



## RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

# **Perturbations naturelles, résilience des forêts et aménagement forestier: le cas de la limite nordique d'attribution des forêts au Québec dans un contexte de changement**

Soumis par Yves Bergeron  
*Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Igor I. Drobyshev, Sciences appliquées, Québec en Abitibi-Témiscamingue  
Martin-Philippe M-P. Girardin, Biology, Winnipeg  
Hubert H. Morin, Sciences fondamentales, Québec à Chicoutimi  
Sylvie S. Gauthier, Groupe de rech. en écologie forestière interuniversitaire (GREFi), Québec à Montréal

**Collaborateurs :**

Christelle C. Hély-Alleaume, Siège social, CEREGE  
André A. Robitaille, Ressources naturelles, Gouvernement du Québec  
Jacques J. Regnière, Cen. foresterie des Laurentides-SCF, Natural Resources Canada  
Christopher C. Carcaillet, Institut de Botanique, Université de Montpellier II, Languedoc  
Adam A. Ali, Head Office, Université de Montpellier I  
Lawrence LA. Mysak, Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill

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

L'aménagement durable des forêts implique nécessairement l'obtention d'un certain volume de bois et de bonnes dimensions d'arbres à l'intérieur d'une période de temps raisonnable. Toutefois, il faut également s'assurer que, face à l'occurrence de perturbations naturelles, la capacité de régénération des écosystèmes soit suffisante pour maintenir des forêts de densité et de productivité satisfaisantes pour soutenir les activités d'aménagement. Au Québec comme au Canada, des pressions économiques pour une extension de la forêt commerciale vers le nord s'opposent à des pressions environnementales qui, elles, vont dans le sens d'une diminution de la superficie allouée à l'aménagement forestier. Pour répondre à ces différents intérêts, il est primordial de développer des stratégies d'aménagement forestier durable qui permettront la mise en oeuvre de mesures réalisables à la fois sur les plans écologique et économique. La prise en compte à la fois de la productivité forestière et du risque de feux développé dans le cadre de la présente demande a été utilisée par le comité chargé d'étudier la limite nordique d'attribution des forêts au Québec comme un des critères déterminants pour évaluer le potentiel du territoire à l'aménagement forestier durable. Nos résultats de simulation suggèrent que le climat deviendra plus sec dans les prochaines décennies rapprochant l'activité des feux à celle de la limite supérieure de la fourchette pré-industrielle de la variabilité ce qui pourrait réduire la capacité à maintenir les taux de coupe actuels. De plus, la croissance de l'épinette noire et les capacités de régénération des espèces résineuses sont affectées par la sécheresse. Tout ces facteurs pourraient réduire la capacité de maintenir les taux de coupe actuels dans les zones aménagées et conduire à l'ouverture des peuplements. Ce projet a permis la formation de 6 étudiants au doctorat et l'implication de deux post-doctorants. En outre, plus d'une quinzaine d'étudiants au baccalauréat ainsi que divers techniciens et professionnels ont été impliqués dans la réalisation des travaux de terrain et de laboratoire. Nous avons aussi fortement collaboré à un numéro spécial de la Revue canadienne de recherche forestière en 2015. Les travaux ont contribué à définir sur une base écologique, quelle serait la limite nordique à laquelle un aménagement durable est possible au Québec et à explorer les possibles contraintes liées aux changements climatiques. Des approches qui permettent de voir quel sera l'impact futur des feux sur la possibilité forestière commencent à aider le MFFP et l'industrie forestière à appréhender plus concrètement quels pourront être les impacts des changements climatiques sur l'approvisionnement en matière lignieuse et à commencer à s'y adapter.

The sustainable forest management necessarily involves obtaining a volume of timber and good tree dimensions within a reasonable period of time. However, we must also ensure that, in the face the occurrence of natural disturbances, ecosystem regeneration capacity is sufficient to maintain satisfactory density of forests and productivity to support development activities. In Quebec as in Canada economic pressure to an extension of the commercial forest north oppose the environmental pressures, they, are in line with a reduction in the area allocated for development forest. To meet these different interests, it is essential to develop forest management strategies that will enable sustainable implementation of feasible measures both ecologically and economically. There taking into account both forest productivity and the risk of fires developed in the context of the present application has been used by the committee to study the northern limit of allocation of forests in Quebec as one of determining criteria to evaluate the potential of the territory in sustainable forest management. Our simulation results suggest that the climate becomes drier in coming decades rapprochat fire activity than the upper limit of the pre-industrial range of variability. This project allowed the formation of 6 students PhD and the involvement of two postdocs. In addition, more than fifteen undergraduates and various technicians and professionals were involved in the implementation of field and laboratory work. We have also greatly contributed to a special issue of the Canadian Journal of Forest Research in 2015. The work helped define ecologically based what would be the northern limit at which a layout Sustainable Forest is possible in Quebec and to explore possible constraints related to climate change. Approaches that allow us to see what will be the future impact of fires on forest production are beginning to help MFFP and industry to understand more concretely what will be the impacts of climate change on supply, and begin to adapt.

## RAPPORT DE PROGRÈS

### 1.1 Objectifs du projet

Dans ce projet, nous souhaitons évaluer l'impact des perturbations par le feu et les insectes sur la dynamique des massifs forestiers se trouvant de part et d'autre de la limite actuelle de l'exploitation forestière, en regard des changements climatiques passés, présents et futurs. La mise en œuvre de ce projet doit permettre de mettre en place et d'optimiser les stratégies d'aménagement et de gestion durable des forêts.

Notons, dans un premier temps, qu'une licence d'utilisation des données du MFFP a été signée au cours du projet. De plus, nous avons fait du terrain afin d'augmenter les données disponibles. Finalement, nous avons eu plus d'étudiants que prévu ayant directement travaillé sur le projet, et certains des étudiants finissants au début du projet y ont également contribué sans être financés directement par ce projet.

### 1) Reconstruire les régimes de perturbations (feux, insectes) récents au sud et au nord de la limite nordique (SG, HM et YB, Doctorants : JP, LN)

L'étudiante au doctorat Jeanne Portier (**JP**) responsable de la reconstitution du régime des feux sur le territoire a entamé le programme de doctorat en sc. de l'environnement à l'automne 2012. Elle a présenté et soutenu avec succès sa proposition de recherche, fait du terrain pendant 2 saisons et elle a complété sa scolarité. Jeanne a finalement étudié 4 transects au lieu de seulement 3, ajoutant celui de la rivière Romaine à la suggestion du MFFP et en collaboration avec Hydro-Québec. L'analyse du lien entre le climat et les histoires de feu de ces transects révèle que 3 d'entre eux ont des risques de feux fortement à modérément liés aux conditions climatiques (sécheresse) prévalant soit au printemps ou tout au cours de la saison de feu. Les résultats montrent aussi que les cycles de feu sont plus courts au Nord de la limite nordique qu'au Sud pour l'ensemble des transects et qu'ils s'allongent progressivement d'ouest en est. Elle a également travaillé à préciser le lien existant entre l'historique de feu et le carbone présent dans la biomasse forestière pour son transect de la rivière Romaine. Les résultats montrent que cette région contient des peuplements productifs dont la biomasse aérienne est équivalente à celles forêts aménagées de la zone boréale. Cette biomasse aérienne s'accumule progressivement avec le temps depuis feu jusqu'à atteindre un plateau aux alentours de 110 ans. Elle a fait les analyses et la rédaction de 2 de ses 3 chapitres de thèse est bien avancée. Elle a présenté les résultats de ces travaux lors de quelques conférences régionale, provinciale et internationale.

Dans le cadre des travaux du comité limite nordique, Sylvie Gauthier et coll. ont aussi évalué le régime de feux dans l'ensemble du territoire à l'étude, et cette information a été utilisée pour proposer une nouvelle limite nordique (Gauthier, Raulier et al. 2015).

L'étudiant au doctorat, Lionel Navarro (**LN**), a été recruté à l'été 2013. Pour cet objectif, il s'attarde à définir la dynamique spatiale et temporelle des épidémies d'insectes, plus précisément, la tordeuse des bourgeons de l'épinette, dans les derniers siècles à l'aide de la dendrochronologie ainsi que le régime des épidémies de la TBE durant tout l'Holocène à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des microfossiles, les écailles de papillon de la TBE dans les sédiments de lacs. Il a effectué son séminaire de projet de thèse de même que sa scolarité. En ce qui concerne l'analyse spatiale, la base de données a été corrigée, les courbes dendrochronologiques interdatées et standardisées. Les sites ont été agrégés et sont en cours d'analyse pour la modélisation spatiale. Pour ce qui est du régime des épidémies de la TBE pendant l'Holocène, un modèle permettant de discriminer les écailles de papillon de la TBE parmi les autres insectes épidémiques de la forêt boréale a été réalisé par une étudiante de premier cycle, Marianne Desmeules. La méthode servant à extraire les écailles des sédiments a été perfectionnée et est en cours d'ajustement. Une étudiante de deuxième cycle, Anne-Élizabeth Harvey a débuté cet été un mémoire qui utilisera cette technique afin de comparer le régime des épidémies à celui des feux dans deux carottes

sédimentaires où nous avons déjà étudié le régime des feux à la limite de distribution de la TBE. Un étudiant stagiaire de premier cycle, Sacha Julien, compare les résultats obtenus par la méthode dendrochronologique, les analyses macrofossiles (feces) et microfossiles (écailles de papillon). Une carotte sédimentaire du lac Flévy, sous la limite nordique mais à la limite de distribution de la TBE est échantillonnée et datée, les sédiments sont prêts pour l'analyse.

**2) Reconstruire les régimes de feux holocène et la végétation selon un gradient climatique spatiotemporel afin de mettre en évidence les relations climat/feu et d'évaluer la résilience des forêts en regard des perturbations par le feu au cours de l'Holocène (AA avec YB et HM (CC); doctorants : CR, FO)**

L'évolution des feux de forêt depuis la dernière glaciation a été reconstruite par plusieurs des membres de l'équipe et a culminé par un article dans PNAS (Ali et al. 2012.) Une telle étude a permis de dresser une histoire régionale de la fréquence des feux, de l'ampleur moyenne des feux et de la biomasse brûlée sur le territoire d'étude. Les résultats suggèrent que dans la forêt boréale résineuse de l'Est de l'Amérique du Nord, le nombre de feux a, en fait, diminué depuis les 3 000 dernières années, de même que la quantité de biomasse brûlée. Des simulations des risques de feu indiquent une tendance à l'augmentation de l'humidité disponible dans cette région pour la même période. La tendance à la baisse du nombre d'incendies de forêt serait causée par la réduction constante de l'insolation estivale en lien avec les changements orbitaux. Par contre, la grandeur des feux a augmenté vraisemblablement en lien avec les températures printanières moyennes. Or depuis 5 000 ans, ces températures ont augmenté d'environ 1° C en lien avec l'accroissement de l'insolation printanière. Ce faible accroissement des températures serait responsable de l'ampleur moyenne plus élevée des feux printaniers. Avec le réchauffement climatique anticipé, une augmentation des superficies brûlées aurait une incidence sur la planification des activités forestières et sur les coûts de suppression des feux par les agences de lutte contre les incendies de forêt. En outre, un plus grand nombre de communautés pourraient être touchées.

France Oris (**FO**) a soutenu son doctorat en 2014 (entrepris sur d'autres fonds depuis 2011) dans la région de Matagami. Elle a travaillé sur la résilience de la forêt boréale nordique au cours de l'Holocène en réponse aux perturbations par le feu. Son travail de recherche a permis d'évaluer l'activité des feux Holocène au sud et au nord de la limite nordique des forêts commerciales dans l'ouest du Québec (Oris, Asselin et al. 2014) et a aussi permis d'affiner les méthodes de reconstructions des paléoincendies *via* l'analyse des charbons de bois préservés dans les dépôts lacustres (Oris, Ali et al. 2014).

L'étudiante au doctorat Cécile Remy (**CR**), recrutée en janvier 2013, a soumis son projet de recherche, et soutenu celui-ci en juin 2013. Son travail de recherche a pour principal objectif de déterminer de quelle manière les forêts de la Côte-Nord du Québec vont évoluer durant les prochaines décennies. Les informations fournies seront utiles pour accompagner les mutations socio-économiques qui devront être faites afin de maintenir les écosystèmes dans leur gamme de variabilité naturelle. Pour atteindre cet objectif, la variabilité naturelle passée, présente et future des zones écologiques étudiées est caractérisée par une approche intégrative du climat, des feux et de la dynamique de végétation aux échelles spatiales locale, régionale et subrégionale. Pour réaliser cette étude, des carottes sédimentaires lacustres ont été prélevées en mars 2013 sur 3 sites de part et d'autre de la limite nordique, de la Côte-Nord au Labrador. Actuellement, l'étudiante est en train de finaliser ces travaux de recherche par des publications dans des revues à comité de lecture. Elle déposera son doctorat en 2016.

**3) Évaluer la résilience des forêts issues de perturbations naturelles (feux, insectes) et analyser les facteurs qui les influencent (YB, SG, HM, ID, MG et Doctorants : JP, NM; QJ; Post-docs : RVB et CB);**

Nicolas Mansuy (*NM*) qui a mené la presque totalité de sa recherche à partir d'autres sources de fonds, a défendu sa thèse en 2013. Une partie de son travail a porté sur une évaluation de la capacité de re-fermeture du couvert forestier après feu à partir des données cartographiques du ministère (Mansuy et al. 2012). Le rétablissement après feu a été estimé en utilisant le temps écoulé pour passer du stade de brûlis au stade de régénération et au stade de jeune forêt afin de déterminer si les forêts situées dans les régions sèches (caractérisées par une proportion élevée de dépôts de surface grossiers et secs, une faible précipitation et un cycle de feu court) ont tendance à se rétablir plus lentement après feu, produisant ainsi un peuplement plus ouvert comparativement aux régions plus humides caractérisées par un cycle de feu plus long. Les prédicteurs les plus significatifs étaient le type de dépôt de surface, l'indice de sécheresse canadien et la précipitation durant la saison de croissance. Un rétablissement rapide et une végétation forestière dense sont associés à des dépôts de till subhydriques seulement dans les régions caractérisées par un cycle de feu long (>500 ans). À l'inverse, une régénération lente propice à une jeune forêt clairsemée était habituellement associée aux régions caractérisées par un cycle de feu court (<200 ans) et la présence de dépôts grossiers secs, tels que le dépôt juxtaglaciaire, mais aussi de dépôts mésiques dans certains cas. Nos résultats indiquent aussi qu'un rétablissement lent et une faible régénération forestière vont très probablement suivre les feux qui se produisent lors d'années sèches, peu importe le type de dépôt et la région.

Le stagiaire post-doctoral Rik Van Bogaert (*RVB*) a travaillé quant à lui sur les données terrain récoltés dans des feux récents au nord de l'actuelle limite nord. Il a produit une annexe qui complète le rapport limite nordique, déposé récemment auprès des autorités du MRN. Les résultats indiquent qu'en termes de qualité de la régénération, la proportion de placettes avec un mauvais stocking après feu a légèrement augmenté (de 22 à 27%) comparativement à celle observée avant le feu. Toutefois, si on tient compte du fait que 49% des placettes se trouvent dans le quart du territoire le plus à l'ouest, où le stocking avant et après feu est significativement plus élevé que dans le reste du territoire, la proportion de placettes ayant un mauvais stocking après feu serait vraisemblablement plus élevée. En terme de croissance des espèces, dans le territoire à l'étude, le temps moyen que prend un semis d'épinette noire pour atteindre 200 cm après feu était ~33 ans, comparativement à ~19 ans pour un pin gris. La croissance après feu de l'épinette noire et du pin gris était négativement influencée par l'altitude, la seule variable qui a montré un effet significatif. Dans le cas de l'épinette noire, la meilleure croissance était observée dans le quart du territoire le plus à l'ouest du territoire mais au total 57% des placettes avaient un taux de croissance inférieur après feu comparativement à celui avant feu. Pour le pin gris, ce pourcentage était de 77% sans distinction spatiale. Ces résultats ont de plus fait l'objet d'une publication (Van bogaert et al. 2015) où nous avons étudié la productivité des forêts, définie en termes de qualité du coefficient de distribution (stocking) et de la croissance, dans 116 sites de 10–30 années après feu distribués dans une zone de 90 000 km<sup>2</sup> au nord de la limite d'attribution des forêts commerciales du Québec. Soixante-douze pour cent des sites ont été classés comme improductifs, principalement en raison de leur faible croissance. Puisque la croissance est fortement liée à des facteurs climatiques, le reboisement seul ne serait pas suffisant pour augmenter la productivité des peuplements dans notre zone d'étude. En outre, nos résultats montrent que le pin gris sur des sites secs pourrait être moins résilient au feu qu'on ne le pensait, probablement à cause de mauvaises conditions de sites et du climat. Finalement, notre étude est l'une des premières à explorer les enjeux de productivité en bas âge dans les forêts naturelles du nord. Le schéma d'analyse proposé, en définissant la productivité des peuplements sur la base de la croissance et du coefficient de distribution, pourrait fournir un outil intéressant pour évaluer des problèmes similaires de manière précoce dans d'autres systèmes. Dans une autre publication, RVB et coll. ont montré pour l'un des premières fois que l'absence de feu pendant longtemps peut aussi entraîner des problèmes de régénération chez l'épinette noire, à cause d'une

diminution de la capacité reproductive de l'espèce avec l'âge et le temps depuis feu, qui est amplifiée lorsque le phénomène de paludification opère aussi.

La stagiaire post-doctorale, Catherine Boudreault (**CB**) a étudié l'abondance des lichens afin de développer des indicateurs permettant de caractériser le temps nécessaire pour permettre la fermeture de la canopée. Ce travail a fait l'objet d'une publication (Boudreault et al. 2015).

Le projet de doctorat de Qingbiao Jiang (**QJ**) (recruté en septembre 2012) porte sur le modèle de la mortalité des arbres dans les forêts du Québec. QJ a avancé avec succès son projet sur les modes de la mortalité des arbres (dernier 20 ans) comme un processus important qui influe sur la succession, la dynamique du bois mort et de l'équilibre de carbone des forêts naturelles. QJ a étudié la mortalité de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*), les deux espèces les plus communes de la forêt boréale du Québec, en utilisant le modèle général linéaire mixte (GLMM) au niveau de l'arbre (diamètre à hauteur de poitrine, superficie basale, la hauteur et le volume) et du peuplement (latitude, longitude, densité, âge du peuplement, hauteur du peuplement et drainage). L'étude de QJ a montré qu'au niveau de l'arbre, les variables avec plus de pouvoir prédictif étaient la hauteur absolue individuelle (épinette noire) et le DBH relatif (pin gris). Au niveau du peuplement, la mortalité de l'épinette noire augmente avec la densité du peuplement et la hauteur moyenne du peuplement. Les taux de mortalité ont diminué vers le nord. La mortalité du pin gris a diminué avec la densité du peuplement et de l'âge, et était plus élevé dans l'ouest du Québec que dans la partie orientale de la province. Les forêts de haute densité ont montré une diminution nette de la mortalité avec la hauteur des forêts par rapport à celles de faible densité. Nos résultats indiquent que les effets de la densité du peuplement sur la mortalité de l'épinette noire et du pin gris sont complexes et dépendent de facteurs au niveau de l'arbre et de la position géographique du peuplement. Ces résultats seront inclus dans l'article en voie d'être soumis. Au cours de 2015, QJ a terminé l'échantillonnage et les analyses de laboratoire pour son projet doctoral et devrait présenter son deuxième chapitre sur les tendances à long terme de la mortalité de l'arbre au printemps 2016.

#### **4) Modéliser les risques passés et futurs des feux, insectes et événements climatiques extrêmes (sécheresses) sur la base de simulations tirées de modèles du climat et comparaison avec les données empiriques obtenues en 1, 2 et 3 (MG avec AA, CH, ID, Doctorants : EC, QJ, CO; stagiaire post-doc OB);**

Emeline Chaste (**EC**), doctorante en cotutelle entre le Québec et la France depuis janvier 2013 sous la direction de Martin Girardin, Yves Bergeron et Christelle Hély, a pour but d'appréhender les changements présents, passés, et futurs de la limite nordique grâce au modèle de végétation LPJ-LMfire. Pour ce faire, elle doit améliorer le modèle en 1) paramétrisant les types fonctionnels de plantes, dont certains sont nouveaux, 2) modifiant l'entrée des patrons de foudre, source naturelle des incendies simulés et augmenter la résolution spatiale des données climatiques et physiques en entrée, et en 3) implémentant un module dédié à la simulation des épidémies de la Tordeuse des Bourgeons de l'Épinette. A ce jour, les objectifs 1 et 2 sont atteints, ce qui inclut la mise en place des logiciels et programmes sur le serveur Briarée de Calcul Québec. Les premières simulations avec le modèle LPJ-LMfire-QC (Québec) sont attendues pour décembre 2015 et le module de la TBE devrait voir le jour d'ici la fin 2016. Parallèlement, une nouvelle méthode de modélisation de l'incertitude dans les paléoincendies a été élaborée par les membres du groupe, sous le leadership du stagiaire post-doctoral Olivier Blarquez (**OB**) (Blarquez et al. 2013). Un package informatique a été compilé et mis à la disponibilité de la communauté scientifique.

De plus, nous avons obtenu les simulations climatiques (température, précipitation, humidité, vents, etc) de modèles climatiques et ce, pour différentes périodes de l'Holocène au pas de temps décennal. Des indices de sécheresse ont déjà été calculés sur une partie de ces données et mis en relation avec les changements de végétation et feux sur le territoire au sud et nord de la limite nordique sur les 7000 dernières années (Ali et

al. 2012; Girardin et al. 2013a, 2013b; Blarquez et al. 2015). Une étudiante au doctorat, Aurélie Terrier, à notamment contribué à ces aspects de modélisations des feux (Ali et al. 2012; Terrier et al. 2013; Girardin et al. 2013a; Girardin et Terrier 2015). Pour ces travaux, nous avons combiné des données provenant de l'analyse des charbons de lacs, de modèles climatiques et de la modélisation de la fréquence des feux à l'échelle régionale avec des données sur la composition des forêts pour tester l'hypothèse voulant que l'augmentation des risques d'incendies dans les forêts boréales de conifères provoquée par des conditions climatiques plus sèches puisse être contrecarrée par une composante feuillue accrue à l'échelle du paysage. Les travaux menés par Bianca Fréchette portant sur la synthèse des données polliniques pour l'ouest du Québec ont permis de quantifier les grands changements de végétation depuis 7000 ans. Ces travaux font l'objet d'un mémoire du Ministère des Ressources Naturelles (Fréchette, sous presse) qui sera utilisé pour l'élaboration des états de référence du MFFP. Olivier Blarquez (OB) en collaboration avec Bianca Fréchette et plusieurs autres membres du programme ont mis en place des analyses numériquement fondées afin de quantifier la composition passée des écosystèmes et d'estimer la biomasse des principaux genre d'arbres (Blarquez et al. 2015). L'analyse des charbons de lacs dans les forêts boréales de conifères de l'est du Canada indique que la fréquence des feux était plus élevée il y a de 6 000 à 3 000 ans que lors de la période pré-industrielle (1750). Toutefois, dans la limite plus au sud de ces forêts, aucune tendance dans la fréquence des feux n'a été constatée. Nous en avons conclu que le risque de feu plus élevé causé par un climat plus chaud et plus sec dans la partie sud il y a de 6 000 à 3 000 ans a été contrecarré par la plus grande présence de feuillus dans les paysages forestiers comme attesté par les reconstructions de biomasse (Blarquez et al. 2015). Ces travaux représentent une contribution scientifique majeure aux connaissances sur les feux. Plusieurs études ont déjà démontré une augmentation potentielle des feux de forêt en raison du changement climatique. Par contre, aucune ne rapporte l'incidence réelle que peut avoir un changement de la composition forestière sur les feux dans un climat chaud et sec, tel que l'entrevoient les projections climatiques. L'application innovatrice proposée dans les études récentes de l'équipe pourrait ainsi avoir des incidences importantes sur la gestion des feux de forêt.

D'autre part, il est couramment véhiculé que le changement climatique pourrait favoriser la croissance des arbres, entre autres parce que la saison de croissance serait plus longue. Or les travaux menés sur les données de croissance annuelle des arbres échantillonnés par le ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec sur plus de 280 placettes démontrent le contraire (Girardin et al. 2012). En fait, l'augmentation des températures estivales amène un accroissement des périodes de sécheresse et des réponses métaboliques qui diminuent la capacité des arbres à séquestrer le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Qui dit moins de carbone séquestré, dit une diminution de la croissance chez les arbres. L'analyse des cernes annuels indique qu'un nombre exceptionnellement élevé d'épinettes noires (62 %) est entré dans une période de baisse de croissance vers la fin du 20<sup>e</sup> siècle. Ces résultats concordent avec les tendances temporelles observées dans les données de l'indice de végétation par différence normalisée et de la productivité primaire nette modélisée (Girardin et al. 2014). Par contre les résultats indiquent une augmentation de la croissance du pin gris. Chez l'épinette noire, une diminution de l'efficacité d'utilisation du carbone depuis 1950 chez les individus âgés en lien avec le réchauffement climatique et la fonte de la calotte glaciaire a été mise en évidence (Girardin et al. 2014). Cette baisse de la productivité, particulièrement marquée dans les vieilles pessières noires, est la première à se produire au cours des 300 dernières années. La relation entre la productivité forestière et la fonte des glaces en Arctique aura des impacts négatifs supplémentaires avec l'accentuation de la fonte des glaces et le réchauffement régional anticipés durant les décennies à venir. À cela s'ajoute l'impact des feux de forêt dont nos travaux indiquent une tendance à l'augmentation dans les prochaines années (Girardin et al. 2013; Girardin et Terrier 2015).

Le projet de Clémentine Ols (CO) évolue rapidement et est axé sur la croissance de l'épinette noire au Québec. Afin de mieux comprendre l'origine climatique des anomalies de croissance des forêts boréales, nous avons analysé 895 séries de croissance d'épinette noire (*Picea mariana*) provenant de 46 sites repartis le long de trois transects latitudinaux dans l'Est Canadien. Les anomalies de croissance ont été identifiées pour chaque site et transect de 1901 à 2001 à l'aide de deux méthodes. Les résultats montrent que les

anomalies de croissance apparaissent principalement à l'échelle du site mais rarement à de plus grandes échelles géographiques. Les anomalies positives sont fortement associées à des températures anormalement basses pendant la saison de croissance de l'année précédente et pendant la période de dormance ainsi qu'à de faibles précipitations l'été précédent. Les anomalies négatives sont généralement associées à des températures hivernales anormalement basses. Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, les anomalies positives et négatives sont devenues plus fréquentes. Nos résultats révèlent l'importance du climat de l'année précédente et de la saison de dormance sur la croissance et suggèrent une association positive entre variabilité climatique et fréquence des anomalies. L'augmentation prévue de la variabilité climatique pourrait davantage accroître la fréquence des anomalies ainsi que l'importance des micro-conditions comme modificateurs des réponses de croissance aux changements climatiques régionaux. Ces résultats sont actuellement soumis pour publication dans la Revue canadienne de recherche forestière. Clémentine prévoit terminer vers la fin 2016.

### **5) Comparer la résilience des forêts après coupe avec celle observée suite aux perturbations naturelles (SG, YB, Doctorant AM)**

Nous n'avons pas recruté de post-doctorant pour effectuer ce travail, compte tenu que des travaux sur le terrain plus importants que prévus. Par contre, les travaux d'Amar Madoui (*AM* étudiant au doctorat financé sur d'autres fonds) permettent de faire une comparaison entre le temps de refermeture du couvert dans des paysages coupés et dans d'autres incendies et le type de végétation qui s'y retrouve à partir d'imagerie satellitaire. Un manuscrit vient d'être publié à cet égard (Madoui et al. 2015). Le travail montre que parce que les feux brûlent dans des territoires plus hétérogènes que ceux qui font l'objet de coupe, la reprise après feu peut paraître plus lente. Lorsque l'on tient compte de la productivité des peuplements perturbés les différences s'estompent. De même lorsque les peuplements ont atteint le stade régénéré, on n'observe que peu de différence par le taux de fermeture du couvert.

### **6) Synthèse des résultats avec nos partenaires : évaluation des risques relatifs aux perturbations et à leurs effets sur la résilience des forêts et développement de stratégies d'adaptation de l'aménagement forestier face aux changements climatiques (Tous)**

Plusieurs des résultats du projet ont été inclus dans le rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables (<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-limite-nordique-forets.jsp>) présenté au ministre des forêts de la faune et des parcs du Québec en 2014. L'équipe a aussi fortement contribué à la publication d'un numéro spécial de la Revue canadienne de la recherche forestière publié en 2015 qui comprend une synthèse du rapport co-signé par les partenaires du MFFP et de plusieurs co-chercheurs de la présente demande. La prise en compte à la fois de la productivité forestière et du risque de feu développé dans le cadre de la présente demande a été utilisée par le comité comme un des critères déterminants pour évaluer le potentiel du territoire à l'aménagement forestier durable.

Par ailleurs, dans Girardin et al. (2013), nous présentons une synthèse des tendances passées, présentes et futures en danger de feu saisonnier et l'activité du feu reposant sur les données recueillies dans les forêts boréales de l'est du Canada au cours des 20 dernières années, et nous fournissons une évaluation critique de la capacité de mener une gestion forestière durable dans le 21<sup>e</sup> siècle. La synthèse de données fournit des preuves convaincantes de la diminution des conditions climatiques propices aux feux et de l'activité des grandes saisons d'incendies au cours des 2000 dernières années dans l'est forêt boréale de conifères. Les simulations suggèrent cependant que le climat deviendra plus sec dans les prochaines décennies, rapprochant l'activité des feux à celle de la limite supérieure de la fourchette pré-industrielle de la variabilité. Les effets de cette hausse combinée avec l'exploitation forestière peuvent présenter un risque pour la résilience des forêts dans le futur.

**Ecart avec le projet initial :**

Des délais dans le recrutement des étudiants et pour la signature de la licence d'utilisation des données du ministère ont retardé le démarrage de certains des objectifs et sous objectifs. Par contre, tous les étudiants ont pu réaliser leurs travaux bien que, dans plusieurs cas, les thèses soient toujours en rédaction. Les objectifs liés aux travaux des doctorants JP, EC, CR, LN sont demeurés inchangés. Le doctorant QJ remplace un étudiant à la maîtrise tel que planifié à l'origine et mentionné au rapport d'étape. Nous avons aussi recruté une étudiante de doctorat dont les travaux compléteront l'objectif 4 et qui sera financée en partie par d'autres sources. De plus, bien que nous estimions a priori faire peu de terrain, une campagne d'échantillonnage à laquelle ont participé Jeanne Portier, Qingbiao Jiang et Clementine Ols, de même qu'une autre pour Cécile Remy ont été effectuées durant les étés 2013-2014. Conséquemment, à l'objectif 5, nous avons décidé de ne pas recruter de second post-doc, étant donné l'ampleur plus grande des travaux de terrain. Par contre, cet objectif a tout de même été couvert en partie par un des chapitres d'un étudiant de doctorat (AM) dont le financement vient d'une autre source.



## Diffusion des résultats de la recherche

|  |    |
|--|----|
| <b>Articles présentés à des revues avec comité de lecture :</b>  | 2  |
| <b>Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :</b>   | 23 |
| <b>Exposés à des conférences/Affiches :</b>  | 21 |
| <b>Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :</b>  | 11 |
| <b>Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :</b> | 46 |

## DIFFUSION DES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE

### 1. Articles présentés à des revues avec comité de lecture

Ols, C., Hofgaard, A., Bergeron, Y., and I. Drobyshev. Previous and non-growing season climate controls the occurrence of black spruce growth anomalies in boreal forests of Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 2015.

Rémy, C., Andrieux, B., Bonhomme, V., Hély, C., Bergeron, Y., Lavoie, M., Girardin, M.P., Grondin, P., Oris, F., and A.A. Ali.. Improving detection of local fire events in lacustrine deposits with analysis of large charcoal counts. *Quaternary Science Review*. 2015.

### 2 Articles acceptés ou publiés par des revues avec comité de lecture

Ali, A.A., Blarquez, O., Girardin, M.P., Hély, C., Tinquaut, F., Guellab, A.E., Valsecchi, V., Terrier, A., Bremond, L., Genries, A., Gauthier, S., and Y. Bergeron. 2012. Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 109(51):20966–20970.

Blarquez, O., Girardin, M.P., Leys, B., Ali, A.A., Aleman, J.C., Bergeron, Y., and C. Carcaillet. 2013. Paleofire reconstruction based on an ensemble-member strategy applied to sedimentary charcoal. *Geophys. Res. Lett.* 40:2667–2672.

Blarquez, O., Ali, A.A., Girardin, M.P., Grondin, P., Fréchette, B., Bergeron, Y., and C. Hély. 2015. Regional paleofire regimes affected by non-uniform climate, vegetation and human drivers. *Scientific Reports* 5: 13356; doi: 10.1038/srep13356.

Drobyshev, I., Guitard, M.-A., Asselin, H., Genries, A., and Y. Bergeron. 2014. Environmental controls of the yellow birch distribution limit in Eastern Canada. *Can. J. For. Res.* 44: 720–731.

Girardin, M.P., Guo, J.X., Bernier, P.Y., Raulier, F., and S. Gauthier. 2012. Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits. *Biogeosciences* 9: 2523-2536.

Girardin, M.P., Ali, A.A., Carcaillet, C., Blarquez, O., Hély, C., Terrier, A., Genries, G. and Y. Bergeron. 2013a. Vegetation limits the impact of a warm climate on boreal wildfires. *New Phytol.* 199:1001-1011. doi: 10.1111/nph.12322.

Girardin, M.P., Ali, A.A., Carcaillet, C., Gauthier, S., Hély, C., Le Goff, H., Terrier, A., and Y. Bergeron. 2013b. Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *For. Ecol. Manag.* 294:238-249.

- Girardin, M.P., Guo, X.J., de Jong, R., Kinnard, C., Bernier, P., and F. Raulier. 2014. Unusual forest growth decline in boreal North America covaries with the retreat of Arctic sea ice. *Global Change Biol.* 20:851-866.
- Girardin, M.P., and A. Terrier. 2015. Mitigating risks of future wildfires by management of the forest composition: an analysis of the offsetting potential through boreal Canada. *Climatic Change* 130(4): 587-601.
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A. Z. and D. G. Schepaschenko. 2015. Boreal forest health and global change. *Science* 349(6250):819-822.
- Gauthier, S., Raulier, F., Ouzennou, H., and J.-P. Saucier. 2015. Strategic analysis of forest vulnerability to risk related to fire: an example from the coniferous boreal forest of Quebec. *Can. J. For. Res.* 45:553-565.
- Jobidon, R., Bergeron, Y., Robitaille, A., Raulier, F., Gauthier, S., Imbeau, L., Saucier, J.-P., and C. Boudreault. 2015. A biophysical approach to delineate a northern limit to commercial forestry: the case of Quebec's boreal forest. *Can. J. For. Res.* 45:515-525.
- Madoui, A., Gauthier, S., Leduc, A., Bergeron, Y., and O. Valeria. 2015. Post-disturbance recovery in the Boreal Forest: Comparing burned to harvested landscapes using satellite data. *Forests* 6(11): 4105-4134.
- Mansuy, N., Gauthier, S., Robitaille, A., and Y. Bergeron. 2012. Regional patterns of postfire canopy recovery in the northern boreal forest of Quebec: Interactions between surficial deposit, climate and fire cycle. *Canadian journal of Forest Research* 42:1328-1343.
- Mansuy, N., Boulanger, Y., Terrier, A., Gauthier, S., Robitaille, A., and Y. Bergeron. 2014. Spatial attributes of fire regime in eastern Canada: influences of regional landscape physiography and climate. *Landscape Ecology.* 29(7):1157-1170.
- Mansuy, N., Gauthier, S. and Y. Bergeron. 2013. Afforestation opportunities when stand productivity is driven by a high risk of natural disturbance: A review of the open lichen woodland in the eastern boreal forest of Canada. *Mitigation and Adaptation of Strategies for Global Change* 18: 245-264.
- Oris, F., Ali, A.A., Asselin, H., Paradis, L., Bergeron, Y., and W. Finsinger. 2014. Charcoal dispersion and deposition in boreal lakes from 3 years of monitoring: Differences between local and regional fires. *Geophysical Research Letters* 41(19): 6743–6752.
- Oris, F., Asselin, H., Finsinger, W., Hély, C., Blarquez, O., Ferland, M.E., Bergeron, Y., and A. Ali. 2014. Long-term fire history in northern Quebec: implications for the location of the northern limit of commercial forests. *Journal of Applied Ecology* 51:675-683.

- Terrier, A., Girardin, M.P., Périé, C., Legendre, P., and Y. Bergeron. 2013. Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecol. Appl.* 23:21-35.
- Van Bogaert, R., Gauthier, S., Drobyshev, I., Jayen, K., Greene, D.F., and Y. Bergeron. 2015. Prolonged absence of disturbance may lead to reduced seed production. *Ecosystems* 18: 1135-1150.
- Van Bogaert, R., Gauthier, S., Raulier, F., Saucier, J.-P., Boucher, D., Robitaille, A., and Y. Bergeron. 2015. Exploring forest productivity at an early age after fire: a case study at the northern limit of commercial forests in Quebec. *Can. J. For. Res.* 45:579-593.
- Waito, J., Girardin, M.P., Tardif, J.C., Hély, C., Blarquez, O., and A.A. Ali. 2015. Fire and climate: using the past to predict the future. In: *Handbook of Forest Ecology*, edited by Kelvin Peh, Richard Corlett, and Yves Bergeron.
- Zhang, Y., Bergeron, Y., Zhao, X., and I. Drobyshev. 2014. Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada. *Journal of Plan Ecology*. doi: 10.1093/jpe/rtu029

### 3. Exposés à des conférences et affiches

- Bergeron, Y. et I. Drobyshev. 2012. Conséquences des changements climatiques sur l'aménagement écosystémique de la forêt boréale du nord-ouest Québécois, Colloque Ouranos Novembre 2012.
- Bergeron, Y. et L. Imbeau. 2015. Démarche et principaux résultats des travaux du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables du Québec. Midis de la foresterie, UQAT. 13 février 2015.
- Blarquez O. 2014 Disturbance ecology in the boreal forest: numerical approaches in paleoecology. Forest Complexity Modelling Program Summer School. Forêt de Montmorency, Québec, 5 juin 2014.
- Blarquez O. and Y. Bergeron 2014. Tree Biomass, paleofires and climate in Eastern North America. AAG Annual Meeting, Tampa, Florida, 8-12 Avril 2014.
- Blarquez O. 2013. Paléo-biodiversité des forêts boréales en Amérique du Nord. Séminaire, Université du Québec à Chicoutimi, 7 Février 2013.
- Gauthier, S., Bergeron, Y., Girardin, M., Raulier, F., Ali, A.A., Mansuy, N., Oris, F., Van Bogaert, R. et R. Rapanoela. 2014. Risques de feux et productivité forestière, de part et d'autre de la limite nordique d'attribution des forêts. VIième Symposium Ouranos.

- Gauthier, S., Raulier, F., Ouzennou, H., et J-P Saucier. 2015. Analyse stratégique de la vulnérabilité des forêts aux incendies forestiers: l'exemple de la pessière à mousse du Québec. Colloque du CEF, session spéciale : Une évaluation scientifique de la limite nordique des forêts attribuables mars 2015.
- Hély, C., Chaste E., Ali A.A., Girardin M.P., Blarquez O., and Y. Bergeron. 2015. Fire models serving paleoecology. XIX INQUA 2015, July 26 - August 2, Nagoya, Japan (P. Invité).
- Mansuy, N., Gauthier, S., Robitaille, A., Boulanger, Y., Saint-Amand, R., and Y. Bergeron. 2012. Orientation of fire patterns in eastern boreal forest of Canada. Wildland fire Canada 2012 Managing fire in a changing time, Kananaskis Alberta October 2012.
- Mansuy, N. et F. Raulier. 2013. Risque de feux, résilience et aménagement forestier à la limite nordique d'attribution des forêts dans un contexte de changement climatique. Forum de transfert sur la recherche en aménagement et en environnement forestiers FQRNT. 2-3 Octobre, Hôtel Clarion, Québec, Canada.
- Madoui, A. Gauthier, S. Leduc. A., and Y. Bergeron. 2013. Spatial characterization of fires and harvests in boreal forest in Quebec, Canada. 9th North American Forest Ecology Workshop, NAFEW 2013: Piecing Together the Fragments. June 16-20 Bloomington, Indiana.
- Madoui A., Gauthier, S., Leduc A., et Y. Bergeron. 2013. Caractérisation spatiale des feux et des coupes en pessière à mousse de l'Ouest du Québec à partir d'images satellites. 7ème Colloque du Centre d'Étude de la Forêt, 22-24 avril 2013, Hôtel Fairmont Le Château Montebello, Montebello, Québec, Canada.
- Portier J., Gauthier, S., et Y. Bergeron. 2015. Le régime des feux diffère-t-il de part et d'autre de la limite nordique des forêts attribuables du Québec ?". 17ème Colloque annuel de la Chaire en aménagement forestier durable, 2 décembre 2015, Rouyn-Noranda.
- Portier J., Gauthier, S., Y. Bergeron, Arseneault D. et A. Leduc. 2015. Caractérisation de la biomasse forestière aérienne dans le secteur de la rivière Romaine – Lien avec le régime des feux". Colloque du CEF, 30 avril - 1er mai 2015, Rimouski.
- Portier J., Gauthier, S. et Y. Bergeron. 2015. Do fire regimes differ South and North of the limit of commercial forest of Quebec, Canada?". 6th International Fire Ecology and Management Congress, 16-20 Novembre 2015, San Antonio, Texas, USA.
- Remy, C., Andrieux, B., Hély, C., Bergeron, Y., Girardin, M.P., Grondin, P., Lavoie, M., and A.A. Ali. 2014. Fire history from lacustrine charcoal analyses : charcoal area or charcoal count ? In 'Wildland Fire Canada 2014'. Halifax
- Terrier, A., Girardin, M.P., Cantin, A., de Groot, W.J., Anyomi, K.A., Gauthier, S., and Y. Bergeron. 2015. Paludification mediate the ecological impact of an intensifying wildfire

regime in the Clay Belt boreal forest of eastern North America. 6th International Fire Ecology in Fire Management, San Antonio, USA.

Terrier, A., Girardin, M.P., Cantin, A., de Groot, W.J., Anyomi, K.A., Gauthier, S., and Y. Bergeron. 2015. Disturbance legacies and paludification mediate the ecological impact of an intensifying wildfire regime in the Clay Belt boreal forest of eastern North America. American Geophysical Union Joint Assembly, Montréal, Canada.

Terrier, A., Girardin, M.P., Cantin, A., de Groot, W.J., Anyomi, K.A., Gauthier, S., et Y. Bergeron. 2014. La forêt boréale de la Ceinture d'Argile, un paysage résistant aux impacts d'une augmentation future du régime de feux. 8ème conférence annuelle du Centre d'étude de la forêt, Montréal, Canada.

Terrier, A., Girardin, M., Périé, C., Legendre, P., et Y. Bergeron. 2012. Un aménagement forestier pour réduire les impacts des changements climatiques sur les feux de forêts boréaux. 6ème conférence annuelle du Centre d'étude des forêts, Rouyn-Noranda, Canada.

Van Bogaert, R., Gauthier, S., Raulier, F., Saucier, J. P., Boucher, D., Robitaille, A., & Bergeron, Y. 2015. Exploring forest productivity at an early age after fire: a case study at the northern limit of commercial forests in Quebec. 9 ième Colloque annuel du CEF, 30 avril-1 mai 2015, Rimouski.

#### **4. Autres (rapports techniques, articles sans comité de lecture, etc.)**

Boudreault, C., P. Drapeau, M.-H. St-Laurent et L. Imbeau. 2013.. Effets de la structure des peuplements sur l'abondance des lichens épiphytes et terricoles dans les forêts nordiques. *Dans* : Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables. MRN, Secteur des forêts. Annexe 5.

Gauthier, S., et collaborateurs. 2013. Description des critères, justification des seuils, méthodes retenues et résultats détaillés : vulnérabilité face au risque de feu. *Dans* : Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables. MRN, Secteur des forêts. Annexe 6, section 2.3.

Girardin, M.P. 2012. Les vieilles forêts boréales souffrent de la hausse des températures. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Les Brèves. No 30. 2 p.

Girardin, M.P. 2013. Feux et températures printanières : une question de taille. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Les Brèves. No 32. 2 p.

Girardin, M.P. 2014. La fonte des glaces affecte la forêt boréale. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Les Brèves. No 36. 2 p.

- Girardin, M.P. 2014. Plus de feuillus, moins de feux? Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Les Brèves. No 34. 2 p.
- Girardin, M.P. 2015. Changement climatique : cap sur l'atténuation. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. L'Éclaircie No. 99. 2 p.
- Mansuy, N., Gauthier, S., Bergeron, Y., and A. Robitaille. 2012. Rapport final et stratégies de réflexion. Cartographie de la vulnérabilité au feu et résilience forestière pour le secteur sud-est du territoire de la Baie-James. Rapport scientifique réalisé par la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable avec la collaboration du Centre forestier des Laurentides et le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune pour la Commission sur les Ressources Naturelles et le territoire de la Baie-James. Décembre 2012. 32p.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2013. Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables. MRN, Secteur des forêts. 2013 (Y. Bergeron, Sylvie Gauthier et André Robitaille) sont co-signataires de ce rapport.
- Tousignant, A. (sous la direction scientifique de M.P. Girardin). 2014. Fonte des glaces et productivité forestière : quel rapport? Couvert Boréal, printemps 2014, 18-19.
- Van Bogaert, R., D. Boucher, S. Gauthier et Y. Bergeron. 2013. Régénération naturelle et croissance de l'épinette noire et du pin gris après feu. *Dans* : Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables. MRN, Secteur des forêts. Annexe 3.

## **Thèses**

- Madoui, Amar. 2014. Configuration spatiale et dynamique de la régénération suite aux feux et à la coupe dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal. Montréal, Québec, Canada.
- Mansuy, Nicolas. 2013. Régimes des feux et dynamique forestière post-feu de part et d'autre de la limite nordique des forêts commerciales au Québec. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal. Montréal, Québec, Canada.
- Oris, France. 2014. Dynamique holocène des feux de forêts à la limite nordique de la forêt commerciale québécoise. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Rouyn-Noranda, Québec, Canada.
- Terrier, Aurélie. 2014. Modélisation des impacts des changements climatiques sur les feux et la végétation de la ceinture d'argile au Québec. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal. Montréal, Québec, Canada.