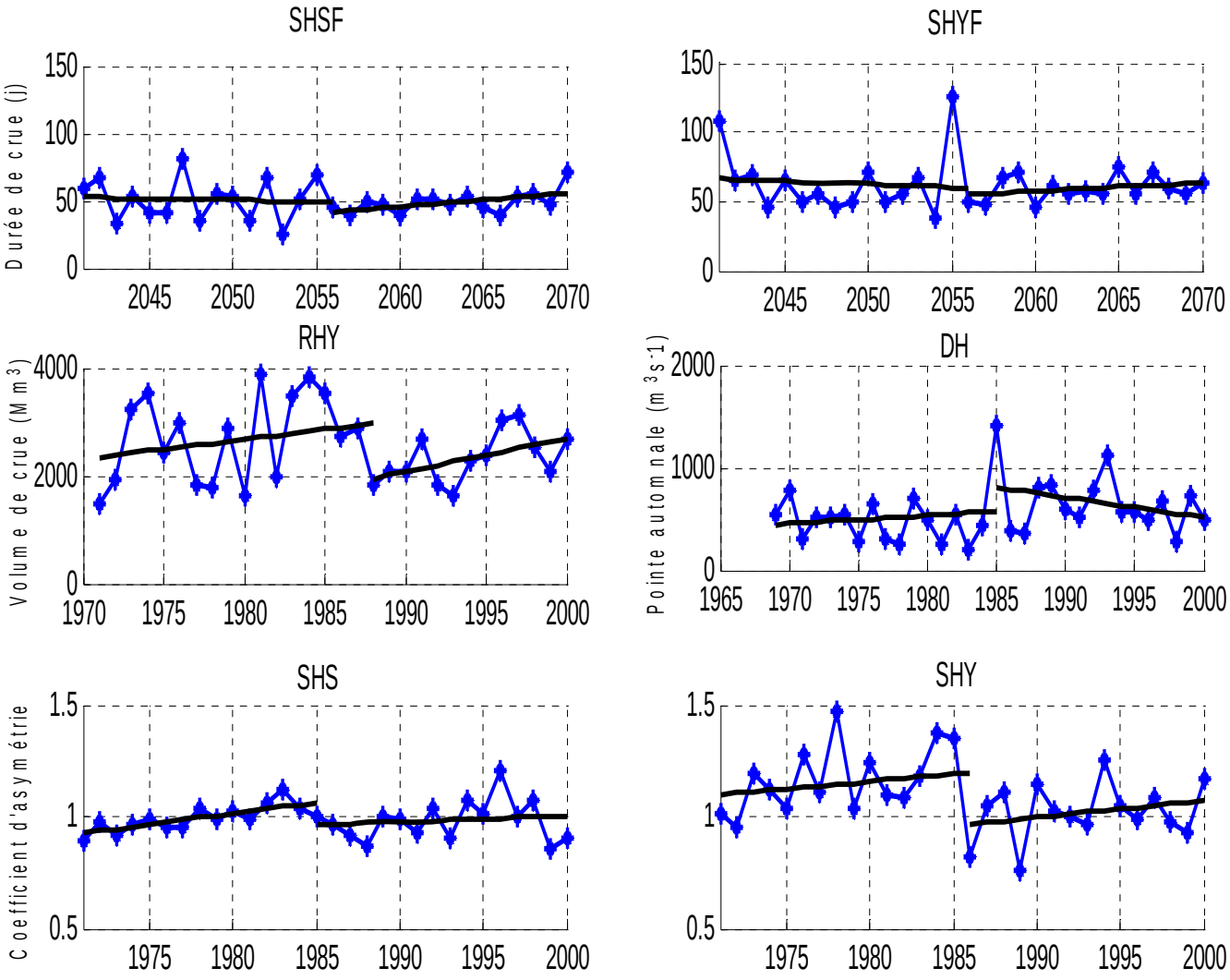

Figure 7: Différents points de rupture enregistrés