



RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

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

Soumis par Hubert Morin
Université du Québec à Chicoutimi

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Daniel D. Houle, Direction de la recherche forestière, Ministère des ressources naturelles

Cornelia CK. Krause, Sciences fondamentales, Québec à Chicoutimi

Martine MM. Savard, CGC - Québec, Natural Resources Canada

Louis L. Duchesne, Dir. de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles

Sergio S. Rossi, Head Office, Università degli studi di Padova

Au

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

et

Ouranos inc.

Décembre 2012



Résumé public des résultats et des avantages pour le Canada

Le principal défi à la base du projet était de recréer les conditions climatiques qui prévaudront dans 50 ans dans la forêt boréale de l'Est du Canada et de mesurer leur impact sur les mécanismes de croissance de l'arbre. Nous avons considéré les deux espèces les plus représentées dans la forêt boréale de l'Est, l'épinette noire et le sapin baumier. Nous avons utilisé une méthodologie originale dans trois dispositifs expérimentaux en forêt boréale naturelle. Le réchauffement du climat et une fonte hâtive de la neige ont été simulés en réchauffant les sols au pied des arbres traités par des câbles chauffants disposés au niveau du système racinaire. L'augmentation des précipitations et de la pollution a été simulée en arrosant les arbres traités avec une solution plus riche en azote par la canopée. Pour savoir si cet azote avait été utilisé par l'arbre pour la confection de cellules et connaître sa répartition dans différents compartiments de l'environnement, certains arbres ont été arrosés avec de l'azote marqué ^{15}N . L'effet des traitements sur la minéralisation du sol et sur la communauté d'ectomycorhizes a également été mesuré. Enfin, la croissance de l'arbre a été suivie en temps réel à l'intérieur des saisons de croissance à l'aide de dendromètres électroniques qui mesurent les variations du tronc et des racines des arbres à toutes les 15 minutes, et d'analyses cellulaires du développement du cerne de croissance en prélevant des échantillons à toutes les semaines sur les troncs et les racines des arbres traités et témoins. Les partenaires du projet étaient le Consortium Ouranos sur les changements climatiques, le Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec et le Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale. L'adaptation aux changements climatiques est un enjeu principal pour Ouranos et pour le Consortium de recherche sur la forêt boréale dont le mandat est de promouvoir des solutions d'aménagements forestiers et une meilleure compréhension de la croissance future de la forêt. Le MRNF quant à lui travaille activement à revoir ses méthodes de calculs de la possibilité forestière et est très fortement intéressé à inclure les effets potentiels des changements climatiques (directs ou indirects) dans ses prédictions futures. Au niveau de la croissance, nous avons démontré que le déneigement hâtif entraînait un allongement de la saison de production cellulaire. Par contre, il n'y a pas de production plus hâtive des cellules chez le sapin ou l'épinette dans nos dispositifs. En effet, même si on observe des tendances, les trois ans du projet ne permettent pas de dégager des patrons clairs. Cependant, les placettes disposées le long du gradient latitudinal montrent qu'il y a plus de cellules de produites avec un déneigement hâtif, ce qui entraîne un allongement de la période de maturation des cellules et une saison de production cellulaire plus longue. Le modèle spatial de la durée de la croissance radiale en fonction de l'altitude que nous avons produit pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean selon différents scénarios de réchauffement montre l'application de ces résultats. La fertilité des sols répond plus à un effet du chauffage que de la fertilisation en N. La disponibilité de plusieurs éléments a augmenté significativement avec la température du sol. Ces relations suggèrent un effet positif du chauffage, dès la première année, sur la disponibilité d'éléments sensibles au pH du sol (Al et Mn) ainsi que d'autres potentiellement limitant pour la croissance des arbres (NO_3 et K). Au niveau des mycorhizes, contrairement à notre hypothèse, l'enrichissement en azote a eu un effet positif sur leur diversité et leur quantité. Le traçage de l'azote marqué montre que tous les compartiments de l'arbre et de son environnement assimilent l'azote dispersé sur la canopée, en particulier le feuillage et les lichens du tronc des arbres. Tous ces résultats améliorent notre compréhension de la réponse de l'arbre aux changements climatiques et de la capacité adaptative des forêts. Ce projet de recherche aide les décideurs à mieux comprendre les conséquences écologiques et à trouver de meilleures façons de protéger et de conserver les ressources forestières au Canada afin de créer et de maintenir un environnement et des écosystèmes forestiers sains qui puissent mieux s'adapter à ces perturbations. Également, par l'encadrement fourni aux étudiants, notre projet a favorisé la formation de chercheurs hautement qualifiés et la création de savoir-faire: 3 Ph.D., 2M.Sc., au moins 5 étudiants de premier cycle et 5 techniciens de recherche. Ils seront en mesure de relever les défis de demain en matière de gestion durable des ressources forestières. Ce projet avait une durée de trois ans, ce qui est peu pour mettre en évidence les impacts des traitements sur des arbres. Il aura permis de faire ressortir des résultats importants et de mettre sur pied un dispositif unique. Nous croyons qu'il est important de continuer l'étude encore pour plusieurs années afin de mettre en évidence les effets à moyen terme des traitements.



Progrès vers la réalisation des objectifs ou des étapes importantes

Sur une échelle de 1 à 7, dans quelle mesure les objectifs de la subvention ont-ils été atteints?

Pas du tout

1

2

Dans une certaine mesure

3

4

Dans une très grande mesure

5

6

7

Rappel des objectifs de la demande :

Objectif général :

L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les paramètres 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

- 1) Élucider le rôle des événements de précipitations incluant la prise en charge de l'azote par la canopée, sur la croissance radiale ponctuelle
- 2) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur la disponibilité des éléments nutritifs et particulièrement sur l'azote
- 3) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur la croissance des racines fines et sur la communauté ectomycorhizienne.
- 4) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur le début de la division cellulaire du sapin et de l'épinette

Les dispositifs expérimentaux ont été installés dans trois forêts distinctes: une pessière située au sud de la distribution des pessières noires dans la forêt d'enseignement et de recherche de l'UQAC: le site SIM, une pessière plus au nord et en altitude: BER, et une sapinière dans la zone de la sapinière à bouleau blanc: LAF, dans la forêt d'enseignement et de recherche de l'U. Laval.

- 1) Élucider le rôle des événements de précipitations incluant la prise en charge de l'azote par la canopée sur la croissance radiale ponctuelle.

Cet objectif est divisé en deux parties. La première concerne le rôle des événements de précipitations sur la croissance radiale ponctuelle (1Ph.D.) et la deuxième la prise en charge de l'azote par la canopée (1M.Sc.).

Le rôle des événements de précipitation sur la croissance radiale ponctuelle :

Cet objectif est abordé en mesurant le statut hydrique de l'arbre à toutes les 15 minutes à l'aide de dendromètres électroniques. Ces appareils mesurent les variations radiales des troncs et des racines de façon très précise. Les effets des précipitations sur les variations radiales sont ainsi visibles et analysables. Afin d'évaluer le statut hydrique des arbres dans les deux sites, les phases de contraction et d'expansion ont été définies dans les séries temporelles provenant des dendromètres installés sur les arbres témoins, qui n'ont pas été fertilisés à l'azote et n'ont pas été soumis au traitement de chauffage du sol. Comparé à la contraction, l'expansion durait plus longtemps, mais son amplitude n'était que légèrement supérieure. Ainsi, les réserves hydriques présentes dans l'écorce des arbres étaient plus rapidement dépensées qu'elles n'étaient renflouées et ce, dans les deux sites. Selon les résultats de l'ANOVA, la durée de la phase de contraction était similaire entre les tiges et les racines ainsi qu'entre les deux sites, tandis que l'amplitude était significativement différente (Fig. 1, bootstrapped F -values, $P < 0.05$). L'amplitude de la contraction était plus élevée dans les tiges et à SIM. Comme pour la contraction, la durée de l'expansion était similaire entre tige et racine ainsi qu'entre les deux sites, tandis que l'amplitude était significativement différente (Fig. 1, bootstrapped F -values, $P < 0.05$). L'amplitude de l'expansion était plus élevée dans les tiges et à SIM. Ces résultats suggèrent que les réserves hydriques dans l'écorce des arbres étaient plus sollicitées à SIM qu'à BER. Les données météorologiques pourraient expliquer cette différence dans l'utilisation des réserves hydriques de l'écorce entre les deux sites. À l'échelle journalière, le déficit en pression de vapeur de l'air était plus élevé à SIM, surtout durant la nuit. De plus, la couche d'humus était plus mince à SIM et elle s'asséchait plus rapidement. Une transpiration plus élevée combinée à une plus faible disponibilité de l'eau pourrait expliquer l'amplitude plus élevée des variations radiales à SIM.

Les arbres à SIM devaient compenser un plus grand déficit hydrique avant que le rapport entre la transpiration et l'absorption de l'eau ne s'inverse. Parce qu'ils utilisent les réserves hydriques de l'écorce à des degrés différents, il est possible que les arbres dans les deux sites réagissent différemment aux traitements.

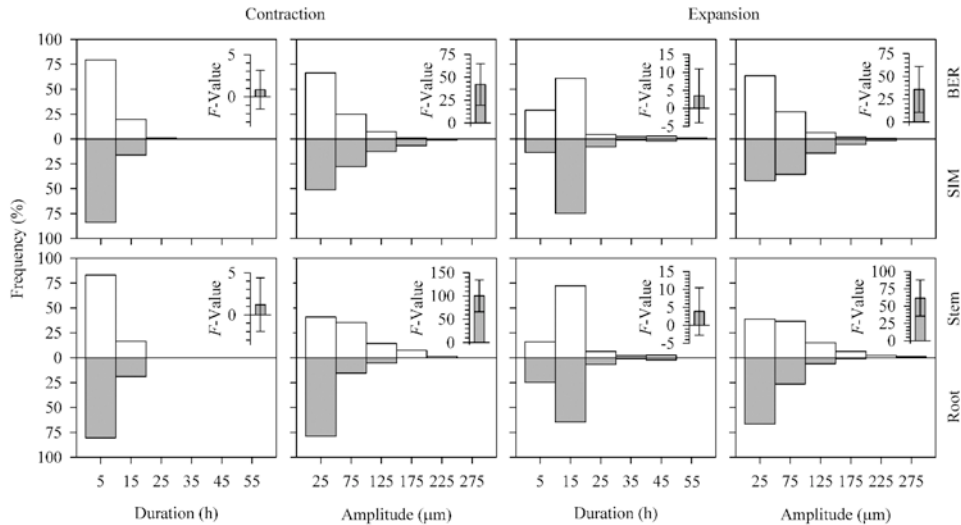


Figure 1: Distribution de fréquence de la durée et de l'amplitude de chaque phase aux deux sites (BER et SIM) et aux deux hauteurs de mesures (tige et racine). La barre verticale à l'intérieur du graphique représente la moyenne et deux fois la déviation standard de la statistique F obtenue par échantillonnage *bootstrap* sur 1000 réplifications. L'effet du site et de la hauteur de mesure est considéré significatif lorsque les deux barres d'erreur sont plus hautes ou plus basses que zéro.

Le dispositif expérimental permettra, dans les stations situées dans les pessières boréales, d'évaluer l'impact sur le statut hydrique de l'arbre et sur la croissance de l'ajout des précipitations contenant ou non de l'azote par rapport à des arbres qui ne reçoivent pas de précipitation supplémentaire. Les analyses préliminaires ne nous permettent pas de distinguer les effets du chauffage ou de l'irrigation artificielle pour le moment car il y a un travail important de standardisation des données à faire au préalable afin que des mesures effectuées sur des arbres de grosseur et de croissance différentes soient comparables.

Prise en charge de l'azote par la canopée :

Cet objectif est abordé en mesurant la prise en charge de l'azote marqué (^{15}N) dans les différents compartiments de l'arbre (feuillage, branches, écorce, cellules de la tige, cellules des racines) et de son environnement (humus, sol minéral). Le dispositif de gicleurs pour l'azote marqué a été installé à l'automne 2008.

L'expérience de traçage s'est déroulée en 2009 dans le site LAF. Durant une période qui s'est échelonnée de la mi-juin à la mi-septembre, trois arbres ont été arrosés avec une solution de pluie enrichie de nitrate marqué ($^{15}\text{NO}_3$) et trois autres avec une solution de pluie enrichie d'ammonium marqué ($^{15}\text{NH}_4$). Les arrosages ont été effectués à un rythme de deux arrosages aux trois semaines pour un total de neuf arrosages. Une semaine après le dernier arrosage, différents compartiments des arbres traités de même que des lichens arboricoles, des semis et du sol sous la canopée de chacun de ces arbres ont été échantillonnés. Trois autres arbres qui n'ont reçu aucun arrosage ont aussi été échantillonnés durant la même période et ont été utilisés comme témoins.

Tous les compartiments des arbres matures arrosés avec de l'azote ^{15}N (sous forme de $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ ou $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$; 98 atom%) ont été enrichis par rapport aux témoins qui ne reçoivent

aucun arrosage. Les aiguilles des sapins matures, les lichens qui pullulent dans le bas de la canopée et le long du tronc, les branches des semis sous couvert et l'horizon L du sol sont les compartiments qui présentent l'enrichissement le plus important (Fig. 2). Les aiguilles des arbres matures et l'horizon L du sol sont plus enrichis par le traitement ammonium et le traitement nitrate respectivement. Les lichens et les autres compartiments ne présentent que peu ou pas de discrimination entre les deux formes d'azote inorganique. Ces résultats démontrent que l'inclusion de ces compartiments lors des études sur les effets écologiques des dépôts atmosphériques d'azotes est essentielle puisqu'ils captent une part de l'azote avant d'atteindre le sol.

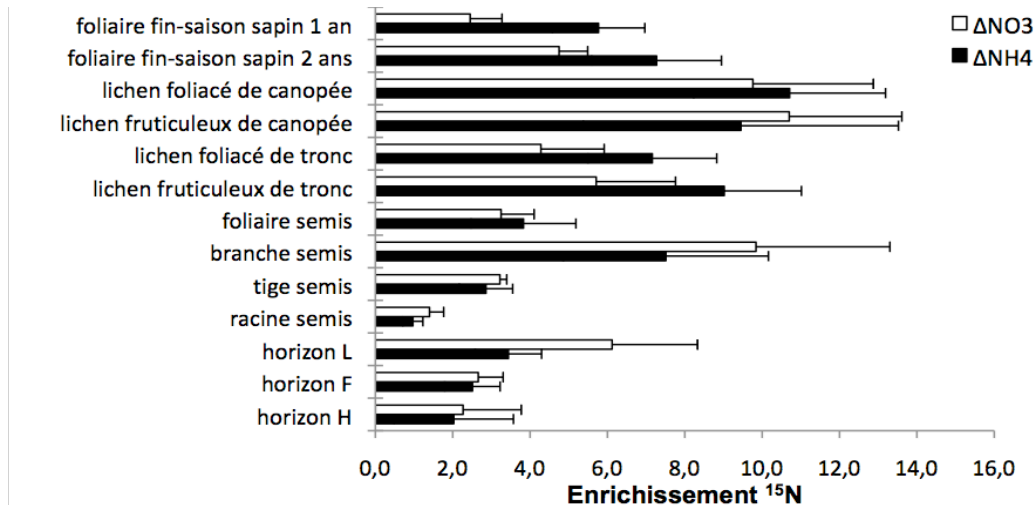


Figure 2. Enrichissement (différence entre les traitements et les témoins) ^{15}N des différents compartiments aériens et des différents horizons du sol de l'expérience de traçage au site LAF.

2) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur la disponibilité des éléments nutritifs et particulièrement sur l'azote.

Le réchauffement du sol est assuré par des câbles chauffants disposés au contact du sol minéral, au niveau des racines, autour des arbres chauffés. Des câbles de même dimension non chauffants sont placés au pied des arbres témoins. Selon les scénarios fournis par le collaborateur Ouranos, la température du sol devrait s'élever au printemps d'environ 4-5 degrés par rapport à la normale. Nous avons donc ajusté notre dispositif de façon à ce que les arbres chauffés présentent une température du sol de 4-5 degrés Celsius plus élevée que les témoins. Le chauffage des sols débute un mois plus tôt que la fonte de la neige dans les stations pour simuler un déneigement hâtif et se termine après la production cellulaire, vers la fin de juillet.

Afin de quantifier les impacts du réchauffement du sol sur la disponibilité des éléments nutritifs, particulièrement l'azote, des échantillons de sols autour de chaque arbre expérimental ont été prélevés à l'aide d'une sonde pédologique durant la première semaine de septembre 2008. Pour chaque arbre, trois sous-échantillons d'au moins 20 cm³ ont été prélevés en trois points équidistants à 1 m du tronc. Les horizons du sol ont été séparés manuellement en trois portions : Litière, matière organique et horizon minéral. Ils ont été placés à -16 °C. Le même échantillonnage a été répété en septembre 2009 et les échantillons ont été analysés au cours de l'automne 2009 dans les laboratoires du MRNF.

Les résultats de la première année sur la fertilité des sols (site LAF) montrent un effet du chauffage plus important que celui de la fertilisation en N. La disponibilité de plusieurs éléments

a augmenté significativement avec la température du sol. Ces relations suggèrent un effet positif du chauffage, dès la première année, sur la disponibilité d'éléments sensibles au pH du sol (Al et Mn) ainsi que d'autres potentiellement limitant pour la croissance des arbres (NO_3 et K).

3) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur la croissance des racines fines et sur la communauté ectomycorhizienne (1 M.Sc.).

Comme on vient de le voir au point 2), le réchauffement du sol a un effet sur la disponibilité des éléments nutritifs et particulièrement sur l'azote. L'augmentation de la disponibilité en azote pourrait avoir des effets sur la flore microbienne et fongique, et particulièrement sur les mycorhizes, qui sont la principale voie d'absorption de l'azote pour l'arbre. Comme la flore ectomycorhizienne de la forêt boréale est peu connue et pour analyser les effets potentiels d'une augmentation d'azote dans le sol, nous avons d'abord échantillonné une pessière du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF, MRNF), au Lac Tirasse, réserve Ashuapmushuan. Deux concentrations de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) ont été appliquées pendant 8 ans sur des quadrats de 100m^2 représentant 3 et 10 fois les dépositions d'azote normales. Des analyses au microscope sont effectuées pour déterminer la vitalité et la mycorhization des racines fines et pour classifier les mycorhizes à l'aide d'anatomorphotypes. Les résultats préliminaires montrent une augmentation de la vitalité des apex des racines, de la proportion d'apex mycorhizés et du nombre d'anatomorphotypes en fonction de l'augmentation de l'azote (Fig. 3 et 4).

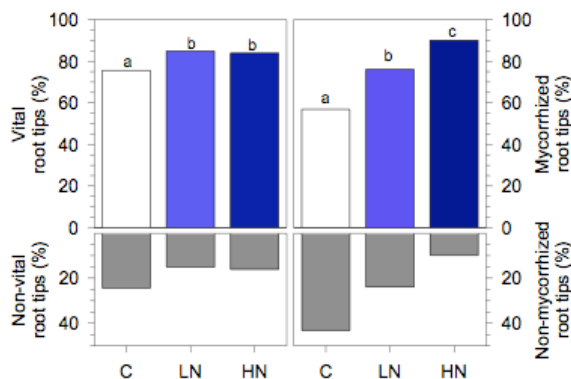


Figure 3. Pourcentage d'apex racinaires vivants et d'apex mycorhizés chez l'épinette noire selon trois niveaux d'application d'azote. (C : Témoin, LN : 3 fois dépositions d'azote annuelles, $9\text{kg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$, HN : 10 fois les dépositions d'azote annuelles, $30\text{kg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$), Lac Tirasse, Réserve Asuapmushuan.

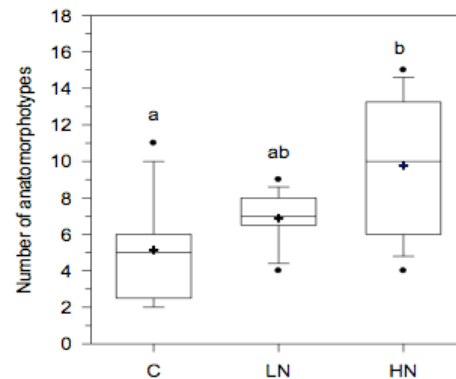


Figure 4. Nombre d'anatomorphotypes d'ectomycorhizes de l'épinette noire selon trois niveaux d'application d'azote. (C : Témoin, LN : 3 fois dépositions d'azote annuelles, $9\text{kg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$, HN : 10 fois les dépositions d'azote annuelles, $30\text{kg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$), Lac Tirasse, Réserve Asuapmushuan.

Les espèces de la communauté mycorhizienne ne réagissent pas toutes de la même manière à la hausse d'azote dans le sol. Il semble y avoir des espèces nitrophiles, nitrophobes et d'autres insensibles à cette variation. Il est important de noter que dans la littérature la plupart des articles montrent une baisse de la diversité et de la mycorhization avec l'augmentation de l'azote. Cependant, la situation initiale de notre site n'est pas semblable puisque la forêt boréale de l'Est semble plus fortement limitée en azote qu'ailleurs, de sorte que plusieurs espèces de champignons mycorhiziens, capables d'exploiter l'azote organique, y ont une croissance limitée.

Les analyses se poursuivent maintenant dans nos sites expérimentaux (SIM et BER). Les échantillons ont été récoltés cet automne (2010) et les analyses sont en cours. Ce volet se poursuivra encore une année avec des fonds d'autres sources puisque l'étudiant à la maîtrise (boursier FQRNT), a été recruté la dernière année du projet.

4) Quantifier les impacts du réchauffement du sol sur le début de la division cellulaire du sapin et de l'épinette (2 Ph.D.).

Cet objectif est abordé chez l'épinette noire, dans les sites SIM et BER, et chez le sapin baumier, dans le site LAF.

En ce qui concerne les résultats dans le site LAF, la phénologie de la xylogénèse a été affectée : les arbres fertilisés ont retardé en moyenne d'une semaine le début de la phase de différenciation cellulaire. Cependant, la fonte hâtive de la neige n'a eu aucun effet significatif sur le début de la xylogénèse, les arbres débutant en général au jour julien 150 ± 3.4 (30 mai).

Chez l'épinette noire, nous avons développé un modèle pour expliquer les liens de cause à effet entre le début et la fin de la xylogénèse et le nombre de cellules produites (Fig. 5). Nous avons démontré que le début de la xylogénèse influence le nombre de cellules produites par le cambium qui influence à son tour la fin de la différenciation des cellules (Lupi et al. 2010). Ainsi, une date de début plus hâtive entraînera un nombre de cellules produites plus élevée qui à leurs tours prendront plus de temps à se lignifier, entraînant une fin plus tardive de la xylogénèse. De plus, grâce à l'analyse de corrélations partielles, aucune relation de cause à effet n'a été observée entre le début et la fin de la xylogénèse. Ces résultats permettent de résoudre le dilemme de l'œuf et de la poule entre la durée de la croissance et le nombre de cellules produites chez les arbres en précisant la cause de l'effet. La production plus élevée de xylème observée chez les jeunes arbres (Rossi et al 2008) ou à des altitudes ou latitudes moins élevées (Rossi et al 2010) entraîne un délai dans la période nécessaire pour compléter la maturation du xylème entraînant ainsi une extension de la période de formation du bois. Cette plus longue fenêtre de production du xylème entraînerait une dilution du signal climatique durant la formation du cerne et une réduction des relations climat-croissance comme on l'observe chez les plus jeunes arbres ayant une longue période de croissance.

Les résultats suivants concernent les analyses cellulaires des tiges et des racines des arbres des dispositifs. Les analyses cellulaires des racines seront complétées dans un mois.

Le design expérimental nous a permis d'analyser les données de la phénologie sous forme de mesures répétées. Ce type d'analyse est puissant car il considère que des mesures prises sur le même sujet (arbre) sont plus corrélées entre elles que des mesures prises sur des sujets différents. Nous arrivons à la conclusion que les deux traitements n'ont pas influencé sensiblement la phénologie de la xylogénèse dans les tiges (Fig. 6). Les dates de début et de fin de la xylogénèse et la durée ne sont pas influencé clairement par le chauffage, la fertilisation ou la combinaison de deux traitements : il n'y a pas de tendance évidente. En 2009 il semble y avoir eu des effets des traitements, mais pas en 2008 et 2010. Cette réponse pourrait être dû à la variabilité climatique interannuelle. Cependant, nous travaillons dans les dispositifs sur une courte série temporelle. Le seul moyen de vérifier cette hypothèse et d'augmenter nos chances de bien comprendre la réponse des arbres aux changements environnementaux est de continuer l'expérimentation pour profiter du dispositif original et de la possibilité d'effectuer des analyses à mesures répétées sur de plus longues séries. Le seul effet significatif que semble avoir eu le chauffage a été sur le début de la xylogénèse des racines dans le site plus chaud, Sim, où la xylogénèse a débuté plus tôt en 2010 dans les arbres chauffés que dans les arbres contrôles.

En ce qui concerne le nombre de cellules ou la largeur du cerne de croissance (deux variables fortement corrélées entre elles), il n'y a pas d'effet statistiquement significatif dans les tiges. Toutefois, si on regarde la variation en pourcentage de la largeur du cerne de croissance par rapport à l'année précédente (Fig. 7), ce qui est une façon de standardiser et de prendre en compte la variation de diamètre et donc du rythme de croissance entre les différents arbres, on peut faire deux observations importantes. Premièrement, il y a eu beaucoup de variation entre les

traitements, autant avant (2006 et 2007) qu'après (2008-2010) le début du chauffage et de la fertilisation. Deuxièmement, à partir de la troisième année, le traitement combiné, fertilisation et chauffage, semble stimuler fortement la croissance des arbres dans le site plus froid, en altitude, et au Nord (Ber). En effet, il y a une augmentation de plus de 40% par rapport à l'année précédente, une augmentation plus élevée que dans les autres traitements. Cela suggère qu'il y a une tendance, un effet cumulatif de l'azote et du chauffage sur la croissance. Le site plus froid et au Nord répond en premier possiblement parce qu'il est plus limité par la disponibilité de l'azote et par la température.

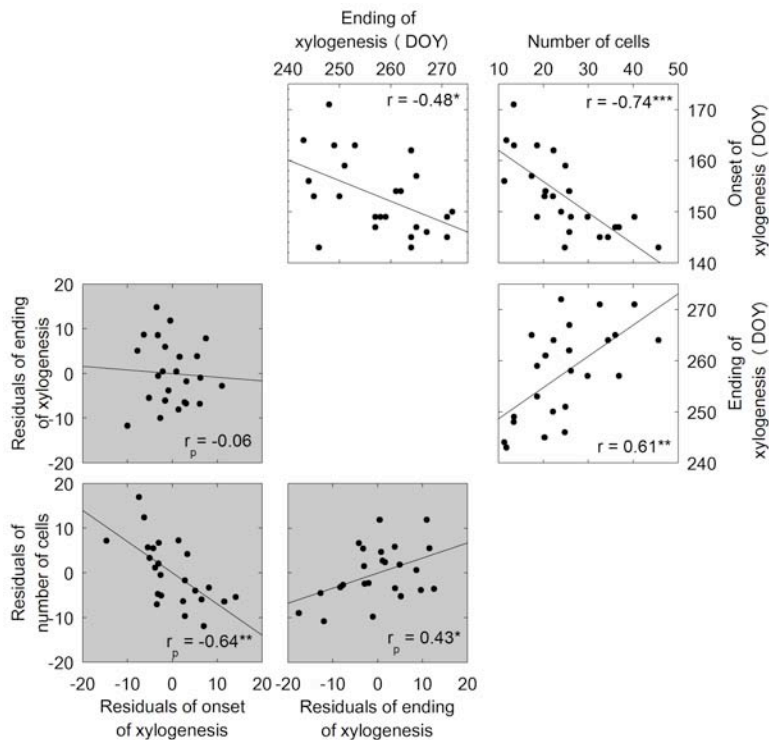


Figure 5: Corrélations simples (r , arrière-plan blanc) et partielles (r_p , arrière-plan gris) entre le début et la fin de la xylogénèse et le nombre total de cellules produites. Un, deux ou trois * correspond à un seuil de probabilité plus petit que 0.05, 0.01 and 0.001, respectivement.

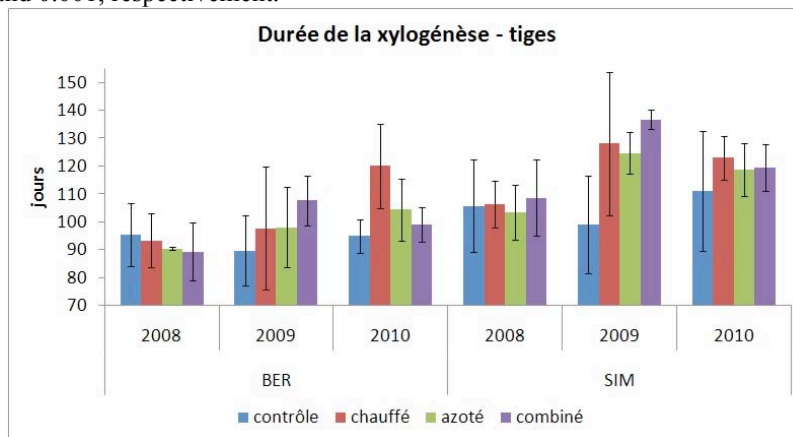


Figure 6. Durée (jours) de la xylogénèse dans les tiges et les racines des deux sites étudiés, de 2008 (début traitement) à 2010, pour chaque traitement (moyenne \pm écart-type).

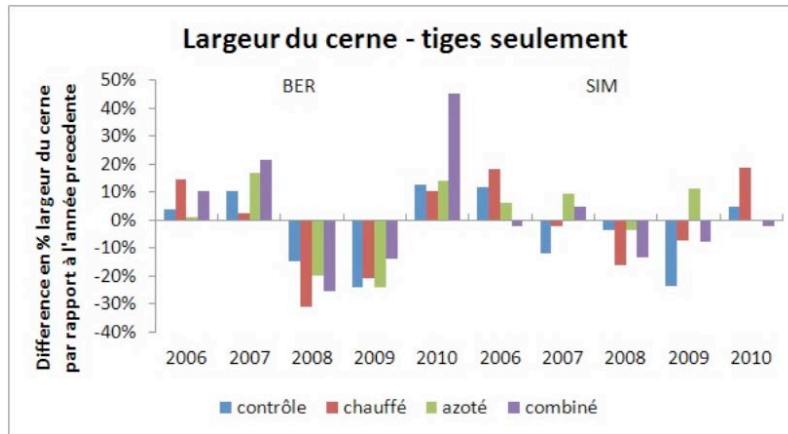


Figure 7. Différence en pourcentage de la largeur du cerne par rapport à l'année précédente dans les deux sites étudiés, de 2006-2007 (période avant le début des traitements) à 2008-2010 (période de traitements), pour chaque traitement.

Par ailleurs, en utilisant les résultats obtenus dans les placettes du présent projet et d'autres placettes établies le long du gradient latitudinal en forêt boréale du 48^e au 51^e parallèle, nous avons produit un modèle qui simule la phénologie cambiale pour estimer les périodes de croissance futures chez l'épinette noire selon des scénarios possibles de réchauffement (Fig. 8) (Rossi et al. 2010). La simulation spatiale du *timing* de la croissance du xylème dans une vaste région comme la région du Saguenay- Lac-Saint-Jean montre un début de production du xylème plus hâtif et une fin de production plus tardive dans la vallée et dans la plaine autours du Lac entraînant une durée de production de 110 à 135 jours. Au contraire, les durées les plus courtes se retrouvent dans le sud-est, sur les hauts plateaux, et à l'est, dans les montagnes, avec des saisons de croissance de moins de 95 jours. Dans le scénario d'une hausse des températures de 1-3°C, la durée de croissance du xylème va augmenter dans toute la région alors que les épinettes noires croissants le long du Fjord et autours du Lac atteindront entre 130 et 160 jours de croissance. Dans les plus hautes altitudes et avec une augmentation des températures de 3°C, la croissance du xylème commencera autours du jour 145 et se terminera autours du jour 275. La croissance du xylème durera donc 120 jours, soit environ 30 jours de plus que le nombre estimé sous les conditions actuelles à ces altitudes.

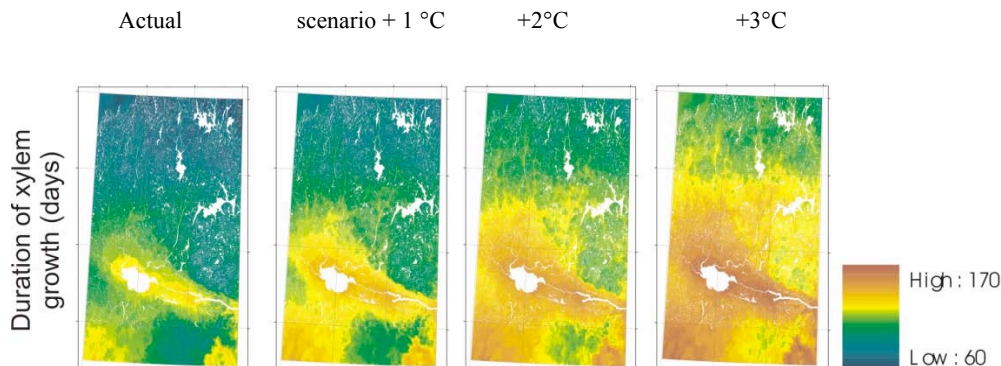


Figure 8. Durée de la croissance du xylème chez l'épinette noire dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada) estimées en appliquant le modèle logistique obtenu des températures minimales des patrons de température actuels et de trois scénarios climatiques futurs en assumant un accroissement uniforme dans la température journalière de 1, 2 et 3°C.



Problèmes survenus

Dans la liste ci-dessous, sélectionnez les problèmes survenus au cours du projet. Sélectionnez toutes les réponses pertinentes.

- Problèmes d'ordre technique ou scientifique
- Problèmes d'orientation de la recherche ou des résultats
- Problèmes d'équipement et d'installations
- Problèmes de dotation (p. ex., disponibilité des étudiants, personnel qui quitte le projet)
- Problèmes de financement
- Un ou plusieurs partenaires ont mis fin à leur participation au projet
- Problèmes d'interaction avec un ou plusieurs partenaires
- Aucun problème
- Autre (précisez)



Problèmes survenus

Décrivez brièvement les problèmes cernés et les mesures qui ont été prises afin de résoudre chacun d'eux.

Les principaux problèmes rencontrés ont été des problèmes d'ordre technique liés à l'installation des équipements. En effet, nous avons reçu la réponse à notre demande de subvention en octobre 2007. Il s'est écoulé un mois avant de recevoir une partie du matériel nécessaire à l'installation en forêt, soit les câbles chauffants, qui devaient nécessairement être installés avant l'hiver puisqu'ils sont enfouis dans les sols et qu'ils devaient être fonctionnels avant la fonte de la neige. Le problème c'est qu'en 2007, au mois de novembre, il y avait déjà un mètre de neige en forêt boréale. Nous avons mis la priorité sur l'installation des 2 placettes dans les pessières noires. Nous avons dû user d'ingéniosité et de persévérance pour nous rendre sur les sites d'échantillonnage en motoneige, pelleter cette neige au pied des arbres étudiés et installer les câbles chauffants. Heureusement, tout le laboratoire (étudiants, techniciens professeurs) se sont réunis de façon spontanée pour aider à la tâche de sorte que nous avons pu installer ces câbles avant l'hiver grâce à l'enthousiasme général. Cette opération a quand-même généré des dépenses imprévues. De plus, nous avons dû répéter l'opération (transport en motoneige etc.) tôt au printemps pour installer les dendromètres (arrivés seulement en avril) sur les arbres étudiés avant le début de la saison de croissance, soit en avril, alors qu'il restait encore près de 2 mètres de neige. Notons que l'on a dû installer des dendromètres de racine également, donc qu'il a fallu pelleter ces 2 mètres de neige pour dégager les racines et installer les dendromètres. Heureusement, grâce à l'habileté et à la générosité de plusieurs bénévoles et du technicien, tout a été installé à temps, mais avec des coûts supplémentaires.

Un autre problème technique a été la source d'énergie pour alimenter les câbles chauffants. Selon nos études récentes, il nous est apparu important de prolonger la période de chauffage jusqu'à la fin juin pour inclure la période de production exponentielle des cellules au mois de juin. De plus, les 2 génératrices nécessaires pour alimenter ces câbles chauffants sont des génératrices au diesel de haute puissance qui pèsent environ 1000 kg. Il est devenu évident qu'il était impossible de louer ces génératrices, de les transporter à tous les printemps en forêt et de les sortir de la forêt à tous les automnes. Il fallait donc acheter ces génératrices pour les installer en forêt pour le temps de l'expérimentation. Or ces coûts n'étaient pas prévus dans la demande de subvention. Voyant ce problème majeur et comme ils croyaient fermement en l'originalité et la pertinence de l'expérience, deux partenaires du projet, soit le MRNF et le Consortium (CRFBC) ont offert de se partager les coûts d'achat de deux génératrices et des accessoires. Ces coûts sont évalués à environ 50 000\$. Les génératrices seront revendues après le projet par les partenaires qui devraient récupérer environ 60 à 70% de cette somme. L'installation de ces génératrices au printemps 2008 en motoneige sur un terrain très accidenté tient d'un exploit et a été réalisé grâce à la généreuse contribution des techniciens de l'UQAC et du maître électricien de l'Université. N'eut été de leur ingéniosité et de leur générosité, ce projet n'aurait jamais pu avoir lieu comme prévu.

Le dernier problème technique auquel nous avons dû faire face est l'installation de gicleurs dans la canopée des arbres. Installer des gicleurs à 20 mètres de hauteur pour arroser le sommet des arbres étudiés n'est pas une tâche facile. Encore une fois, nous avons pu compter sur l'ingéniosité et la générosité d'amis grimpeurs et de l'agronome responsable des serres de l'UQAC pour faire le design, installer le système au sommet des arbres et produire un arrosage fin et régulier pendant environ 4 heures à chaque arrosage, comme prévu.

Finalement, le système dans les deux pessières noires a été mis en place de façon fonctionnelle à temps pour le printemps 2008 et le début de la production cellulaire.

Ayant beaucoup appris sur le plan technique avec l'installation des deux placettes dans les pessières, nous avons par la suite installé un système identique dans une sapinière de la station d'enseignement et de recherche de l'Université Laval, à la forêt Montmorency, à proximité d'une des stations du RESEF, grâce à la participation financière du MRNF. De plus, un système d'irrigation supplémentaire a été installé sur 6 arbres afin de faire un suivi de l'utilisation de l'azote dans différents compartiments de l'arbre et de son environnement.

Tout le système a finalement fonctionné normalement pendant la période d'étude.

Enfin, certains étudiants n'ont pu être recrutés au début du projet, ce qui a entraîné un retard dans l'interprétation des résultats. Par exemple, l'étudiant à la maîtrise qui travaille sur les mycorhizes n'a été recruté que la dernière année du projet. Il pourra cependant terminer ses études avec des fonds d'autres sources.



Diffusion des résultats de la recherche

Articles présentés à des revues avec comité de lecture :	14
Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :	13
Exposés à des conférences/Affiches :	32
Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :	2
Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :	22

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

- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S, Houle D. Role of soil nitrogen for the conifers of the boreal forest: a critical review. *Environmental Reviews*
- Rossi S, Morin H, Deslauriers A. Multi-scale influence of snowmelt on tree growth in the boreal forest. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*

2. Articles acceptés ou publiés dans des revues avec comité de lecture:

- Rossi S, Morin H, Deslauriers A, Plourde P-Y. 2010. Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. *Global Change Biology*. *In press*
- Dufour, B. and Morin, H. 2010. Tracheid production phenology of black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with climatic fluctuations and bud development using multivariate analysis. *Tree Physiol*. *Sous presse*
- Rossi D, Rossi S, Morin H, Bettero A. Within-tree variations in the surface free energy of wood assessed by contact angle analysis. *Wood Science and Technology*, *in press*
- Deslauriers A, Rossi S, Turcotte A, Morin H, Krause C. A three-step procedure in SAS to analyze the time series from automatic dendrometers. *Dendrochronologia*, *in press*
- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Xylem phenology and wood production: resolving the chicken-or-egg dilemma. *Plant Cell and Environment* 33:1721-1730
- Krause C, Rossi S, Thibeault-Martel M, Plourde P-Y (2010) Cell features and climatic influences in stems and roots of black spruce and balsam fir. *Annals of Forest Science* 67:402
- Turcotte, A., Morin, H., Krause, C., Deslauriers, A. and Thibault-Martel, M. 2009. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agri. For. Meteorol.* 149 (9): 1403-1409.
- Dufour, B. and H. Morin. 2007. Focusing modelling on the tracheid development period – An alternative method for treatment of xylogenesis intra-annual data. *Dendrochronologia* 25:125-133.
- Rossi S, Deslauriers A, Gričar J, Seo J-W, Rathgeber CBK, Anfodillo T, Morin H, Levanic T, Oven P, Jalkanen R (2008) Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography* 17:696-707
- Thibeault-Martel M, Krause C, Morin H, Rossi S (2008) Cambial activity and intra-annual xylem formation in roots and stems of *Abies balsamea* and *Picea mariana*. *Annals of Botany* 102:667-674

Chapitres de livre

- Deslauriers A, Rossi S, Morin H, Krause C.---- Analyse intra-annuelle de la formation des cernes de croissance: méthodes, traitement des données et résultats. In Payette S, Filion L, Bégin Y (Eds) *La dendroécologie: principes, méthodes et applications (in press)*
- Sergio Rossi, Annie Deslauriers, Carlo Lupi, Hubert Morin. ---- Controls over Growth in cold climates. In Michael Tausz, Nancy E. Grulke (Eds) *Trees in a Changing Environment: ecophysiology, adaptation and future survival (in press)*.

Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, De Zan C, Nocetti M., 2008. Lo studio della xilogenesi: dal campionamento all'analisi dei risultati. In Romagnoli M (Ed) *Dendrocronologia per i beni culturali e l'ambiente*. Nardini Editore, Firenze.

3. Exposés à des conférences et affiches:

Loïc D'Orangeville. 2010. Productivité future de la sapinière boréale: interactions expérimentales des changements climatiques et des pluies acides - Montréal(Qc). Consortium Ouranos.

Bordeleau A, Morin H, Rossi S, Houle D. 2010. Effets de l'augmentation des dépôts azotés 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

Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Durée de la xylogénèse et nombre de trachéïdes, l'œuf ou la poule? Un modèle causal appliqué à l'épinette noire. 78^o Congrès de l'ACFAS, Montreal (Canada), 10-14 mai

Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Xylogenesis in black spruce: the role of growing season length, soil temperature and nitrogen availability. *ECANUSA Forest Science Conference*, Edmundston (NB, Canada), 14-16 octobre

Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Wood production and duration of xylogenesis: resolving the chicken and egg dilemma by causal modelling. *IV Colloque Annuel du CEF*, Orford (QC) Canada, 12-14 mars

Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Wood production and duration of xylogenesis: resolving the chicken and egg dilemma by causal modelling. *CONFOR*, Thunder Bay, Canada, 21-24 gennaio

Rossi S, Deslauriers A, Morin H, Krause C (2010) Predicting timings of xylogenesis in black spruce under climatic warming. *WorldDendro 2010*, the 8th International Conference on Dendrochronology. Rovaniemi (Finland), 13-18 Juin

Rossi S, Morin H, Deslauriers A, Plourde P-Y (2010) Scénarios prédictifs de la phénologie du cambium chez l'épinette noire sous l'influence du réchauffement climatique. 78^o Congrès de l'ACFAS, Montreal (Canada), 10-14 mai

Deslauriers A, Rossi S, Turcotte A, Morin H, Krause C (2009) SAS routines for analysing the time series from dendrometers. *Workshop Monitoring seasonal dynamics of wood formation*. 20-22 avril, Otocec (Slovenia)

Rossi S (2008) Ectomycorrhizae and oak decline in a coastal forest in Italy. *Symposium sur les racines*, 14-15 avril, Montreal (Canada)

Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Carrer M (2008) Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *Wood matters: a celebration of the work of John Barnett*, IAWA-IAWS meeting at the Linnean Society of London, 29-30 mai, Londres

- Rossi S, Deslauriers A, Morin H, Krause C (2009) Data analysis and representation of xylem growth. Workshop *Monitoring seasonal dynamics of wood formation*. 20-22 avril, Otocec (Slovenia)
- Turcotte, A. 2008. Impact combiné des apports azotés atmosphériques et du réchauffement du sol sur la croissance radiale de l'épinette noire. La face humaine de la science, 3eme colloque de la recherche en ressources renouvelables, du 30 au 31 octobre 2008, Centre du Lac Pouce, Ville de Saguenay.

Presentations sur invitations:

- Morin, H. 2010. Croissance des pessières et des sapinières et changements climatiques: deux expérimentations utilisant la croissance intra annuelle Consortium Ouranos, Montréal, Québec, avril 2010.
- Rossi S (2010) Cambial phenology and climate change: ongoing projects in Chicoutimi. Discussion meeting: Ecosystem-level effects of climate change induced phenological shifts. Durham University (UK) 31 August - 2 September
- Rossi S (2009) L'attività cambiale: dinamismi e metodi di analisi. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze, 5 juin.
- Rossi S (2009) L'attività cambiale: dinamismi e metodi di analisi. Università la Tuscia, Viterbo, 4 juin.
- Morin, H. 2007. The use of strange paleo indicators and cell analysis to understand the dynamics of the boreal forest. Great Lakes Inst. for Ecol. research, University of Windsor, Ontario, April 2007.
- Morin, H. 2007. Développement intra annuel du cerne de croissance chez le sapin baumier et l'épinette noire: Fluctuations hydriques au cours de l'année. Symposium sur l'activité cambiale, U. Laval, Québec, avril 2007.
- Morin, H. 2007. Développement intra annuel du cerne de croissance chez le sapin baumier et l'épinette noire. Consortium Ouranos, Montréal, Québec, nov 2007.

Affiches

- Loïc D'Orangeville, Benoît Côté, Daniel Houle, Louis Duchesne, et Hubert Morin 2010. Xylem formation in balsam fir: experimental interactions of climate change and nitrogen deposition Joint Annual Meeting of the American Society of Plant Biologists & the Canadian Society of Plant Physiologists – Montréal (Qc), Canada.
- Loïc D'Orangeville, Benoît Côté, Daniel Houle, Louis Duchesne, et Hubert Morin 2010. Étude de chauffage du sol dans une sapinière boréale: augmentation de la disponibilité de K, Al et Mn avec la température. Association québécoise des spécialistes en sciences du sol – Oka (Qc), Canada.
- Loïc D'Orangeville, Benoît Côté, Daniel Houle, Louis Duchesne, et Hubert Morin 2009. Future productivity of the balsam fir boreal forest: experimental interactions of climate change and nitrogen deposition National Atmospheric Deposition Program – Saratoga Springs (NY), États-Unis.
- Bordeleau A, Rossi S, Morin H, Houle D (2010) Black spruce and balsam fir ectomycorrhizal communities: a long-term field study of the impact of nitrogen deposition. IV Colloque Annuel du CEF, Orford (QC) Canada, 12-14 mars

- Deslauriers A, Rossi S, Turcotte A, Morin H, Krause C (2010) A three-step procedure in SAS to analyse the time series from automatic dendrometers. WorldDendro 2010, the 8th International Conference on Dendrochronology. Rovaniemi (Finland), 13-18 June
- Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A., Rossi, S., Houle, D. 17-18 Novembre 2010 Formation du bois dans l'Épinette noire : influence de la saison de croissance de la température du sol et de la disponibilité en eau et en azote – Symposium Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques Ouranos, Québec (QC), Canada, 17-18 Novembre
- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Xylogenesi in black spruce on two sites in the boreal forest of Quebec: the importance of temperature for the onset and duration of cell differentiation. ECANUSA Forest Science Conference, Edmundston (NB, Canada), 14-16 octobre
- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S (2010) Xylogenesi in black spruce on two sites in the boreal forest of Quebec: the importance of temperature for the onset and duration of cell differentiation. WorldDendro 2010, the 8th International Conference on Dendrochronology. Rovaniemi (Finland), 13-18 June
- Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S, Turcotte A (2010) Formation du bois dans l'épinette noire: influence de la saison de croissance, de la température du sol et de la disponibilité d'eau et d'azote. 78^e Congrès de l'ACFAS, Montreal (Canada), 10-14 mai
- Simard S, Rossi S, Deslauriers A, Morin H, Rathgeber C (2010) Cambial resistance to water stress and defoliation. WorldDendro 2010, the 8th International Conference on Dendrochronology. Rovaniemi (Finland), 13-18 June
- Turcotte, A., Houle, D., Morin, H., Krause, C., Rossi, S. et Lupi, C. 2008. Impact combiné des changements climatiques, des apports azotés atmosphériques et d'une hausse de la température du sol sur la productivité de la forêt boréale. Ouranos, 3^{ème} symposium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, du 19 au 20 novembre 2008, École de technologie supérieure, Montréal.

4. Autres (Rapports)

- D'Orangeville, L., B. Côté, L. Duchesne, H. Morin et D. Houle. 2010. L'impact des changements climatiques et des apports azotés sur la productivité de la sapinière boréale. Rapport d'étape - juillet 2009 présenté au MRNFQ – DRF. 23 pages.
- D'Orangeville, L., B. Côté, L. Duchesne et D. Houle. 2009. L'impact des changements climatiques et des apports azotés sur la productivité de la sapinière boréale. Rapport d'étape - juillet 2009 présenté au MRNFQ – DRF. 15 pages.



Information financière

Explication en détail des écarts de chaque poste budgétaire mis en évidence ci-dessus

Étudiants :

Nous avons pu octroyer des bourses aux étudiants de deuxième cycle et de premier cycle pour les soutenir dans le cadre de ce projet sans affecter le budget global parce que:

1. Des étudiants au doctorat ont obtenu des bourses: Audrey Turcotte (CRSNG) et Carlo Lupi (bourse au mérite de l'Italie).
2. Le stagiaire postdoctoral Sergio Rossi a obtenu une bourse de stage de 4 mois pour chercheur étranger du FQRNT.
3. Le partenaire Consortium de recherche sur la forêt boréale a versé 5000\$ de plus la première année en espèce (voir le dernier point).

Chercheurs postdoctoraux : Les dépenses reliées à ce poste ont été moindres que prévu parce que:

1. le Dr. Rossi a obtenu une bourse au mérite de stage de 4 mois du FQRNT pour chercheurs étrangers et
2. une partie de son salaire a été assuré par d'autres projets de recherche puisqu'il n'a consacré, comme prévu, que la ½ de son temps sur ce projet. Ceci ne l'a pas empêché de participer à toutes les étapes du projet, d'aider tous les étudiants et de faire des articles synthèses des résultats obtenus, comme prévu (voir la section production scientifique).

Frais d'analyses: Comme ces analyses se sont déroulées dans nos laboratoires à l'UQAC, ces frais concernent l'engagement de techniciens de recherche affectés à l'analyse cellulaire (27163\$, Sonia Pedneault et Maxime Thibault-Martel) et à l'analyse des données des dendromètres (12837\$, François Gionest).

Travail sur le terrain : Ces dépenses concernent essentiellement la location de véhicule et l'essence pour les déplacements. Les dépenses ont été plus élevées que prévues la première année en raison des difficultés rencontrées pour l'installation des dispositifs (voir la section problèmes rencontrés). Nous avons quand même été en mesure d'effectuer les travaux et réduit les dépenses pour les 2 autres années.

Frais liés aux publications : Il s'agit de frais pour la correction de textes anglais. Ici aussi, nous avons pu obtenir du financement d'autres sources, c'est pourquoi les dépenses ont été moins élevées que prévues.

Vous constaterez que les dépenses réelles ont été de 5000\$ plus élevées que le budget total. Cela a été possible parce qu'un partenaire, le Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, a versé 5000\$ de plus en espèces la première année du projet (25000\$ au lieu de 20000). Cela a permis de verser des bourses aux étudiants de deuxièmes et de premiers cycles et de défrayer des salaires pour les assistants de recherche.

Donc, malgré les difficultés techniques rencontrées lors de l'installation des dispositifs et malgré la complexité du dispositif, le budget a été respecté dans l'ensemble, grâce à la bonne collaboration des étudiants, des assistants de recherche, des collaborateurs, des collègues et des trois partenaires.