

# Impact des perturbations climatiques et anthropiques sur la dynamique des écosystèmes forestiers boréaux : une approche par modélisation hybride

**Encadrants :** Benoît Delahaye, Guillaume Cantin, Adam Ali

**Laboratoire d'accueil :** Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, CNRS UMR 6004

**Projet de recherche :** TOUNDRA

**Financement :** Agence Nationale de la Recherche (ANR-24-CE56-3042)

**Équipe de recherche :** équipe VELO (Vérification pour l'Environnement et le LOGiciel)

**École doctorale :** MASTIC (<https://ed-mastic.doctorat-paysdelaloire.fr/>)

## Contexte

Dans son rapport d'évaluation le plus récent, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) alerte une nouvelle fois sur l'urgence due au changement climatique et accorde une attention toute particulière aux événements extrêmes qu'il semble provoquer, à leur augmentation récente en fréquence et en intensité, et à leurs impacts sur l'équilibre des écosystèmes forestiers [PRA<sup>+</sup>22]. La préservation des écosystèmes forestiers constitue donc un défi sociétal et scientifique majeur, qui implique de produire une meilleure connaissance de leur dynamique, caractérisée par des interactions complexes entre leur évolution biologique, le climat, et l'activité humaine. Malgré le développement récent de modèles mathématiques de végétation qui intègrent plusieurs aspects de ces interactions, la modélisation de la dynamique des écosystèmes forestiers reste particulièrement difficile, en partie en raison de la grande variabilité spatiale des espèces végétales, et de la difficulté à obtenir des données à long terme sur les paramètres qui caractérisent la distribution, l'âge et la croissance des arbres. Or, la gestion des forêts est considérée comme incontournable pour atténuer les effets du changement climatique et pour la préservation des services écosystémiques, dans un contexte de déforestation intense et de perte importante de biodiversité.

Le projet de recherche TOUNDRA (*Mathematical modeling and analysis of boreal forests vulnerability to climate change : a hybrid approach*), financé par l'Agence Nationale de la Recherche, propose d'étudier la stabilité des écosystèmes forestiers boréaux en réponse au changement climatique, par une approche de modélisation hybride, visant à reproduire la dynamique biologique de la forêt perturbée par les événements climatiques extrêmes et l'activité humaine. Le projet s'articule donc autour d'un modèle mathématique obtenu par couplage d'un système d'équations différentielles décrivant la dynamique biologique de la forêt boréale, avec un processus probabiliste discret modélisant l'impact des événements extrêmes et de la déforestation. Ce modèle est décrit en détail dans les articles suivants : [CDF23], [CDF21] et [KABA94]. Cette thèse s'inscrit dans l'activité de recherche du projet TOUNDRA.

## Sujet de thèse

Les objectifs de cette thèse s'articulent autour de deux axes principaux.

Le premier axe concerne la confrontation du modèle hybride de dynamique de forêt perturbée avec les données d'observation produites par les membres écologues forestiers du projet TOUNDRA. Ces données sont de nature paléo-écologique et décrivent l'histoire de la forêt boréale et du feu sur la période de l'Holocène [AAL<sup>+</sup>08]. Une exploration paramétrique et des simulations numériques du modèle seront donc effectuées afin de dégager au moins des régimes de paramètres pertinents. Une réflexion sur la structure du modèle pourra amener à certaines modifications. Cette confrontation du modèle aux données doit permettre de mieux comprendre les mécanismes spatio-temporels qui agissent au sein de l'écosystème forestier boréal. Ainsi, les observations de motifs chaotiques en espace, l'impact

des perturbations climatiques et anthropiques sur la stabilité de l'écosystème, la réponse des écotones forêt-toundra et forêt tempérée-forêt boréale au changement climatique, seront questionnés au regard des trajectoires du modèle.

Le deuxième axe est d'ordre plus théorique et concerne l'étude des propriétés du modèle hybride de forêt. Construit par couplage de deux formalismes, ce modèle hybride présente en effet une dynamique riche. Les propriétés de stabilité, d'émergence d'oscillations ou de régimes chaotiques seront donc étudiées dans le prolongement de travaux très récents en informatique fondamentale sur les systèmes dynamiques hybrides [Tab09]. Une abstraction du système dynamique hybride correspondant au modèle de forêt perturbée sous la forme d'un processus de décision de Markov sera étudiée, ainsi que les questions de bisimulation, de décidabilité et de vérification qui en découlent. Pour une large portée, cette analyse théorique sera placée dans un cadre général, dont l'étude de la dynamique forestière sera l'application privilégiée. D'autres applications pourront néanmoins être envisagées, notamment en océanographie ou en épidémiologie.

## Profil du candidat ou de la candidate

Pour réaliser ce travail de recherche, le candidat ou la candidate devra disposer de solides compétences en informatique, aussi bien computationnelle (simulation numérique, calcul intensif) que théorique (méthodes formelles de vérification de modèles) et en mathématiques appliquées, dans le domaine des équations différentielles. Le candidat ou la candidate devra également montrer de l'intérêt pour les sciences environnementales et notamment l'écologie forestière. Une expérience sur l'étude de modèles en sciences du vivant sera fortement appréciée. Enfin, le candidat ou la candidate devra disposer de qualités rédactionnelles et d'une aptitude pour le travail en équipe.

## Contrat

- Statut : thèse rémunérée sous convention.
- Domaines : informatique, modélisation, mathématiques appliquées, écologie forestière.
- Durée du contrat : 36 mois.
- Date de prise de poste souhaitée : premier semestre de l'année 2025.

## Modalités de candidature

- Date limite pour l'envoi des dossiers : 15 janvier 2025.
- Envoyer à Guillaume Cantin ([guillaume.cantin@univ-nantes.fr](mailto:guillaume.cantin@univ-nantes.fr)) une lettre de motivation et un CV.

## Références

- [AAL<sup>+</sup>08] Adam A Ali, Hugo Asselin, Alayn C Larouche, Yves Bergeron, Christopher Carcaillet, and Pierre JH Richard. Changes in fire regime explain the Holocene rise and fall of *Abies balsamea* in the coniferous forests of western Québec, Canada. *The Holocene*, 18(5) :693–703, 2008.
- [CDF21] Guillaume Cantin, Arnaud Ducrot, and Beatriz M Funatsu. Mathematical modeling of forest ecosystems by a reaction–diffusion–advection system : impacts of climate change and deforestation. *Journal of Mathematical Biology*, 83(6) :66, 2021.
- [CDF23] Guillaume Cantin, Benoît Delahaye, and Beatriz M Funatsu. On the degradation of forest ecosystems by extreme events : Statistical model checking of a hybrid model. *Ecological Complexity*, 53 :101039, 2023.
- [KABA94] Yu A Kuznetsov, M Ya Antonovsky, VN Biktashev, and EA Aponina. A cross-diffusion model of forest boundary dynamics. *Journal of Mathematical Biology*, 32 :219–232, 1994.
- [PRA<sup>+</sup>22] Hans-O Pörtner, Debra C Roberts, Helen Adams, Carolina Adler, Paulina Aldunce, Elham Ali, Rawshan Ara Begum, Richard Betts, Rachel Bezner Kerr, Robbert Biesbroek, et al. *Climate change 2022 : Impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC Geneva, Switzerland, 2022.

- [Tab09] Paulo Tabuada. *Verification and control of hybrid systems : a symbolic approach*. Springer Science & Business Media, 2009.