

## RAPPORT FINAL DU DEUXIÈME PROGRAMME DE BOURSES DU RIISQ

### IDENTIFICATION DU/DE LA CANDIDAT.E

---

#### Étudiant.e

Étudiant.e	Alexandre Florent NOLIN
Université	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
Programme d'étude	Doctorat en Sciences de l'Environnement
Adresse courriel	alexandreflorent.nolin@uqat.ca

#### Superviseur.e

Superviseur.e	Yves Bergeron
Université	UQAT
Département	Institut de Recherche sur les Forêts

#### Co-superviseur.e | Superviseur.e de stage

Co-superviseur.e	Jacques C. Tardif
Université	The University of Winnipeg
Co-superviseur.e	
Université	
Superviseur.e (stage)	
Établissement	
Division	

## RÉSUMÉ DU PROJET

---

### Titre du projet

Reconstitution des inondations en Abitibi-Témiscamingue et prévisions suite aux changements climatiques

### Résumé du projet (300 mots)

La fréquence et la sévérité des dernières inondations observées en Abitibi-Témiscamingue (AT) est inhabituelle à l'échelle des enregistrements hydrologiques du 20<sup>e</sup> siècle. L'analyse des facteurs à l'origine de cette variabilité se heurte à la faible couverture spatiale et temporelle des enregistrements hydro-climatiques, ainsi qu'à la gestion des débits pour l'hydroélectricité, qui se surimpose à la variabilité naturelle des rivières. Le RIISQ 2ePB a appuyé un Doctorat engagé en 2017 pour (1) déterminer les variables climatiques à l'origine des inondations régionales, (2) analyser leur cohérence spatiale, et (3) calculer leurs trajectoires hydro-climatiques prévisionnelles. La reconstruction des débits moyens de printemps de la rivière Harricana par analyse de cernes de crues dans des arbres périodiquement inondés, démontre que la fréquence et la magnitude des hauts débits printaniers a augmenté depuis la fin du Petit-Âge Glaciaire (1850-1870) et particulièrement depuis 1940-1950. Ce changement est appuyé par l'analyse de cernes de crues dans plus de 1000 arbres dans 4 bassins versants différents en AT. Une reconstruction des température moyennes printanières régionales démontre aussi que la fréquence et la magnitude des printemps chauds a graduellement augmenté à la fin du Petit-Âge Glaciaire, et particulièrement depuis 1940. L'ensemble des résultats indiquent que les plus hauts débits printaniers historiques étaient associés à des hivers longs et froids suivis de printemps tardifs et froids avec une forte couverture neigeuse combinée à de fortes pluies. Les trajectoires hydroclimatiques prévisionnelles calculées pour la rivière Harricana (résultats préliminaires) suggèrent globalement une plus grande contribution des pluies au débits hivernal et printanier, compensée par une diminution du manteau neigeux, ce qui n'entraînerait pas ou peu de modifications de la variabilité dans les hauts débits printaniers d'ici la fin du siècle. Ce projet apporte une contribution innovante à la compréhension des inondations régionales et de leurs forçages climatiques à long-terme au Québec.

### 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.

Dans l'Est du Canada boréal, les sévères inondations printanières de la dernière décennie (2010-2020) appuient l'importance de comprendre les effets potentiels des changements climatiques sur la variabilité des débits. La faible couverture temporelle et spatiale des enregistrements hydroclimatiques semblent indiquer que ces phénomènes sont inhabituels à l'échelle du 20<sup>e</sup> siècle, mais la compréhension de la variabilité des débits et des conditions météorologiques à l'origine des inondations bénéficierait d'une perspective à plus long-terme, d'autant que la régulation des débits pour la production d'hydroélectricité se superpose à la variabilité naturelle dans les enregistrements hydrologiques. Dans le Nord du Québec et la région du Lac Duparquet, l'étude des cicatrices de glaces et des cernes de croissance des arbres démontre que l'activité glacielle a augmenté depuis la fin du Petit-Âge Glaciaire, et particulièrement depuis 1950 où les hauts niveaux d'eau sont plus fréquents et plus hauts. Les projections climatiques pour le Québec indiquent qu'une diminution des couverts neigeux pourrait diminuer la fréquence et la magnitude des inondations, mais qu'une augmentation des précipitations extrêmes au printemps pourrait au contraire augmenter le risque inondation. L'étude des frênes noirs périodiquement inondés au Lac Duparquet suggère qu'il est possible d'analyser plus en profondeur les cernes de croissances pour relier les variations dans l'anatomie du bois aux variations du niveau d'eau appliqué aux arbres pendant les inondations. Les études dendroclimatiques menées au Manitoba et Québec suggèrent également qu'il est possible de reconstituer une partie de la variabilité climatique de printemps (au moment des inondations) en analysant les cernes annuels de croissance des pin gris. Ce projet s'attache à reconstituer, analyser, puis prévoir, la variabilité des débits printaniers dans la région d'AT. Les cernes de crues sont analysés à l'échelle du Lac Duparquet, puis dans 4 grands bassins versants pour déterminer leurs performances à reconstituer l'historique régional des inondations et déterminer dans quelles mesures ils peuvent être appliqués à l'échelle du Québec. Les associations entre facteurs climatiques et déclenchement des inondations sont déterminées et précisées par une reconstruction des températures printanières moyennes qui apporte une perspective à plus long terme des effets du réchauffement climatique sur la variabilité des débits printaniers. Ces associations climat-débit sont ensuite utilisées pour projeter statistiquement les trajectoires hydroclimatiques du bassin versant de la rivière Harricana et comparées à des modèles hydrologiques de la Direction de l'Expertise Hydrique du Québec. Cette recherche est importante car elle adresse la compréhension à long terme des inondations en AT et en tire avantage pour projeter les effets potentiels des changements climatiques sur la variabilité des hauts débits de printemps. Dans un contexte où les sociétés doivent s'adapter au changement climatique, ce projet fournit, à l'échelle régionale des outils de précision des risques et d'aide à la décision pour les projets de développements du territoire, tout en fournissant une approche novatrice et applicable dans une grande diversité de contexte hydrologiques.

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

Ce projet s'appuie sur une reconstruction du débit moyen de printemps de la Rivière Harricana (nommée 'REC1' ; 1771-2016), produite à partir de l'analyse de cernes de crues de Frênes noirs inondés périodiquement. L'analyse de cette reconstruction a permis de caractériser la variabilité naturelle historique des débits printaniers pour la région AT depuis la fin du Petit-Âge Glaciaire, et de déterminer les principaux facteurs climatiques associés aux inondations printanières du 20<sup>e</sup> siècle. Ce projet se décline en 3 objectifs principaux.

**Objectif 1. Cohérence spatiale des inondations.**

L'objectif est de déterminer la cohérence spatiale à large échelle du signal d'inondation printanière contenu dans les cernes de crues dans l'Est du Canada boréal, et notamment de déterminer le degré d'association entre REC1 et; (1) différentes fréquences de cernes de crues échantillonnés dans un grand nombre de rivières régionales et de contexte hydrologiques naturels, régulés, et non-inondés; (2) l'ensemble des enregistrements hydrologiques régionaux disponibles. Un sous-objectif est de déterminer comment la régulation des niveaux d'eau par barrage affecte notre capacité à extraire de l'information hydrologique de l'étude des cernes de crues.

**Objectif 2. Évolution des températures printanières et liens avec les inondations.**

Cet objectif s'attache à reconstruire la variabilité naturelle historique des températures printanières régionales et leurs relations avec les hauts débits printaniers reconstruits pour la Rivière Harricana (REC1) afin de préciser les effets potentiels d'un réchauffement climatique dans les régimes d'inondations. Les associations, et la stabilité temporelle de ces associations, entre les variations des températures printanières reconstituées, la dynamique récente des inondations printanières régionales, et les données climatiques spatiales régionales sont analysées.

**Objectif 3. Trajectoires hydro-climatiques prévisionnelles.**

Cet objectif s'attache à estimer les trajectoires potentielles futures des hauts débits de dégel printanier de la Rivière Harricana, à analyser la présence de tendances à long-terme dans les variables climatiques et leur contribution relative aux inondations printanières, puis à comparer les tendances futures estimées par rapport à la perspectives historique à long terme détaillée dans les précédents chapitres (REC1 et températures printanières).

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

**1. Cohérence spatiale des inondations.** Les années de haut débit printaniers indiqués par l'analyse de cernes de crues provenant 929 échantillons (470 arbres) dans 4 bassins versants (Mattagami, Abitibi, Harricana, Outaouais Amont) été comparés à REC1 pour déterminer la cohérence régionale des inondations. Les cernes de crues ont aussi été comparés entre des rivières à écoulement naturel, à écoulement régularisé par barrage, et dans des sites contrôles non-inondés pour déterminer (1) si les cernes de crues peuvent être appliqués à des contextes hydrologiques régularisés pour reconstruire l'historique des inondations, et (2) assurer qu'aucun autre facteur externe (attaque d'insectes, sécheresse, ...) peut induire la formation de cernes de crues dans des zones non inondées. Dans un second temps, l'étude des cernes de crues en rivière régularisée a été approfondie pour déterminer comment la régulation des débits printaniers par un barrage affectent leur production (variabilité des éléments de vaisseaux du bois initial) et la largeur des cernes de croissance des Frênes noirs riverains selon les contextes hydrologiques. Les fréquences de cernes de crues ont été comparées entre sites situés en aval et en amont d'un barrage, selon différentes distances des arbres au barrages et au trait de berge.

**2. Évolution des températures printanières et liens avec les inondations.** Pour préciser les effets potentiels d'un réchauffement climatique dans les régimes d'inondations, un réseau de chronologies de cernes sensibles à la température printanière a été développé pour reconstruire et évaluer la variabilité des températures printanières au cours des 250 dernières années, et étudier les associations entre les hauts débits printaniers (REC1) et l'évolution de la température printanière régionale depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Une fonction de transfert a été établie incluant l'ensemble des chronologies de largeur de cerne de croissance des Frêne noirs développés aux précédents chapitres, ainsi qu'un nouveau réseau de chronologies de pin gris développé à l'échelle régionale à partir de 722 échantillons (345 arbres).

**3. Trajectoires hydro-climatiques prévisionnelles.** Afin d'envisager les impacts potentiels des changements climatiques sur le futur des inondations printanières, plusieurs trajectoires hydro-climatiques de changements dans les débits moyens printaniers de la Rivière Harricana ont été projetés pour l'horizon 2100, sous deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et RCP8.5) et en utilisant un ensemble de 10 modèles climatiques globaux (GCM) CMIP5 régionalisés pour le Québec. Les associations climat-débit déterminés dans les chapitres précédents sont utilisées pour projeter statistiquement les trajectoires hydroclimatiques prévisionnelles de la Rivière Harricana et comparés à 2 modèles hydrologiques de la Direction de l'Expertise Hydrique du Québec, incluant les même produits (10-GCMs) et scénarios climatiques (RCP4.5, 8.5) et selon les mêmes paramètres (r1i1p1). Les tendances à long-terme dans les variables climatiques et leur contribution relative aux inondations printanières historiques ont aussi été comparer avec les tendances projetées, et par rapport à la perspectives historique à long terme détaillée dans les précédents objectifs (REC1 et températures printanières).

## Principaux résultats obtenus (300 mots)

### 1. Cohérence spatiale des inondations.

Les cernes de crue des rivières naturelles sont similaires entre eux et corrélés avec REC1 et avec les enregistrements hydrologiques régionaux démontrant un signal cohérent d'inondations à l'échelle régionale. Au contraire, les cernes de crues des rivières régulées diffèrent et principalement après installation des barrages. Les cernes de crues ne présentent pas ou peu de différences pour la période avant la construction du barrage, contrairement à la période après barrage dans laquelle ils sont marqués et enregistrés plus fréquemment dans les arbres les plus éloignés du barrage, et les plus proches du trait de berge.

### 2. Évolution des températures printanières et liens avec les inondations.

La variabilité des températures printanières reconstruites est corrélée aux re-analyses climatiques et aux données paléo-climatiques régionales qui démontrent tous un refroidissement durant le Petit Âge Glaciaire, et un réchauffement depuis le début de l'Ère industrielle. Le changement climatique observé à la fin du Petit Âge Glaciaire, ainsi que l'augmentation dans la fréquence et la magnitude des inondations printanières se traduit par un réchauffement graduel marqué des températures printanières en 1850 puis en 1940. Les plus hauts débits enregistrés et reconstitués correspondent pourtant aux hivers les plus longs et les plus neigeux, et aux printemps les plus froids et les plus tardifs. Depuis les dernières décennies le réchauffement est associé à des dégels printaniers plus précoces et semble contribué à une dominance des pluies, contrairement à la fonte des neiges, dans les débits printaniers.

### 3. Trajectoires hydro-climatiques prévisionnelles.

Les tendances historiques démontrent une réduction de la durée et de la sévérité de la saison froide, ainsi que de l'accumulation annuelle de neige et de l'équivalent en eau de la neige, associé à un dégel printanier et un pic de débit printanier plus précoces depuis 1901. Les trajectoires hydroclimatiques projetées suggèrent globalement une plus grande contribution des pluies aux débits hivernal et printanier, compensée par une diminution du manteau neigeux, ce qui n'entraînerait pas ou peu de modifications de la variabilité des débits moyens printaniers d'ici la fin du siècle. Cependant, 2 GCM sur 10 envisagent une augmentation future de la magnitude et de la fréquence des hauts débits printaniers liés à l'influence conjointe de pics de neige en hiver et de pics de pluies au printemps. Ce résultat reflète surtout l'incertitude liée à l'utilisation de tels modèles climatiques à la petite échelle du bassin de la rivière Harricana. Ces analyses sont toujours en cours et ces résultats encore préliminaires.

**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

Ce projet a su bénéficier de l'expertise de nos partenaires et de nombreux chercheurs (*cf.* co-auteurs) pour étudier les inondations régionales dans leur ensemble (leur histoire, leurs futures probables, leurs mécanismes climatiques), tout en proposant une approche novatrice pour reconstruire de l'information paléo-hydrologiques dans un contexte de manque d'enregistrements hydrologiques. Dans son ensemble, le projet a surtout considéré le frein constitué par le manque de données hydrologiques et la régulation des niveaux d'eau dans les analyses et les modélisations hydrologiques. Les études ont porté sur un ensemble de bassins versants et une échelle régionale plutôt qu'une unité hydrologique unique pour démontrer l'applicabilité des méthodes et des résultats à plus grande échelle afin de bénéficier à la société québécoise, et canadienne. L'approche de la dendro-hydrologie reste encore peu utilisée au Québec et bénéficierait d'une plus large considération puisqu'elle permet d'accéder rapidement à des données hydrologiques cruciales pour aider dans les décisions des gestionnaires des territoires et des ressources en eau. On peut imaginer échantillonner 1 rivière par bassin versant pour dresser un portrait global des changements historiques dans la variabilité des débits printaniers au Québec par exemple. Nous avons également publié l'intégralité des données sur un serveur scientifique (Mendeley Data) et, lorsque cela était possible car coûteux, nous avons publié sous licence Open Access pour que ces recherches puissent être bénéfiques au plus grand nombre. Nous travaillons également à transposer cette méthode vers d'autres essences d'arbres qui peuplent les berges des cours d'eau en zone boréale. Ces arbres deviendraient autant de sources de données sur les inondations, et ce, rendues accessibles par notre méthode. Son application dans les zones où les données hydrologiques manquent serait bénéfique pour la compréhension générale de l'aléa inondation au Canada, mais aussi pour l'ensemble du biome boréal. Au-delà d'améliorer les connaissances régionales de l'aléa hydroclimatique et des risques inondations, ce projet a donc aussi développé une méthode de reconstitution, et un outil de projection qui serait reproductible ailleurs au Canada.

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

Pour nos partenaires, la compréhension de la variabilité naturelle des inondations et des mécanismes climatiques qui les déclenchent sont essentielles pour la projection des scénarios de changements climatiques, en AT comme au Canada. Ces scénarios sont indispensables pour la planification de l'aménagement du territoire, la protection des populations, et l'avenir du secteur hydroélectrique. Les résultats de ce projet ont fourni une perspective annuelle continue de la variabilité des inondations depuis 1771 et de manière cohérente dans 4 grands bassins versants et avec d'autres enregistrements paléohydrologiques. La reconstruction du débit de la rivière Harricana est une des plus longues (245 ans) et des plus stables (69% de la variance capturée sur 102ans de calibration) produites à ce jour dans l'Est du Canada boréal. Cette reconstruction devient donc une référence des modèles hydrologiques comme analogues des conditions passées pour gérer, concevoir, ou prévoir les trajectoires hydroclimatiques empruntées par les rivières, et notamment, pour re-calibrer les fréquences de retour des inondations par rapports aux données instrumentales. Ce projet contribue au développement d'une méthode de reconstruction hydrologique applicable où les données manquent, et permettra d'améliorer notre compréhension future de l'aléa inondation dans l'ensemble du biome boréal. L'étude des cernes de crues en rivières jaugées, non jaugées, naturelles ou régulées, pour étudier la variabilité naturelle historique des débits printaniers peut être largement appliqué dans l'étude des inondations à travers le Québec au sens où chaque Frêne noir riverain des cours d'eau devient une source de données sur les inondations. Ce projet améliore donc les connaissances régionales de l'aléa hydroclimatique et des risques inondations, et a développé une méthode de reconstitution des inondations et un outil de projection reproductible largement au Canada boréal. Les résultats permettront de mieux évaluer les coûts associés aux impacts prévisionnels des inondations et à actualiser, ou dresser, des cartes des régions touchées particulièrement dans les bassins non-jaugés ou régulés.



**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.).

### **Publications scientifiques produites, ou en cours de production, avec le soutien de la bourse RIISQ 2ePB**

Nolin A.F., Girardin M.P., Adamowski J.F., Barzegar R., Boucher M.A, Tardif J.C., Bergeron Y. (in prep). Trends and variability in historical and projected climate change impacts in the Upper Harricana River spring discharge (1771-2100). *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 00(0), 00-00.

Nolin A.F., Girardin M.P., Tardif J.C., Guo X.J., Conciatori F., Bergeron Y., (2022). A 247-years tree-ring reconstruction of spring temperature and relation to spring flooding in eastern boreal Canada. *International Journal of Climatology*, in press. <https://doi.org/10.1002/JOC.7608>

Nolin A.F., Tardif J.C., Conciatori F., Bergeron Y., (2021c). Flood ring production modulated by river regulation in eastern boreal Canada. *Frontiers in Plant Science*. 12: 757280. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.757280>

Tardif, J.C., Kames, S., Nolin, A., Bergeron, Y., (2021b) Earlywood vessels in black ash (*Fraxinus nigra* Marsh.) trees show contrasting sensitivity to hydroclimate variables according to flood exposure. *Frontiers in Plant Science*, 12:754596. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.754596>

Tardif, J.C., Dickson, H., Conciatori, F., Nolin, A.F., Bergeron, Y., (2021a). Are periodical (intra-annual) tangential bands of vessels in diffuse-porous tree species the equivalent of flood rings in ring-porous species: reproducibility and cause? *Dendrochronologia*, 70: 125889. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125889>

Nolin A.F., Tardif J.C., Conciatori F., Bergeron Y., (2021b). Spatial coherency of the spring flood signal among major river basins of eastern boreal Canada inferred from flood rings. *Journal of Hydrology*, 596, 126084. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126084>

### **Données publiées avec le soutien de la bourse RIISQ 2ePB**

Nolin A.F., Girardin M.P., Tardif J.C., Guo X.J., Conciatori F., Bergeron Y., (2022) *Pinus banksiana* and *Fraxinus nigra* dataset for the study of spring temperature in eastern boreal Canada. Mendeley Data, V1, <https://dx.doi.org/10.17632/kk2rsk7rj6.1>

Nolin, A.F., Tardif, J.C., Conciatori, F., Bergeron, Y., (2021c) *Fraxinus nigra* flood ring dataset for the study of flood history (1850-2017) of the Driftwood River, northwestern Ontario. Mendeley Data, V1, <https://dx.doi.org/10.17632/6pgc25nk27.1>

Nolin, A.F., Tardif, J.C., Conciatori, F., Bergeron, Y., (2021b) *Fraxinus nigra* tree-ring dataset for flood history study among major river basins near the Lake Duparquet, eastern boreal Canada. Mendeley Data, V1, <https://dx.doi.org/10.17632/94vjr69fb2.1>

**Participation à des colloques scientifiques soutenu par la bourse RIISQ 2ePB**

Nolin, A. F. : Apport des cernes de crues (flood rings) à la reconstitution des inondations au Québec. Webinaire étudiants du Réseau Inondations InterSectoriel du Québec (RIISQ), Online, 9 – 10 Dec. 2021.

Nolin, A. F.: Reconstruire le débit de la rivière Harricana. L'eau au service de l'énergie, 8e Symposium Ouranos, (Montréal, Canada) Online, 26 Oct. – 6 Nov. 2020

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