



RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

Quantifier et cartographier les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts de l'Est du Canada

Soumis par Dominique Gravel
Université du Québec à Rimouski

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Oswaldo OE. Valeria, Institut de recherche sur les forêts (IRF), Québec en Abitibi-Témiscamingue
Frédéric F. Doyon, Sciences naturelles, Québec en Outaouais
Christian C. Messier, Sciences biologiques, Québec à Montréal
Dominique D. Berteaux, Biologie, Chimie et Géographie, Québec à Rimouski
Yves YG. Bergeron, Sciences appliquées, Québec en Abitibi-Témiscamingue

Collaborateurs :

Isabelle I. Aubin, Centre de foresterie des Grands Lacs, Canadian Forest Service
Alain A. Paquette, Head Office, Québec à Montréal
Wilfried W. Thuiller, Head Office, Université Joseph Fourier
William Parker, OFRI - Forest Research and Development, Ministry of Natural Resources
Dan D. McKenney, Cen. foresterie des Grands Lacs-SCF, Natural Resources Canada
Charles CR. Drever, Région d'Ottawa, Nature Conservancy of Canada
Michel M. Loreau, Biology, McGill
Catherine C. Périé, Dir. de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Nikolay NS. Strigul, Mathematical Sciences, Stevens Institute of Technology
Peter PB. Reich, Forest Resources, University of Minnesota
Charles CD. Canham, Head Office, Cary Institute of Ecosystem Studies
Stephen SJ. Colombo, Institut de recherche de forêt d'Ontario, Ministry of Natural Resources

Au
Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

Et
Ouranos inc.

Décembre 2015



Résumé public des résultats et des avantages pour le Canada

Le défi scientifique à la base du projet est de mieux comprendre la distribution future de la forêt tempérée, ainsi que sa productivité, à la fin du siècle. Nous avons donc entrepris le développement d'une série de modèles de simulation à l'échelle de l'individu, du peuplement et du paysage forestier, et de leur intégration. Nous utilisons ces modèles pour mieux comprendre les impacts conjoints du changement climatique et de l'aménagement forestier sur la migration de la forêt tempérée. Le défi opérationnel de ce projet stratégique était d'une part de nature technique, et d'autre part collaboratif. Nous avons dû créer une nouvelle approche de modélisation des aires de répartition basé sur la dynamique des arbres et qui tient compte de la compétition et de la dispersion. Ces modèles doivent être supportés d'une solide analyse de données empiriques afin de satisfaire les attentes de nos partenaires. Le défi opérationnel était de réaliser ces travaux en étant sensible aux préoccupations de nos divers partenaires.

Nos réalisations pour les partenaires gouvernementaux comprennent: i) l'acquisition d'une connaissance 'stratégique' sur l'évolution probable des écosystèmes forestiers de l'est du Canada sous les changements climatiques; ii) la mise en place d'outils pour la recherche (e.g. bases de données et connaissance fondamentale); et iii) la disponibilité de modèles pour explorer des hypothèses d'aménagement forestier.

Nos réalisations pour les partenaires industriels comprennent: i) Une meilleure compréhension de l'incertitude sur la productivité de différentes essences à la suite des changements climatiques. Nous avons trouvé que la source la plus importante d'incertitude vient, non pas de la qualité des modèles écologiques (qui est excellente, au-delà de nos attentes), mais plutôt de l'incertitude des scénarios de changements climatiques; ii) Nous avons cartographié les régions les plus sensibles aux changements climatiques. Ainsi, nous trouvons que la capacité de réponse des forêts aux changements climatiques est minimale là où le changement le plus important est susceptible de se produire, soit à la limite actuelle de la forêt tempérée; iii) Nous avons caractérisé la perception des enjeux forestiers au Canada par un sondage massif auprès des intervenants de l'ensemble du pays; iv) Nous avons proposé des scénarios d'aménagement susceptibles de minimiser les impacts financiers des changements climatiques pour l'industrie forestière. Dans l'ensemble, nous trouvons que les changements climatiques constituent un enjeu qui se développera à moyen terme et nos résultats permettront ainsi une meilleure planification stratégique de l'industrie forestière et de l'aménagement des forêts.

Nos résultats alimenteront également la réflexion de nos partenaires responsables d'aires de protection (la SÉPAQ, Nature Conservancy et Corridor Appalachien) à la transition entre la forêt tempérée et la forêt boréale. Les modèles développés permettent de réaliser des simulations de changement climatique à petite échelle spatiale, celle où la conservation est réalisée.

Finalement, le projet a contribué directement à la formation de personnel hautement qualifié. Le projet a supporté la formation de 1 étudiant à la maîtrise, 10 étudiants au doctorat, 4 stagiaires post-doctorat, 10 étudiants au baccalauréat et un professionnel de recherche. Le projet a supporté la réalisation de deux écoles d'été en modélisation. Les étudiants ont réalisé des stages chez les partenaires et ils ont communiqué leurs résultats à des conférences scientifiques nationales et internationales. Les étudiants ont développé des compétences dans la mise en place et la gestion de bases de données massives, l'analyse statistique bayésienne, la programmation et la simulation de modèles dynamiques, les bonnes pratiques en écologie computationnelle ainsi que la communication scientifique. Un étudiant a reçu une offre d'emploi au terme de ses études par un des partenaires du projet.

Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche est de développer un ensemble de modèles de la dynamique forestière afin de mieux comprendre les incertitudes sur la distribution future des forêts tempérées ainsi que leur rendement à la suite des changements climatiques. Ces outils serviront à mieux évaluer les impacts des changements climatiques sur les stratégies d'aménagement de cet écosystème. Les outils disponibles actuellement pour modéliser la réponse des forêts aux changements climatiques sont limités par l'absence d'intégration de processus écologiques fondamentaux. D'un côté, les forestiers utilisent des courbes de croissance paramétrées pour différentes régions afin de prédire la productivité future. D'un autre côté, les gestionnaires de la biodiversité utilisent des modèles de distribution des espèces basées sur la relation actuelle entre la distribution et le climat. Ces deux approches sont inappropriées pour prédire le rendement futur des forêts parce qu'elles ne considèrent pas l'interaction complexe entre l'aménagement forestier, la dynamique de migration des arbres et les interactions de compétition entre les différentes espèces. Ces prédictions sont trop souvent irréalistes ; à titre d'exemple, les modèles actuels prédisent que l'érable à sucre pourrait se retrouver jusqu'à la Baie d'Ungava en 2100, là où actuellement on ne trouve pas d'arbres. Ce projet est unique parce qu'il réunit ensemble les meilleurs écologistes forestiers et modélisateurs pour développer une suite intégrée d'outils qui permettront de mieux quantifier les impacts sur la productivité des forêts de l'est du Canada. Nous étudions plus particulièrement la productivité des forêts à la transition entre les régions tempérées et boréales, là où les changements les plus importants sont susceptibles de survenir.

Le projet est structuré en quatre tâches techniques : i) développement d'un modèle général de la productivité de l'écosystème forestier sous les changements climatiques ; ii) développement de modèles de compétition pour les prédictions à court terme (10-25 ans) des impacts des changements climatiques sur la productivité ; iii) développement de modèles de simulations de la dynamique forestière pour la prédiction des changements futurs de distribution des espèces et de la productivité à long terme (100-200 ans) ; iv) développement d'applications pratiques de ces modèles et de stratégies d'aménagement forestier innovantes afin de diminuer les impacts appréhendés des changements climatiques sur la productivité des érablières.

Au terme de ce projet de recherche, nous avons transmis trois livrables directement exploitables par nos partenaires. Nous avons d'abord produit un ensemble de cartes pour les régions correspondant aux domaines bioclimatiques actuels de l'érablière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune qui détaillent la distribution attendue en 2100 des principales espèces d'arbres à valeur commerciale. Nous avons caractérisé la perception des enjeux liés aux changements climatiques par les intervenants du milieu forestier et proposé des stratégies d'aménagement forestier qui permettront de mitiger ces impacts et nous les comparerons aux stratégies d'aménagement actuelles. Finalement, nous avons rendu disponible les différents modèles développés au cours du projet aux partenaires afin qu'ils puissent explorer différents scénarios d'aménagement.

Des progrès significatifs ont été réalisés dans la poursuite de chacun de ces objectifs. Nous résumons une description des accomplissements techniques, étape par étape, et ensuite résumons les progrès scientifiques pour chacun des objectifs. Globalement, toutes les étapes planifiées sont complétées ou seront réalisées au cours de la prochaine année.

Progrès réalisés

Les principales étapes du projet sont regroupées par thème :

1. Constitution de l'équipe. La première étape du projet consistait à recruter les étudiants, stagiaires postdoctoraux et assistants de recherche (voir la liste à la section trois). Cette étape s'est déroulée avec succès, bien qu'avec un délai quant à l'établissement de certains d'entre eux. Le premier membre de l'équipe recruté est arrivé en février 2013 (C. Albouy, postdoc) et les derniers en janvier 2014 (R. Aussenac et L. Jatton, PhD). 13 étudiants et postdocs ainsi que 10 assistants de recherche et techniciens ont été recrutés pour le projet. Nombre d'entre eux ont obtenu un financement complémentaire, soit par des bourses du CRSNG ou du FRQNT, ou bien des financements connexes (e.g. chaires de recherche, programme FONCER en modélisation de la complexité de la forêt). Les étudiants recrutés ont les compétences nécessaires à la réalisation du projet. Notamment, nous avons recruté un mathématicien, une physicienne et deux modélisateurs en écologie, dont l'un a des compétences en statistiques bayésiennes. Les collaborateurs indiqués dans la demande de financement participent tous activement au projet et des collaborateurs supplémentaires se sont joints à l'équipe. De nouveaux partenaires se sont également joints à l'équipe : la SÉPAQ (Parc National du Bic), le centre Acer, le Bureau du Forestier en chef, la Direction régionale du Ministère des Forêts, Faune et Parcs ainsi que la pépinière gouvernementale de Berthierville.

2. Ateliers de collaboration. Un premier atelier de travail de trois jours a été tenu en juillet 2013, à Eastman dans les Cantons de l'Est. L'atelier rassemblait collaborateurs, étudiants et partenaires. L'atelier a permis de revisiter les objectifs du projet, les approches de modélisation et à recevoir l'avis des partenaires présents (Domtar, Service Canadien des forêts). Un projet d'article sur l'approche de modélisation multi-échelles a été mis sur pied. L'article a été développé subséquemment et publié à l'hiver 2015 (voir articles publiés). L'atelier a été l'occasion de réaliser

une visite sur le terrain, sur l'une des parcelles permanentes étudiées, dans le massif des Monts Sutton. Nous avons également été visités par Mark Vellend, professeur à l'Université de Sherbrooke, qui est venu nous entretenir de ses travaux sur la germination et la migration de l'érable à sucre.

Un atelier de mi-parcours a été tenu en juin 2014 à Rimouski. Cette rencontre a réuni les chercheurs participant au projet, étudiants gradués, partenaires et aussi des représentants du Ministère des Forêts, Faune et Parcs et du Bureau du Forestier en chef. Une mise à jour sur les directions du projet a été réalisée en avant-midi, alors que l'après-midi a porté sur des échanges structurés autour de deux thèmes : l'aménagement écosystémique dans un contexte de changements climatiques et le calcul de la productivité forestière sur un horizon de 150 ans en incluant les changements climatiques. Cette réflexion a permis d'amorcer un article de synthèse qui sera publié, en collaboration avec nos partenaires, dans un journal spécialisé en aménagement forestier. Nous souhaitons également publier un article d'opinion sur les enjeux pour la foresterie au Canada dans un journal plus général sur les changements climatiques (e.g. Nature Climate Change). Les échanges ont donné naissance à un sondage massif qui a été envoyé à la fin de l'automne 2014 (voir plus bas).

Il est prévu d'organiser un atelier de clôture au projet au printemps 2016, réunissant les collaborateurs, étudiants et partenaires. Ce dernier atelier aura pour objectif de faire le bilan du projet et de préparer une nouvelle collaboration pour la suite de ce projet. Les partenaires sont tous motivés à poursuivre cette collaboration et nous souhaitons construire sur les outils qui ont été développés au cours du projet (base de données, modèles de simulation, sondage etc....).

3. La construction de la base de données nécessaire à l'exécution du projet est complétée. Il est maintenant possible de réaliser des requêtes sur l'ensemble des données d'inventaire forestier des Etats-Unis, du Québec, de l'Ontario, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle Écosse. Nos partenaires de la Direction de la Recherche Forestière, du OMNR et Domtar ont fourni des données d'inventaire, et la contribution de Tembec a permis l'acquisition de données Lidar. Le Service Canadien des Forêts a fourni les données climatiques historiques pour toute la région étudiée. Ouranos a fourni les données de scénarios de changements climatiques. Cette étape est réalisée grâce aux efforts d'un étudiant à la maîtrise et d'une professionnelle de recherche embauchée spécifiquement pour ce projet. La base de données est interrogeable à distance par les membres de l'équipe. Nous avons procédé également à l'acquisition de données sur le terrain, sur trois parcelles permanentes de suivi de la dynamique forestière. La cartographie et le mesurage des arbres sont complétés depuis 2013 aux sites du Bic (10ha) et de l'Abitibi (5ha), et depuis 2015 à la parcelle de Sutton (20ha). Le carottage des arbres et l'analyse des cernes ont été réalisés à l'été 2014. Les données sont également intégrées à une base de données qui est rendue accessible à l'ensemble des collaborateurs du projet. Nous préparons un article décrivant le dispositif de suivi et le protocole de récolte de données et les données seront rendues accessibles publiquement (sans restrictions) dès la publication de cet article.

4. Développement des outils de communication. Le site web décrivant le projet est en ligne (<http://quicc-for.uqar.ca/>). Le site sert principalement à diffuser les objectifs de notre projet, procure la liste des membres avec leurs coordonnées, ainsi que leurs projets. Nous avons également créé un groupe 'github', accessible à tous (<https://github.com/QUICC-FOR>), qui permet d'accéder librement à nos développements et modèles. Cette approche est destinée à accélérer la diffusion de la science, conformément à un article d'opinion que nous avons publié en 2013 (Desjardins et al. 2013, PLoS Biology).

5. Élaboration des stratégies d'aménagement forestier. Des stratégies d'atténuation des effets des changements climatiques ont été discutées au cours de l'atelier de départ et de l'atelier de mi-parcours. Ces discussions ont aussi permis d'élaborer une liste de traitements dont la performance sera évaluée au moyen des modèles que nous développons. Les modèles sont complétés ou en voie de l'être et nous oeuvrons actuellement à la publication de leur description. Nous réaliserons des simulations de scénarios d'aménagement forestier au cours de la prochaine année pour évaluer les stratégies qui ont été proposées.

6. Nous avons constitué un groupe d'étude des statistiques bayésiennes et dirigé notre propre formation sur ces nouveaux outils. Nous avons profité de l'expertise du stagiaire postdoctoral M. Talluto dans le domaine pour animer et superviser les rencontres. Le groupe a été actif durant la première année du projet. Des écoles d'été intensives (une semaine) en modélisation ont été offertes à l'été 2013 et l'été 2014 par D. Gravel. Les étudiants impliqués dans le projet ont tous participé à ces écoles d'été. Une formation intensive d'une semaine sur le calcul informatique haute performance sera offerte à l'été 2016 en collaboration avec prof. T. Poisot de l'Université de Montréal.

7. Développement des modèles (objectifs 1 à 3). Les trois premiers objectifs requièrent la définition de modèles et leur paramétrisation. Ainsi, nous avons défini les bases de trois types de modèles que nous avons sub-séquentiellement paramétré : - Un modèle général d'écosystème forestier sur un gradient environnemental, étudié pour mieux comprendre les déterminants des vitesses de migration. Le modèle est basé sur les équations de Lotka-Volterra auxquelles nous avons ajouté un terme de diffusion (Laplacien) ; - Un modèle de la dynamique de peuplements fo-

restiers couplé à un modèle de dispersion. Nous avons ajouté une courbe de diffusion au modèle de simulation PPA (Perfect Plasticity Approximation) pour étudier la vitesse de migration d'espèces d'arbres dans un contexte où la compétition est forte. - Un modèle de la dynamique du paysage forestier. Nous avons défini un premier modèle à 4 états (Transition, Boréal, Tempéré, Mixte) qui nous permet d'étudier les déterminants des limites d'aire de répartition des grands biomes. Nous nous basons sur la théorie des processus markoviens. Nous avons également développé une approche méthodologique qui permettra d'intégrer les modèles de paysage et les modèles de peuplement et de réaliser des prédictions cohérentes de la répartition et de la croissance des arbres. Notre approche est basée sur les statistiques bayésiennes et permet d'aller au-delà de l'intégration traditionnelle basée sur la moyenne de modèles. Nous avons également développé un modèle couplant la dynamique forestière à l'échelle du paysage (4 états) à celle de population de cerf de Virginie. Le modèle a pour objectif de mieux documenter l'impact de ces herbivore (à la dynamique rapide) sur la réponse des écosystèmes forestiers (dynamique lente) à un changement climatique. Cette addition au projet n'était pas anticipée au départ mais elle est venue de la suggestion d'un partenaire (Domtar), particulièrement soucieux des conséquences de la pression d'herbivorie par le cerf de Virginie sur l'érable à sucre. Le développement de ces modèles est un accomplissement considérable, néanmoins nous sommes en retard de 6 mois sur l'échéancier prévu. Ce retard s'explique par le délai dans le recrutement des étudiants ainsi que pour la compilation des données. Ainsi, nous travaillons actuellement à la rédaction des premiers articles décrivant ces modèles. Ces articles devraient être soumis d'ici les 6 prochains mois. Nous amorcerons à l'hiver les simulations de scénarios d'aménagement forestier.

8. Sondage sur l'aménagement forestier au Canada. Nous avons lancé un sondage massif à l'échelle du Canada pour mieux connaître la perception des changements climatiques chez les aménagistes forestiers. Le sondage a été envoyé à plus de 1145 personnes et nous avons obtenu la réponse de 966 personnes, en provenance du Québec, Saskatchewan, Yukon, Alberta, Colombie Britannique, Nouveau Brunswick, Terre-Neuve, Nouvelle-Écosse et de l'Ontario. L'ensemble des acteurs du milieu est représenté, avec les chercheurs, forestiers du gouvernement, de l'industrie, les consultants, les organisations de protection de l'environnement et les parcs. La participation des associations professionnelles de forestiers et de biologistes a été appréciée et nous a aidé à rejoindre cette grande diversité d'acteurs. Le résultat principal, bien que pas nécessairement surprenant, supporte notre hypothèse de départ que les aménagistes sont conscients des enjeux que constituent les changements climatiques, mais qu'ils ne savent pas comment prendre des moyens concrets pour s'y adapter. Nous publierons ces résultats pour appuyer un article d'opinion ainsi que dans un article décrivant les grandes tendances. Les résultats appuieront également nos choix de stratégies d'aménagement qui seront simulées dans nos modèles.

9. Rédaction d'articles scientifiques. Le projet a commencé il y a trois ans, les étudiants ont été recrutés et ont commencé leurs thèses au cours de la première année. La plupart d'entre eux termine leur premier ou second article scientifique. Néanmoins, 12 articles scientifiques ont été publiés dans des revues internationales avec comité de lecture, parmi les meilleures dans le domaine (e.g. Global Ecology and Biogeography, Ecology Letters, Ecography). 2 articles de vulgarisation ont également été publiés. 5 manuscrits sont actuellement en évaluation et plusieurs sont en préparation pour une soumission d'ici les trois prochains mois. À terme, nous nous attendons à ce que ce financement ait contribué directement à la publication d'une trentaine d'articles. Il existe une très bonne collaboration entre les membres de l'équipe. Notamment, l'article de Talluto et al. (2015) regroupe la majeure partie de l'équipe de collaborateurs. D'autres articles similaires sont en préparation.

10. Stages chez les partenaires. Des stages chez les partenaires ont été réalisés tel que prévu, d'autres seront réalisés dans les prochains mois. Notons :

- S. Vissault a réalisé un stage à la Direction de la recherche forestière et un second chez Ouranos ;
- K. Solarik a réalisé un stage à la pépinière de Berthierville et un second à la Direction de la recherche forestière ;
- H. Nenzen a réalisé un stage au Service canadien des forêts ;
- A. Lesquin réalisera un stage au Bureau du forestier en chef ;
- C. Hutchison réalisera un stage chez Conservation de la Nature Canada ;
- R. Aussenac réalisera un stage chez Ouranos ;

Cette description des principales étapes et accomplissements montre que nous avons suivi les étapes prévues initialement. Le projet se poursuivra au cours de la prochaine année, jusqu'à la soutenance des thèses par les étudiants. Les principales activités qui seront réalisées au cours de la prochaine année sont :

- Poursuivre les échanges avec les partenaires pour raffiner l'interprétation et l'application des résultats, et préparer la poursuite du projet. Nous envisageons mettre en place un Réseau Stratégique ;
- Rédaction d'articles scientifiques sur la présentation des modèles et des résultats de base ;
- Rédaction d'un article scientifique sur le dispositif des parcelles permanentes ;
- Développement d'une plate-forme en ligne pour la diffusion des bases de données ;
- Développement d'un standard international pour les données d'inventaire forestier ;

- Atelier de clôture avec les partenaires ;
- Rédaction d'une demande de financement pour supporter la poursuite du projet ;

Atteinte des objectifs scientifiques

En amont des objectifs principaux de ce projet, nous avons proposé plusieurs réflexions conceptuelles sur l'avenir de la modélisation écologique à plusieurs échelles. La demande pour des projections de la distribution de la biodiversité et de son fonctionnement a stimulé la recherche à l'interface entre plusieurs disciplines de l'écologie. Malgré l'enthousiasme pour les 'scénarios de biodiversité', nous avons remarqué à la suite d'un inventaire de modèles que la plupart des approches sont limitées par l'absence d'intégration de processus écologiques. Nous avons publié deux critiques de ces approches (Thuiller et al. 2013 ; Snell et al. 2014) et identifié les manques de connaissances théoriques et empiriques qui limitent le développement de modèles.

Objectif 1. Si les biogéographes peuvent prédire la distribution future des écosystèmes au terme des changements climatiques au moyen d'analogues spatiaux, ils ne parviennent pas à prédire ce qui se passera durant la phase transitoire où les écosystèmes amorceront un réajustement aux nouvelles conditions environnementales. Nous avons par conséquent entrepris un travail théorique afin de mieux comprendre les déterminants de la vitesse de migration des espèces au sein de communautés. Nous avons réalisé une synthèse (Svenning et al. 2014 - voir Fig. 1) qui révèle que, même si la théorie sur la diffusion identifie le taux de croissance intrinsèque et le taux de dispersion comme les paramètres de base, les interactions biotiques sont susceptibles d'influencer ces deux quantités. Nous avons donc entrepris l'étude de la migration au moyen d'un modèle général de la dynamique spatiale des écosystèmes. Notre analyse révèle que certaines interactions accélèrent la migration (e.g. facilitation, interaction prédateur-proie) et que d'autres la ralentissent (e.g. compétition). La spécialisation des interactions et la correspondance entre exigences environnementales affectent significativement la vitesse de migration. L'analyse d'un modèle cerf-forêt révèle aussi que non seulement le climat a un effet direct sur la distribution de la végétation et des zones de transition, mais aussi indirectement via son effet sur les herbivores. Par conséquent, nous trouvons qu'il est essentiel de considérer la migration de l'ensemble des communautés, et non pas seulement les espèces en isolation l'une de l'autre.

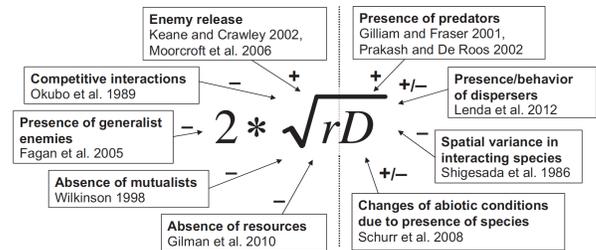


FIGURE 1 – Représentation schématique des impacts des interactions sur la vitesse de migration. La théorie indique que la migration dépend du taux de croissance intrinsèque, r , et de la distance moyenne de dispersion, D . Les interactions peuvent influencer ces deux paramètres et ainsi accélérer ou ralentir la migration.

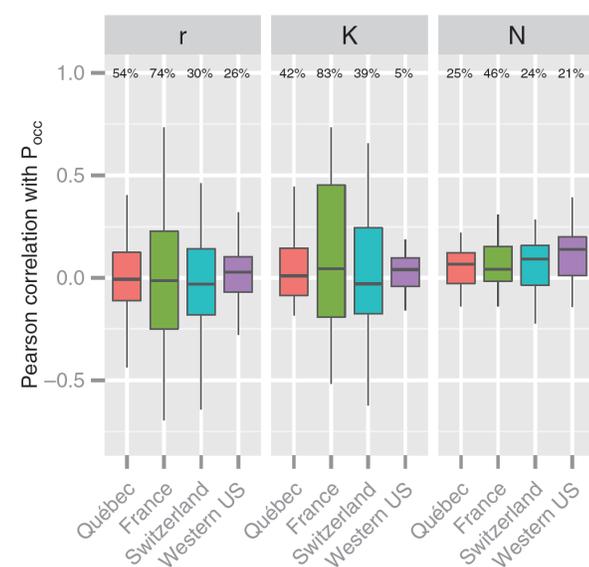


FIGURE 2 – Corrélation entre le taux de croissance intrinsèque, r , la densité maximale, K , et l'abondance, N , et la probabilité d'occurrence (P_{occ}) pour quatre régions tempérées. La théorie suggère une corrélation forte alors que nous n'observons aucune relation significative sur l'ensemble des 119 espèces étudiées.

Objectif 2. Nous avons d'abord réalisé une étude de la démographie des arbres au sein de leur aire de répartition. Nous avons testé l'hypothèse que l'aire de répartition des arbres correspond à l'enveloppe de conditions climatiques où le taux de croissance est positif (Thuiller et al. 2014 - Fig. 2). Notre première analyse a révélé une très mauvaise relation entre le taux de croissance et la répartition, suggérant qu'il y a d'autres phénomènes importants pour expliquer la distribution des arbres. Nous avons ensuite entrepris une analyse détaillée des composantes démographiques de la croissance de populations (croissance, mortalité et recrutement). L'approche que nous développons est basée sur les statistiques bayésiennes et servira à calibrer un modèle de peuplement. Ce travail est toujours en cours puisque l'étudiante en charge du projet (A. Butler) a abandonné ses études pour des raisons personnelles. L'étudiant de doctorat A. Lesquin qui travaille sur l'adaptation du modèle PPA poursuit actuellement cette paramétrisation et elle devrait être complétée à l'hiver 2016. Nous portons une attention particulière à la propagation de l'erreur. L'approche standard est de calibrer les modèles à l'échelle de l'individu et d'agrèger les prédictions moyennes pour un ensemble d'individus, à l'échelle de la communauté, sans se préoccuper l'incertitude qui émerge de l'addition de prédictions avec de l'erreur.

La combinaison de non-linéarités peut amener une explosion de l'erreur. Nous avons trouvé qu'il est possible de contraindre les prédictions à l'échelle de l'individu (e.g. relation entre densité et croissance) à partir des observations à l'échelle du peuplement. Finalement, deux étudiants analysent l'impact de fluctuations climatiques sur la productivité totale des peuplements (R. Aussenac, C. Hutchison). Ils testent l'hypothèse que la diversité dans un peuplement forestier permet de maintenir la productivité face aux fluctuations climatiques. Cette hypothèse suscite particulièrement l'intérêt du Bureau du forestier en chef, qui y voit une assurance face à l'incertitude des changements climatiques. Nous avons trouvé au moyen d'analyse dendrochronologique que les arbres ont généralement une complémentarité dans leur réponse à la sécheresse et à la température de juillet, ce qui permet de réduire la variance de la croissance annuelle. Nous étudions également les conséquences de ces fluctuations au moyen d'un modèle stochastique de développement de peuplement (integro-projection model).

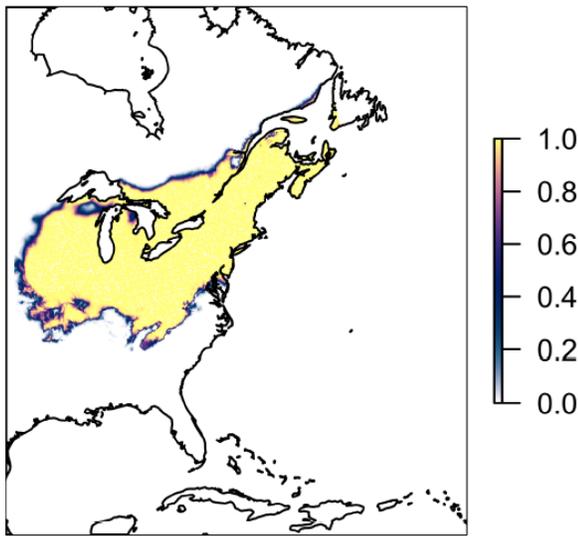


FIGURE 3 – Aire de répartition de l'érablé à sucre estimée à partir de l'observation des transitions de colonisation et d'extinction dans les parcelles d'inventaire forestier. La coloration indique l'incertitude dans l'estimation de la bordure de l'aire de répartition, obtenue par le modèle statistique bayésien.

tions et d'extinctions. Ce nouveau modèle d'aire de répartition a de nombreux avantages sur l'approche traditionnelle, statique, des modèles de distribution. Le modèle utilise une information dynamique, ce qui permet de faire des prédictions sur des états transients en plus de l'équilibre. Par ailleurs, il tient compte de la résistance à l'invasion lors du processus d'immigration, ce qui ralentit considérablement la diffusion. Finalement, il tient également compte des limites à la dispersion. Cette nouvelle approche de modélisation permet de réaliser des prédictions plus réalistes des aires de répartition à la suite des changements climatiques. Nous trouvons notamment que la forêt tempérée ne migrera pas vers le nord au cours des 100 prochaines années, malgré un déplacement de plusieurs centaines de kilomètres des conditions climatiques favorables (Fig. 4). Les forêts mixtes seront cependant converties en forêts tempérées, de sorte que la transition entre le biome tempéré et le biome boréal sera très abrupte, sans cette transition par l'état mixte. Maintenant il nous reste à évaluer ces transitions au moyen de notre méthode intégrative, en tenant compte de l'information à l'échelle de l'arbre. Ces résultats feront l'objet de trois articles scientifiques qui seront soumis au cours de l'hiver 2016. Finalement nous avons couplé ce modèle de transition d'états avec celui de la dynamique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Nous avons d'abord développé l'approche de modélisation sur la base de la théorie épidémiologique (Nenzen et al., en évaluation) et nous avons ensuite calibré le modèle sur des données empiriques. Nous trouvons que c'est une combinaison de la dispersion de l'insecte et de conditions climatiques favorables qui expliquent l'explosion des épidémies. Nous réaliserons des simulations de scénarios d'aménagement forestier afin de déterminer s'il serait possible de minimiser l'ampleur des épidémies par une récolte optimale des bois à l'échelle du paysage.

Objectif 3. La méthode d'intégration de modèles développée pour l'analyse de propagation de l'erreur lors de la transition arbre-peuplement est générale et peut être appliquée à toutes les échelles. Nous avons développé l'approche mathématique pour réaliser cette intégration multi-échelle. Nous poursuivons ainsi plusieurs objectifs : avoir des prédictions cohérentes entre échelles, minimiser les évaluations biaisées par l'autocorrélation entre variables en incorporant des mécanismes à plusieurs échelles, minimiser l'incertitude en utilisant toute l'information disponible, limiter la propagation de l'incertitude au passage à une échelle supérieure d'organisation. Nous avons appliqué cette méthode à la paramétrisation de modèles d'aires de répartition, en combinant un modèle corrélatif à un modèle mécanistique et trouvons une augmentation significative de la qualité des prédictions (Talluto et al. 2015). Nous avons également développé une approche de modélisation des aires de répartition à partir de la théorie des métapopulations. Nous avons donc réalisé une analyse de la dynamique d'extinction et de colonisation par différentes espèces, en posant l'hypothèse que les aires de répartition sont principalement déterminées par des processus à l'échelle du paysage, plutôt qu'à l'échelle du site. Nous trouvons une bien meilleure performance du modèle régional relativement au modèle démographique (objectif 2) : il est possible de prédire la répartition d'espèces forestière sur l'observation de colonisa-

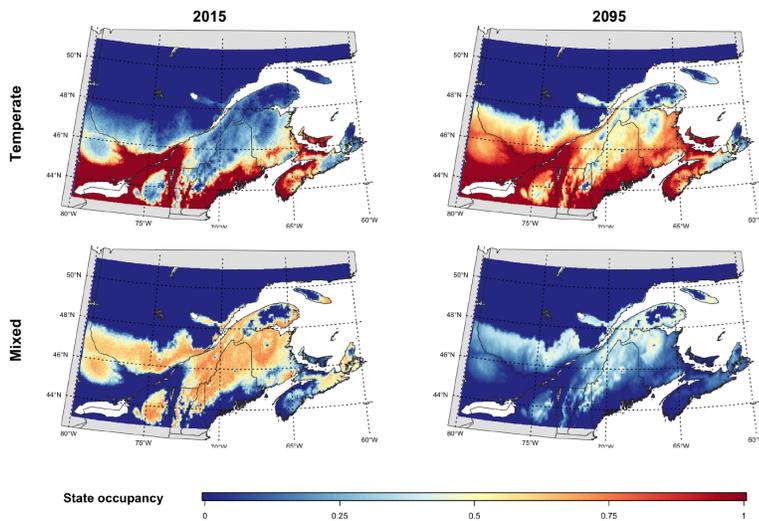


FIGURE 4 – Distribution actuelle et projetée de la forêt tempérée et de la forêt mixte à partir du modèle de simulation étudié. Remarquons l'absence de progression vers le nord de la forêt tempérée et de la diminution de la présence de la forêt mixte.

rencontres et le sondage ont révélé un besoin majeur de réaliser une analyse stratégique des impacts conjoints de l'aménagement forestier et des changements climatiques. Le sondage révèle également que, même si tous les acteurs du milieu forestier (les industriels autant que les organisations de protection de l'environnement) sont sensibles aux changements climatiques, ils ne disposent pas des outils nécessaires à l'adaptation (Fig. 5).

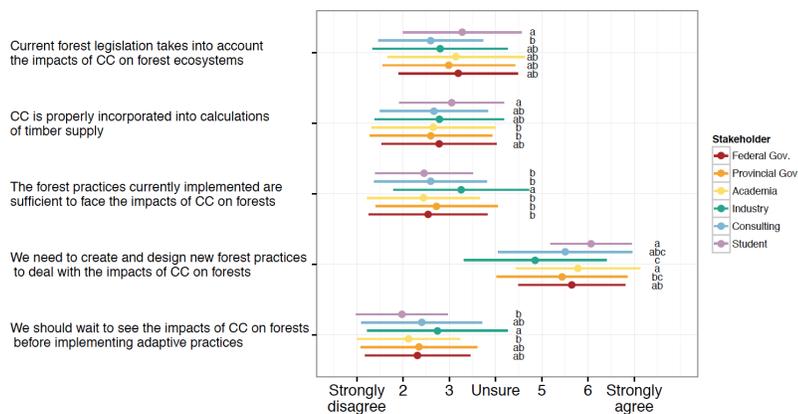


FIGURE 5 – Résultat du sondage national sur la perception des enjeux des changements climatiques par le milieu forestier. Les différents intervenants partagent des opinions similaires, et de nouveaux outils doivent être développés.

Importance des résultats

Importance scientifique. Nos résultats sont susceptibles d'avoir d'importantes retombées au sein de la communauté scientifique en raison de leurs caractères fondamentaux et structurants. Nos résultats sont des contributions méthodologiques, empiriques et conceptuelles. Déjà, certaines publications ont reçu un nombre significatif de citations (Thuiller et al. 2014 : 68 citations ; Svenning et al. 2014 ; 27 citations ; Snell et al. 2014 : 16 citations), ce qui indique un impact immédiat de ces contributions. Nous retenons les cinq résultats suivants quand à leurs impacts potentiels sur les domaines de l'écologie des communautés, de la biogéographie et de l'écologie forestière :

- L'aire de répartition des arbres est déterminée par les processus régionaux de colonisation et d'extinction, pas par la démographie locale ;
- La capacité de réponse des écosystèmes forestiers à un changement climatique est minimale à la transition entre les biomes, là où le plus de changements est susceptible d'intervenir ;

Objectif 4. Nous avons amorcé une réflexion conceptuelle sur l'aménagement écosystémique dans un contexte de changement climatique. L'objectif de l'aménagement écosystémique est de minimiser l'écart entre la forêt naturelle et la forêt aménagée. Le défi est considérable lorsque la cible est changeante. Nos rencontres avec les aménagistes révèlent que leur préoccupation principale est l'incertitude de l'état futur des écosystèmes forestiers. Il sont aussi inquiets de l'efficacité de leurs stratégies d'aménagement. L'une des solutions privilégiée pour soutenir cet enjeu est de réaliser un aménagement qui est à la fois adaptatif et aussi qui mise sur la diversité (d'espèces, de structures et d'aménagements) afin de réduire les risques. Les résultats de ces échanges sont appuyés par la réalisation d'un sondage national sur la perception des enjeux liés aux changements climatiques par les aménagistes forestiers. Nos

Par ailleurs, malgré la reconnaissance de l'ampleur de ces enjeux, ils priorisent d'abord des enjeux locaux de protection de l'environnement ainsi que de production ligneuse à court terme. Nous avons également fait une analyse de la sensibilité des six critères indicateurs d'aménagement écosystémique au changement climatique. Notre travail a permis d'ordonner les critères par leur sensibilité. Nous avons trouvé que les critères les plus sensibles sont aussi ceux qui sont sur lesquels il y a plus d'incertitudes et il faudra conséquemment travailler à réduire ce problème au moyen de stratégies d'atténuation. L'ensemble de cette réflexion est l'objet d'un article d'opinion qui est en cours de rédaction, ainsi qu'un article portant sur les résultats du sondage. Nous soumettrons ces articles au cours de la prochaine année.

- L'intégration multi-échelles est nécessaire afin de limiter la propagation de l'incertitude dans les projections de scénarios de changements climatiques
- Les interactions biotiques peuvent avoir un effet majeur sur la vitesse de migration et par conséquent, il est plus important de comprendre la transition à la suite d'un changement climatique, que l'équilibre futur ;
- Le développement de modèles de simulation des impacts des changements climatiques doit s'appuyer sur la théorie afin de minimiser la complexité et maintenir la compréhension des processus ;

Ces résultats sont suffisamment généraux pour être appliqués à d'autres systèmes ainsi que d'autres régions du monde. Ils sont susceptibles d'être utilisés pour assister le développement de nouveaux modèles de répartition des espèces, et surtout pour améliorer les prédictions des états 'transients'. Cette idée d'une modélisation 'dynamique' de la réponse aux changements climatiques contraste énormément avec la procédure actuelle qui consiste à faire des projections de la distribution future des espèces à l'équilibre avec le climat. Nos résultats montrent que cette approche des modèles de distribution à l'équilibre apparaît fautive, particulièrement pour les arbres qui pourraient prendre plusieurs milliers d'années avant d'atteindre leur nouvel aire de répartition. Nos résultats sont donc susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de scénarios de biodiversité plus réalistes, qui tiennent compte de la complexité des interactions écologiques. Finalement, la base de données que nous avons créée, intégrant les inventaires forestiers de plusieurs instances gouvernementales de l'est de l'Amérique du Nord, permet d'aborder des problèmes en écologie forestière à très large échelle spatiale. Il est plus approprié de travailler à cette échelle, qui est celle à laquelle on s'attend à observer les conséquences des changements climatiques sur la distribution de la biodiversité forestière.

Importance pour les partenaires. Ces résultats, et d'autres, auront des retombées pour les partenaires. Grâce à cette collaboration, nous avons établi que leurs préoccupations principales à l'égard des changements climatiques sont :

- Minimiser l'incertitude sur les conséquences des changements climatiques sur la production forestière ;
- Maintenir la productivité forestière pour les groupes d'essences valorisés par l'industrie ;
- Assurer le renouvellement des forêts après intervention ;
- Adopter des stratégies d'aménagement qui assurent la compétitivité de l'industrie ;
- S'assurer du maintien des objectifs d'aménagement écosystémique ;
- Approbation du public des stratégies d'aménagement ;

Ainsi, nos résultats répondent à ces préoccupations puisque nous trouvons qu'à moyen terme, sur un horizon de 75 ans, les changements climatiques ne devraient pas fondamentalement bouleverser la structure de production. La productivité des espèces résineuses en régions tempérée et mixte devrait cependant considérablement diminuer puisque les peuplements mixtes sont appelés à être convertis en peuplements feuillus. L'adaptation des pratiques d'aménagement écosystémique pour une cible qui est en changement est aussi préoccupante. Les responsables de l'aménagement écosystémique au MFFP craignent notamment la complexification des stratégies d'aménagement, après des années d'effort pour faire changer les pratiques industrielles. Certaines techniques sylvicoles sont prometteuses (e.g. migration assistée, valorisation de la diversité des peuplements) mais les aménagistes soulignent leur difficulté d'implantation compte tenu du cahier de charge en vigueur, ainsi que le manque de moyens financiers pour les appliquer. Néanmoins, les résultats de simulations préliminaires et la théorie soutiennent l'idée que l'outil principal pour accélérer la réponse aux changements climatiques est la récolte de bois. L'ouverture du couvert accélère la succession en bouleversant les interactions de compétition et en augmentant la croissance des peuplements. Une planification judicieuse des interventions de récolte serait par conséquent un moyen d'adaptation cohérent avec les préoccupations de l'industrie forestière. Cette réflexion devra être poursuivie étant donné la découverte que nous avons fait d'une résilience minimale des écosystèmes forestiers à la transition entre les biomes tempéré et boréal. Comme il s'agit de l'endroit où les changements les plus significatifs sont attendus, les aménagistes devront accorder une attention particulière à l'évolution de la forêt dans cette région.



Diffusion des résultats de la recherche

Articles présentés à des revues avec comité de lecture :	5
Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :	12
Exposés à des conférences/Affiches :	23
Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :	4
Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :	3

Diffusion des résultats de la recherche

Articles soumis

1. AMEZTEGUI, A., PAQUETTE, A., HEYM, M., MESSIER, C. & D., G. *Shade tolerance mediates the functional trait – demography relationship in temperate and boreal forests* Submitted to *Functional Ecology*. 2016.
2. AUBIN, I., MUNSON, A., CARDOU, F., BURTON, P., ISABEL, N., PEDLAR, J., PAQUETTE, A., TAYLOR, A., DELAGRANGE, S., KEBLI, H., MESSIER, C., SHIPLEY, B., VALLADARES, F., KATTGE, J., BOISVERT-MARSH, L. & MCKENNEY, D. *Traits to stay, traits to move : a review of functional traits to assess sensitivity and adaptive capacity of temperate and boreal trees to climate change* Submitted to *Environmental Reviews*. 2016.
3. CRAVEN, D., FILOTAS, E., ANGERS, V. & MESSIER, C. *Resilience of tree communities in fragmented landscapes : linking local impacts of functional diversity with connectivity* Accepted in *Diversity and Distributions*. 2016.
4. NENZÉN, H., FILOTAS, E., PERES-NETO, E. & GRAVEL, D. *Landscape models reproduce cyclic insect outbreaks* Submitted to *Ecological Complexity*. 2016.
5. SOLARIK, K., GRAVEL, D., AMEZTEGUI, A., BERGERON, Y. & MESSIER, C. *Acer saccharum germination success is determined by temperature, temperature shifting, and seed origin* Submitted to *Seed Science*. 2016.

Articles publiés

1. AMEZTEGUI, A., COLL, L. & MESSIER, C. Modelling the effect of climate-induced changes in recruitment and juvenile growth on mixed-forest dynamics : The case of montane–subalpine Pyrenean ecotones. *Ecological Modelling* **313**, 84–93. ISSN : 0304-3800 (2015).
2. DANNEYROLLES, V., ARSENEAULT, D. & BERGERON, Y. Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate – boreal forest interface in western Quebec , Canada, 1–13 (2015).
3. LIÉNARD, J. F., GRAVEL, D. & STRIGUL, N. S. Data-intensive modeling of forest dynamics. *Environmental Modelling Software* **67**, 138–148. ISSN : 1364-8152 (2015).
4. TALLUTO, M. V., BOULANGEAT, I., AMEZTEGUI, A., AUBIN, I., BERTEAUX, D., BUTLER, A., DOYON, F., DREVER, C. R., FORTIN, M.-J., FRANCESCHINI, T., LIÉNARD, J., MCKENNEY, D., SOLARIK, K. A., STRIGUL, N., THUILLER, W. & GRAVEL, D. Cross-scale integration of knowledge for predicting species ranges : a metamodeling framework. *Global Ecology and Biogeography*, n/a–n/a. ISSN : 1466-8238 (2015).
5. ZHANG, Y., BERGERON, Y., ZHAO, X.-H. & DROBYSHEV, I. Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada. *J. Plant Ecol.* **8**, 368–379. ISSN : 1752-9921 (2015).
6. BROUSSEAU, P.-M., GRAVEL, D. & HANDA, T. First Record In Canada of *Onthophilus pluricostatus* Leconte (Coleoptera : Histeridae) and a New Mention for the Rare Species *Lordithon niger* (Gravenhorst)(Coleoptera : Staphylinidae). *The Coleopterists Bulletin* **68**, 343–344 (2014).
7. DROBYSHEV, I., GUITARD, M.-A., ASSELIN, H., GENRIES, A. & BERGERON, Y. Environmental controls of the northern distribution limit of yellow birch in eastern Canada. *Can. J. For. Res.* **731**, 720–731. ISSN : 0045-5067 (2014).
8. SNELL, R. S., HUTH, A., NABEL, J. E. M. S., BOCEDI, G., TRAVIS, J. M. J., GRAVEL, D., BUGMANN, H., GUTIÉRREZ, A. G., HICKLER, T., HIGGINS, S. I., REINEKING, B., SCHERSTJANOI, M., ZURBRIGGEN, N. & LISCHKE, H. Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts. *Ecography* **37**, 1184–1197. ISSN : 1600-0587 (2014).
9. SVENNING, J.-C., GRAVEL, D., HOLT, R. D., SCHURR, F. M., THUILLER, W., MÜNKEMÜLLER, T., SCHIFFERS, K. H., DULLINGER, S., EDWARDS, T. C., HICKLER, T., HIGGINS, S. I., NABEL, J. E. M. S., PAGEL, J. & NORMAND, S. The influence of interspecific interactions on species range expansion rates. *Ecography* **37**, 1198–1209. ISSN : 1600-0587 (2014).
10. THUILLER, W., MÜNKEMÜLLER, T., SCHIFFERS, K. H., GEORGES, D., DULLINGER, S., ECKHART, V. M., EDWARDS, T. C., GRAVEL, D., KUNSTLER, G., MEROW, C., MOORE, K., PIEDALLU, C., VISSAULT, S., ZIMMERMANN, N. E., ZURELL, D. & SCHURR, F. M. Does probability of occurrence relate to population dynamics? *Ecography* **37**, 1155–1166. ISSN : 1600-0587 (2014).

11. DROBYSHEV, I., GEWEHR, S., BERNINGER, F. & BERGERON, Y. Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *J. Ecol.* **101**, 231–242. ISSN : 00220477 (2013).
12. THUILLER, W., MÜNKEMÜLLER, T., LAVERGNE, S., MOUILLOT, D., MOUQUET, N., SCHIFFERS, K. & GRAVEL, D. A road map for integrating eco-evolutionary processes into biodiversity models. *Ecology Letters* **16**, 94–105. ISSN : 1461-0248 (2013).

Conférences

1. SOLARIK, K. *Germination : A better understanding in Forest Complexity Modelling Workshop* (St-Hippolyte, Canada, 2015).
2. SOLARIK, K., GRAVEL, D., AMEZTEGUI, A., BERGERON, Y. & MESSIER, C. *Acer saccharum germination rates are influenced by temperature in Center for Forest Research Annual Symposium (CEF)* (St-Hippolyte, Canada, 2015).
3. SOLARIK, K., GRAVEL, D., AMEZTEGUI, A., BERGERON, Y. & MESSIER, C. *Assessing tree germination resilience to global warming : A manipulative experiment using sugar maple (Acer saccharum) in Quebec Center for Biodiversity Science Annual Symposium* (Montreal, Canada, 2015).
4. SOLARIK, K., MESSIER, Y. C. and Bergeron & GRAVEL, D. *Limited Migration : Will Sugar Maple (Acer saccharum) tap out to climate change in North American Forest Ecology Workshop* (Veracruz, Mexico, 2015).
5. TALLUTO, M., BOULANGEAT, I., VISSAULT, S. & GRAVEL, D. *Local colonization-extinction dynamics generate lags in the response to climate change in eastern North American forests in AGU Annual Fall Meeting* (San Francisco, United States of America, 2015).
6. VISSAULT, S., TALLUTO, M., BOULANGEAT, I. & GRAVEL, D. *Difficult migration of temperate tree species in boreal forest under climate change ? in Center for Forest Research (CEF)* (Rimouski, Canada, 2015).
7. BOULANGEAT, I., DAUFRESNE, T. & GRAVEL, D. *The role of consumer-resource trophic interactions in determining vegetation distribution and ecotones in Ecological Society of America Annual Meeting* (Sacramento, United States of America, 2014).
8. GRAVEL, D., TALLUTO, M., BOULANGEAT, I. & VISSAULT, S. *A state-transition approach to estimating the migration rate of the temperate-boreal forest transition under climate change in Symposium annuel du Centre de la science de la biodiversité du Québec* (Montréal, Canada, 2014).
9. GRAVEL, D., TALLUTO, M., BOULANGEAT, I. & VISSAULT, S. *Vers une nouvelle génération de modèles de dynamique forestière in Symposium Ouranos sur les changements climatiques* (Québec, Canada, 2014).
10. NENZÉN, H., FILOTAS, E., PERES-NETO, P. & GRAVEL, D. *Epidemiological models reproduce cyclic insect outbreaks in Quebec Center for Biodiversity Science Annual Symposium* (Montreal, Canada, 2014).
11. NENZÉN, H., PERES-NETO, P. & GRAVEL, D. *More than Moran : dispersal and climate effects on insect outbreaks in Quebec Center for Biodiversity Science Annual Symposium* (Montreal, Canada, 2014).
12. SOLARIK, K. *Limited Migration : Will Sugar Maple Tap Out to Climate Change ? in University of Montreal* (Montreal, Canada, 2014).
13. TALLUTO, M., BOULANGEAT, I., VISSAULT, S. & GRAVEL, D. *A framework for cross-scale integration for predicting tree range shifts under climate change in 7th Eastern CANUSA conference in forest science* (Rimouski, Canada, 2014).
14. TALLUTO, M., BOULANGEAT, I., VISSAULT, S. & GRAVEL, D. *A framework for cross-scale integration for predictive modeling of species' ranges in Ecological Society of America Annual Meeting* (Sacramento, United States of America, 2014).
15. TALLUTO, M., BOULANGEAT, I., VISSAULT, S. & GRAVEL, D. *A state-transition approach to estimating the migration rate of the temperate-boreal forest transition under climate change in Quebec Center for Biodiversity Science Annual Symposium* (Montreal, Canada, 2014).
16. VISSAULT, S., TALLUTO, M., BOULANGEAT, I. & GRAVEL, D. *Difficult migration of temperate tree species in boreal forest under climate change ? in 7th Eastern CANUSA conference in forest science* (Rimouski, Canada, 2014).

17. SOLARIK, K. *Limited Migration : Will Sugar Maple Tap Out to Climate Change ?* in *Centre de semences forestières de Berthierville* (Bertherville, Canada, 2013).
18. NENZÉN, H., FILOTAS, E., PERES-NETO, P. & GRAVEL, D. *Space-time interactions in forest metacommunities in Quebec Center for Biodiversity Science Annual Symposium* (Montreal, Canada, 2012).

Séminaires invités

1. GRAVEL, D. *Critical transition at range limits slows down the response of forest trees to climate warming* Gainesville, Florida, 2015.
2. GRAVEL, D., TALLUTO, M., BOULANGEAT, I. & VISSAULT, S. *Une transition critique à la bordure des aires de répartition ralentit la réponse des forêts aux changements climatiques* Québec, Canada, 2015.

Affiches

1. JATON, L., VALERIA, O., DOYON, F. & BERGERON, Y. *Évaluation multi échelles de l'importance des facteurs abiotiques qui influencent la distribution des essences forestières dans l'Ouest du Québec* Rouyn Noranda, Canada, 2015.
2. VISSAULT, S., BOULANGEAT, I., TALLUTO, M. & GRAVEL, D. *A state transition model to investigate what constrains the northward migration of the temperate forest* Oregon, United States of America, 2015.
3. VISSAULT, S., BOULANGEAT, I., TALLUTO, M. & GRAVEL, D. *A state transition model to investigate what constrains the northward migration of the temperate forest* Montreal, Canada, 2015.
4. SOLARIK, K. *Limited Migration : Will Sugar Maple Tap Out to Climate Change ?* Montreal, Canada, 2014.
5. JATON, L., VALERIA, O., DOYON, F. & BERGERON, Y. *Identification des facteurs abiotiques qui modulent la répartition des essences de la forêt tempérée au Québec* Rouyn Noranda, Canada, 2013.

Vulgarisation

1. SOLARIK, K. *Modelling Climate Change Impact on Tree Regeneration and Future Migration* 2015.
2. GRAVEL, D. & DIONNE, M. *Avec les changements climatiques, où trouvera-t-on le sirop d'érable en 2100 ?* 2013. <<https://www.sepaq.com/dotAsset/dee46bf4-d73f-42c9-b71b-7d92b8a61f5b.pdf>>.