



RAPPORT FINAL (EXTRAIT)

Influence des changements climatiques sur le rendement de la forêt boréale mixte

Soumis par Yves Y. Bergeron
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

au nom de l'équipe de recherche:

Chercheurs universitaires:

Frédéric FJRC. Raulier, *Université Laval*

Frank FA. Berninger, *Univ. Du Québec à Montréal*

Martin-Philippe M-P. Girardin, *Université du Québec à Montréal*

Pierre PY. Bernier, *Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*

Au
Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
et
Ouranos inc.

Date d'échéance du projet: 30 septembre 2011



Résumé public des résultats et des avantages pour le Canada

Le projet vise à évaluer l'influence des changements climatiques sur le rendement des forêts afin de faciliter l'adaptation des intervenants forestiers aux conséquences possibles des changements climatiques pour un territoire localisé dans la forêt boréale de la ceinture d'argile du Canada. Notre estimation de la productivité d'un territoire forestier sert à calculer les volumes de bois que l'on peut y récolter. Le modèle actuellement utilisé au Québec considère que les arbres pousseront au cours de la prochaine période de planification de récolte de la même façon qu'ils ont poussé au cours de la période récente. Cependant, de nombreuses études scientifiques ont documenté de quelle façon le climat a changé dans le passé et, qu'il va continuer de changer dans le futur. Ce modèle actuel, insensible aux variations et aux changements climatiques, pourrait contribuer à fausser notre estimation de la productivité forestière et expose les investissements concédés au secteur forestier à des risques majeurs en plus de risquer de mener à une situation de surexploitation de la ressource ligneuse.

La croissance des arbres est contrôlée par la température et la disponibilité en eau et en nutriments. La croissance radiale de 4 espèces boréales dominantes (épinette noire, pin gris, bouleau jaune et peuplier faux-tremble) a été documentée le long d'un gradient latitudinal de l'Outaouais à la Baie-James. Les relations documentées ont été projetées en substituant les variables climatiques passées par les valeurs estimées pour le futur afin de projeter la croissance des arbres dans l'avenir. Dans les sites les plus nordiques, la productivité pourrait augmenter alors qu'elle pourrait rester stable voire diminuer dans les sites plus au sud, exposés à des conditions qui n'avaient jusque-là jamais été expérimentées par les espèces boréales examinées au cours des 300 dernières années. Les relations documentées permettent également de modifier certains intrants du calcul de la possibilité forestière pour y intégrer l'influence du climat sur la croissance et la densité des peuplements forestiers.

En forêt boréale, les feux sont un élément-clé de la dynamique forestière et déterminent largement la structure d'âge et la composition des forêts par leur fréquence et leur sévérité. Ce processus est principalement contrôlé par le climat et ses variations même s'il dépend aussi des conditions édaphiques, de la topographie, de la végétation et des activités humaines. Dans la région de la Ceinture d'Argile (au sud de la Baie-James), une partie importante des forêts est composée de peuplements établis sur des sites mal-drainés, où la matière organique au sol s'accumule avec le temps écoulé depuis le dernier feu, ce qui ralentit la croissance des arbres et mène, ultimement à une ouverture des peuplements. Ces deux processus ont été documentés afin de mieux comprendre comment ils modulent la réponse de la croissance des arbres aux variations climatiques documentée précédemment.

Ce projet a permis de documenter plusieurs mécanismes par lesquels le climat influence la productivité forestière (feux, paludification, enneigement, fréquence de sécheresses) et de développer des outils mathématiques qui permettent d'améliorer le modèle pour calculer la possibilité forestière en y intégrant l'influence du climat.



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

Le projet vise à évaluer l'influence des changements climatiques sur le rendement des forêts afin de faciliter l'adaptation des intervenants forestiers aux conséquences possibles des changements climatiques pour un territoire localisé dans la forêt boréale de la ceinture d'argile du Canada. Cet objectif général s'articule en cinq objectifs spécifiques.

Objectif 1. Évaluer l'influence du climat sur la croissance de l'épinette noire et du peuplier faux-tremble, et projeter les taux de croissance radiale anticipés en réponse aux changements climatiques futurs (YB, FB, Huang PhD, Zhai MSc, Chauchard Post-doc).

Nous avons utilisé une approche dendrochronologique afin d'évaluer l'effet des températures et des précipitations sur la croissance radiale de l'épinette noire, du pin gris, du bouleau à papier et du peuplier faux-tremble le long d'un gradient latitudinal dans l'est de la forêt boréale canadienne (de l'Outaouais à la Baie James, 46-54°N). Les deux objectifs de l'étude étaient de documenter i) les facteurs climatiques qui contrôlent la croissance des espèces examinées ainsi que ii) les variations de l'association climat-croissance le long d'un gradient latitudinal pour la période 1950-2003. Les résultats suggèrent que la réponse de la croissance au climat varie en fonction de l'espèce et de la latitude à laquelle elle croît. La croissance radiale de toutes les espèces répondait négativement aux températures estivales de l'année précédant la formation du cerne et positivement, aux températures de janvier et de mars-avril de l'année de formation du cerne. Par ailleurs, l'épinette noire et le pin gris étaient positivement affectés par les températures de l'hiver et du printemps de l'année en cours, ainsi que par les températures de la saison de croissance dans sa globalité et ce, pour tous les sites. Cette étude suggère que les conditions hydriques durant l'année précédant la croissance radiale jouent un rôle prépondérant dans la régulation de la croissance du peuplier faux-tremble tandis que la température de janvier et les précipitations de la saison de croissance ont eu un impact positif sur la croissance du bouleau blanc. Le bouleau blanc, l'épinette noire, et le pin gris seraient les espèces les plus sensibles aux variations du climat comparativement au peuplier faux-tremble. Si les changements climatiques futurs maintiennent des hivers plus doux et des températures printanières plus chaudes, la croissance radiale du bouleau à papier situé au nord du 49°N, ainsi que celle de l'épinette noire et du pin gris situés au nord du 47°N pourraient augmenter, alors que celle du peuplier faux-tremble pourrait ralentir (Huang et al. 2010). Une analyse dendroclimatique pour l'épinette et le tremble a été entreprise selon un gradient longitudinal (Québec /Ontario) et les analyses sont en cours (Post-doc Chauchard).

Nous avons examiné les variations de la croissance radiale des quatre espèces boréales anticipées entre 2010 et 2099 à l'aide de plusieurs scénarios de changements climatiques générés par GCMs et CRCM3. Les prédictions indiquent que les peuplements localisés au nord du transect latitudinal auront une meilleure croissance en raison des conditions climatiques favorables prévues pour la saison de croissance, alors que les peuplements localisés au sud pourraient montrer de faibles variations ou bien même une réduction de croissance du fait de l'augmentation du stress hydrique. Parmi les quatre espèces, le pin gris pourrait être le plus avantagé par le réchauffement climatique car sa croissance radiale pourrait augmenter sous l'effet des changements climatiques au cours du 21^{ème} siècle (Huang et al soumis).

Nous avons examiné les variations de la date du début et de la fin de la formation du cerne de croissance annuel de l'épinette noire dans trois sites situés le long du gradient latitudinal pour 2005 et 2006. En 2006, la température élevée de mai (comparativement à celle de 2005) a entraîné la formation plus précoce de cellules du xylème en 2006. Toutefois, les températures basses de juin à août ont entraîné l'arrêt précoce de la formation de cellules du xylème en 2006. Les arbres situés dans le sud du gradient ont débuté plus précocement la formation de cellules du xylème que les arbres des sites plus nordiques en raison d'un printemps plus précoce au sud comparativement au nord. L'ensemble de ces résultats supporte l'idée générale selon laquelle les peuplements nordiques verraient leur croissance radiale accroître au cours d'un réchauffement climatique (Huang et al. 2010). Dans une étude semblable, Zhai et al. (soumis) ont montré que la croissance radiale du peuplier et du bouleau était limitée par les conditions hydriques alors que celle du pin gris a été limitée par les températures basses.

Afin de mieux comprendre comment la croissance des arbres est influencée par les variations climatiques, la croissance radiale, la croissance apicale et l'expansion du feuillage ont été mesurées à intervalles d'une semaine de mai à septembre pour le pin gris, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier. Les séries de cernes de croissance ont été analysées à l'aide des données météorologiques afin

d'identifier les variables climatiques qui contrôlent la croissance des trois espèces examinées. Le début et la fin de la formation des cellules du xylème de *P. banksiana*, *P. tremuloides*, et *B. papyrifera* ont été détectées les 7 mai, 28 mai, 5 Juin et les 9 août, 16 août et 16 août, respectivement. Des trois espèces, *P. banksiana* avait le débourrement le plus hâtif (20 mai) et l'arrêt de l'expansion du feuillage le plus tardif (2 août). *P. tremuloides* montrait le débourrement le plus tardif (27 mai) et la date la plus hâtive d'arrêt d'expansion du feuillage (10 juillet). Comparé à *P. tremuloides*, *B. papyrifera* a eu un débourrement plus précoce (22 mai), mais une date d'arrêt de l'expansion du feuillage et de la croissance du xylème plus tardive (juillet 30). Nos résultats montrent que les contrôles climatiques et la phénologie varient beaucoup d'une espèce à l'autre, ce qui peut conduire à différentes vulnérabilités aux événements climatiques extrêmes. Dans un contexte de changements climatiques, les espèces d'arbres avec une courte période de croissance du feuillage comme *P. tremuloides*, pourraient être plus vulnérables à des conditions défavorables au cours de la croissance des feuilles, comme les sécheresses ou les gelées (Li-Hong Zhai, thèse de maîtrise).

Objectif 2 : Évaluer l'influence du climat sur la fréquence des feux et calculer les fréquences futures en réponse aux changements climatiques (MG, YB, Terrier PhD).

Un article de synthèse réalisé par l'étudiante au doctorat Aurélie Terrier et portant sur la modélisation de la réponse des réservoirs de carbone aux changements climatiques dans l'est du Canada a été soumis. Ce travail élabore les incertitudes selon trois types différents : les incertitudes dans les données, les incertitudes structurelles et les incertitudes imprévisibles. Pour chaque type d'incertitude, des recommandations afin de les réduire sont proposées en vue d'aménagements forestiers.

L'étudiante est présentement en rédaction de son premier chapitre portant sur la modélisation des régimes de feux futurs au Québec intégrant les changements de la végétation dans une perspective d'aménagement forestier. Ce travail inclut la collaboration de Catherine Périer du MRNFQ. Des cartes de prévision du danger de feu ont été réalisées par l'étudiante et le consortium OURANOS. Un accord de contribution entre le SCF et cet organisme a d'ailleurs été signé lors de l'année financière 2008-2009 relativement à ce projet et le partage de données.

En parallèle, l'étudiante travaille sur le volet visant à évaluer l'effet des changements climatiques anticipés sur l'intervalle entre les feux, la matière organique consommée, la productivité forestière résultante et l'impact écologique dans les peuplements de conifères de la ceinture d'argile et ayant subi l'effet de la paludification. Ce travail est réalisé en collaboration avec Bill de Groot. Le modèle CANFIRE (anciennement BORFIRE) a été développé au centre de foresterie du Nord pour étudier et prévoir les effets, sur la forêt boréale, de la modification du régime d'inflammabilité. Depuis le printemps 2010, des sondes sont installées en permanence pour mesurer en continu et de façon automatisée, la teneur en humidité de la matière organique de sites forestiers de la ceinture d'argile. Les consigneurs de données (dataloggers) ont été prêtés par l'UQAM et l'UQAT (Chaire industrielle en aménagement forestier durable). Des fonds en provenance du Service Canadien des Forêts (Martin Girardin) ont servi à acquérir des sondes supplémentaires. L'étudiante au PhD, Aurélie Terrier, a débuté l'analyse des informations collectées par les sondes. Nous sommes présentement à l'étape de calibration des paramètres de combustible nécessaires comme intrant au modèle de prédiction des feux CanFIRE. Nous allons calibrer les paramètres de combustible du modèle pour son application en forêt boréale de la ceinture d'argile en y ajoutant les paramètres écologiques provenant de la littérature et de données de terrain en provenance de stations automatisées. Il n'y a actuellement aucun modèle dans la littérature qui intègre cet environnement dans les prédictions de dynamique de carbone et végétation. Plusieurs réunions avec Bill de Groot ont été tenues à Montréal pour cet aspect de la recherche.

Deux articles ont été publiés en 2010 dans le numéro spécial de International Journal of Wildland Fire ayant pour sujet « Wildfire in boreal ecosystems » (Girardin et al. 2010 et Bergeron et al. 2010). Nous avons estimé les tendances futures de l'activité des feux sous les changements climatiques dans la forêt boréale de l'Est du Canada et cherché à savoir si ces changements étaient inscrits dans la variabilité observée au cours des 7000 dernières années.

Objectif 3 Évaluer comment les changements climatiques affecteront la croissance et la distribution des deux espèces en fonction d'un gradient de drainage, (YB, FB, Drobyshev post-doc, Gewehr Msc, Fréchette Msc)

L'épaisseur de matière organique au sol dans les milieux mal drainés pourrait moduler la relation entre le climat et la croissance des arbres dans les sites mal drainés de la Ceinture d'argile (paludifiés). Pour tester cette hypothèse, nous avons analysé des séries de croissance radiale d'épinette noire à l'aide des données sur l'épaisseur de la couche de matière organique du sol (CMO) à l'échelle du peuplement. Les températures de la fin de l'hiver et du début du printemps, ainsi que la température de la fin de la saison de croissance de l'année précédente sont des contrôles environnementaux majeurs de la croissance de l'épinette. L'effet de CMO sur les relations climat-croissance est modérée et entraînerait l'inversion de la relation entre la croissance des arbres et l'aridité estivale: les arbres poussant sur des couches organiques minces étaient négativement affectés par la sécheresse, alors que c'était le contraire pour les sites avec une CMO > 20-30 cm. Ceci indique le développement de conditions plus humides sur des sites avec une CMO plus épaisse. Une CMO plus épaisse est également associée à une fréquence accrue d'anomalies de croissance négatives dans les séries dendrochronologiques. Nos résultats suggèrent une réponse non-linéaire de la croissance à l'accumulation de la CMO dans laquelle une épaisseur de CMO de 20-30 cm semble jouer un rôle de seuil au-delà duquel la croissance répond positivement à des conditions de sécheresse. Étant donné les conditions climatiques actuelles caractérisées par une activité des feux généralement faible et une tendance à l'accumulation de CMO, l'importance des effets de la CMO dans la pessière noire est susceptible d'augmenter dans l'avenir (Drobyshev et al. 2010).

Des travaux similaires comparant la réponse de la croissance radiale de l'épinette noire et du tremble sont en cours (Sylvie Gewehr, thèse de maîtrise). Sur la ceinture d'argile, l'accumulation de la matière organique au sol, formant la couche organique, peut mener à des conditions d'humidité très variables et influencer la croissance et la sensibilité du tremble et de l'épinette noire aux conditions climatiques. Cette étude vise à déterminer les effets de l'épaisseur de la couche organique sur la distribution et la croissance des arbres, ainsi que sur leur relation croissance radiale – climat. La comparaison des réponses des deux espèces a permis d'évaluer comment ces espèces peuvent être influencées par les conditions de sites et les conditions climatiques. Les hypothèses sont (1) la croissance radiale des arbres est limitée par l'épaisseur de la couche organique, (2) la croissance radiale du tremble répond différemment au climat et est plus sensible aux variations climatiques que celle l'épinette noire et (3) les arbres des sites humides ont une forte réponse positive à des températures plus élevées et sont peu sensibles aux variations de précipitations, par rapport aux arbres des sites mésiques et xériques. Les impacts de l'épaisseur de la couche organique sur la distribution et la croissance des arbres ont été déterminés grâce aux données d'inventaire forestier et au calcul de l'accroissement annuel en surface terrière respectivement. Des analyses dendroclimatologiques ont permis de mettre en évidence les variables climatiques critiques pour la croissance radiale du tremble et de l'épinette noire. Finalement, les effets de l'épaisseur de la couche organique sur la réponse des arbres à ces variables climatiques ont été déterminés. Les résultats indiquent que, contrairement à l'épinette, le tremble est très limité par l'épaisseur de la couche organique dans sa distribution et sa croissance radiale. Les deux espèces répondent très différemment au climat et la réponse de la croissance du tremble semble davantage sensible à l'épaisseur de la couche organique que celle de l'épinette. Les extrêmes climatiques affectent rarement les deux espèces à la fois si bien que l'accumulation de biomasse serait constante dans les peuplements mixtes. Les changements climatiques affecteront l'épinette noire assez uniformément, alors que leur effet sur le peuplier faux-tremble dépendra beaucoup des conditions de site. Si l'augmentation des précipitations en été surcompense l'augmentation des températures, la réponse positive du tremble à des étés plus chauds pourrait être limitée localement par l'épaisseur de la couche organique.

En forêt boréale, les couverts de neige et de mousses, deux isolants et importants régulateurs de la température du sol, sont susceptibles de changer considérablement avec les changements climatiques prévus. Nous avons évalué la réponse physiologique de l'épinette noire et du peuplier faux-tremble à différentes épaisseurs de mousses et de neige dans la pessière à mousses du sud-ouest du Québec. Pendant un an, des épinettes et peupliers de 10 ans ont poussé avec un couvert additionnel de mousses, sans couvert de mousses, avec un couvert de neige modifié pour retarder ou accélérer le dégel du sol, ou

avec une dose de fertilisant d'azote. Au cours de la saison de croissance 2008, nous avons suivi le débourrement des deux espèces, leur rendement de fluorescence chlorophyllienne (PSII (Fv/Fm)) et leur contenu foliaire en carbone, azote et en isotopes stables ^{13}C , ^{15}N et ^{18}O . Au printemps, les traitements qui ont impliqué l'ajout d'une couche isolante de mousse ou de neige ont refroidi le sol, tandis que l'enlèvement de la mousse et de la neige l'ont réchauffé. Une tendance prédominante est que le couvert du sol, qu'il soit neigeux ou végétal, a accru le taux de reprise de la photosynthèse au printemps. Réciproquement, l'enlèvement du couvert de neige et de mousses a été néfaste pour la reprise de la photosynthèse, particulièrement chez l'épinette, où l'on a enregistré un taux de transport d'électrons maximal 39.5% plus bas sans mousse qu'avec mousse additionnelle, et 16.3% plus bas suivant un dégel accéléré qu'avec un dégel retardé. Le rendement potentiel du PSII (Fv/Fm) était 3.3% plus bas sans mousse qu'avec mousse additionnelle, et 3.8% plus bas avec un dégel accéléré qu'avec un dégel retardé. Ces taux de reprise modérés étaient généralement accompagnés de contenus foliaires en azote plus bas. La reprise de photosynthèse et l'assimilation de nutriments affaiblis en l'absence d'une couche isolante de mousses ou de neige ont été principalement attribuées à une assimilation réduite de nutriments occasionnée par des changements au niveau de la microbiologie du sol probablement causés par une plus grande amplitude des variations journalières de la température du sol. Il est probable que les champignons mycorhiziens et/ou organismes décomposeurs du sol en aient été affectés dans leurs fonctions, perturbant les dynamiques de N du sol. Les deux espèces ont été affectées dans le même sens, mais le peuplier a réagi de façon moins importante. Le système racinaire de l'épinette, qui se développe en surface dans le profil du sol, rend l'assimilation de nutriments par voie mycorhizienne plus sensible aux variations de température de l'air que le peuplier, qui développe ses racines davantage en profondeur (Fréchette et al, sous-presse).

Objectif 4 Modéliser des tables de rendement pour les deux espèces en peuplement purs ou mixtes qui tiennent compte de l'influence du climat sur leur croissance.

(FB, PB, Lapointe-Garant PhD, Gea-Izquierdo post-doc)

Nous avons utilisé un modèle de photosynthèse du couvert forestier, qui décrit les changements de la capacité photosynthétique lors de processus d'acclimatation lente à la température. Un algorithme de partitionnement de flux a été appliqué pour ajuster le modèle d'activité photosynthétique des écosystèmes pour 12 forêts de conifères du nord des régions tempérées et boréales. Le modèle représente bien une grande partie de la variation de la production photosynthétique, avec un rendement similaire à ceux de modèles plus complexes. Le paramètre décrivant le taux d'acclimatation avait plus d'importance pour les sites nordiques, qui ont une acclimatation plus lente de la photosynthèse à la température. La réponse du taux de photosynthèse de température de l'air au printemps a été retardée de plusieurs jours pour les sites les plus froids. Par conséquent, des changements lents de la capacité photosynthétique expliquent les variations de la photosynthèse pour les sites froids en forêt boréale où l'acclimatation de l'activité photosynthétique à la température est plus lente, alors que l'importance de ces processus semble moindre dans les régions plus chaudes des forêts conifériennes (Gea-Izquierdo et al. 2010).

Nous avons examiné la relation entre la productivité des écosystèmes et la croissance radiale du pin gris et de l'épinette noire le long d'un gradient latitudinal dans l'Est du Canada. La croissance du pin gris répond directement à la productivité moyenne du site alors que celle de l'épinette noire y est moins sensible. La croissance moyenne de l'épinette noire a été beaucoup plus imprévisible et homogène le long du gradient, suggérant l'influence de facteurs non-climatiques. La productivité montre une relation très étroite à la fois aux degrés-jours de croissance et à la température, en particulier lorsque les sites sont regroupés pour l'analyse. Une plus grande activité photosynthétique au printemps et en été augmente la croissance. La réponse de la croissance du pin gris à la productivité de l'écosystème était plus précoce dans les sites les plus méridionaux. Encore une fois, le pin gris démontre une plus grande plasticité, en adaptant sa croissance, alors que l'épinette noire est moins sensible aux basses fréquences climatiques et à la productivité. Les différences dans l'allocation des hydrates de carbone des différentes espèces et sous différentes conditions écologiques pourraient expliquer en partie la variabilité rencontrée dans la réponse de la croissance (Gea Izquierdo et al. soumis). Aussi, les facteurs qui déterminent la croissance dans les sites à long terme semblent être différents des facteurs qui déterminent la croissance à court terme.

Afin de pouvoir bâtir des tables de rendement qui tiennent compte du climat, il fut nécessaire d'ajouter une composante climatique au calcul de croissance ainsi qu'à l'estimé de mortalité du peuplement. Ainsi, une méthode paramétrique a d'abord été développée afin de rendre les prédictions de croissance des arbres sensibles au climat. C'est à partir des cernes mesurés sur le gradient latitudinal étudié dans le cadre de l'objectif 1 qu'un lien empirique entre le climat et les paramètres du modèle forestier NE-Twigs a été estimé. En effet, l'indice de qualité de station (IQS) de ce modèle forestier a été remplacé par un indice de croissance variant annuellement selon le climat observé. Ainsi, le modèle de croissance sensible au climat a été utilisé pour prédire la croissance de la surface terrière de peuplements de peuplier faux-tremble sous six scénarios climatiques futurs, les résultats suggèrent une très légère augmentation de croissance pour le site le plus au nord et une diminution de croissance pour les sites situés en dessous du 49°N (Lapointe-Garant et al. 2010). Nous avons aussi développé des équations pour les relations croissance-climat pour les autres espèces. Ensuite, un second modèle paramétrique a été estimé afin de tenir compte de l'effet du climat sur la mortalité du peuplement. L'effet de la mortalité peut être considéré dans le calcul de rendement par l'entremise de la densité relative de peuplement tel que dans les tables de rendement de Pothier et Savard (1998). C'est pour cette raison que le second modèle tente d'établir le lien paramétrique entre la densité relative et plusieurs variables climatiques. Grâce au modèle de croissance et de densité relative sensibles au climat, il sera possible d'obtenir des tables de rendement variant selon le climat pour les quatre espèces de l'étude (Marie-Pierre Lapointe-Garant, étudiante au doctorat).

Objectif 5 Simuler pour une unité d'aménagement gérée par nos partenaires différents scénarios d'aménagement tenant compte de l'effet des changements climatiques sur la croissance de l'épinette noire et du peuplier faux tremble, ainsi que sur l'activité des feux.

(FR, PB, YB, Dhital PhD, Anyomi PhD)

Narayan Dhital (étudiant Ph.D.) a reçu le calcul de possibilité de notre partenaire industriel. Le nombre de strates d'aménagement utilisé pour le calcul de possibilité étant beaucoup trop élevé pour la réalisation de cet objectif, il a été décidé de pratiquer un regroupement des strates d'inventaire sur la base de la distribution du volume marchand des placettes d'inventaire par espèce et classe de diamètre à 1.3 m. De plus, comme les hypothèses de succession forestière du calcul de possibilité ne reposent pas sur la trajectoire successione normale observée (elles reposent plutôt sur les normes du manuel d'aménagement forestier du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec), il a été décidé d'utiliser le modèle de dynamique forestière proposé par Nguyen pour la même unité d'aménagement forestier et qui se base sur l'observation de la composition forestière en fonction du temps depuis le dernier feu. Le travail de Lapointe-Garant (Objectif 4) a permis de projeter jusqu'en 2100 l'indice de qualité de station moyen et la densité relative moyenne pour les trois espèces principales du territoire (épinette noire, pin gris et peuplier faux-tremble) et pour deux scénarios climatiques (A2 et B1). De nouvelles courbes ont été produites pour chaque strate d'aménagement en utilisant le taux d'augmentation de la croissance de la courbe moyenne du volume marchand. Seules de faibles différences (positives) ont été obtenues dans les courbes de rendement, relativement aux courbes utilisées pour les peuplements actuellement existants. Ces différences augmentent en fonction du temps nécessaire avant de récolter ces peuplements. L'approche utilisée suggère aussi une perte plus rapide de volume pour les peuplements passant en phase de sénescence. Plus fondamentalement, les effets d'un changement climatique sur la productivité forestière devraient être ressentis sur un horizon temporel supérieur à 100 ans, c'est-à-dire pour les peuplements futurs (i.e. régénérés par la coupe ou une perturbation sévère). Le logiciel de calcul de possibilité utilisé par le Bureau du Forestier en Chef du Québec ne permet pas de tenir compte de l'évolution des courbes dans le temps. Une approche est en cours de développement pour changer les rendements escomptés entre le moment où le logiciel de calcul compile le problème d'optimisation et sa résolution par un solveur.

Ce même logiciel de calcul de possibilité utilise une méthode d'optimisation (i.e. programmation linéaire) qui ne peut pas tenir compte de processus à forte composante stochastique comme le feu ou la succession forestière. Actuellement, ni le feu ni la succession forestière ne sont directement pris en compte dans le calcul de possibilité. Une approche reconnue dans la littérature (prise en compte d'un fonds de réserve) a été utilisée pour tenir compte de la superficie moyenne brûlée par période de 5 ans

dans le calcul. Un premier scénario a été de tenir compte du taux de brûlage actuel. Deux autres scénarios ont utilisé les taux de brûlage projetés avec les changements climatiques tels qu'estimés par Bergeron et al. (2010 - scénarios A2 et B1). Ces scénarios ont été évalués pour deux stratégies d'aménagement, l'une basée uniquement sur la coupe de protection et de régénération des sols et l'autre sur une approche multi-cohorte (Dhital et al., en prép). La possibilité forestière du territoire devrait être réduite en moyenne de 22% pour pouvoir tenir compte de l'effet du régime de feu actuel sur le volume disponible à la récolte. Cette réduction augmente un peu pour les scénarios B1 (26%) et A2 (34%). En termes relatifs, peu de différences sont observées entre les stratégies d'aménagement. La première recommandation à faire aux partenaires est donc la nécessité de tenir compte du régime actuel de perturbations dans le calcul de possibilité. Une approche déterministe par fonds de réserve ne permet pas de tenir compte de la prise de décision face au risque. Un projet en cours sur le même territoire et en collaboration avec OURANOS montre qu'il est possible de raffiner et de moduler cette réduction en utilisant une stratégie d'assurance probabiliste. Celle-ci requiert une interaction entre le logiciel de calcul de possibilité et un modèle de simulation de la dynamique du paysage pour estimer les probabilités de réussite de la planification de récolte face au feu et à la succession naturelle.

Kenneth Anyomi a débuté un doctorat en janvier 2009. L'objectif de ses recherches est de mieux comprendre la relation entre le climat et la mesure de productivité qu'est l'indice de qualité de station (IQS) qui sert d'intrant aux courbes de rendement. Il a utilisé des analyses de tige qui ont servi à la classification écologique du territoire. Ces analyses de tige ont été prétraitées pour enlever l'impact de la suppression juvénile et les défoliations sur la croissance en hauteur. Son premier chapitre traite la constance de l'IQS du peuplier faux-tremble au cours du temps (Anyomi et al., en prép). Le faible effet observé par Dhital sur les courbes de rendement est en partie dû à la définition même de l'indice de qualité de station. En effet, ce dernier est évalué au Québec sur un horizon de 50 ans. Cet horizon temporel est nécessaire pour déterminer avec suffisamment d'assurance le niveau de productivité des peuplements. Par contre, sa dynamique temporelle s'effectue sur une échelle différente de celle de la dynamique projetée du climat (i.e. inter-annuelle). Ce n'est donc peut-être pas le meilleur indice de productivité à utiliser pour pouvoir tenir compte des changements climatiques sur la productivité forestière. Un modèle à effets mixtes a été utilisé pour corrélérer l'IQS avec des variables climatiques, édaphiques et de classification écologique. La première variable qui explique l'IQS correspond aux degrés-jours pendant la saison de croissance. Par contre, l'essentiel de la variabilité temporelle de l'IQS est observé non pas à l'échelle régionale ou sous-régionale mais plutôt à l'échelle de la placette : la variabilité de l'IQS d'une placette s'explique d'avantage relativement au climat moyen de la placette (meilleure corrélation observée pour une moyenne mobile de 20 ans) que relativement au climat moyen de la région étudiée. Une part importante de la variabilité reste inexpliquée par ce modèle et une stratégie de prédiction de l'effet aléatoire à l'aide de variables auxiliaires (i.e. mesures effectuées dans des placettes-échantillons comme l'IQS et la texture du sol) permet de capturer l'essentiel de la variation temporelle de l'IQS (i.e. > 90%). Ces résultats renforcent ceux de Lapointe-Garant et al. (2010) et tendent à montrer que la réponse de productivité face à des changements climatiques n'est pas unique (i.e. régionale ou globale) mais dépend en grande partie de l'historique de croissance des peuplements.

Objectif 6 Discuter avec nos partenaires de l'optimisation de scénarios d'aménagement afin de maximiser l'adaptation de leurs pratiques aux conséquences observées et anticipées des changements climatiques.

(YB, Le Goff post-doc, Jayen professionnelle et toute l'équipe)

Héloïse Le Goff (postdoc) a été engagée en juin 2009 pour contribuer à la coordination du projet (organisation d'une rencontre annuelle et rédaction d'un article de synthèse des résultats du projet) et entretenir les liens avec les partenaires industriels Tembec et Norbord. Héloïse a siégé aux rencontres du comité technique de mise en œuvre de la stratégie d'aménagement écosystémique pour y rapporter les connaissances pertinentes concernant les changements climatiques (évolution du régime des feux, de la composition forestière, outils d'adaptation développés ailleurs au Canada, interactions entre l'adaptation aux changements climatiques et l'aménagement forestier écosystémique) et y recueillir les commentaires de membres du comité pour caractériser les différentes vulnérabilités aux changements climatiques ainsi que les principales pistes d'adaptation de la stratégie d'aménagement écosystémique mise en œuvre sur

le territoire. L'UAF 85-51 constitue ainsi un projet-pilote pour l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques des activités forestière pour le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, mais également pour le Conseil Canadien des Ministres des Forêts suite à l'atelier du 23-27 mars 2010 qui s'est organisé par le CCMF à Winnipeg. Une analyse générale de la vulnérabilité (identifier les risques et les incertitudes) du calcul de possibilité face aux changements climatiques a été réalisée en lien avec un projet Ouranos (2010-1012) sur l'aménagement forestier écosystémique et l'adaptation aux changements climatiques. Les vulnérabilités aux changements climatiques de la forêt (composition et dynamique), des pratiques sylvicoles et de la planification forestière (intégration du risque de feu dans le calcul de la possibilité forestière) ont été entreprises. L'objectif de ces recherches est de proposer des approches pour gérer les risques et incertitudes associés aux changements climatiques dans le contexte de la planification forestière. Trois rapports visant l'évaluation des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements climatiques pour trois projets d'aménagement forestier écosystémiques ont été produits. Héloïse Le goff étant partie en congé de maternité, Karelle Jayen (Msc) a pris la suite du projet en avril 2011. Son travail vise à faire l'analyse comparative des trois évaluations des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements climatiques pour les trois projets pilotes étudiés. Il vise également à entretenir les liens professionnels avec les partenaires industriels impliqués mais aussi avec le CCMF. Une présentation des résultats du projet a d'ailleurs été faite en ce sens le 6 juillet 2011 lors d'une rencontre avec le Technical Group Analysis de la Climate Change Task Force du CCMF et au congrès annuel du Canadian Institute of Forestry/Institut Forestier du Canada à Huntsville, Ontario, Canada qui s'est tenu du 18 au 21 septembre 2011.

Écarts par rapport aux objectifs initiaux

Retard dans le calendrier; voir la section problèmes survenus.

Le projet impliquait une longue démarche scientifique à partir de la croissance des arbres jusqu'au calcul de la possibilité forestière. Bien que des avancées importantes aient été faites à chacun des niveaux, l'intégration verticale n'a pas pu être complétée dans la période couverte par la subvention. Elle le sera cependant avec la complétion des travaux en cours.

Importance scientifique et technique des résultats

Plusieurs résultats importants émanant du projet ont pu être publiés dans la littérature scientifique. Entre autres, les travaux ont pu mettre en évidence les réponses individuelles des différentes espèces aux conditions climatiques et notamment, l'importance du bilan hydrique et de la provenance (Huang et al. 2010 et soumis). Les caractéristiques phénologiques des différentes espèces contribuent à expliquer les différences observées entre les espèces (Huang et al. 2010; Zhai et al soumis). Les résultats ont aussi pu démontrer l'importance des conditions de sols (couche organique) comme filtre de la réponse des espèces aux changements climatiques (Fréchette et al. Sous-presse; Drobyshev, 2010) Par ailleurs, nos travaux ont contribué à démontrer les liens entre la réponse empirique des espèces et les mécanismes physiologiques (photosynthèse) responsables de la croissance (Gea Izquierdo et al. 2010 et soumis). Nos résultats ouvrent aussi la porte à un saut d'échelle entre la réponse des arbres à la réponse des peuplements via la modélisation de l'indice de qualité de site (Lapointe-Garant et al. 2010, Anyomi et al. en préparation). Le projet a aussi contribué significativement à notre compréhension de l'influence des changements climatiques sur les incendies forestiers (Bergeron et al. 2010) et sur ses interactions avec les changements futurs de la composition forestière (Terrier et al. en préparation). Enfin, à terme nos travaux permettront d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la possibilité forestière (Dhital et al. en préparation) un des éléments déterminant dans les prises de décision de nos partenaires. À court terme, nous pouvons recommander les éléments suivants : 1. Compte tenu des réponses différentes des espèces et des incertitudes quant au bilan hydrique qui contrôle la croissance, de maintenir une mixité d'espèces si possible en peuplement mixte 2. De favoriser des espèces à croissance rapide et bien adaptées aux feux dans un contexte où ceux-ci risquent de devenir plus fréquents. 3. De tenir compte du régime de feux actuel et de la dynamique de succession après perturbations dans le calcul de possibilité forestière.



Diffusion des résultats de la recherche

Articles présentés à des revues avec comité de lecture :	4
Articles acceptés par des revues avec comité de lecture ou publiés dans ceux-ci :	11
Exposés à des conférences/Affiches :	20
Autre (y compris les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, etc.) :	13
Combien de ces publications, de ces exposés à des conférences, etc. ont été élaborés en collaboration avec un partenaire non universitaire? :	9

1. Manuscrits en préparation

Anyomi, K., Raulier, F., Mailly, D., Girardin, M., and Y. Bergeron. Using site index to model global and local responses of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx) to climate within the boreal forest of western Quebec.

Dhital N., Raulier, F., Asselin, H., Imbeau, L., Valeria, O., and Y. Bergeron. Long-term environmental and social impacts of a multi-cohort management scenario in an eastern Canadian boreal forest.

Drobyshev, I., Gewehr, S., Bergeron, Y. Differences between black spruce and trembling aspen in response to climate in western Quebec.

Gea-Izquierdo, G., Bergeron, Y., Huang, J.-G., Lapointe-Garant, M.-P., Grace, J., and F. Berninger. Species-specific scale dependent relationships between ecosystem productivity and tree-ring growth in boreal coniferous forests.

Gewehr, S., Drobyshev, I., Berninger, F., Bergeron, Y. Effects of soil organic layer on distribution, growth, and climate response of black spruce and trembling aspen in western Québec.

2. Articles soumis pour publication dans une revue avec comité de lecture

Berninger, F., Nicault, A., Savva, Y., Begin, C. Dunn, A., Savard, M.M., and Y. Bégin. Winter climate drives growth of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) in large areas of North-Eastern Canada. Submitted to *Ecosystems*

Gea Izquierdo, G., Bergeron, Y., Huang, J., Lapointe-Garand, M.P., Grace, J., and F. Berninger. Species-specific scale dependent relationships between ecosystem productivity and tree ring growth in boreal coniferous forests. *Global biogeochemical cycles*,

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Berninger, F., Zhai, L.H., Tardif, J., and B. Denneler. Impact of future climate on radial growth of the four dominant boreal tree species along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. Soumis à *New Phytologist*

Zhai, L.H., Bergeron, Y., Huang, J.-G., and F. Berninger. Variations in intra-annual wood formation, and foliage and shoot development of three major Canadian boreal tree species. Submitted to *Tree Physiology*.

3. Articles acceptés ou publiés dans une publication avec comité de lecture

Drobyshev, I. Flannigan, M.; Bergeron, I.; Girardin, M., and S. Byambagere. 2010. Variation in local weather explains differences in fire regimes within a Québec south-eastern boreal forest landscape. *International Journal of Wildland Fire*. 19: 1073-1082

Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M.P., and C. Carcaillet. 2010. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian 2 boreal forests outside of natural variability: Collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *Int. J. Wildland Fire* 19: 1127-1139.

Drobyshev, I., Bergeron, Y., Simard, M., and A. Hofgaard. Does soil organic layer thickness affect climate-growth relationships in the black spruce boreal forest? *Ecosystems* 13: 556–574.

Frechette, E., Berninger, F., and Y. Bergeron. Will changes in root zone temperature in boreal spring affect recovery of photosynthesis in *Picea mariana* and *Populus tremuloides* in a future climate?" *Tree physiology*, accepted September 2011.

Gea-Izquierdo, G., Mäkelä, A., Margolis, H., Bergeron, Y., Black, T.A., Dunn, A., Hadley, J., Tha Paw, U. K., Falk, M., Wharton, S., Monson, R., Hollinger, D.I., Laurila, T., Aurela, M., McCaughey, H., Bourque, C., Vesala, T., and Berninger, F. 2010. Modeling acclimation of photosynthesis to temperature in evergreen conifer forests. *New Phytologist* 188(1): 175-186.

Girardin, M.P., Raulier, F., Bernier, P.Y., and J.C. Tardif. 2008. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: A comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecological Modelling* 213(2): 209-228.

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F. and J. Tardif. 2007. Response of forest trees to increased atmospheric CO₂. *Critical Reviews in Plant Sciences* 26(5): 265-283.

Huang, J.-G., Tardif, J., Denneler, B., Bergeron, Y., and F. Berninger. 2008. Tree-ring evidence extends the historic northern range limit of severe defoliation by insects in the aspen stands of western Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 2535-2544.

Huang, J.-G., Tardif, J.C., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F., and M.P. Girardin. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology* 16(2): 711-731.

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Zhai, L.H., and B. Denneler. 2011. Variations in intra-annual radial growth (xylem formation) of black spruce along a latitudinal gradient in western Quebec, Canada. *American Journal of Botany* 98(5): 792-800.

Lapointe-Garant, M.-P., Huang, J.-G., Gea-Izquierdo, G., Raulier, F., Bernier, P., and F. Berninger. 2010. Use of tree rings to study the effect of climate change on trembling aspen in Québec. *Global Change Biology* 16: 2039–2051.

4. Exposés (E) et affiches (A) présentés à des conférences

Bergeron, Y., Berninger, F., Raulier, F., Bernier, P., Girardin, M., Lapointe-Garant, M.-P., Huang, J.-G., Terrier, A., Dhital, N.P., et H. Le Goff. Comment la productivité de la forêt boréale va-t-elle changer sous l'influence des changements climatiques. 3^e symposium du consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, 17-18 novembre 2010, Québec, QC. **A**

Berninger, F. 2008. Coordination of phenology among sites and species, annual assembly of the American Geophysical Union, 12.2008, San Francisco.

Drobyshev, I. 2010. Does soil organic layer thickness effect climate-growth relationship in the black spruce forests? *Northern Primeval Forests: Ecology, Conservation and Management*. Sundsvall, Suède, août 2010. **E**

Fréchette, E. 2009. Mousses et neige en forêt boréale: Les effets des changements climatiques sur l'épinette et le tremble. 11^{ème} colloque de la Chaire AFD. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec. **E**

Fréchette, E. 2010. Moss, snow and the effects of climate change on black spruce and trembling aspen. Colloque annuel, centre d'étude de la forêt, Orford, mars 2010. **E**

Gewehr, S., Bergeron, Y. et F. Berninger. 2008. Les changements climatiques dans la forêt boréale: impacts de la couche organique sur la croissance du tremble et de l'épinette noire. 10^{ème} Colloque annuel de la Chaire en Aménagement Forestier Durable, le 4 décembre 2008, Rouyn-Noranda, Québec. **A**

Gewehr, S., Bergeron, Y. et F. Berninger. 2010. Impacts de la couche organique sur la croissance radiale et effets des changements climatiques sur le peuplier faux-tremble et l'épinette noire. 12^{ème} colloque annuel de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable, 23 novembre 2010, Rouyn-Noranda, QC. **E**

Gewehr, S. and Y. Bergeron. 2010. Impacts of soil organic layer thickness on sensitivity to climate change of black spruce and trembling aspen in western Quebec, Canada. WorldDendro 2010, the 8th international conference on dendrochronology, Rovaniemi, Finlande. Juin 2010. **A**

Gewehr, S. 2010. Impacts de la couche organique sur la réponse aux changements climatiques du peuplier faux-tremble et de l'épinette noire dans la pessière à mousses de l'ouest du Québec. Colloque annuel, Centre d'étude de la forêt. Orford, mars 2010. **A**

Huang, J-G., Fréchette, E., Berninger, F., and Y. Bergeron. 2010. Impact of future climate on radial growth of four dominant boreal tree species along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. WorldDendro 2010 - 8th Conference on Dendrochronology. June 13-18, 2010, Rovaniemi, Finland. Abstracts. Edited by Mielikäinen, K., Mäkinen, H., and Timonen, M. 229. <http://cgrg.geog.uvic.ca/cdabstracts/HuangImpactFuture.html>

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Tardif, J., Denneler, B., Berninger, F., and M. Girardin. 2008. Response of four major boreal tree species to climate warming along the latitudinal gradient in western Quebec, Canada.

Huang, J.G., Bergeron, Y., Tardif, J., Denneler, B., Berninger, F., and M. Girardin. 2008. Response of four major boreal tree species to climate warming along the latitudinal gradient in western Quebec, Canada. Proc. 1st American Dendrochronology Conference, 23-27 June, 2008, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.

Huang, J.G., Bergeron, Y., Denneler, B., and J. Tardif. 2007. Tree-ring reconstruction of forest tent caterpillar outbreaks along a latitudinal gradient in western Quebec, Canada. Proc. VI International Conference on Disturbance Dynamics in Boreal Forests: Climate Change Impacts on Boreal Forest Disturbance Regims, 30 May-2 June, 2007, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA.

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Tardif, J., Denneler, B., Berninger, F., and M. Girardin. 2008. Response of four major boreal tree species to climate warming along the latitudinal gradient in western Quebec, Canada. Proc. 1st American Dendrochronology Conference, 23-27 June, 2008, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. **E**

Jayen, K. et Y. Bergeron. Forest ecosystem management and climate change in Québec. Canada's Forest Conference 2011. Canadian Institute of Forestry/Institut Forestier du Canada annual general meeting and conference. 18-21 septembre 2011, Huntsville, ON. **A**

Le Goff, H. 2010. Vulnerability assessment of three forest ecosystem management strategies. Vulnerability Assessment Practitioners Workshop organisé par le Conseil Canadien des Ministres des Forêts, 24-26 mars 2010, Winnipeg. **E**

Le Goff, H et Y. Bergeron. 2010. L'adaptation aux changements climatiques dans le cadre de l'aménagement forestier écosystémique. Séminaires Impacts et Adaptation d'Ouranos, 9 décembre 2010, Montréal. **E**

Le Goff, H et Y. Bergeron. 2010. L'aménagement forestier écosystémique et les changements climatiques. Colloque sur l'aménagement forestier écosystémique, Université Laval, 12 novembre 2010, Québec, QC. **A**

Le Goff, H et Y. Bergeron. 2010. L'aménagement forestier écosystémique et les changements climatiques. 3^e symposium du consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, 17-18 novembre 2010, Québec, QC. **A**

Le Goff, H. Aménager durablement nos forêts dans un contexte de changements climatiques : 3 projets-pilotes. Colloque du Centre d'Étude de la Forêt, 10-12 avril 2011, Québec, Québec. **E**

5. Rapports techniques, articles sans comité de lecture, etc.

Beekharry, A., Huang, J.-G., Sigouin, M.-È., et Y. Bergeron. 2007. Changements climatiques: les arbres aussi vont y goûter! *Le Couvert Boréal* 3(4): 27-28.

Bergeron, Y. et Le Goff, H. 2010. Les impacts des changements climatiques sur la productivité de la forêt boréale québécoise. Billet dans le cadre de la série "Copenhague s'en vient : projets de recherche" publié sur le site internet de Vertigo, la revue des Sciences de l'Environnement. URL: <http://vertigo.hypotheses.org/432>, dernière consultation le 15 novembre 2010.

Bernier, P. 2011. Changement climatique et productivité forestière : une forêt de questions. *Le Couvert boréal* 7 : 26-27.

Gewehr, Sylvie. 2011. Le peuplier faux-tremble et l'épinette noire, un couple qui a de l'avenir. *Le Couvert boréal* 7 :18-19.

Le Goff, H. 2011. Intégrer les enjeux reliés aux changements climatiques dans notre façon d'aménager les forêts: pourquoi et comment ? *Le Couvert Boréal* Volume 7, numéro 2, printemps 2011, p 20-21.

Terrier , A., Girardin, M.P., et Y. Bergeron. soumis. Les réservoirs de carbone en forêt boréale à l'est du Canada : acquis et incertitudes face aux changements climatiques. **Vertigo**.

6. Thèses et Mémoires

Anyomi, K. A. 2009. Influence of climate change on potential site index in west Québec; has boreal forest site productivity (index) changed? Synthesis Exam for the PhD program. Laval university, Québec. 18p.

Anyomi, K. A. 2010. Influence of climate change on potential site index in west Québec. PhD research proposal. Laval University, Québec. 29p.

Fréchette, E. 2010. Effets de l'enneigement et de l'entourbement sur la physiologie de l'épinette noire et du peuplier faux-tremble en forêt boreale québécoise. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Montréal. 59 p.

Gewehr, S. 2011. Influence du climat et de l'épaisseur de la couche organique sur la croissance et la distribution du peuplier faux-tremble et de l'épinette noire dans le nord-ouest du Québec. Mémoire de maîtrise en biologie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Huang, J.-G. 2010. Effets du climat passé et futur sur la croissance radiale de quatre espèces d'arbres dominantes (peuplier faux-tremble, bouleau blanc, épinette noire, et pin gris) de la forêt boréale mixte et coniférienne de l'Ouest du Québec, Canada. Thèse de doctorat en Science de l'Environnement, Université du Québec en Abitibi- Témiscamingue. 263 p.

Terrier, A. 2010. Incertitudes dans la réponse des réservoirs de carbone de la forêt boréale de l'Est du Canada aux changements climatiques. Examen de synthèse du doctorat en Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Montréal.

Zhai, L. 2009. Variation intra-annuelle de la formation du bois, du développement de la pousse et des feuilles de trois espèces majeures dans la forêt boréale du nord-ouest du Québec, Canada. Thèse de Maîtrise, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal.



Transfert des connaissances et de technologie

Décrivez brièvement les résultats

Dans le cadre des plans d'aménagement, les partenaires peuvent choisir de favoriser les essences en fonction de s'adapter aux changements climatiques. À terme, le projet leur fournira les bases nécessaires pour simuler les conséquences de ces choix dans le contexte des changements climatiques.



Transfert des connaissances et de technologie

Décrivez tout avantage social ou environnemental qui a découlé ou qui découlera de ces travaux de recherche

Ce projet s'inscrit dans le développement de l'aménagement écosystémique et supporte l'application de ce type d'aménagement en collaboration avec des partenaires industriels. La démarche de l'aménagement écosystémique est présentement au coeur des priorités d'aménagement forestier du Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec. Une meilleure compréhension des impacts à long terme du réchauffement atmosphérique sur la croissance et la composition de la forêt boréale permettra d'ajuster le concept de l'aménagement forestier écosystémique qui s'inspire de la dynamique naturelle des peuplements forestiers pour minimiser l'impact des activités forestières sur la structure et les fonctions des écosystèmes et sur la biodiversité. L'évaluation des impacts à long terme des changements climatiques sur la productivité et la composition de la forêt boréale est d'un intérêt primordial pour l'industrie forestière en ce qui concerne le développement durable des ressources et leur exploitation optimale. Le calcul de la possibilité forestière se fait sur un horizon de 150 ans, un horizon conséquent en ce qui a trait aux impacts des changements climatiques sur la croissance et la structure forestière. La durabilité et le développement de la foresterie sont aussi d'un grand intérêt pour le Canada et ses provinces vu l'importance économique sous forme de revenus et de créations d'emplois de ce secteur, particulièrement aux régions de ressources périphériques telles que l'Abitibi-Témiscamingue. Si les résultats de ce projet de recherche sont concluants pour des UAF de l'Abitibi-Témiscamingue, notre approche pourrait être reprise ailleurs au Canada à cause de l'homogénéité de grandes parties de la forêt boréale. La quantification de l'impact des changements climatiques sur la croissance forestière est aussi importante en termes d'obligations internationales pour le Canada. L'accélération de la croissance forestière telle qu'anticipée pourrait augmenter la séquestration de carbone et, par conséquent, contribuerait à atteindre l'objectif que le Canada s'est donné. Finalement, le consortium Ouranos, auquel nous participons, profitera aussi des résultats de nos recherches pour le développement de ses stratégies d'adaptation aux changements climatiques. De plus, la recherche proposée permettra à quatre étudiants et un stagiaire postdoctoral d'acquérir des connaissances en écologie forestière et/ou en modélisation qui les qualifieront pour le marché du travail dans le domaine de la foresterie.