



RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

Impact à moyen terme d'une hausse de la température du sol et de l'enrichissement en azote sur la croissance de l'Épinette noire

Soumis par Hubert Morin
Université du Québec à Chicoutimi

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Benoit BD. Côté, Natural Resource Sciences, McGill
Annie A. Deslauriers, Sciences fondamentales, Québec à Chicoutimi
Cornelia CK. Krause, Sciences fondamentales, Québec à Chicoutimi
Daniel DH. Houle, Centre Eau, Terre et Environnement (ETE), INRS

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

et
Ouranos inc.

Novembre 2016



Résumé public des résultats et des avantages pour le Canada

Le défi à la base du projet était de mesurer les réactions des épinettes noires et des sapins baumiers matures au réchauffement climatique. Le grand défi technique était de reconstituer les conditions climatiques qui vont prévaloir dans 50 ans dans la zone boréale de l'Est de l'Amérique du Nord, soit une augmentation de la température d'environ 4 degrés et une augmentation des précipitations de 20% avec une teneur en azote plus élevée. Nous avons pour ce faire établi des dispositifs expérimentaux originaux dans une sapinière mature et dans deux pessières noires matures. Pour simuler adéquatement l'apport en azote supplémentaire des pluies dans le futur, des systèmes d'arrosage par la canopée à l'aide de gicleurs ont été installés. Pour simuler le réchauffement climatique, des câbles chauffants élevant la température du sol de 4 degrés ont été disposés dans le sol autour du système racinaire d'arbres traités. Dans ces dispositifs, certains arbres étaient chauffés seulement, chauffés et arrosés, arrosés seulement et d'autres étaient des témoins. Un autre dispositif consistait en des gicleurs fournissant une pluie enrichie en azote marqué (15N) pour déterminer où cet azote supplémentaire se localisait dans l'arbre et s'il pouvait participer à la formation de bois. Des méthodes novatrices pour suivre les effets de ces traitements sur la croissance ont été utilisées. La première mesure le développement cellulaire du cerne de croissance. Des microéchantillons du cerne de croissance étaient prélevés à toutes les semaines de la saison de croissance pour définir la phénologie de développement et comparer la production cellulaire des arbres traités et non traités. La deuxième méthode utilise des dendromètres électroniques qui sont des dispositifs mesurant à toutes les 5 minutes les variations radiales des troncs.

Le projet stratégique ayant permis de mettre en place ces dispositifs a duré trois ans. Ce projet RDC a duré 4 ans mais il y a eu un an de transition entre les deux projets. À la fin du RDC, nous avons la possibilité d'analyser huit ans de traitement, ce qui est exceptionnel. Les données récoltées dans ce projet ne sont pas encore toutes analysées mais elles le seront dans les prochains mois grâce entre autre à des stagiaires postdoctoraux. Globalement, après huit ans d'arrosage et de chauffage des sols, les épinettes n'ont pas montré de différence significative en ce qui concerne le nombre ou les autres paramètres cellulaires mesurés comme l'épaisseur des parois cellulaires ou la grosseur des cellules. La croissance de l'épinette noire n'a pas augmenté significativement par rapport aux témoins à notre grande surprise. Après trois ans de mesure, la croissance des épinettes dans le site plus froid commençait avant les autres et il se dessinait une tendance vers l'augmentation du nombre de cellules produites. Cependant, cette tendance ne s'est pas maintenue durant les cinq années suivantes. Également, même si l'éclosion des bourgeons s'est produite plus tôt dans le site le plus froid, cet effet s'est estompé avec le temps. L'épinette noire, qui est une espèce très conservatrice, montre que les arbres matures présentent une grande résistance à réagir à différents traitements. C'est une espèce très difficile à étudier puisqu'à la base, elle ne produit pas un grand nombre de cellules dans ses cernes. Les sols chauffés n'ont affecté la proportion d'ectomycorhizes et le nombre d'apex racinaires que dans le site le plus froid alors qu'aucune différence n'a été observée dans l'autre dispositif. L'azote est un élément limitant en forêt boréale. L'ajout d'azote devrait être étudiée en suivant sa dispersion dans l'écosystème par un ajout par la canopée, plus représentatif de la réalité, plutôt qu'un ajout au sol, ce qui est généralement réalisé. L'azote marqué arrosé sur la canopée est effectivement retrouvé en plus grande quantité dans la canopée des arbres que dans les autres compartiments (semis, sols...). Cependant, une très faible proportion de cet azote pénètre dans les branches. L'analyse des microcarottes du bois permettra de voir si cet azote peut contribuer de façon significative à la construction des cellules du bois et éventuellement augmenter la croissance.

Pour les partenaires industriels ou gouvernementaux, ces travaux montrent que l'espèce la plus répandue et exploitée dans la forêt boréale de l'Est du Canada pour ses qualités exceptionnelles présente une résistance surprenante à des traitements simulant un réchauffement climatique à moyen terme (8 ans). Même si ce dispositif ne reproduisait pas parfaitement un réchauffement climatique, il permet de conclure que l'épinette noire ne réagira pas de manière spontanée et drastique à un réchauffement régional, ce qui suggère que la croissance ne devrait pas augmenter de façon rapide dans les prochaines décennies. Une augmentation de la productivité des peuplements causée par une augmentation des températures et des précipitations azotées ne serait pas à prévoir à court ou moyen terme.

Contexte

Ce projet constitue la poursuite d'un projet d'envergure initié grâce à une subvention du CRSNG volet stratégique qui s'intitulait : Impact combiné des changements climatiques, des apports azotés atmosphériques et d'une augmentation de la température du sol sur la productivité de la forêt boréale. Ce projet se situait à la fine pointe des développements en ce qui concerne l'analyse de la croissance intra annuelle et la nutrition azotée. Il a permis de faire avancer nos connaissances de façon significative au niveau de la compréhension des mécanismes de croissance en relation avec les variables environnementales et en particulier la température du sol (Lupi *et al.* 2010a; Rossi *et al.* 2011; D'Orangeville *et al.* 2010; Turcotte *et al.* 2009), l'apport de la canopée dans la nutrition en azote (Lupi *et al.* 2010b) et la réaction des mycorhizes au réchauffement du sol et à l'enrichissement en azote (Bordeleau 2010). Cependant, ce projet constituait un premier pas dans la compréhension de ces mécanismes puisqu'il ne durait que trois ans, un nombre d'années suffisant pour mesurer certains effets des traitements à court terme, mais insuffisant pour mesurer clairement leurs effets à moyen terme et leurs effets cumulés dont on présume qu'ils augmenteront avec le temps. Par exemple, le long d'un gradient latitudinal en forêt boréale, le déneigement peut varier de 3-4 semaines dans quatre placettes réparties entre les 48° et 51° parallèles. D'une année à l'autre, le déneigement peut, à l'intérieur d'une même placette, varier aussi de 3-4 semaines. Or, alors que le début de la xylogénèse est clairement plus hâtif dans les placettes les plus au sud, on n'observe pas de différence significative d'une année à l'autre dans une placette donnée (Rossi *et al.* 2011). Dans le premier cas, l'écosystème est bien adapté à la fonte plus hâtive de la neige alors que dans le deuxième cas, il n'a pas le temps de s'adapter d'une année à l'autre. Dans notre dispositif expérimental, les analyses préliminaires montrent que le chauffage du sol entraîne un début plus hâtif de la xylogénèse d'environ une quinzaine de jours, mais cet effet n'est significatif que pour la 3^e année de mesures. Par ailleurs, les revues de littérature récentes suggèrent une croissance accrue des forêts tempérées et boréales de l'Europe et de l'Amérique du Nord causée par un ajout d'azote (Magnani *et al.* 2007), mais les efforts de modélisation n'ont pas été capables de montrer une influence significative sur la croissance (Currie *et al.* 2004). Cependant, ces modèles ne séparent pas l'ajout d'azote au sol de celui dans la canopée. Sparks (2009) souligne qu'il serait intéressant de voir le résultat si ces modèles considéraient un ajout de l'azote par la canopée. Il souligne également que les études ajoutant de l'azote par la canopée sont rares et qu'ils n'ont été effectuées que sur de courtes périodes alors qu'il est très probable qu'il existe un effet positif sur la croissance à moyen terme. Dans notre dispositif d'arrosage par la canopée, les arbres fertilisés produisent effectivement plus de cellules mais encore une fois, cet effet n'est significatif que pour la 3^e année. Lupi *et al.* (2010a) ont démontré qu'un nombre plus élevé de cellules entraînait une xylogénèse qui se termine plus tard puisque le temps de lignification augmente avec le nombre de cellules. En accord avec ce modèle, la xylogénèse se termine plus tard chez les arbres fertilisés. Ces résultats, après trois années d'études, démontrent bien l'importance de poursuivre l'expérience pour analyser les effets à moyen terme et, si possible, à long terme, des traitements simulant le réchauffement climatique. C'est ce que ce projet se propose de faire, en plus d'utiliser avantageusement l'expérience acquise pour ajuster les méthodes et proposer de nouvelles hypothèses de recherche.

Le climat de la planète s'est considérablement réchauffé dans les 100 dernières années avec une hausse moyenne de 0.6 °C. La dernière décennie a été particulièrement chaude alors que les années 1998, 2001, 2002, 2003, 2004 et 2010 ont été les six années les plus chaudes mesurées instrumentalement depuis 1880 (National Climatic Data Center 2005). Une des plus longues séries instrumentales de l'est du Canada indique un réchauffement de 2 °C depuis 1875 dans la

région de Québec (Houle *et al.* 2007). Une vaste revue de la littérature (Boisvenue & Running 2006) suggère que l'augmentation de croissance de plusieurs forêts de l'hémisphère nord dans les dernières décennies puisse être en partie attribuable au réchauffement du climat bien que l'augmentation des dépôts azotés atmosphériques aurait pu également jouer un rôle.

Les plus récentes simulations pour la forêt boréale de l'est du Canada suggèrent une hausse de la température annuelle moyenne autour de 3 °C alors que les précipitations devraient augmenter de 5 à 20% d'ici 2050 (Plummer *et al.* 2006). De tels changements auront certainement un impact important sur la croissance de la forêt boréale.

La région boréale circumpolaire représente 32% de la forêt du globe. On estime que dans notre pays, la forêt boréale contribue pour 60% des revenus provenant de l'exploitation du bois, et ce, en considérant seulement les emplois directs (coupe du bois, production de pâte à papier, bois d'œuvre) (Burton *et al.* 2003). Malgré son importance vitale, nous connaissons mal la sensibilité de cet écosystème aux changements climatiques. Une meilleure connaissance des facteurs qui contrôlent la productivité et la structure de la forêt boréale est essentielle si on veut exploiter cet écosystème de façon durable tout en se donnant des outils fiables pour prédire son évolution dans un avenir rapproché en fonction des changements climatiques.

Rappel des objectifs et hypothèses de travail

Objectif général : L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les paramètres écophysologiques qui influencent la croissance d'une façon plus globale en intégrant au sein de la même étude à la fois une manipulation du climat (précipitations et température du sol) et les apports d'éléments nutritifs azotés directement dans la pluie et -potentiellement- indirectement par le réchauffement du sol.

Objectifs spécifiques

Mesurer les effets à moyen terme (4 à 7 ans) d'un réchauffement du sol et de l'ajout de précipitations azotées par la canopée sur :

- 1) la disponibilité et l'utilisation des éléments nutritifs et particulièrement de l'azote dans les différents compartiments de l'arbre du feuillage aux racines et dans les compartiments associés (lichens arboricoles, strate herbacée, sol),
- 2) la xylogénèse du sapin et de l'épinette, en relation avec la phénologie de la production cellulaire dans le bourgeon,
- 3) la photosynthèse et l'utilisation des sucres,
- 4) la croissance des racines fines et sur la communauté ectomycorhizienne.

Hypothèses

- 1- L'azote des précipitations est non seulement absorbée par les différents compartiments de l'arbre et les compartiments associés, mais il est utilisé pour la production des cellules du xylème.
- 2- Une réponse positive en croissance dépendra
 - de la plus grande disponibilité en azote inorganique causée par l'élévation de la température et l'azote ajoutée
 - du début plus hâtif de la xylogénèse et du développement des bourgeons
- 3- Une augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs et en particulier de l'azote dans le sol augmentera :
 - la photosynthèse et la production des sucres au niveau du feuillage
 - la translocation de sucres dans les racines fines

4- Les effets combinés d'augmentation de la température du sol et de la disponibilité en azote inorganique provoqueront une modification quali-quantitative de la communauté ectomycorhizienne se traduisant par une augmentation de la biomasse et de la biodiversité fongique.

Progrès réalisés selon les objectifs

Globalement, les travaux ont porté sur les analyses de six années de réchauffement du sol et d'amendement en azote dans les deux dispositifs d'épinette noire situés à des altitudes différentes au Saguenay (Postdoc de Madjelia Ebou C. SOME/DAO), sur des analyses du dispositif d'azote marqué de la forêt Montmorency (doctorat de Mathieu Gélinas-Pouliot), la xylogénèse du sapin et de l'épinette, en relation avec la phénologie de la production cellulaire dans le bourgeon et la photosynthèse et l'utilisation des sucres, (doctorat de Daniele de Barba (2013-15), mémoire de baccalauréat de Joanie Piquette (bourse d'été du CRSNG 2014)), sur l'analyse des arbres défoliés par l'arpeuse de la pruche dans le dispositif expérimental de la forêt Montmorency (Postdoc de Evelyn Belien), et sur la croissance des racines fines et la communauté ectomycorhizienne (maîtrise de Adam Bordeleau). Comme les dispositifs avaient à l'origine été conçus pour durer trois ans, nous avons été contraints en 2015 d'abandonner le dispositif d'arrosage dans le site situé en altitude au Saguenay et celui de la forêt Montmorency puisqu'ils n'étaient plus réparables. Par contre, le chauffage du sol s'est poursuivi dans les trois sites et l'arrosage par la canopée de pluie azotée s'est poursuivi dans le site de basse altitude. Le dispositif spécialement conçu pour l'application répétée de faibles doses d'azote inorganique fortement marqué sur la canopée de six arbres matures à la Forêt Montmorency dans une sapinière installée à la fin de 2008 n'a pas pu être réparé non plus. Nous disposons quand même de 7 ans d'arrosage dans ce site exceptionnel.

Mesurer les effets à moyen terme (4 à 7 ans) d'un réchauffement du sol et de l'ajout de précipitations azotées par la canopée sur :

1) la disponibilité et l'utilisation des éléments nutritifs et particulièrement de l'azote dans les différents compartiments de l'arbre du feuillage aux racines et dans les compartiments associés (lichens arboricoles, strate herbacée, sol),

Étudiant au doctorat : Mathieu Gélinas-Pouliot (2013-)

Un dispositif spécialement conçu pour l'application répétée de faibles doses d'azote inorganique fortement marqué ($^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ et $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$; 99% at. ^{15}N ;) sur la canopée de six arbres matures a été mis en place à la Forêt Montmorency (domaine de la sapinière à bouleau jaune; forêt boréale) dans une sapinière à la fin de 2008. Le dispositif compte aussi 6 arbres témoins qui sont arrosés par de la pluie de composition chimique normale. L'azote marqué permet de mesurer le taux de rétention de l'azote dans les différents compartiments de l'arbre et de l'environnement.

L'utilisation d'azote fortement marqué permet de suivre le devenir de l'azote sans effet fertilisant, un aspect qui a rarement été considéré dans la littérature jusqu'à maintenant. Chaque été de 2009 à 2014 les arbres ont été arrosés de façon hebdomadaire sur une période qui s'échelonne de la mi-juin à la fin septembre.

Durant la période des arrosages, des microcarottes de bois provenant du tronc des arbres traités et d'arbres témoins ont été récoltées sur une base hebdomadaire à l'aide d'un Trefor. À la fin de chaque saison de croissance, soit environ une semaine après le dernier arrosage, des aiguilles, des

rameaux et des branches des arbres traités et des arbres témoins, de même que les différents compartiments du sol (Horizons L, F, H et les 15 premiers centimètres de l'horizon B) sous ces arbres ont aussi été échantillonnés.

Les résultats des deux premières années (2009-2010) de traçage seront bientôt soumis pour publication. Ils démontrent que, contrairement aux études où l'azote est ajouté directement au sol, la canopée des arbres intercepte autant sinon plus d'azote en provenance des précipitations que le sol. Au cours de la deuxième année (2010) des semis présents sous le couvert des arbres matures ainsi que des lichens fruticuleux et foliacés qui pullulent sur les branches et le tronc des arbres ont été récoltés lors de l'échantillonnage de fin de saison. Malgré leur capacité importante à capter l'azote des précipitations, ces compartiments de par leur biomasse ne jouent qu'un rôle marginal.

En 2011, dans l'objectif d'améliorer la précision des résultats obtenus, en plus des échantillons récoltés normalement à la fin de chaque saison, des aiguilles, des rameaux et des branches supplémentaires ont été ramenés en laboratoire. Les aiguilles supplémentaires ont été lavées dans trois bains successifs d'eau distillée et l'écorce des rameaux et des branches a été enlevée pour ne garder que le bois. Les résultats des aiguilles indiquent qu'une bonne partie de l'azote mesuré n'est pas simplement adsorbé à leur surface. Les résultats des analyses du bois indiquent, quant à eux, qu'une faible quantité (différence non significative par rapport aux témoins) se retrouve dans le bois des rameaux et des branches.

Les échantillons récoltés à la fin de 2012 et 2013 qui seront analysés statistiquement bientôt permettront d'inclure les effets d'une épidémie d'insectes défoliateurs sur la captation de l'azote par l'écosystème. Nous avons reçu en décembre 2015 les résultats de l'analyse isotopique des microcarottes de bois. Les analyses sont en cours et elles devraient permettre d'estimer de façon claire la quantité d'azote en provenance des précipitations qui se rend à ce compartiment et de mesurer comment le signal varie au cours d'une saison de croissance. L'étudiant responsable de ce volet a malheureusement été victime d'une maladie. Il s'est écoulé plusieurs mois avant que les médecins découvrent qu'il souffrait de diabète. Cela a entraîné un peu de retard dans la publication des manuscrits et dans la progression de la thèse. M. Gélinas-Pouliot est maintenant suivi et il poursuit son doctorat. Il a effectué sa présentation de projet en décembre 2015. Le projet est très avancé de sorte que les articles devraient être soumis sous peu.

Production scientifique associée :

Gélinas-Pouliot, M., D. Houle, H. Morin, L. Duchesne. The fate of ^{15}N -labeled ammonium and nitrate applied on trees canopy in a mature balsam-fir stand, Québec. Article presque terminé qui sera soumis sous peu.

Mesurer les effets à moyen terme (4 à 7 ans) d'un réchauffement du sol et de l'ajout de précipitations azotées par la canopée sur :

2) la xylogénèse du sapin et de l'épinette, en relation avec la phénologie de la production cellulaire dans le bourgeon.

Étudiant au doctorat : Daniele de Barba (2013-15)

La phénologie peut être utilisée comme un indicateur biologique de changements dans l'environnement, en particulier dans le contexte des changements climatiques. Dans la forêt boréale en particulier, le débourrement des bourgeons est un élément clef de la longueur de la saison de croissance. Avec les changements climatiques, les principaux facteurs limitant la croissance des arbres boréaux (la température et la disponibilité en azote) changent et les études

sur les arbres matures sont limitées. Les objectifs de cette étude étaient d'investiguer les effets du réchauffement du sol et d'une augmentation des dépôts azotés sur le débourrement des bourgeons de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP). Depuis 2008, une expérimentation manipulant ces deux facteurs a été réalisée dans deux peuplements matures d'épinette noire à différentes altitudes dans la forêt boréale québécoise. Une augmentation de la température du sol et une application d'azote via la canopée ont été réalisées. L'observation de la phénologie du débourrement des bourgeons a été effectuée de mai à juillet 2012 et 2013. Dans le site situé en altitude, le traitement de chaleur a causé un début plus hâtif du débourrement (1-3 jours) alors que le traitement en azote a causé un décalage (1-2 jours, seulement en 2012). Aucun effet n'a été enregistré pour l'autre site. Notre design expérimental a démontré que la température du sol et la disponibilité en azote peuvent jouer un rôle important dans la phénologie du débourrement des bourgeons chez l'épinette noire mais les effets des variables environnementales considérées sur la croissance sont étroitement liés aux conditions du site.

Des fluxmètres ont été installés à l'été 2014 dans ces mêmes dispositifs pour bien évaluer le flux de sève en fonction de la phénologie du développement cellulaire, des changements de température et de la disponibilité en azote. Les données de 2014 et de 2015 sont actuellement disponibles. Malheureusement, l'étudiant au doctorat, Daniele de Barba a abandonné sa thèse pour des raisons familiales. Malgré cela, l'analyse de ces données se poursuit actuellement dans le cadre du stage postdoctoral de Lorena Balducci (bourse postdoctorale FRQNT 2016-2017) en collaboration avec Annie Deslauriers (UQAC) et Yves Bergeron (UQAT-UQAM). Ceci est un bon exemple de possibilités de collaborations que le dispositif original a permis.

Étudiante au mémoire de baccalauréat : Joanie Piquette (bourse d'été du CRSNG 2014)

Une étudiante boursière d'été du CRSNG a comparé la phénologie du débourrement du bourgeon à celle du développement cellulaire du xylème (la xylogénèse) dans le cadre de son mémoire de fin d'études. Elle n'a pas trouvé de différence significative entre les différents traitements.

Stagiaire postdoctorale : Madjelia Ebou C. SOME/DAO (boursière de la francophonie 2014-15)

Le dispositif original simulant un changement climatique a été installé en 2008, par conséquent, nous avons six années de données d'analyses cellulaires détaillées (échantillonnage hebdomadaire pendant toute la saison de croissance) du développement du cerne de croissance. Mme Some/Dao est arrivée en août 2014 pour un an. Elle étudie les changements dans la phénologie du développement du cerne de croissance au cours de six années, une base de données uniques. L'analyse effectuée dans deux sites à différentes altitudes n'a pas montré d'effet substantiel du réchauffement et de la déposition azotée sur les différentes phases du développement du xylème comme l'élargissement cellulaire, l'épaisseur des parois ou la lignification. La production cellulaire en terme de nombre de cellules le long du radius n'a pas montré de différence significative et montre un patron semblable dans les arbres traités et témoins. L'effet à moyen terme d'un réchauffement du sol et d'une déposition azotée n'est donc pas concluant.

Stagiaire postdoctorale : Evelyn Belien (2015-16)

Une opportunité inespérée s'est présentée dans le dispositif de la forêt Montmorency dans la sapinière : une épidémie de l'arpenteuse de la pruche a frappé le dispositif et a défolié les arbres. Les arbres sur lesquels des dendromètres électroniques étaient installés et sur lesquels des

microcarottes étaient prises à toutes les semaines de la saison de croissance depuis 2008 ont été plus ou moins touchés. Nous avons donc profité de cette situation pour étudier les effets de la défoliation sur le développement cellulaire et les variations radiales des troncs des sapins. Des mesures de l'intensité de la défoliation et de l'état des arbres ont été prélevées dans toute la placette. La date de mortalité des arbres pourra être déterminée par interdatation. Comme nous avons des mesures avant la défoliation et que nous avons des témoins non défoliés, cette étude est unique en son genre. Les analyses sont actuellement en cours.

Production scientifique associée:

De Barba, D., Rossi, S., Deslauriers, A. Morin, H. 2015. Effect of soil warming and nitrogen foliar applications on bud burst of Black spruce. *Trees-Struct. Func.*, DOI 10.1007/s00468-015-1152-0.

Ebou DAO, M.C., Rossi, S., Walsh, D., Morin, H., Houle, D. 2015. A 6-year-long manipulation with soil warming and canopy nitrogen additions does not affect xylem phenology and cell production of mature black spruce. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2015.00877.

Mesurer les effets à moyen terme (4 à 7 ans) d'un réchauffement du sol et de l'ajout de précipitations azotées par la canopée sur :

3) la photosynthèse et l'utilisation des sucres

Étudiant au doctorat : Daniele de Barba (2013-15)

La photosynthèse a été mesurée à toutes les deux semaines durant la saison de croissance sur les arbres traités et témoins. Des analyses de la photosynthèse avaient déjà été effectuées sur des arbres témoins en 2011, 2012 et 2013 dans le cadre d'un autre projet de doctorat dans les mêmes sites. Les analyses sont en cours. Les échantillons de feuillage, de bois et de racines pour l'analyse des sucres ont été prélevés à toutes les deux semaines durant la saison de croissance. Les échantillons ont été placés dans l'azote liquide pour stopper l'activité cellulaire et ils seront analysés pour leur contenu en sucres par d'autres étudiants.

Mesurer les effets à moyen terme (4 à 7 ans) d'un réchauffement du sol et de l'ajout de précipitations azotées par la canopée sur :

4) la croissance des racines fines et sur la communauté ectomycorhizienne.

Étudiant à la maîtrise : Adam Bordeleau (presque terminé, en congé de maladie)

Les températures plus chaudes et les dépôts azotés altèrent les cycles d'éléments nutritifs des sols et la nutrition des plantes et ce phénomène devrait augmenter dans le futur, particulièrement en hautes latitudes. Comment ces altérations affecteront-ils les organismes en symbiose comme les ectomycorhizes (ECM)? L'objectif était d'étudier les effets à court terme d'un réchauffement de la température du sol et des précipitations enrichies en azote sur les racines et les ECM dans le même dispositif que décrit ci-haut. Les ECM de 12 arbres par site ont été comptés et identifiés à l'aide de la méthode des morphotypes. Après trois ans, le réchauffement du sol a modifié la proportion d'apex racinaires vivants et les ECM dans le site le plus froid. Aucun effet de l'enrichissement en azote sur la chimie du sol n'a été observé et en conséquence, aucun effet sur les racines et les ECM. La densité et les ramifications des apex racinaires n'ont pas été modifiées par les traitements. L'hypothèse selon laquelle les traitements allaient altérer les ECM n'a été confirmée que dans le site le plus froid. Le type d'application et la faible concentration en azote n'ont pas été en mesure de modifier substantiellement les conditions de croissance des racines et

des ECM à court terme.

Production scientifique associée :

Rossi S, Bordeleau A, Morin H, Houle D (2013) The effects of N-enriched rain and warmer soil on the ectomycorrhizae of black spruce remain inconclusive in the short-term. *Annals of Forest Science* 70:825-834.

Références :

- Boisvenue, C. & Running, S.W. 2006. *Glob. Change Biol.* 12: 862-882.
- Bordeleau, A. et al. 2010. *Mycorrhizes 2010, Quebec (Canada)*, 28-29
- Burton, P.J. et al. 2003. p.1-40. Édité par P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith & W.L. Adamowicz
- Currie, W.S., Nadelhoffer, K.J. and Aber, D. 2004. *For. Ecol. Manage.* 196:109-127.
- D'Orangeville, L. et al. 2010. *Annual Meeting of the Am. Soc. Plant Biol. & the Can. Soc. of Plant Physiol.*
- Houle et al. 2007. *J. Climate.* 20: 757-764.
- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S 2010a. *Plant Cell Environ.* 33: 1721-1730.
- Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A., Rossi, S. & Houle, D. 2010b.
- Plummer, S. et al. 2006. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 11: 97-111.
- Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A. & Plourde, P.Y. 2011. *Glob. Change Biol.* 17: 614-625.
- Sparks, T. H., Jaroszewicz, B., Krawczyk, M. and Tryjanowski, P. 2009. *Clim. Res.* 39: 221-226.
- Turcotte, A. et al. *Frontiers in functional plant ecology.* Sous presse.
- Turcotte, A. et al. 2009. *Agr. For. Meteorol.* 149: 1403-1409.



Diffusion des résultats de la recherche

Articles présentés à des revues avec comité de lecture :	2
Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :	13
Exposés à des conférences/Affiches :	7
Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :	0
Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :	10

Articles présentés ou en voie de l'être :

Gélinas-Pouliot, M., D. Houle, H. Morin, L. Duchesne. The fate of ¹⁵N-labeled ammonium and nitrate applied on trees canopy in a mature balsam-fir stand, Québec. Article presque terminé qui sera soumis sous peu.

Belien, E.Houle, D. Morin, H. Duchesne, L. Impact of Balsam fir defoliation by Hemlock looper (*Lambdina fiscellaria*): dendrometric of the stem and cell analysis of the growth ring. En préparation

Article publiés :

De Barba, D., Rossi, S., Deslauriers, A. Morin, H. 2016. Effect of soil warming and nitrogen foliar applications on bud burst of Black spruce. *Trees-Struct. Func.*, 30 : 87-97.

Ebou DAO, M.C., Rossi, S., Walsh, D., Morin, H., Houle, D. 2015. A 6-year-long manipulation with soil warming and canopy nitrogen additions does not affect xylem phenology and cell production of mature black spruce. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2015.00877.

Girard, M.J., Rossi, S., Morin, H. 2015. Mapping events: Cambium phenology across the latitudinal distribution of black spruce. *IAWA Journal*, in press.

Belien, E., Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A. , Gaudard, J. 2014a. Foliar absorption in black spruce [*Picea mariana* (Mill.) BSP] saplings: Does it exist? *Am. J. Exp. Bio.* 1, 52-60.

Rossi, S., Girard, M.J., Morin, H. 2014. Lengthening of the duration of xylogenesis engenders disproportionate increases in xylem production. *Global Change Biology* 20 : 2261-2271.

Lupi, C. S. Rossi, J. Vieira, H. Morin and A. Deslauriers 2013. Assessment of xylem phenology: a first attempt to verify its accuracy and precision. *Tree Physiology* 00, 1–7 doi:10.1093.

Rossi,S., Bordeleau,A., Morin,H. & Houle,D.2013. The effects of n-enriched rain and warmer soil on the ectomycorrhizae of Black spruce remain inconclusive in the short-term. *Ann. For. Sci.*70:825-834

Lupi Carlo, Morin Hubert, Deslauriers Annie, Rossi Sergio, and Houle, Daniel. 2013. Role of soil nitrogen for the conifers of the boreal forest: a critical review. *Int. J. of Plant & Soil Sci.* 2:155-189.

D'Orangeville, L., Houle, D., Côté, B. ,Duchesne, L. et Morin, H. 2013. Increased soil temperature and atmospheric N deposition have no effect on the N status and growth of a mature balsam fir forest. *Biogeosciences* 10 : 4627-4639.

D'Orangeville, L., Côté, B. Houle, D., Morin, H. et Duchesne, L. 2013. A three-year increase in soil temperature and atmospheric N deposition has minor effects on the xylogenesis of mature balsam fir *Trees - Structure and Function*, 27 : 1525-1536.

D'Orangeville L, Côté B, Houle D, Morin H 2013 The effects of throughfall exclusion on xylogenesis of balsam fir. *Tree Physiol* 33(5):516-526

D'Orangeville L, Houle D, Côté B and Duchesne L 2014 Soil response to a 3-year increase in temperature and nitrogen deposition measured in a mature boreal forest

using ion-exchange membranes. Environ. Monit. Assess. 186:8191-8202: DOI 10.1007/s10661-014-3997-x

D'Orangeville L, Côté B, Houle D, Whalen J 2013 Reduced mineralizable carbon in a boreal forest soil after three years of artificial warming. Can J Soil Sci 93:567-572

Exposés à des conférences

Rossi, S. Componente genetica ed ambientale nella fenologia di *Picea mariana* Università del Molise, Pesche, 10 maggio 2016. 10 mai 2016.

Rossi, S. Componente genetica ed ambientale nella fenologia di *Picea mariana* Università di Napoli Federico II, Portici, 16 maggio 2016. 16 mai 2016

Rossi, S. Bud break across black spruce ecotypes under experimental warming conditions. Chinese Academy of Sciences, Beijing, 19 December 2015

Bordeleau A, Rossi S, Morin H, Houle D (2011) Increase ectomycorrhizae diversity with high inorganic nitrogen depositions in a field experiment. Disturbance dynamics on boreal forests, Chicoutimi (QC, Canada), 29 May-3 June

Bordeleau A, Morin H, Rossi S, Houle D (2010) Effets de l'augmentation des dépositions azotées sur les communautés ectomycorhiziennes. Mycorrhizes 2010, Quebec (Canada), 28-29 octobre

Bordeleau A, Morin H, Rossi S, Houle D (2010) Impact of increased inorganic nitrogen deposition on the mycorrhizal community. ECANUSA Forest Science Conference, Edmundston (NB, Canada), 14-16 octobre

D'Orangeville L, D Houle. L Duchesne, B Côté 2014 Effects of an experimental drought on balsam fir xylogenesis in the eastern Canada boreal forest. American Geophysical Union fall meeting, San Francisco, December 15-19, 2014