

# **Climhydro-2 : stratégies d'adaptation des compagnies d'hydroélectricité canadiennes face aux changements climatiques**

**R. Leconte, USherbroke  
F. Brissette, École de technologie supérieure  
D. Caya, École de technologie supérieure  
M. A. Boucher, UQAC**

**Rapport final**

**Octobre 2017**

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



## Table des matières

1. Objectifs généraux du projet de recherche .....	2
2. Progrès réalisés .....	2
3. Écarts par rapport aux objectifs initiaux .....	9
4. Importance technique et scientifique des résultats .....	9
Annexes: principaux articles scientifiques et rapports issus du projet.....	11

## 1- Objectifs généraux du projet de recherche

Le principal objectif du projet est le développement d'approches et d'outils pour aider à la planification de la production hydroélectrique et pour adapter les méthodes opérationnelles de gestion des systèmes à la variabilité et aux changements climatiques.

Les objectifs spécifiques de la recherche proposée sont :

1. De développer et comparer plusieurs méthodes d'optimisation adaptées à des processus stochastiques non stationnaires et applicable à des systèmes hydriques à plusieurs réservoirs.
2. De développer des approches de prévisions/projections d'apports couvrant la variabilité naturelle et la non stationnarité climatique applicables en climats actuel et futur.
3. De valider les approches de 1-2 sur des problématiques réelles de gestion chez Hydro-Québec (HQ) et chez Rio Tinto (RT)

La programmation dynamique stochastique (PDS) a servi de canevas à l'élaboration et à la comparaison de méthodes pour la prise en compte de la non-stationnarité climatique. La génération de prévisions/projections d'apports en eau s'est articulée autour du concept de prévision d'ensembles tenant compte de la non stationnarité climatique, en faisant appel à des modèles hydrologiques spatialisés alimentés par des prévisions météorologiques et des projections climatiques à l'échelle du bassin. Des applications concrètes ont permis de valider la robustesse et la versatilité des outils de modélisation développés pour une gestion efficace des parcs de production dans un contexte de variabilité climatique.

## 2- Progrès réalisés

**L'objectif 1** de la recherche proposée traite de la conception d'outils stochastiques relatifs à la gestion des systèmes hydriques. Cet objectif est constitué de 2 sous-objectifs :

Sous-objectif 1.1 : Développer des approches permettant de repousser la modélisation de la dimensionnalité intrinsèque à la programmation stochastique dynamique;

Sous-objectif 1.2 : Développer une méthodologie visant à améliorer la représentation des processus stochastiques pour l'optimisation appliquée à la gestion des ressources hydriques;

Sous-objectif 1.1. La PDS est l'approche mathématique la plus connue et la plus utilisée dans la gestion des systèmes hydriques. Son application reste cependant impossible pour des systèmes hydriques comprenant plus de 3 réservoirs. S. Krau, Le professionnel de recherche du projet Climhydro-2, a développé une méthode d'échantillonnage novatrice pour repousser le problème de la dimensionnalité afin d'appliquer la programmation dynamique stochastique à des systèmes hydriques de grandes tailles. Cette méthode résout récursivement l'équation de Bellman en ajoutant des échantillons dans des régions où la valeur actuelle de la fonction d'approximation de l'erreur est la plus élevée.

La méthode proposée est une procédure de type Branch et Bound qui consiste à évaluer, sur chaque sous-région, la précision de l'approximation de la Fonction de Valeur actuelle de l'eau et de fractionner les sous-régions ayant les pires approximations de la Fonction Valeur. Le processus se poursuit jusqu'à ce que l'approximation souhaitée sur l'espace d'état soit atteinte. Une comparaison numérique entre cette méthode et la discrétisation uniforme classique a été réalisée sur le complexe hydroélectrique de la rivière La Grande au Québec, constitué de 4 réservoirs et de 6 centrales

hydroélectriques. L'expérience numérique a consisté à simuler des politiques de gestion obtenues de la méthode proposée et de l'approche classique sur une série de 10000 scénarios synthétiques d'apports sur un horizon temporel de 5 années et de comparer la production hydroélectrique totale obtenue de ces 2 politiques sur des sous-systèmes constitués de 2, 3 et 4 réservoirs. Les résultats ont montré que l'approche adaptive converge plus rapidement vers la meilleure politique que l'approche classique et qu'elle génère une production hydroélectrique plus importante. Ceci est particulièrement vrai pour le système à 4 réservoirs. Il a aussi été démontré avec l'approche adaptive proposée concentre l'échantillonnage de l'espace des états dans les régions où le risque de perdre de la production est le plus important, en d'autres mots, où la courbure de la Fonctions Valeur est la plus importante. Ces résultats suggèrent que la détermination d'une politique de gestion basée sur un échantillonnage adaptif de l'espace des états est prometteuse pour des systèmes comportant plusieurs réservoirs, où le nombre de variables hydrologiques d'état est important. La méthode a fait l'objet d'une présentation dans le cadre d'un séminaire au Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT) en janvier 2014, aux Journées de l'optimisation 2014 à Montréal en mai 2014 et à conférence CORS/INFORMS à Montréal en juin 2015. Un article scientifique soumis à la revue Water Resources Research est en cours d'évaluation.

Sous-objectif 1.2. De précédents travaux de recherche chez RT par l'étudiant Q. Desreumaux ont montré que considérer la neige dans les modèles d'optimisation permet d'améliorer significativement la gestion des systèmes hydriques, notamment en utilisant la PDS. Cependant, si ces résultats sont observés par simulations, le fondement théorique reste inexploré. Une réécriture de l'équation de Bellman a été proposée pour comprendre le rôle de l'information hydrologique dans le processus d'optimisation. De cette réécriture, on a mis en évidence la propagation temporelle de l'information hydrologique en suivant un processus markovien, comme décrit dans les probabilités de transition. Pour mesurer l'information qu'apporte une variable hydrologique, on a choisi de mesurer sa corrélation avec les apports hydriques. En effet, plus la corrélation entre variable hydrologique et apports sera forte, plus la variance des apports conditionnelle à la variable hydrologique sera faible, et donc mieux on sera capable de réduire l'incertitude sur les apports. On a ainsi mesuré la corrélation entre variables hydrologiques et apports hydriques à chaque pas de temps et dans la dimension de propagation à l'échelle d'une année pour les 7 localisations des 11 types de variables hydrologiques dont on dispose avec le modèle hydrologique CEQUEAU pour le bassin versant Nechako en Colombie Britannique, où on retrouve un système hydrique géré par RT. On a ainsi pu mettre en évidence que le maximum de neige depuis le début de l'automne donne plus d'informations que l'équivalent en eau courant. Cela est conforme avec les résultats issus de simulations passées. De plus, selon la localisation de la mesure de neige, on observe que l'information est meilleure en milieu de crue ou en fin de crue. Enfin, une méthodologie statistique multi-dimensionnelle a été développée pour la détermination et l'utilisation de variables hydrologiques pertinentes à la programmation dynamique stochastique. Cette méthodologie a été testée sur le complexe hydroélectrique La Romaine. Un article scientifique a été soumis dans la revue Water Resources Management et est en cours de révision.

La PDS est largement utilisée pour concevoir les règles de gestion pour l'exploitation des systèmes hydriques. Pour appliquer cette méthode, un modèle d'apport doit être fourni à l'algorithme pour représenter le processus stochastique. À cause de la décomposition temporelle du problème imposée par la méthode, seul un modèle autorégressif à variables exogènes (ARX) peut être utilisé. De plus, la malédiction de la dimensionnalité limite son application à des modèles ARX de faible ordre. Il peut alors être difficile de construire un modèle d'apport cohérent avec la PDS. Alternativement, une

approche basée sur les simulations évite la nécessité d'un modèle. Spécifiquement, avec l'approche de recherche directe de politique multi-objective évolutionnaire (RDPMOE), on suppose que la politique appartient à une famille présélectionnée et on effectue l'optimisation directement dans l'espace des paramètres. Cependant, cette approche conduit à une approximation à cause de la réduction de l'espace de recherche de la politique. Comme les apports sont implicitement représentés par simulation, la méthode peut demander beaucoup de données. Aussi, pour éviter d'apprendre le jeu de données, on propose une méthode de régularisation pour généraliser la politique à des données non vues. Cette étude est basée sur le cas réel du système hydrique de Kemano, localisé en Colombie-Britannique, Canada. Le système est difficile à gérer à cause de la corrélation de long-terme des apports induite par l'accumulation de neige et des multiples objectifs du système. On a évalué les limites des deux méthodes autant que les avantages sur des systèmes dominés par la neige, comme Kemano. Les travaux de recherche ont montré que la méthode (RDPMOE) couplée à un algorithme évolutionnaire bénéficie de sa bonne représentation des apports pour obtenir une meilleure gestion lorsqu'il s'agit de gérer la crue. En revanche, lorsqu'il faut être précis dans la commande, la PDS bénéficie de l'optimisation précise des débits, alors que la forme des fonctions à bases radiales utilisées dans l'étude permet difficilement une telle gestion. On suggère alors d'utiliser des familles de fonctions plus complexes pour représenter la politique de gestion. Un article scientifique a été publié dans la revue ASCE Journal of Water Resources Planning and Management.

Cependant, le temps de calcul de la méthode RDPMOE est beaucoup trop important pour l'utiliser dans un cadre opérationnel. Un algorithme mono-objectif, basé sur une descente par gradient sur les paramètres de la politique, a donc été appliqué pour optimiser le problème de recherche directe de politique du système Kemano. La méthode de gradient de politique dans un cadre acteur-critique (GPAC) a été employée et une nouvelle solution de référence a été proposée pour réduire la variance de l'estimation du gradient et augmenter la vitesse de convergence. Des résultats ont montré la supériorité de la méthode GPAC par rapport à la RDPMOE et aussi par rapport à un algorithme évolutionnaire mono-objectif. De plus, l'utilisation de fonctions fortement non linéaires a permis d'améliorer significativement la politique de gestion. Un article a été soumis à la revue Journal of Machine Learning Research.

Enfin, des travaux de recherche ont porté sur l'influence et la performance des probabilités de transition dans un modèle SDP appliqué à l'optimisation de trois systèmes hydriques, soient Outardes, Manicouagan et Lac-St-Jean. Les résultats ont montré que la configuration du système hydrique jouait un rôle central dans la performance des probabilités de transition.

**L'objectif 2** de cette recherche vise le développement d'approches de prévisions d'apports couvrant la variabilité naturelle et la non stationnarité climatique applicables en climats actuel et futur. Cet objectif est constitué des sous-objectifs suivants :

Sous-objectif 2.1 : développer des approches de prévisions hydrologiques saisonnières prenant compte de la non stationnarité du climat;

Sous-objectif 2.2 : développer un générateur stochastique de climat multi-site qui prend en compte la non stationnarité du climat;

Sous-objectif 2.3 : développer une approche de calibration et de régionalisation d'un modèle hydrologique pour augmenter la robustesse des modèles dans un contexte de variabilité climatique;

Sous-objectif 2.1. La production d'hydroélectricité nécessite une gestion optimale des barrages. Dans un climat du nord, où la crue printanière constitue le principal apport aux réservoirs, les prévisions

saisonniers peuvent aider à établir une stratégie annuelle. Les prévisions hydrologiques à long terme comptent souvent sur les observations passées des apports ou des données météorologiques. Une autre alternative consiste à utiliser les prévisions météorologiques d'ensemble produites par des modèles climatiques. Une évaluation de la performance de modèles de prévision météorologique d'ensemble saisonnière en vue de la production de prévisions hydrologiques a été réalisée dans cette recherche par le stagiaire R. Jouglà. L'étude, menée sur 10 bassins versants situés au Québec, a porté sur 4 systèmes de prévisions météorologiques (Europe, Australie, É.U., Russie) sur un horizon prévisionnel de 30 jours qui ont été comparées au système d'HQ basé sur la climatologie. Les résultats indiquent que les prévisions sur les échéances les plus lointaines sont meilleures et le système développé par le European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) surpassait légèrement les autres systèmes testés. Dans une seconde étude réalisée par l'étudiante au doctorat R. Bazile, les prévisions produites par le système 4 de l'ECMWF sur un horizon de 7 mois ont été examinées et le biais a été caractérisé sur 10 bassins versants québécois. La correction de biais a amélioré la performance des prévisions météorologiques de l'ensemble brut selon le CRPS. Trois ensembles de prévision hydrologique saisonnière ont été comparés: 1) les apports simulés selon la climatologie, 2) l'ensemble hydrologique les prévisions basées sur la climatologie (ESP) et 3) les prévisions hydrologiques basées sur les prévisions météorologiques d'ensemble de System 4 avec correction de biais (corr-DSP). Les apports simulés ont utilisés comme observations. ESP et corr-DSP ont surpassé la qualité des apports simulés selon la climatologie sur un horizon de prévision variant de 1 mois à 5 mois selon la saison et le bassin versant. L'intégration d'information sur les conditions météorologiques futures a amélioré les prévisions de volume mensuelles. Pour un horizon d'un mois, un gain existe pour presque tous les bassins versants pendant l'hiver, l'été et l'automne. La performance des prévisions de volume pour le printemps est proche de la performance de l'ESP. Pour des horizons prévisionnels plus grands, les résultats demeurent ambigus. Les prévisions météorologiques d'ensemble corrigées par les biais semblent être une source d'information intéressante pour les prévisions hydrologiques. Un rapport scientifique a été produit et un article a été publié dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences*.

Toujours dans le domaine de la prévision hydrologique d'ensemble, une méthode tenant compte de l'impact de plusieurs indices de circulation (NAO, AO, AMO, PNO, ENSO) pour la prise en compte du changement climatique et de la variabilité naturelle est en cours d'évaluation par l'étudiante au doctorat S. Sorhabie. Dans l'élaboration de cette approche, il a été démontré que l'utilisation d'un générateur de climat est équivalent au ré-échantillonnage des séries historiques pour la prévision d'ensemble moyen/long terme et que le ré-échantillonnage des séries historiques se traduit par un biais printanier dû à l'augmentation des températures liée aux changements climatiques. Plusieurs méthodes simples sont étudiées pour tenter de corriger ce biais avec l'aide du générateur de climat (ex : utilisation de la moyenne des 5 dernières années pour établir la température moyenne, tout en gardant l'historique complet pour la variabilité);

Le potentiel d'utiliser des méthodes d'apprentissage automatique couplées aux indicateurs climatiques (NAO, AO, PNO, ENSO) pour la prévision d'apports saisonniers non stationnaires dans un contexte de climat changeant a aussi été exploré par le stagiaire postdoctoral D. Haguma. L'étude, qui a porté sur le bassin versant de la rivière Romaine, a montré que les méthodes d'apprentissage représentent bien les apports saisonniers à une saison et deux saisons d'avance. Les forêts aléatoires ont offert une meilleure performance pour l'entraînement et les machines à vecteurs supports ont produit de meilleurs résultats pour le test avec un bon pouvoir prédictif. La modélisation d'indicateurs climatiques a été rendue possible par une décomposition saisonnière de séries de données car le

signal des indicateurs est trop bruité. Même si la prévision d'apports en fonction d'apports précédents a une bonne performance, l'intégration des indicateurs climatiques aborde le problème de la non-stationnarité du climat et des changements climatiques dans le cas où les apports passés ne représentent pas les apports futurs. Un rapport technique a été produit et un article scientifique est en préparation.

Sous-objectif 2.2. Ce volet a été essentiellement pris en charge par J. Chen, chercheur postdoctoral et spécialiste des générateurs stochastiques de climat. Il a aussi été soutenu par Z. Li, professeur visiteur qui a séjourné à l'ÉTS pendant 8 mois. Durant la première année, un générateur multi-site a été mis sur pied, rendu fonctionnel et testé sur plusieurs jeux de données. Ce générateur est basé sur le principe de plusieurs séries de nombres aléatoires corrélés entre eux. Les travaux se sont basés sur des embryons de programmes développés à l'ÉTS en 2007 et fonctionnels pour la précipitation. Les travaux ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques avec comité de lecture. Les principales avancées ont été :

- Mise sur pied de programmes robustes pour la précipitation;
- Incorporation de la génération multi-site pour les températures minimales et maximales. Cet aspect, que nous avons d'abord cru simple, s'est révélé particulièrement complexe notamment par le haut niveau de corrélation entre les stations pour ces variables;
- Incorporer l'autocorrélation des séries de température et la dépendance multi-site sur l'occurrence de précipitation ou non;
- Corriger le problème d'intermittence spatiale. L'algorithme semble performer mieux que toute autre méthode autres que les approches de ré-échantillonnage du passé (K-nearest-neighbour resampling);
- Le logiciel MULETS ainsi créé est disponible en source libre sur le site de Matlab (File Exchange).

Une veille technologique sur les méthodes multi-sites a été mise sur pied. Cette veille démontre un intérêt soutenu pour les approches multi-sites ainsi que la découverte de ce problème par des chercheurs ayant un background mathématique. Malgré le potentiel de plusieurs méthodes mathématiquement complexe à très complexe, aucune approche permettant d'offrir de meilleurs résultats n'a été identifiée.

Des efforts ont été mis sur des aspects pratiques de l'utilisation de la méthode, à savoir la détermination de distributions paramétriques appropriées, ainsi que sur le développement d'une approche novatrice pour générer les extrêmes. En effet, toute méthode paramétrique est très sensible à la surestimation des extrêmes et des précipitations irréalistes peuvent résulter lorsque des nombres aléatoires très près de 1 sont tirés. La méthode proposée contraint les maxima par l'estimation de la pluie maximum probable (PMP), ce qui permet d'imposer une limite physique réaliste aux extrêmes générés par le générateur.

Sous-objectif 2.3. Ces travaux ont été menés par R.Arsenault, Ph.D. et D. Poissant M.Sc.A.

La régionalisation du modèle hydrologique HSAMI (23 paramètres) a été effectuée sur 306 bassins versants québécois. Les méthodes de régression, de ressemblance physique et de proximité spatiale ont été testées aux fins d'établir la meilleure approche de régionalisation pour la prévision sur des bassins non-jaugés. L'approche de ressemblance physique avec moyenne des séries hydrologiques

s'est avérée la plus performante. Une approche mixte de ressemblance physique avec régression linéaire pour un des paramètres d'HSAMI a amélioré la performance à un niveau supérieur. Le nombre optimal de donneurs se situe entre 6 et 8. Sur les 23 paramètres d'HSAMI, un seul paramètre a démontré une corrélation significative avec les descripteurs physiques des bassins versants.

Il a été investigué si ce résultat était lié au problème d'équifinalité. Ceci a été fait via deux approches :

- En réduisant la complexité paramétrique du modèle HSAMI. Ceci a été fait par une méthode de décomposition de la variance ainsi que par une méthode novatrice d'optimisation multi-objective.
- En travaillant à partir d'un modèle hydrologique le plus simple possible (GR4-J avec module de neige CEMANEIGE) à 6 paramètres et à le complexifier avec des versions à 9 et 15 paramètres. Il s'agit en quelque sorte de l'approche inverse présentée plus haut, et partant du principe qu'il est plus facile d'ajouter des paramètres à un modèle que d'en éliminer.

Dans les deux cas, l'hypothèse sous-jacente est qu'un modèle simple devrait être moins performant, mais plus facile à régionaliser, puisque moins sujet au problème d'équifinalité. Il a été démontré que HSAMI pouvait être réduit de 23 à 11 paramètres, et ce sans perte globale de performance, ce qui diminue dramatiquement le problème d'équifinalité.

Trois versions de GR4J ont été mises sur pied, 6, 9 et 15 paramètres. La version de 15 paramètres n'est pas plus performante que celle à 9, et cette dernière est meilleure que celle à 6. Les conclusions principales sont :

- La parcimonie extrême se traduit toujours par une perte de performance globale;
- Le modèle parcimonieux est moins sujet à l'équifinalité;
- Le modèle parcimonieux n'est pas plus facilement régionalisable, et ce particulièrement pour les méthodes de régression;
- Étonnamment, l'équifinalité n'est pas un frein à la régionalisation mais plutôt un atout. La diversité des jeux de paramètres transmis se traduit par de meilleurs résultats;
- La méthode de calibration a un impact sur les résultats en régionalisation. Les méthodes d'optimisation permettant d'explorer l'espace paramétrique complet résultent en une plus grande diversité de paramètres et performant mieux.

Ces travaux ont fait l'objet de publications scientifiques dans des revues avec comité de lecture.

**L'objectif 3** de cette recherche porte sur des applications à des systèmes hydriques réels d'HQ et de RT qui se sont basées sur des algorithmes de calcul développés des objectifs 1 et 2. Trois sujets de maîtrise ont été élaborés. Le premier a traité de la modélisation des apports hydrologiques à l'intérieur de la PDS sous l'hypothèse de convexité (M.O. Trottier). Le second sujet a porté sur la désagrégation d'une politique de gestion hebdomadaire en une politique de gestion journalière pour appréhender la variabilité court terme des apports hydrologiques (M. Zarghami). Le troisième sujet a consisté à évaluer la valeur ajoutée d'une prise en compte de politiques de gestion d'un système hydrique tirées de la PDS et actualisées dans le temps (mode 'in-line'), par rapport à une politique classique basée sur les apports historiques (mode 'off-line') (A. Martin).

Sous-objectif 3.1. Un premier projet consistait à évaluer l'influence de la modélisation des apports sur la gestion d'un système hydrique. Cette problématique survient du fait que la faible quantité de

données d'apports que l'on rencontre typiquement génère potentiellement une imprécision dans le calcul des probabilités de transition nécessaires au calcul de la politique de gestion par le PDS. La modélisation des apports permet d'allonger la série d'apports et par conséquent de produire des matrices de probabilité de transition qui seraient plus représentatives des processus hydrologiques en jeu. Dans cette recherche, on a testé 7 modèles statistiques d'apports, dont deux modèles périodiques autorégressifs PAR(1) et PAR(2), deux modèles périodiques autorégressifs avec moyenne mobile PARMA(1,1) et PARMA(2,2), un modèle de type 'shifting mean' et deux modèles PAR dont le bruit est modélisé par une loi lognormale. Le système hydrique retenu est celui de la rivière Romaine, constitué de 4 réservoirs en série. Les matrices de probabilités de transition résultantes ont été fournies à l'algorithme PDS développé dans l'objectif 1. Les résultats ont montré que le choix du modèle d'apports n'exerçait pas une influence significative sur la production hydroélectrique annuelle moyenne totale du système et n'était pas différente de la production obtenue par rapport à l'utilisation des données historiques dans le calcul de la politique. Par contre, le choix du modèle avait une influence sur la gestion au niveau de chacun des réservoirs du complexe. Par exemple, le recours au modèle PARMA(1,1) a produit des déversements non productifs plus faibles que ceux obtenus avec l'historique des apports, alors que le modèle PAR(2) a généré des déversements significativement plus élevés. En général, le recours à la modélisation stochastique des apports a permis d'obtenir une politique de gestion qui respectait mieux les contraintes imposées au système hydrique.

Sous-objectif 3.2. L'objectif principal du second projet est de solutionner un problème d'optimisation de la gestion à court terme d'un système hydrique à plusieurs réservoirs. Le système hydrique de la rivière Romaine a été retenu à l'étude. La méthode PDS est choisie lorsque le nombre de variables d'état du système est petit (généralement des systèmes à 1 ou 2 réservoirs). Par contre, la 'malédiction de la dimensionnalité' limite l'utilisation de cette approche à des systèmes complexes. Le projet a investigué le recours à une approche d'apprentissage machine, appelée apprentissage par renforcement, comme alternative pour limiter la malédiction de la dimensionnalité. La méthode 'Q-learning' (QL) utilisée ici propose de parcourir l'espace des états en profondeur plutôt qu'en largeur. Ainsi, la fonction de bénéfice futur est évaluée essentiellement dans les régions où le système est effectivement opéré, réduisant le nombre d'évaluations de la fonction de bénéfice. Une analyse comparative entre la QL et la PDS a révélé la supériorité de l'approche d'apprentissage par renforcement. En particulier, une diminution importante des déversements non productifs a été notée, de même qu'une réduction du nombre de violations de contraintes sur les niveaux maximums des réservoirs. Aussi, la mise à jour hebdomadaire de la politique, par rapport à une mise à jour quotidienne, a mené à un meilleur comportement des réservoirs au niveau des soutirages. Par contre, la PDS a conduit à une production d'énergie plus importante que la QL. De cette étude ressort le potentiel de la méthode QL par rapport à la PDS pour optimiser la gestion de systèmes multi-réservoir en s'affranchissant du problème de la malédiction de la dimensionnalité.

Sous-objectif 3.3. Le troisième projet a porté sur la gestion du système hydrique de la rivière Nechako avec l'aide d'un banc d'essai informatique qui effectue une mise à jour des règles de gestion à chaque pas de temps de calcul. L'objectif spécifique du projet était d'étudier l'utilisation des prévisions d'ensemble pour améliorer les règles de gestion de la Rivière Nechako établies à l'aide de l'outil d'optimisation par programmation dynamique stochastique de RT. Les prévisions d'ensemble ont été élaborées avec le modèle CEQUEAU qui utilise l'historique des données météorologiques recueillies par RT. Une analyse comparative entre les modes de gestion 'in-line' et 'off-line' a montré que l'approche 'in-line' offrait moins de sensibilité dans l'étalonnage de la fonction objective, une réduction des déversements non productifs tout en maintenant une production similaire, ainsi qu'une

réduction du risque d'inondation en aval pendant les années caractérisées par d'importants volumes élevés d'apports. Ces résultats confirment l'idée que, parce qu'elle représente différents processus hydrologiques, la modélisation hydrologique est une option intéressante pour l'optimisation de la gestion en temps réel de systèmes hydriques dans les régions nordiques. Une publication scientifique a été soumise à la Revue canadienne de génie civil.

### **3- Écart par rapport aux objectifs initiaux**

Deux étudiants à la maîtrise devaient initialement comparer des modèles d'optimisation développés dans cette recherche avec des méthodes existantes. De concert avec les partenaires industriels, il a plutôt été décidé de substituer un étudiant au doctorat aux deux étudiants à la maîtrise. Ce projet, présenté à l'objectif 1.2 et qui correspond davantage aux besoins des partenaires, conserve par rapport à la version originale l'aspect comparatif des méthodes d'optimisation.

Aussi, l'étudiant qui au doctorat devait s'attaquer à la problématique du balancement de la réserve énergétique a plutôt fait place à deux étudiants à la maîtrise. Un projet a porté sur la désagrégation d'une politique de gestion hebdomadaire en une politique de gestion journalière pour appréhender la variabilité court terme des apports hydrologiques avec une application sur le système La Romaine, voir l'objectif 3.1. Le second projet a porté sur l'influence de la modélisation stochastique des apports sur la politique de gestion d'un système multi-réservoir, voir l'objectif 3.2. Enfin, un étudiant au doctorat devait être recruté pour travailler au développement du générateur stochastique de climat multi-site (objectif 2.2). Un stagiaire postdoctoral a plutôt été recruté pour effectuer ce projet. Ayant réalisé son doctorat et sa maîtrise sur les générateurs uni-sites, le stagiaire s'est avéré le candidat idéal pour réaliser cette tâche.

### **4- Importance scientifique et technique des résultats**

Les activités de recherche réalisées grâce à la subvention accordée a permis des avancées scientifiques notables et aussi permis le développement de modèles qui permettront aux partenaires industriels que sont HQ et RT de mieux gérer leur parc d'équipement face à la variabilité et au changement climatique.

En premier lieu, les travaux réalisés conformément au premier objectif de cette recherche auront débouché des méthodes originales pour s'attaquer aux différentes 'malédiction' qui freinent l'utilisation de la PDS dans la gestion de systèmes hydriques comprenant plus de 2 réservoirs – soit une majorité des systèmes hydriques gérés par les partenaires. Une première méthode développée dans cette recherche a consisté à effectuer un échantillonnage adaptif de l'espace des états d'un système hydrique. La méthode a démontré son applicabilité à des systèmes hydriques à 4 réservoirs, ce que la PDS classique telle qu'implémentée chez HQ et RT ne peut accomplir. Aussi, les expériences numériques suggèrent que la politique optimale obtenue offre une meilleure performance du système hydrique par rapport à la celle obtenue par la PDS classique. En second lieu, il a été démontré que les approches de recherche directe de politique (RDP) s'avèrent avantageuses pour contrer les malédiction de la dimensionnalité et de la modélisation par une meilleure corrélation des apports. Aussi, la combinaison de la RDP avec un algorithme évolutionnaire de recherche de solution a été montrée avantageuse par rapport à la PDS dans un problème d'optimisation multi-objectif grâce à une meilleure exploration du front de Pareto. Enfin, une contribution originale de cette recherche aura été d'utiliser et d'adapter un algorithme de descente par gradient pour l'optimisation des paramètres de la méthode RDP. Cette méthode permet d'obtenir une politique de gestion dans un temps raisonnable, ce qui ouvre la voie à une application opérationnelle.

En second lieu, les travaux réalisés grâce à cette subvention auront permis d'explorer des méthodes prometteuses de prévision hydrologique saisonnière. Tout d'abord, on a montré que les prévisions météorologiques d'ensemble, produites par les agences de prévision, améliorent conditions hydrologique saisonnière (1 à 5 mois) sous certaines conditions, par rapport à l'utilisation de la climatologie. Une meilleure compréhension des résultats est requise, notamment en lien avec les caractéristiques hydrométéorologiques des bassins versants concernés. Aussi, une méthode originale de prévision hydrologique saisonnière, basée sur le recours à des algorithmes de forage de données et en y incluant une combinaison d'indicateurs de climat, a été développée et montre des résultats encourageants pour la prévision des apports dans un contexte de non stationnarité climatique dans les bassins nordiques. La méthode doit être approfondie, notamment par une généralisation des résultats avant son implémentation opérationnelle. Des recherches novatrices sur la régionalisation des modèles hydrologiques ont été réalisées et ont permis de constater qu'une réduction de la complexité de modèles hydrologiques par simplification de leur structure et donc du nombre de paramètres requis pour calibrer les modèles hydrologiques n'a pas résulté en une perte globale de performance, diminuant significativement le problème d'équifinalité. Par contre, il n'a pas été possible de conclure qu'un modèle parcimonieux était plus facilement régionalisable qu'un modèle plus complexe. Malgré les avancées faites dans le cadre de cette recherche, le problème de régionalisation des modèles hydrologiques, indispensable à la modélisation et à la prévision hydrologique sur des bassins non ou faiblement jaugés, demeure non résolu.

Enfin, des applications d'algorithmes développées dans cette recherche à des systèmes hydriques réels offrent des perspectives encourageantes quant à un transfert technologique en vue de leur utilisation opérationnelle.

## **Annexes : principaux articles scientifiques et rapports issus du projet**

### **Articles présentés à des revues avec comité de lecture**

- 1)** Krau, S., Emiel, G., Merleau, J., Leconte, R. Adaptive sampling in stochastic dynamic programming for water resources management. Soumis à *Water Resources Research*, sept 2017.
- 2)** Martin, A., Côté, P., Leconte, R. On-line Reservoir Management using Hydrological Modeling: Case Study of a Northern Hydropower System, soumis à la revue canadienne de génie civil, sept 2017.
- 3)** Desreumaux, Q., Côté, P., Leconte, R. Random process representation within stochastic dynamic programming for reservoir management. Soumis à *Water Resources Management*, juin 2017.

### **Articles acceptés/publiés par des revues avec comité de lecture**

- 4)** Bazile, R., Boucher, M.A., Perreault, L., Leconte, R. 2017. Verification of ECMWF System4 for seasonal hydrological forecasting in a northern climate, *Hydrological and Earth System Science*, accepté, sept 2017.
- 5)** Desreumaux, Q., Côté, P., Leconte, R. 2017. Comparing model-based vs model-free approaches to improve hydropower reservoir operation, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, sous presse, juillet 2017.
- 6)** Haguma, D., Leconte, R., Côté, P. 2017. Evaluating transition probabilities for a stochastic dynamic programming model used in water system optimization, *ASCE Journal of Water Resources Planning and management*, accepté, août 2017.
- 7)** Poissant, D., Arsenault, R., & Brissette, F. 2017. Impact of parameter set dimensionality and calibration procedures on streamflow prediction at ungauged catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 220-237.
- 8)** Arsenault, R., Essou, G. R., & Brissette, F. P. 2016. Improving hydrological model simulations with combined multi-input and multimodel averaging frameworks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(4), 04016066.
- 9)** Arsenault, R., & Brissette, F. 2016. Analysis of continuous streamflow regionalization methods within a virtual setting. *Hydrological Sciences Journal*, 61(15), 2680-2693.
- 10)** Arsenault, R., & Brissette, F. 2016. Multi-model averaging for continuous streamflow prediction in ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2443-2454.
- 11)** Côté, P., Leconte, R. 2015. Comparison of Stochastic Optimization Algorithms for Hydropower Reservoir Operation with Ensemble Streamflow Prediction. *Journal Wat. Res Plan. Mgt.* DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000575.
- 12)** Chen, J., Brissette, F. P., & Zhang, X. J. 2015. Hydrological modeling using a multisite stochastic weather generator. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2), 04015060.
- 13)** Arsenault, R., Poissant, D., & Brissette, F. 2015. Parameter dimensionality reduction of a conceptual model for streamflow prediction in Canadian, snowmelt dominated ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 85, 27-44.
- 14)** Côté, P., Desreumaux, Q., Leconte, R. 2014. The Role of Hydrologic Information in Stochastic Dynamic Programming: a Case Study of the Kemano Hydropower System in British Columbia. *Revue canadienne de génie civil*, 41(9): 839-844.

- 15)** Chen, J., Brissette, F. P., & Li, Z. 2014. Postprocessing of ensemble weather forecasts using a stochastic weather generator. *Monthly Weather Review*, 142(3), 1106-1124.
- 16)** Arsenault, R., & Brissette, F. P. 2014. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. *Water Resources Research*, 50(7), 6135-6153.

#### **Autres**

- 17)** Haguma, D., Leconte, R. 2017. Prévision d'apports saisonniers avec des méthodes d'apprentissage automatiques et des indicateurs climatiques. Université de Sherbrooke, 42 pages.