

**Développement d'un générateur de climat et application
pour étudier l'effet du changement climatique sur la
distribution des crues extrêmes**

2003-1006

Rapport final

par

**Robert Leconte, ing., Ph.D.
École de technologie supérieure**

**Projet de recherche et développement coopératif CRSNG
(dossier CRDPJ 277868 – 03)**

Partenaires industriels :

**Consortium Ouranos
Hydro-Québec**

Juillet 2007

BRÈVE DESCRIPTION DES OBJECTIFS DU PROJET

Les objectifs du projet, tels qu'énoncés dans la demande de subvention originale, sont :

- a) Génération de scénarios de changement climatique sur quelques bassins versants de 'petite' (1000-2000 km²) et 'moyenne' (> 2000 km²) taille à partir d'un générateur stochastique de climat'. Les scénarios correspondront aux conditions de 2xCO₂ et 3xCO₂, et seront bâtis à partir des données du modèle canadien de circulation générale MCGG1.
- b) Analyse, par modélisation hydrologique, de la distribution des crues extrêmes sous des conditions actuelles et projetées de climat pour deux bassins versants du Québec représentatifs de bassins de petite et moyenne tailles.
- c) Développement d'un logiciel prototype pour produire des scénarios de changement climatique applicable sur des bassins versants de petite et moyenne tailles.

PROGRÈS RÉALISÉS

Plusieurs étudiants gradués et de premier cycle ont participé à différentes facettes du projet. Ces sous-projets sont maintenant présentés, avec les principaux résultats issus des travaux.

1- Algorithmes d'un générateur stochastique de climat.

Un générateur stochastique de climat, appelé WeaGETS a été développé dans le cadre du projet RDC. Le générateur s'inspire du générateur stochastique WGEN. Il simule les processus de précipitation, température minimale et température maximale journaliers. L'occurrence de la précipitation est simulée par une chaîne de Markov du troisième ordre, ce qui ajoute de la 'mémoire' au processus par rapport à WGEN qui ne possède qu'une chaîne du premier ordre. Cet ajout permet de mieux modéliser les périodes prolongées de précipitation ou d'absence de pluie. La quantité de précipitation est simulée en échantillonnant une intensité d'averse à partir d'une loi statistique établie. Deux lois statistiques sont disponibles dans WeaGETS, soient la loi exponentielle et la loi gamma. Par contre, la sous-estimation des précipitations extrêmes que l'on retrouve dans WGEN est corrigée dans WeaGETS par un facteur d'ajustement régional qui est en fait une équation quadratique qui ajuste les précipitations simulées. Deux équations d'ajustement sont nécessaires, une pour les précipitations dont la valeur simulée initiale se trouve sous la valeur d'un percentile de précipitation (65^{ième} ou 85^{ième} tout dépendant de la région géographique considérée) et une au-dessus de ce même percentile. Tout comme dans WGEN, WeaGETS simule les températures maximale et minimale journalières par un modèle autorégressif multivarié du premier ordre. Aucune modification n'a été apportée à cette structure. Par contre, des pistes de recherche ont été explorées pour pallier à certaines lacunes du modèle, comme il sera vu plus loin.

Le modèle de précipitation dans WeaGETS a été validé sur un ensemble de 16 stations météorologiques (14 au Québec et 2 en Colombie Britanniques) représentant un ensemble de régions hydriques (perhumide, humide, semi-aride) et thermiques (mésothermique, microthermique). Deux types de validation ont été effectuées : une validation directe qui consistait à comparer des indices d'extrêmes calculés avec les données climatiques générées et ceux calculés avec les séries climatiques observées. Les indices retenus pour analyse ont été tirés d'un sous-ensemble d'indices recommandés dans le cadre du projet européen STARDEX; une validation indirecte qui consistait à piloter un modèle hydrologique avec l'aide de données climatiques générées et à comparer les résultats obtenus avec les simulations hydrologiques réalisées à partir d'observations climatologiques. Le modèle hydrologique HSAMI ont été utilisé et appliqué au bassin versant de la rivière Châteauguay.

Les différents résultats obtenus sont généralement satisfaisants. Pour l'ensemble des régions analysées et des paramètres étudiés, WeaGETS réussit à relativement bien reproduire les données observées et à améliorer la performance par rapport à WGEN. Toutefois certains aspects de la génération ne semblaient pas encore tout à fait au point. C'est au niveau du caractère saisonnier de la génération des occurrences et des quantités de précipitation qu'une certaine marge d'erreur a pu être remarquée, et plus particulièrement pour l'hiver. Des recherches sont requises afin de comprendre et d'améliorer la performance du générateur pour cette saison. La comparaison sur la base des modélisation hydrologiques a permis de montrer que WeaGETS associé à HSAMI réussissait à bien reproduire de manière raisonnable les durées d'étiages observées, le ruissellement annuel et les débits de pointe printaniers et d'été-automne. De plus, une amélioration de la simulation de ces variables hydrologiques a été notée comparativement aux résultats obtenus par le recours à WGEN. Une sous-estimation des périodes d'étiages les plus longues est notée de même qu'une surestimation des débits de pointe et une plus grande variabilité pour les périodes de retour les plus grandes (au-delà de 50 années).

Au sujet des températures journalières, il a été constaté que WGEN produisait des valeurs de températures maximales journalières inférieures aux températures minimales pour environ 4% des journées simulées. Cette anomalie est attribuable à la nature même du modèle autorégressif, dans lequel les variables normalisées sont modélisées selon une loi de distribution normale. Or, un examen de données observée a révélé que l'hypothèse de la normalité des 'résidus' n'est pas nécessairement valide, particulièrement pour les températures minimales journalières. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de transformer la variable de température en une nouvelle variable aléatoire dont les résidus obéiront à une loi normale. Pour ce faire, nous avons utilisé une transformation de type Box-Cox qui est parfaitement adaptée à ce type de problèmes. Toutefois, bien que des améliorations aient été apportées à la distribution simulée des températures minimales par rapport aux distributions observées, le nombre de jours où $T_{max} < T_{min}$ a augmenté. Des recherches restent à réaliser pour élucider ce problème. La modélisation d'une nouvelle variable aléatoire $DT = T_{max} - T_{min}$ avec l'aide d'une fonction de distribution bornée vers la gauche serait également une avenue à explorer pour régler ce problème.

2- Mise au point d'un logiciel prototype de génération de climat

Un logiciel a été développé pour permettre la génération de scénarios climatiques dans le cadre d'analyses d'impacts des changements climatiques. Le cœur du programme a été codé en langage MATLAB. Cependant, le logiciel dans son ensemble n'a pas besoin que l'usage se procure une licence MATLAB pour fonctionner.

Le logiciel, appelé WeaGETS, permet de générer des séries chronologiques de température et de précipitation journalières au niveau local, soit de la station météorologique, pour un climat actuel et un climat futur. La version remise au partenaire industriel subdivise le territoire québécois en 6 régions au Québec/Labrador : Churchill Falls, Des Cascades, Baie James Ouest, Baie James Est, Côte Nord, et Outaouais. Pour chaque région, des sorties de précipitation et de température (tmin, tmax) mensuelles tirées 6 modèles de circulation générale (MGC) (HADCM3, ECHAM4, CSIRO, CGCM2, CGCM3, CCSRNIES) pour divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont disponibles pour construire les scénarios climatiques en temps futur.

Le logiciel WeaGETS possède trois sous menus principaux : visualisation des données, analyse en climat actuel, analyse en climat futur. L'analyse du climat actuel consiste en deux étapes : le calage du générateur de climat, suivi par la génération des séries proprement dite. L'utilisateur a accès à plusieurs fonctionnalités qui confère une grande flexibilité de modélisation : choix des stations, des paramètres du générateur, de la longueur des séries temporelles et du nombre de séries à générer. Un souci particulier a été apporté à la gestion des fichiers de sorties qui sont produits par le générateur (fichiers de calibration, séries chronologiques climatiques). L'analyse du climat futur se fait en 'perturbant' les séries climatiques observées avec les variations mensuelles moyennes de température et précipitation tirées des scénarios climatiques des MGC qui sont disponibles. L'approche des 'deltas' est présentement employée dans le générateur. Les séries modifiées sont par la suite employées pour reconditionner le générateur (calcul des nouveaux paramètres) pour ultérieurement produire des séries chronologiques représentatives du temps futur. Un guide d'utilisateur accompagne le logiciel prototype.

Finalement, le logiciel prototype a été testé pour s'assurer qu'il n'y ait pas de coquilles. Lors des tests, des scénarios climatiques en temps actuel et futur ont aussi été produits à partir du logiciel pour chacune des 6 régions citées ci-dessus.

3- Approches de mise à l'échelle (downscaling)

La mise à l'échelle, ou 'downscaling', consiste à produire, à partir de scénarios de climat global, des scénarios climatiques à l'échelle régionale. Le passage de l'échelle global à l'échelle régionale est nécessaire puisque la résolution des MGC est très grossière et que les études d'impacts sont typiquement réalisées à l'échelle régionale, par exemple à celle du bassin versant dans le cadre d'analyses hydrologiques. Le présent projet a exploré différentes approches de mise à l'échelle statistique. Le but était de produire une approche qui permettrait de modifier les paramètres du générateur stochastique pour

simuler le climat futur à l'échelle locale, soit de la station météorologique. L'emphase a porté sur la mise à l'échelle de la précipitation.

La recherche a porté sur deux éléments : la mise à l'échelle de la quantité de la précipitation et la mise à l'échelle des probabilités d'occurrence.

Pour la mise à l'échelle des quantités, nous avons décidé d'opter pour une mise à l'échelle des valeurs mensuelles. Deux raisons nous ont guidés dans cette décision : des scénarios climatiques des MCG sont en très grande partie disponibles à l'échelle mensuelle; les succès plutôt mitigés reportés dans la littérature pour la mise à l'échelle des précipitations journalières.

Nous avons développé une méthode inspirée de Widmann et al. (2003, *J. Climate*, **16**, pp. 799-816) basée sur une analyse en composantes principales – L'échelle spatiale considérée dépend de la résolution du jeu d'observations. Elle est ici d'environ 50 km, soit la résolution horizontale du jeu de données CANGRID disponible pour l'analyse.

Le principe de l'approche de Widmann est de déterminer en chaque point de grille (50 km de résolution) un facteur d'échelle saisonnier entre la précipitation simulée par le MCG et la précipitation observée. Ce facteur renferme deux composantes : une composante dite 'statique' calculée sur une période de référence (nous avons employé la période 1961-1990) et une composante dite 'dynamique' dans lequel le prédicteur choisi peut être de type dynamique (vent, géopotentiel, indice de circulation, ...) ou thermodynamique (humidité, température, ...). La composante statique est supposée invariante dans le temps (climat actuel ou climat futur) et reflète essentiellement des caractéristiques constantes telles la topographie, qui influencent le climat à l'échelle régionale. La composante dynamique est un facteur météorologique qui varie dans le temps et qui se superpose aux effets statiques pour influencer le climat régional. Les prédicteurs dynamiques/thermodynamiques sont tirés d'un MCG en mode climat actuel et climat futur.

Afin d'optimiser les résultats nous avons décidé de prendre le meilleur prédicteur saisonnier en chaque point de grille parmi un choix de 5 variables météorologiques disponibles prises à différents niveaux: la hauteur géopotentielle et la température de l'air à 1000, 850 et 500 hPa, les 2 composantes du vent horizontal à 850, 500 et 200 hPa et l'indice de tourbillon à 1000 hPa (cet indice est calculé à partir de la pression au niveau de la mer). Le choix se fait en fonction de la minimisation des erreurs entre les précipitations observées et simulées.

Les résultats obtenus en mode 'climat actuel' mettent en évidence le très bon comportement de cette approche. L'amélioration par rapport aux données brutes est très importante. On voit aussi l'intérêt d'utiliser la correction dynamique / statique qui fournit systématiquement de meilleurs résultats.

On peut dès lors utiliser cette information pour modifier les paramètres de la fonction de distribution de précipitation du générateur de climat. Toutefois, l'application de la méthode pour générer des scénarios futurs n'a pas permis, du moins pour les stations

étudiées, des changements significatifs par rapport à ceux que l'on obtiendrait à partir d'un delta plus classique. Il est possible que les prédictors simulés par les MCG ne varient pas de manière significative entre les climats actuel et futur. Le recours à des prédictors à échelle plus fine (par exemple à partir d'un modèle régional de climat) fournirait un éclairage additionnel sur ce comportement observé.

Pour la mise à l'échelle des occurrences, le principe consiste à établir une relation statistique entre un prédictor et les probabilités journalières d'occurrence de précipitation. Des études passées ont montré que les paramètres de type circulation (tourbillon, divergence, ...) étaient particulièrement adaptés à ce type de problématique. Nous avons exploré la viabilité de cette approche sur des stations situées au Québec.

Des relations saisonnières ont été générées afin de produire des probabilités d'occurrence journalières sur la période de calibration qui ont ensuite été entrées directement dans le générateur de climat. Nous avons par la suite généré une cinquantaine de séries synthétiques sur la période de référence. Les séries synthétiques produites ont par la suite été comparées à la série observée. Les résultats ont montré que l'on arrivait à reproduire quasiment parfaitement le cycle saisonnier. Par contre la génération de séries synthétiques en temps futur en employant des paramètres de circulation tirés d'un MCG n'a pas révélé de changements significatifs par rapport au présent. La raison est que le prédictor utilisé ne semblait pas être véritablement affecté par d'éventuels changements climatiques. Il est important de noter que rien ne permet d'affirmer catégoriquement que ces résultats sont faux. Il se pourrait en effet très bien que les changements en terme d'occurrence découlant de l'absence de modification des prédictors dynamiques dans les MGC soient faibles, voire inexistant dans un climat futur. Cela dit, il faut s'interroger sur cette possibilité au regard des changements importants en terme de température et de quantité de précipitation prévus par ces mêmes modèles. Les résultats d'autres études sur le downscaling des températures, notamment Huth (2004, J. Climate), suggèrent qu'il est nécessaire de combiner des prédictors dynamiques et microphysiques (notamment l'humidité) afin de véritablement représenter les effets des changements climatiques sur le paramètre mis à l'échelle. La prise en compte de l'humidité dans le cadre de cette approche a été étudiée au moyen de relations statistiques couplant le tourbillon et l'humidité (relative puis spécifique). Ce paramètre supplémentaire n'a cependant pas eu d'effets notables sur les occurrences de précipitation dans le futur. Le recours à une analyse plus étendue, combinant à la fois plusieurs stations météorologiques et points de grille des MCG permettrait d'y définir un portrait davantage régional et de confirmer/infirmar les résultats obtenus à l'échelle locale. Il serait aussi fortement recommandé d'évaluer, par modélisation hydrologique, l'impact réel qu'aurait un changement des probabilités d'occurrence des précipitations sur des variables hydrologiques telles que débit de pointe, étiage, etc. Cette analyse permettrait de mieux se prononcer quant aux efforts additionnels à consentir au downscaling des paramètres d'occurrence de précipitation.

4- Générateur de climat multi-site

Peu de générateurs multi-sites ont été développés à ce jour. L'approche de Wilks (1998) basée sur la génération de séries de nombres aléatoires spatialement corrélés est sans doute la plus connue. Ces générateurs ont pour but de produire des séries chronologiques de variables climatiques (ex : précipitation, température) qui sont géographiquement corrélées, par opposition aux générateurs stochastiques comme WGEN et WeaGETS qui sont de type uni-site. Leur utilité ne fait nul doute pour les études d'impacts des changements climatiques à l'échelle du bassin versant, où la précipitation à titre d'exemple n'est pas spatialement homogène. Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une nouvelle approche de génération multi-site basée sur le concept d'auto-corrélation spatiale. Elle vise à pallier certaines des lacunes de l'approche de Wilks, qui requiert beaucoup d'efforts pour son implantation et peut souffrir de problèmes liés à des matrices de corrélation mal conditionnées qui compliquent la résolution numérique du problème.

Le concept d'auto-corrélation spatiale réfère à la dépendance spatiale entre des observations en rapport avec leur proximité géographique. L'approche multi-site proposée se base sur un processus de moyenne mobile spatialisée pour générer des séries chronologiques de nombres aléatoires géographiquement auto-corrélés. Une fois ces nombres aléatoires produits, ils sont directement incorporés dans un générateur de climat (par exemple WeaGETS) pour produire autant de séries chronologiques de précipitations journalières qui présenteront des caractéristiques de corrélations statistiquement similaires aux séries chronologiques observées. Une matrice poids et un coefficient de moyenne mobile sont requis pour le fonctionnement du modèle. Les éléments de la matrice poids représentent les divers degrés d'adjacence ou de dépendance entre les stations météorologiques qui sont analysées. Le coefficient de moyenne est fonction de l'auto-corrélation spatiale de l'ensemble des stations soumis à l'analyse. L'originalité de l'approche réside dans le fait que l'on traite simultanément l'ensemble des stations, comparativement à l'approche de Wilks qui procède à une analyse par paires de stations. Cette approche offre la flexibilité de construire des matrices poids qui reflètent le caractère 'd'adjacence' des stations en fonction de critères 'classiques' tels que la distance entre les stations, mais aussi d'autres critères, exemple climatiques. L'approche a été appliquée à un ensemble de 7 stations situées dans la région du bassin versant Péribonca. Elle a permis de reproduire différentes caractéristiques statistiques des séries observées tel que les auto-corrélations spatiales mensuelles, le nombre de jours pluvieux et les quantités totales de précipitation. Le concept d'auto-corrélation spatiale a aussi été étendu à l'analyse des températures journalières avec succès.

Enfin, nous avons également développé un algorithme de calcul permettant d'implanter la méthode de Wilks (1998) pour la modélisation de la précipitation et proposé une approche pour améliorer le traitement du phénomène d'intermittence de la précipitation.

5- Études hydrologiques

Des travaux consistant à évaluer les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques de bassins versants ont été réalisés sur les bassins des rivières Châteauguay, Péribonka, au Québec. Une première analyse des impacts du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Châteauguay a été effectuée par couplage de scénarios climatiques avec le modèle hydrologique HSAMI. Les scénarios climatiques ont été produits avec WeaGETS en utilisant les sorties de 3 MCG et un seul scénario d'émission de gaz à effet de serre. Cinquante séries chronologiques de 37 années chacune ont été produits pour le climat actuel ainsi que pour chacun des climats futurs produits par les 3 MCG. Les débits de pointe printanière et d'été-automne ont été analysés par le biais d'analyses de fréquences. De ces analyses il ressort que les pointes ont été réduites de manière statistiquement significative lorsque les scénarios du modèle climatique Echam4 a été employé. Le modèle CGCM2 a produit une baisse des pointes printanières statistiquement significative. Par contre, la diminution des débits de pointe en été n'était pas significative. Enfin, le modèle Hadcm3 a produit des diminutions modestes des pointes qui n'étaient pas significativement significatives. Au-delà des statistiques elles-mêmes, l'élément innovateur de l'approche a été le couplage d'un modèle hydrologique avec un très grand nombre de scénarios climatiques produits avec un générateur de climat, ce qui a permis d'entreprendre des analyses d'incertitude, indispensables à toute étude d'impacts des changements climatiques. Une seconde étude, qui est toujours en phase de réalisation, a consisté à évaluer les impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de la rivière Péribonka et sur la production d'hydroélectricité sur ce bassin versant. Une approche multi-modèle (5 MCG), multi-scénario d'émission de gaz à effets de serre (2). La variabilité naturelle du climat a été tenue en compte, du moins en partie, par la simulation de séries chronologiques de température et de précipitation avec un générateur stochastique de climat. Ces séries ont été incorporées dans un modèle global d'hydrologie. Une étude est présentement en cours pour étendre l'analyse à un modèle hydrologique distribué. Un modèle de simulation de réservoirs a été employé avec les règles de gestion actuelles pour voir quel serait l'impact des changements climatiques sur la production hydroélectrique. Une étude en cours s'emploie à utiliser un algorithme programmation dynamique stochastique pour évaluer les impacts. Les résultats indiquent que l'incertitude entourant la magnitude des impacts est fortement reliée au choix du MCG.

RÉSULTATS IMPORTANTS EN SCIENCE OU EN GÉNIE

Les résultats importants issus du projet de recherche sont les suivants :

- Développement d'un logiciel prototype pour générer des scénarios de climatiques dans le cadre d'études d'impacts de changements climatiques. De l'avis de l'équipe de recherche, il n'existe pas d'outils similaires au Canada (et probablement ailleurs dans le monde;

- Développement d'un générateur de climat, WeaGETS, capable de produire des séries chronologiques de température et de précipitation journalière. Les algorithmes développés ont été validés avec succès pour des stations météorologiques que l'on retrouve dans diverses provinces hydriques et thermiques canadiennes (surtout québécoise). Le générateur a produit des résultats supérieurs à celui de WGEN, un générateur bien connu et largement employé.
- Développement d'un générateur stochastique de climat multi-site pour calculer la précipitation et la température journalière à l'échelle d'un bassin versant. Le générateur tient compte de la corrélation spatiale entre les stations météorologiques et introduit le concept d'autocorrélation spatiale dans le domaine des sciences de la terre, une première de l'avis des auteurs. De plus, un algorithme permettant l'établissement d'un générateur multi-site connu, mais difficile à implanter en raison de difficultés d'ordre numérique, a été proposé et testé avec succès. Une approche pour aborder la problématique d'intermittence spatiale a aussi été proposée et améliore les résultats par rapport aux techniques actuelles;
- Amélioration d'une approche de mise à l'échelle des quantités mensuelles de précipitation par l'emploi d'un facteur d'échelle dont la partie dynamique est calculée à partir de prédicteurs dynamiques/thermodynamiques choisis de manière à optimiser les résultats;
- Études hydrologiques pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques de deux bassins versants, un petit bassin en zone méridionale, l'autre de taille moyenne et situé plus au nord. Ces études ont permis d'explorer les possibilités de couplages entre les scénarios de changements climatiques produits avec un générateur de climat et un modèle d'hydrologique, notamment pour le traitement de l'incertitude sur les résultats des simulations.

AVANTAGES POTENTIELS POUR LE CANADA

- La possibilité de produire des scénarios climatiques plus fiables à l'échelle du bassin versant. Les retombées sont significatives par exemple dans le domaine du contrôle des inondations, où des stratégies plus efficaces d'atténuation des dommages pourraient être mises en place;
- Avec quelques modifications, il serait possible de produire un logiciel 'générique' qui permettrait de réaliser des scénarios climatiques sur différentes régions canadiennes. Le logiciel serait d'un intérêt pour les secteurs/compagnies concernés par la gestion de l'eau (agriculture, foresterie, génie conseil, etc.). Des scénarios à l'échelle du bassin versant peuvent donc être produits à faible coût car les générateurs de climat ne nécessitent pas de puissants ordinateurs pour leur fonctionnement;
- Il est possible de générer des scénarios climatiques d'une taille théoriquement infinie. Cette possibilité ouvre la voie à des analyses d'incertitude et de risque. De telles analyses sont couramment employées pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques et pour les analyses d'impacts environnementaux;

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Chercheur principal

Robert Leconte : gestion du projet. Supervision d'étudiants gradués. Développement de WeaGETS. Études hydrologiques.

Chercheur adjoint

François Brissette : supervision d'étudiants gradués. Générateur multi-site. Études hydrologiques.

Associé de recherche :

Olivier Bousquet (juin 2004 – janvier 2006) : approches de mise à l'échelle.

Étudiants gradués :

Doctorat :

Malika Khalili (juillet 2003 – soutenance prévue avril 2007) : générateur multi-site

Marie Minville (septembre 2005 -) : impacts sur les régimes hydrologiques et la production hydroélectrique du bassin Péribonca. Analyses d'incertitude.

Maîtrise :

Karine Lorrain (juillet 2003 –soutenance prévue janvier 2007): impacts des changements climatique sur régime hydrologique de Churchill Falls. Modification à WeaGETS pour les températures de l'air

Annie Caron (juillet 2003 – décembre 2005) : développement de WeaGETS

Arnaud Mareuil (mars 2004 – août 2005) : application de WeaGETS pour études d'impacts des changements climatiques sur le régime hydrologiques rivière Châteauguay.

Serge Laforce (mars 2006 -) : application de WeaGETS pour études d'impacts des changements climatiques la cartographie des zones inondables, rivières du Nord

Marie-Claude Simard (mars 2006 -) : application de WeaGETS pour études d'impacts des changements climatiques la cartographie des zones inondables, rivière Châteauguay

Stagiaires de premier cycle:

Billy Cauvier (avril 2006 -) : Programmation du logiciel prototype WeaGETS

Milieu de l'entreprise :

Georges Desrochers (IREQ): supervision d'un étudiant gradué dans le cadre d'un stage à Ouranos. Évaluation de WeaGETS. Échanges scientifiques avec les étudiants et les chercheurs. Participation à des rencontres d'équipes.

Claude Gignac/René Roy (Hydro-Québec): échanges scientifiques avec les étudiants et les chercheurs. Évaluation des travaux des étudiants (jury de maîtrise). Participation à la rédaction d'articles scientifiques. Révision d'articles. Participation à des rencontres d'équipes.

DIFFUSION DES RÉSULTATS DES RECHERCHES ET TRANSFERT DES CONNAISSANCES OU DES TECHNOLOGIES

ARTICLE DANS UNE PUBLICATION AVEC COMITÉ DE LECTURE (PUBLIÉ OU ACCEPTÉ)
Khalili, M., Leconte, R., Brisette, F. Stochastic Multi-site Generation of Daily Precipitation Data using Spatial Autocorrelation. <i>Journal of Hydrometeorology</i> , 8 (3), 396-412
Mareuil, A., Brisette, F., Leconte, R. Impact of climate change on the flood frequency and severity of a northern watershed: case of the Châteauguay River Basin, Canada. Accepté à la <i>Revue canadienne de génie civil</i> .
Minville, M. Changements climatiques : Les atténuer ou s'y adapter ? Points de vue économique, environnemental et équitable Accepté à la revue <i>Vecteur Environnement</i> .
Brisette, F., Khalili, M., Leconte, R. Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data. Accepté au <i>Journal of Hydrology</i> .
ARTICLE DANS UNE PUBLICATION AVEC COMITÉ DE LECTURE (PUBLIÉ OU SOUMIS)
Khalili, M., Leconte, R., Brisette, F. Stochastic Multi-site Generation of Daily Weather Data using Spatial Autocorrelation. Soumis au <i>Journal of Hydrometeorology</i> .
Khalili M., Brisette F., Leconte R. Effectiveness of Multi-Site Weather Generator for Hydrological Modelling: Comparative Study with Uni-Site Weather Generator using Distributed Hydrological Model. Soumis au <i>Journal of Hydrology</i> .
Caron, A., Leconte, R., Brisette, F. Development and validation of a stochastic weather generator for Canadian climates. Soumis à la <i>Revue canadienne des ressources hydriques</i> .
Minville, M., Brisette, F., Leconte, R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. Soumis au <i>ASCE Journal of Hydrologic Engineering</i> .

PRÉSENTATIONS À L'OCCASION DE CONFÉRENCE OU PRÉSENTATIONS PAR AFFICHES
Présentations à l'occasion de conférence
Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. 2006. Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique et la gestion du système hydrique du bassin versant de la rivière Péribonka. Can. Dam Ass. 2006 Annual conf., Quebec City, 30 Sept - 5 Oct 2006. 8 p.
Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. 2006. Évaluation des impacts hydrologiques des changements climatiques au bassin versant de la rivière Péribonka (Québec) pour la proposition de mesures d'adaptation des opérations du système hydrique. EIC Climate Change Conference, Ottawa, Can. May 2006. 4p.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2006. On the Use of Multi Site Generated Meteorological Input Data for Realistic Hydrological Modeling in the Context of Climate Change Impact Studies. EIC Climate Change Conference, Ottawa, Can. May 2006. 6p.
Brissette, F., Leconte, R., Minville, M., Roy, R. 2006. Can we adequately quantify the increase/decrease of flooding due to climate change? EIC Climate Change Conference, Ottawa, Can. May 2006. 6p.
Mareuil, A., Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. 2006. Évaluation des impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de deux bassins versants québécois. 74 ^{ième} congrès annuel de l'ACFAS, 15-19 mai 2006, U. McGill, Montréal, QC, Canada.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2005. Efficient Watershed Modeling using a Multi-site Weather Generator for Meteorological Data. Third International Conference River Basin Management, Bologne, Italie, 6-8 septembre 2005, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 83.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2005. Quantification of the runoff process using a new approach for multi site generation of daily precipitation data, <i>Geophysical Union Abstracts</i> , Vol. 17, 05257, 2005, European Geosciences Union Annual Assembly, Vienne, Autriche, 24-29 avril 2005.
Présentations par affiches
Caron, A., Leconte, R., Brissette, F. 2006. Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques. 2ième symposium Ouranos: Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, QC, Canada.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2006. Évaluation des effets des changements climatiques avec un générateur de climat multi-site. 2ième symposium Ouranos: Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, QC, Canada.

Mareuil, A., Brissette, F., Leconte, R. 2006. Impacts des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay. 2ième symposium Ouranos: Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, QC, Canada.
Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. 2006. Évaluation des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie de la rivière Péribonka et implications sur la gestion du système hydrique et la production hydroélectrique. 2ième symposium Ouranos: Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, QC, Canada.
Desrochers, G., Chaumont, D., Bokoye, A., Brissette, F., Caya D. et R. Roy. 2006. Comparaison de méthodes de constructions de scénarios climatiques pour applications en hydrologie, 2 ^{ième} Symposium scientifique Ouranos : Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, QC, Canada.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2004 'Multisite generation of a daily stochastic precipitation to evaluate the effects of climate change on the Châteauguay River Basin hydrology', <i>Eos Trans. AGU</i> , 85(17), AGU-CGU 2004 Joint Assembly Supplement., Abstract H33A-08.
Leconte, R., Brissette, F., Khalili, M., Lorrain, K., Caron, A., Roy, R., Desrochers, G., Gignac, C. 2004. Développement d'un générateur de climat et application pour étudier l'effet du changement climatique sur la distribution des crues extrêmes. 1 ^{er} symposium Ouranos sur les changements climatiques, 9-10 juin 2004, Montréal, QC, Canada.
Lorrain, K., Brissette, F., Leconte, R. 2004. Stochastic generation of accurate, extreme precipitation data. 57 ^e Congrès de l'association canadienne des ressources hydriques, 16-18 Juin, Montréal, Canada.
Khalili, M., Leconte, R., Brissette, F. 2004. Génération multi site des données de précipitation du bassin versant de la rivière Péribonka à des fins de génération des scénarios de changements climatiques. 57 ^e Congrès de l'association canadienne des ressources hydriques, 16-18 Juin, Montréal, Canada.
AUTRES : RAPPORTS TECHNIQUES, AUTRES ARTICLES SANS COMITÉ DE LECTURE, ETC. (PRÉCISEZ)
Leconte, R., Brissette, F.P. Cauvier, B. 2007. WeaGETS. Guide d'utilisateur.
Caron, A. 2006. Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte de changements climatiques. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, 134 p.
Mareuil, A. 2005. Impact des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, 125 p.
Lorrain, K. 2007. Analyse des apports horizon 2050 pour les bassins Churchill Falls, Manic-5 et Caniapiscou. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure.

Khalili, M. 2007. Nouvelle approche de génération multi-site des données climatiques downscalées pour une évaluation efficace des impacts des changements climatiques. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure.