

RAPPORT FINAL DU TROISIÈME PROGRAMME DE BOURSES DU RIISQ

IDENTIFICATION DU/DE LA CANDIDAT.E

Étudiant.e

Étudiant.e	Sant'Anna, Caio
Université	Université Laval Département de Génie Civil et de Génie des Eaux
Programme d'étude	Doctorat Génie des Eaux
Adresse courriel	caiolucas.santanna@gmail.com ; caio.santanna.1@ulaval.ca

Superviseur.e

Superviseur.e	Amaury Tilmant
Université	Université Laval
Département	Département de Génie Civil et de Génie des Eaux

Co-superviseur.e | Superviseur.e de stage

Co-superviseur.e	
Université	
Co-superviseur.e	
Université	
Superviseur.e (stage)	
Établissement	
Division	

RÉSUMÉ DU PROJET

Titre du projet

Évaluation de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation des systèmes de réservoirs au Québec.

Résumé du projet (300 mots)

La gestion d'un système hydrique composé de plusieurs réservoirs cherche souvent à concilier plusieurs objectifs conflictuels comme l'approvisionnement d'eau, le contrôle des inondations, la production d'énergie, la navigation, le maintien d'un débit environnemental, etc. Compte tenu des impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique des cours d'eau, il est important d'évaluer (1) le degré avec lequel les différents objectifs de gestion seront affectés et (2) le degré d'adaptabilité du système hydrique, c'est-à-dire sa capacité à satisfaire ces objectifs sans avoir recours à de nouvelles infrastructures hydrauliques dont les coûts financiers, sociaux et environnementaux sont de plus en plus élevés. Un projet de recherche réalisé en partenariat avec le Centre d'Expertise Hydrique de Québec (CEHQ) a comme objectif de développer une approche pour révéler la vulnérabilité et capacité d'adaptation de systèmes multi-réservoirs au Québec où le contrôle des inondations, et donc la sécurité publique, est un objectif prioritaire. Trois systèmes sont étudiés : le Haut Saint-François, le Kénogami et le bassin de la Lièvre. Pour chaque système, un large ensemble de projections hydrologiques fourni par le CEHQ et Ouranos est utilisé comme input pour réaliser un « stress test » des systèmes. À partir de l'analyse des résultats du stress test, des mesures d'adaptation sont proposées à l'aide d'un outil d'optimisation de la gestion des systèmes. Les principaux livrables sont des articles scientifiques et affiches, ainsi que des documents techniques et des modèles des systèmes hydriques pour le gouvernement Québécois.

Axes(s) dans lesquels s'inscrit ce projet

- Axe 1 Axe 2 Axe 3 Axe 4 Axe 5

Secteurs impliqués dans le projet

- Sciences naturelles et génie Santé Sciences sociales et humaines, arts et lettres

DESCRIPTION DU PROJET

Introduction (500 mots) - Cette section doit aborder le contexte de la recherche, l'état des lieux, les questions de recherche et l'importance de l'étude.

Les changements climatiques peuvent affecter de manière significative les ressources en eau avec des impacts négatifs sur de nombreuses facettes de la société et des écosystèmes. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée au développement de stratégies d'adaptation efficaces. Plus spécifiquement, la réopération des systèmes hydriques en vue de maintenir la performance globale dans des limites acceptables devrait être priorisée pour éviter, ou du moins retarder autant que possible, de nouveaux investissements coûteux en infrastructures hydrauliques.

Les incertitudes liées au changement climatique sont dites profondes puisque les scientifiques ou les décideurs ne connaissent pas ou ne peuvent pas s'entendre sur (i) les évolutions sociales et technologiques de la société qui entraîneront les futures émissions de gaz à effet de serre ; (ii) le meilleur modèle climatique décrivant les phénomènes sous-jacents à la nature chaotique du climat global et (iii) les distributions de probabilité a priori des variables climatiques et leurs interdépendances. Cela rend le cadre décisionnel traditionnel prévisionniste inadapté pour faire face au changement climatique.

Nous présentons dans ce rapport les résultats d'une étude qui s'est terminée en mars 2022 et qui consiste en une approche axée sur des caractéristiques hydrologiques pour soutenir la prise de décision sous incertitude profonde basée sur des informations climatiques. Cette approche est motivée par le fait que la disponibilité et le nombre de projections hydrologiques ne cessent d'augmenter. Donc, nous proposons un cadre d'évaluation de la vulnérabilité rapide qui pourrait être utilisé pour d'autres études de cas. Dans cette étude, 828 projections hydrologiques sur trente ans pour le système du Bassin de la Rivière du Lièvre ont été générées en tenant compte des incertitudes liées aux émissions futures, ainsi que des modèles climatiques et hydrologiques.

Étant donné que les gestionnaires des ressources en eau ont une connaissance fine des caractéristiques hydrologiques de leur système, les projections hydrologiques sont regroupées en fonction de leurs propriétés hydrologiques et ce indépendamment du forçage radiatif et/ou des modèles utilisés. Ce regroupement est un moyen d'impliquer davantage les gestionnaires et vise dès lors à améliorer l'utilisation des informations climatiques par ceux-ci.

Une fois que les projections basées sur les modèles climatiques sont regroupées en fonction de leurs caractéristiques hydrologiques, des mesures d'adaptation peuvent être identifiées pour chaque groupe. Dans un premier temps, une politique d'opération adaptée est déterminée pour un scénario représentatif au sein de chaque groupe à l'aide d'un modèle d'optimisation stochastique du système hydrique. Ensuite, la nouvelle politique est simulée sur tous les scénarios appartenant au même groupe afin d'évaluer sa robustesse vis-à-vis de projections hydrologiquement similaires. Cet exercice fournit une indication de la flexibilité du système hydrique, c'est-à-dire sa capacité d'adaptation opérationnelle au changement climatique, tout en se concentrant sur les propriétés hydrologiques qui sont significatives pour les gestionnaires.

Objectifs du projet - Indiquer les objectifs généraux et spécifiques de la recherche.

L'objectif principal du projet est de développer des portefeuilles de mesures d'adaptation non-structurelle pour la gestion des systèmes hydriques en climat changeant. Cet objectif principal comprend les objectifs secondaires suivants: (1) identifier les limites à l'adaptabilité d'un système hydrique, (2) évaluer la vulnérabilité des usagers du système hydrique aux changements climatiques, (3) proposition-évaluation-sélection de mesures d'adaptation. Le principal système hydrique étudié a été le bassin de la Lièvre, mais nous avons mené aussi une analyse simplifiée des impacts des changements climatiques pour le Lac Kénogami et le Haut-Saint-François. Ces différents systèmes sont gérés en priorité pour assurer la sécurité publique, en particulier vis-à-vis des inondations.

Méthodologie (400 mots) - Présenter un bref résumé des procédures et méthodes utilisées et du montage des expériences.

Afin d'atteindre les objectifs énoncés dans la section précédente, l'approche commence par l'acquisition d'un large ensemble de projections hydrologiques basées sur les modèles climatiques, simulant les climats de référence (REF) et futurs (FUT). La disponibilité et le nombre de projections hydro-climatiques ne cessent d'augmenter, tout comme notre compréhension des processus physiques et biogéochimiques sous-jacents qui influencent le climat global.

Ensuite, en utilisant l'approche de mise en grappe (clustering) K-means, ces projections hydrologiques sont regroupées en fonction de leurs propriétés hydrologiques. Ce regroupement a deux objectifs : (i) aider à combler le l'écart entre l'expérience des opérateurs et les projections hydrologiques et (ii) réduire les efforts de calcul liés à la recherche de politiques d'opération alternatives par l'optimisation, une étape très coûteuse en termes de temps car elle peut nécessiter des centaines de milliers d'exécutions.

Ensuite, la politique d'opération actuelle du réservoir est simulée sur toutes les projections hydrologiques, et les indicateurs de performance du système sont évalués. En fonction de l'objectif opérationnel, l'évaluation de la performance est réalisée à l'aide des parties prenantes concernées pour fournir, par exemple, des seuils faisant la distinction entre les états satisfaisants et défaillants, ou leur pertinence par rapport aux variables d'état/de décision.

Enfin, un modèle d'optimisation stochastique détermine des politiques d'opération adaptées à chaque groupe hydrologique, qui sont ensuite utilisées en simulation pour mettre à jour les indicateurs de performance. Plus précisément, pour chaque groupe, le modèle d'optimisation génère de nouvelles courbes guides qui sont ensuite utilisées comme entrées du modèle de simulation pour des simulations plus détaillées du système de ressources en eau à travers toutes les projections appartenant à ce groupe.

Un ensemble de cinq scénarios d'adaptation (correspondant au nombre de groupes) constitue le portefeuille de politiques d'exploitation adaptées, donnant une indication de la capacité d'adaptation du système multi-réservoirs ; c'est-à-dire sa capacité à s'adapter aux régimes d'écoulement modifiés identifiés à partir de l'analyse statistique d'un large ensemble de projections hydrologiques basées sur les MCG.

Principaux résultats obtenus (300 mots)

Les groupes ont été transcrits en récits hydroclimatiques (*proche de conditions actuelles, fort volume annuel, variation saisonnière modérée, faible volume annuel, et forte variation saisonnière*) pour aider les opérateurs à interpréter ces changements et leur permettre d'associer les cinq groupes à des conditions hydrologiques similaires à celles déjà vécues par le passé.

1) Les impacts de la politique opérationnelle actuelle sous les différents clusters

On observe seulement une légère augmentation du risque d'inondation pour les clusters *fort volume annuel* et *forte variation saisonnière* du fait de volumes d'eau plus importants durant l'hiver et le printemps. Cependant, les trois principaux réservoirs sont en mesure de fournir des performances satisfaisantes en matière de contrôle des crues pour la plupart des scénarios appartenant à ces clusters. En d'autres termes, la grande capacité de stockage peut faire face à l'augmentation possible des débits hivernaux et printaniers.

Même si le risque d'inondation semble faible, les autres objectifs de gestions semble se dégrader de façon significative en climat futur, si la politique d'opération actuelle reste en place.

2) Les impacts du portefeuille de mesures d'adaptation

La dernière étape de la méthodologie proposée produit un portefeuille de politiques opérationnelles adaptées aux caractéristiques hydrologiques partagées par toutes les projections dans le même groupe hydrologique. Ces politiques adaptées sont déterminées par un modèle d'optimisation et sont ensuite traduites en nouvelles courbes guides pour le modèle de simulation. A partir des résultats de la simulation, les indicateurs de performance peuvent être calculés et comparés à ceux obtenus avec la politique opérationnelle actuelle.

Les principaux gains du portefeuille de mesures d'adaptation sont pour les objectifs autres que le contrôle d'inondations, c'est-à-dire la production d'énergie, l'usage récréotouristique et la satisfaction du débit écologique.

Conclusion et discussion (300 mots) – Préciser comment le projet a abordé les problèmes liés aux inondations et les impacts du projet sur la société dans son ensemble

En raison de l'impact attendu des changements climatiques sur la disponibilité de l'eau et compte tenu également du rôle central de l'eau dans l'atténuation des impacts sur les autres secteurs tels que l'alimentation ou la santé, une attention particulière doit être accordée au développement de stratégies d'adaptation des systèmes hydriques.

L'approche proposée dans cette étude regroupe les projections hydrologiques en fonction d'attributs hydrologiques pertinents à la zone étudiée, et ce indépendamment du modèle climatique ou les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre. Des mesures d'adaptation de la gestion du système hydrique sont ensuite développées pour chaque groupe et donc pour différentes altérations possibles du régime hydrologique.

Par contre, cette mise en grappe implique une perte d'information qui doit être mise en perspective avec les avantages liés à des résultats plus facilement interprétables puisque les politiques d'adaptation sont directement liées aux changements du régime hydrologique plutôt qu'aux changements du climat.

Cette étude ne remplace pas des méthodes visant à trouver plus précisément les conditions hydroclimatiques entraînant la défaillance d'un système hydrique. Cette étude traite plutôt des situations dans lesquelles un large ensemble de projections basées sur les modèles climatiques est disponible, couvrant une plage d'incertitude suffisamment large pour que les opérateurs soient à l'aise de les utiliser dans un stress-test.

Finalement, l'approche proposée n'a pas pour but d'informer les opérateurs de l'eau sur la détection des changements de régime hydrologique en temps réel. L'approche fournit plutôt une évaluation ex ante de la flexibilité opérationnelle d'un système de ressources en eau et doit être régulièrement mise à jour à mesure que de nouvelles informations climatiques deviennent disponibles.

Retombées du projet pour la gestion des inondations pour les partenaires et au Québec (300 mots)

Les systèmes étudiés ici sont gérés en priorité pour assurer la sécurité publique vis-à-vis des inondations. Par exemple, le système du bassin de la Lièvre, dont l'influence s'étend jusqu'à la région de Montréal, pourra bénéficier directement des résultats de la recherche effectuée. Il en sera de même pour le Lac Kénogami, dont la population locale a subi des conséquences dévastatrices lors du déluge du Saguenay en 1996.

Dans ce projet, les performances de ces systèmes vis-à-vis des inondations sont mesurées par des dépassements de seuils (niveau des réservoirs ou débit des rivières en aval). Afin d'intégrer les enjeux d'une gestion de barrages, les indicateurs d'inondation sont analysés conjointement avec d'autres indicateurs de performance (hydroélectricité, etc.).

Face à l'incertitude sur la direction des changements climatiques et, par conséquent, sur l'ampleur de l'altération du régime hydrologique des cours d'eau, notre recherche vise à créer un portefeuille de mesures d'adaptation non-structurelles des réservoirs. Ces mesures sont communiquées à la direction des barrages du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques de façon à guider leur prise de décisions. Par la même, une meilleure gestion de ces réservoirs permettra de limiter le risque d'inondations au Québec.

Activités de mobilisation des connaissances entreprises dans le cadre de la bourse (par exemple, participation à des événements divers, tels que des conférences, des ateliers; l'élaboration (ou la participation à) des articles scientifiques, etc.).

2021
Participation virtuelle : European Geosciences Union

Conférence : Vulnérabilité et capacité d'adaptation des réservoirs – ACFAS 2021. (Présentation disponible sur le lien

https://www.youtube.com/watch?v=-Smz0_3VNOs&ab_channel=CentrEauQu%C3%A9bec)

Concours : ma présentation en 3 minutes - Journée Québécoise des Étudiants Centreau 2021: Théorie du Cygne noir et vulnérabilité des réservoirs

2022

Mars 2022 – Publication de l'article open access dans la Revue Climate Risk and Management

Sant'Anna, C., Tilmant, A., & Pulido-Velazquez, M. (2022). A hydrologically-driven approach to climate change adaptation for multipurpose multireservoir systems. *Climate Risk Management*, 100427.

Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212096322000341>

27 Mai – webinaire Riisq

Le rapport final doit être envoyé à l'adresse courriel suivante pour le 30 avril 2022 :
poudrette.diane@uqam.ca