Évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique au Québec

by Héloïse Le Goff^{1,2,3} et Yves Bergeron³

RÉSUMÉ

Le nouveau régime forestier du Québec reconnaît l'importance de considérer les conséquences des changements climatiques en aménagement forestier. Cependant, les professionnels forestiers ne savent pas comment ils pourraient tenir compte des changements climatiques dans leurs décisions. Cet article présente l'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique (AFE) au Québec: le projet de Tembec dans la région de l'Abitibi, le projet Triade dans la région de la Mauricie, et le projet de la Réserve faunique des Laurentides. Les objectifs étaient d'identifier i) les vulnérabilités aux changements climatiques des écosystèmes forestiers et de l'aménagement forestier, ii) des options d'adaptation visant à réduire ces vulnérabilités, et iii) les pratiques empêchant ou facilitant l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques en aménagement forestier. L'AFE présente plusieurs aspects, comme l'amélioration de la résilience des écosystèmes ou l'utilisation d'une gestion adaptative, qui pourraient faciliter l'intégration de mesures d'adaptation dans notre façon actuelle d'aménager les forêts. Nous présentons l'adaptation aux changements climatiques comme une pièce du casse-tête qui pourrait faciliter l'atteinte d'objectifs d'AFE.

Mots-clé : adaptation aux changements climatiques, aménagement forestier durable, résilience, gestion adaptative, études de cas

ABSTRACT

The new forest management stewardship of Quebec acknowledges the importance of integrating climate change consequences into forest management. However, forest professionals do not know how they could take climate change into account into their decision-making. This paper proposes the assessment of climate change vulnerability for three ecosystem-based forest management (EBFM) projects in Quebec: the Tembec project in the Abitibi region, the Triad project in the Mauricie region, and the Laurentian Wildlife Reserve project. The objectives were to identify: i) climate change vulnerabilities affecting forest ecosystems and forest management, ii) adaptation options to decrease these vulnerabilities, and iii) current EBFM practices impeding or facilitating the integration of climate change adaptations in forest management. Several features of EBFM, like promoting ecosystem resilience and using an adaptive management framework, may facilitate the integration of adaptation measures into the current forest management approach. We present climate change adaptation as a piece of the puzzle that would facilitate the achievement of EBFM objectives.

Keywords: adaptation to climate change, sustainable forest management, resilience, adaptive management, case studies

Héloïse Le Goff

Yves Bergeron

Introduction

La planification stratégique de l'aménagement forestier au Québec se fait sur une fenêtre de 150 ans au Québec. Or on sait avec certitude que les conditions climatiques vont changer au cours de cet horizon, même si on ne sait pas avec certitude quel sera le climat futur. Les modèles actuels de planification de la récolte ligneuse se basent sur des conditions climatiques constantes si bien que les projections de la dynamique forestière et de la productivité forestière sont à risque dans un contexte de changements climatiques.

Bien que les professionnels forestiers et les utilisateurs du milieu forestier soient confrontés aux changements climatiques et à leurs conséquences sur les forêts et leur aménagement, cette problématique n'est pas explicitement prise en compte

¹Centre d'Étude de la Forêt, Faculté de Foresterie, de Géomatique et de Géographie, Université Laval, 2405, rue de la Terrasse, Québec (QC) G1V 4C7.

²Adresse actuelle: Ministère des Ressources naturelles, 5700, 4^e ave. Ouest, Québec (QC) G1H 6R1. Courriel : heloise.legoff@mrnf.gouv.qc.ca.

³Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en Aménagement Forestier Durable, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, Boulevard de l'Université, Rouyn-Noranda (QC) J9X 5E4. Courriel : yves.bergeron@uqat.ca

dans le processus de planification forestière (Ogden et Innes 2008). Pourtant, la forêt boréale est particulièrement exposée et sensible aux changements climatiques. Comme ils sont situés à des latitudes nordiques, les écosystèmes boréaux subissent des changements climatiques de plus grande amplitude (notamment l'augmentation des températures) que les écosystèmes situés à des latitudes plus méridionales (GIEC 2007). Par ailleurs, la forêt boréale est particulièrement sensible aux changements climatiques car leurs impacts affectent plusieurs processus biologiques et écologiques actuellement limités par les conditions climatiques (incendies forestiers, épidémies d'insectes, croissance, aires de répartition, etc.). Les changements climatiques qui affecteront particulièrement les forêts boréales sont la hausse des températures atmosphériques, l'altération des régimes de précipitations (fréquence, amplitude des événements), l'altération des saisons (hivers plus doux et plus courts, étés plus précoces et plus longs, Ouranos 2010) et les changements de la fréquence et de l'amplitude des événements météorologiques extrêmes (sécheresses, gels-dégels, pluies abondantes, etc.; Logan *et al.* 2011). Ces changements auront plusieurs conséquences importantes dont : i) une modification de la fréquence et de la sévérité des perturbations naturelles; ii) une augmentation de l'aire occupée par des espèces de début de succession en réponse aux perturbations accrues (feux, inondations, épidémies d'insectes); iii) un changement spatial et temporel de l'occurrence et de l'assemblage des espèces (composition forestière); iv) une modification de la croissance radiale des arbres, et donc de la productivité forestière; v) une migration latitudinale et altitudinale des aires de distribution des espèces (dans la mesure où les conditions édaphiques et les processus écologiques, comme les perturbations naturelles, la compétition, y sont propices); vi) la présence accrue d'espèces envahissantes et exotiques; et vii) une altération de la quantité et de la qualité des habitats fauniques et des relations prédateur-proie (Prato 2008, Huang *et al.* 2010, Ouranos 2010, Logan *et al.* 2011).

Ces modifications biophysiques auront assurément des conséquences sur les services écologiques offerts par la forêt tels que la disponibilité des produits forestiers (ligneux et non ligneux), la production d'oxygène, la régulation du climat, la séquestration du carbone et les activités et les valeurs récréotouristiques et culturelles (Hassan *et al.* 2005). Pour cette raison, le gouvernement du Québec décidait en 2006 d'adopter une série de mesures engageant les acteurs de divers secteurs économiques afin d'atténuer les changements climatiques et de favoriser l'adaptation à ceux-ci. Ainsi, le Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques (MDDEP 2008) définit une mesure spécifique au secteur forestier. L'objectif de cette mesure était d'identifier les vulnérabilités aux changements climatiques et d'intégrer les effets anticipés à l'aménagement forestier. Parallèlement, la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (Gouvernement du Québec 2012), en vigueur depuis avril 2013, mentionne également qu'il est nécessaire de tenir compte de l'impact des changements climatiques dans la gestion des ressources forestières. La loi et la stratégie correspondante (MRNF 2010) visent à implanter un nouveau régime forestier basé notamment sur l'aménagement forestier écosystémique (AFE). Cette approche vise le maintien d'écosystèmes forestiers sains et résilients à long terme en diminuant les écarts entre les paysages naturels et les paysages aménagés (Gauthier *et al.* 2008, MRNF 2010). Cette approche nécessite une bonne compréhension de

la dynamique naturelle des écosystèmes forestiers et un cadre de gestion adaptative permettant d'intégrer rapidement les nouvelles connaissances dans notre façon d'aménager les forêts. La prise en compte des changements climatiques dans les stratégies d'aménagement est incontournable dans un tel contexte puisque ceux-ci influencent la dynamique naturelle des forêts. Le risque de feu, par exemple, est étroitement lié à la teneur en eau du combustible, aux précipitations, à l'humidité relative, à la température de l'air, à la vitesse du vent et à la foudre. On peut ainsi s'attendre à des variations dans l'activité des feux en fonction des changements climatiques et elles doivent être considérées dans un contexte d'AFE.

Le passage au nouveau régime forestier représente un moment propice pour explorer les approches qui permettraient d'intégrer l'adaptation aux changements climatiques dans l'aménagement forestier au Québec pour que les professionnels forestiers puissent faire face aux conditions climatiques actuelles, mais également aux incertitudes climatiques futures. Il existe une abondante littérature sur les impacts biophysiques des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers et sur l'aménagement de ceux-ci, de même que certaines solutions d'aménagement forestier pour y faire face. Cependant, ces connaissances sont disponibles surtout sous la forme de rapports encyclopédiques (GIEC 2007, Bourque et Simonet 2008, Lemmen *et al.* 2008) et sont formulées à des échelles spatiales de l'ordre du biome, du continent ou de la province. Elles sont donc difficiles à intégrer dans les prises de décisions qui entourent la planification forestière d'une unité d'aménagement forestier (Swift 2012) et nécessitent souvent une compréhension préalable des changements climatiques et de leurs conséquences sur les écosystèmes forestiers.

L'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques est une approche reconnue pour fournir l'information sous une forme pertinente pour soutenir les politiques et les prises de décision dans le contexte de l'adaptation aux changements climatiques (Williamson *et al.* 2012). L'adaptation réfère à une variété de réponses qui visent à réduire les effets indésirables ou à saisir les opportunités créées par les nouvelles conditions climatiques (Adger *et al.* 2007). Fondamentalement, l'adaptation vise à réduire la vulnérabilité d'un système aux changements climatiques. La vulnérabilité est le degré à partir duquel un système est susceptible ou incapable de faire face aux effets néfastes, incluant la variabilité et les extrêmes climatiques (Adger *et al.* 2007). Elle dépend de la nature et de l'amplitude des changements climatiques (exposition), de la susceptibilité d'un système à ces changements climatiques (sensibilité), des caractéristiques socio-économiques d'un système et de son habileté à s'ajuster aux changements climatiques (capacité adaptative) (Füssel et Klein 2006). Ainsi, la capacité adaptative repose non seulement sur les connaissances scientifiques et techniques, mais également sur les composantes sociales, économiques et politiques associées à la mise en œuvre des différentes mesures d'adaptation (Yohe et Tol 2002).

Cet article rapporte les vulnérabilités et les adaptations aux changements climatiques de trois projets d'AFE, mais sans fournir une analyse complète de leur capacité adaptative respective. Le présent projet visait à mettre en valeur ces informations spécialisées afin qu'elles atteignent les professionnels de la forêt impliqués dans les décisions d'aménagement. Les trois projets d'aménagement forestier écosystémique examinés sous l'angle

des changements climatiques sont : le projet Tembec en Abitibi, le projet Triade en Mauricie et le projet de la Réserve faunique des Laurentides (RFL). Les objectifs de cette analyse étaient d'identifier :

1. les principales vulnérabilités réelles et potentielles aux changements climatiques des écosystèmes forestiers et des approches d'aménagement examinés,
2. les options d'adaptation, déjà en place ou potentielles qui pourraient contribuer à diminuer les vulnérabilités identifiées,
3. les éléments freinant ou facilitant l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques en aménagement forestier.

Nous présentons tout d'abord les trois projets d'aménagement forestier utilisés comme cas d'étude, ainsi que l'approche et le fonctionnement général du projet. Ensuite, nous présentons les principales vulnérabilités et opportunités liées aux changements climatiques actuels et futurs, suivi des mesures d'adaptations proposées. La section discussion aborde les éléments facilitant ou nuisant à l'adaptation aux changements climatiques. Enfin nous avons dédié une section aux leçons apprises à la lumière de la réalisation du projet et de ses résultats.

Approche

Nous avons évalué la vulnérabilité aux changements climatiques de trois projets d'aménagement en utilisant une revue de littérature sur les vulnérabilités de l'aménagement forestier aux changements climatiques et des discussions avec des professionnels forestiers impliqués dans la planification de forestière.

Fig. 1. Localisation des trois territoires examinés. Carte réalisée par Mélanie Desrochers, Centre d'étude de la Forêt.

La revue de littérature nous a surtout permis d'alimenter les échanges avec les professionnels forestiers pour explorer les vulnérabilités particulières à chacun des projets examinés. Le rapport de recherche complet est disponible (Le Goff *et al.* 2012).

Trois cas d'étude

Nous avons choisis trois projets d'AFE pour aborder la question des vulnérabilités et des mesures d'adaptation aux changements climatiques pour des stratégies d'aménagement

Tableau 1. Principaux enjeux écologiques des trois cas d'étude (voir la Fig. 1 pour la localisation des trois territoires).

Projet	Superficie (km ²)	Domaine bioclimatique	Dynamique naturelle dominante	Enjeux d'aménagement (Boulfroy and Lessard 2009)
Tembec	10826	Pessière noire à mousses	Régime de feux Paludification	Répartition spatiale des perturbations naturelles et anthropiques dans un paysage de forêt ouverte Stratégie de conservation du caribou des bois Déficit de vieilles forêts dans le sud Maintien ou amélioration de la productivité des peuplements paludifiés
Réserve faunique des Laurentides	7860	Sapinière à bouleau blanc	Épidémie d'insectes	Disparition de la dominance des forêts mûres et surannées Raréfaction des forêts mûres et surannées Raréfaction du bois mort Perte d'intégrité de la lisière boisée adjacente aux milieux humides riverains Uniformisation des structures horizontale et verticale des peuplements
Triade	8590	Érablière à bouleau jaune Sapinière à bouleau jaune Pessière noire à mousses	Régime de feux Épidémies d'insectes	Raréfaction des forêts mûres et surannées et de leurs fonctions biologiques Raréfaction de certaines essences résineuses Raréfaction des peuplements mixtes à dominance résineuse Simplification de la structure interne des peuplements

forestier réelles : le projet Tembec en Abitibi, le projet Triade en Mauricie, et le projet de la Réserve faunique des Laurentides (Fig. 1). Ce choix repose sur trois raisons principales.

La première est que le fonctionnement de ces projets facilite l'inclusion de nouvelles connaissances scientifiques afin d'améliorer leur stratégie d'aménagement. Ces projets impliquent une collaboration suivie et déjà établie entre chercheurs, gestionnaires gouvernementaux (Ministère des Ressources naturelles, Bureau du Forestier en Chef) et compagnies forestières (Boulfroy et Lessard 2009).

La seconde raison est que la distribution spatiale des différentes régions examinées sur le territoire québécois (Fig. 1) nous a permis d'aborder une variété de contextes (naturels, mais aussi sociaux et économiques, Tableau 1), et de cette façon, nous avons pu documenter une diversité de vulnérabilités et d'adaptations en plus d'ouvrir la discussion avec une variété intéressante d'intervenants. Ce dernier point nous a exposé à une diversité de sensibilité, de compréhension et de niveau de conscience des professionnels forestiers par rapport à la question des changements climatiques.

La troisième raison est que les enjeux écologiques qui mobilisent les professionnels forestiers de chacun des projets sont bien définis. Les territoires forestiers examinés ont été considérablement modifiés par l'aménagement forestier (Gauthier *et al.* 2008, Boulfroy et Lessard 2009). Plusieurs éléments, incluant la proportion de vieilles forêts et la composition et la structure des peuplements sont actuellement en dehors des limites de la variabilité naturelle documentée (Cyr *et al.* 2009). Il est généralement accepté que des modifications significatives des peuplements peuvent avoir de profonds impacts sur la biodiversité et sur les différents processus naturels régissant les écosystèmes forestiers (Hunter 1993, Messier et Kneeshaw 1999, Gauthier *et al.* 2008). Le maintien de la biodiversité et des processus écologiques est crucial pour assurer la résilience des peuplements forestiers (Drever *et al.* 2006, Gauthier *et al.* 2008). Cette résilience permet aux écosystèmes de faire face aux perturbations et de maintenir leurs fonctions et leur structure (Brand et Jax 2007). L'uniformisation de la structure et de la composition des peuplements ainsi que la perte de vieilles forêts associée aux activités d'aménagement forestier contribue à réduire la résilience des écosystèmes (Landres *et al.* 1999, Gauthier *et al.* 2008). Cette situation pourrait rendre les forêts aménagées davantage vulnérables aux changements climatiques (Leduc *et al.* 2004).

Les enjeux écologiques (Tableau 1) ont été utilisés pour démontrer comment les changements climatiques et leurs conséquences sur les écosystèmes forestiers peuvent empêcher les professionnels forestiers d'atteindre certains objectifs d'aménagement. Par la suite, les autres vulnérabilités aux changements climatiques ont été identifiées d'après une revue de littérature et discutées afin de déterminer leur pertinence selon les professionnels forestiers concernés. Ces discussions visaient l'identification des principales vulnérabilités aux changements climatiques pour lesquelles des mesures d'adaptation devraient être déterminées. Nous avons utilisé la littérature spécialisée pour identifier les mesures d'adaptation potentielles qui pourraient contribuer à diminuer les vulnérabilités identifiées.

Fig. 2. Cadre d'évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques et des mesures d'adaptation. Cet article présente des résultats reliés aux étapes comprises dans la boîte grise.

Évaluation des vulnérabilités

Notre approche d'évaluation des vulnérabilités est dérivée d'une version préliminaire du cadre proposé par Williamson *et al.* (2012). Nous avons procédé en cinq étapes (Fig. 2):

1. Dresser un portrait de la végétation, de la dynamique naturelle, du climat, des approches d'aménagement et des enjeux écologiques qui caractérisent le territoire.
2. Identifier des éléments associés aux écosystèmes forestiers et aux opérations forestières actuellement vulnérables au climat et pour lesquels des mesures d'adaptation ont été mises en place.
3. Caractériser le climat futur des territoires à l'étude à l'aide d'un ensemble de simulations de modèles régionaux du climat.
4. Anticiper les vulnérabilités que pourraient occasionner les changements climatiques projetés, tant sur la dynamique que sur les opérations forestières.

Tableau 2. Composition des comités consultés pour les trois projets selon l'affiliation des membres. RFL : Réserve faunique des Laurentides.

Projet	Industrie	Ministère des Ressources naturelles	Universités	Ressources naturelles Canada	Municipalités
Tembec	7	7	2	–	–
RFL	–	7	4	1	–
Triade	3	1	3	–	1

- Proposer des actions qui pourraient être implantées afin de limiter les effets négatifs des changements climatiques ou de profiter des opportunités créés par les nouvelles conditions climatiques (ex. augmentation de la croissance des arbres).

Conditions climatiques futures

Les conditions climatiques futures ont été simulées en utilisant différents modèles climatiques. Ces modèles sont des représentations numériques du système climatique basés sur des équations qui régissent les phénomènes physiques du climat (Logan *et al.* 2011). Ces outils permettent de reproduire un ensemble complexe de processus responsables des changements climatiques. Les tendances climatiques prévues à l'horizon 2050 pour les trois territoires étudiés ont été rapportées en utilisant les 10^e, 50^e (médiane) et 90^e percentile des changements calculés à partir de huit simulations de différents modèles climatiques régionaux. La différence séparant les 10^e et 90^e percentiles illustre l'incertitude associée aux projections des changements climatiques. Plus elle est grande, plus les différentes simulations climatiques donnent des valeurs différentes. Dans ce cas, les changements médians rapportés sont considérés comme moins fiables.

Comités consultés

Nous avons consulté un comité pour chacun des projets examinés. Pour le projet Tembec, il s'agissait d'un comité préexistant, chargé de mettre en œuvre la stratégie d'AFE, alors que dans le cas du projet Triade et du projet Tembec, nous avons constitué des comités *ad hoc*. La consultation des comités (Tableau 2) avait pour objectifs : i) d'évaluer la perception des partenaires régionaux des changements climatiques parmi leurs autres préoccupations, ii) de les sensibiliser aux conséquences des changements climatiques pour leur pratique professionnelle, et iii) de déterminer les

vulnérabilités aux changements climatiques pour le territoire d'intérêt. Dans le cadre de cet article, seul le dernier aspect est présenté.

Nous avons utilisé les enjeux écologiques pour démontrer les implications des changements climatiques sur les objectifs d'aménagement qui requièrent actuellement des efforts considérables pour être atteints. Ceci nous a permis de vulgariser le concept de vulnérabilité aux changements climatiques et d'initier l'évaluation de la vulnérabilité de chacun des projets examinés.

Résultats

Portrait régional du climat futur

Les conditions climatiques futures anticipées pour 2050 pour les trois territoires examinés sont présentées dans le Tableau 3. Globalement au Québec, la température annuelle médiane augmenterait de 2,7°C à 2,9°C. Les augmentations les plus marquées seraient observées en hiver (de 3,2°C à 3,6°C) et pour les territoires les plus nordiques (celui du projet Tembec dans le cadre de notre étude). Les modèles se montrent plus incertains pour les valeurs futures des précipitations. Les précipitations annuelles médianes augmenteraient (97 mm à 100 mm), avec des augmentations plus marquées au printemps (34 mm à 36,5 mm) et pour le territoire du projet Triade. Les modèles anticipent aussi une augmentation du nombre de jours avec des événements de gels-dégels (5,2 à 5,7 jours) et du nombre de degrés-jours de croissance (381 à 387 degrés-jours).

Vulnérabilités et opportunités pour l'aménagement forestier face aux changements climatiques

Le Tableau 4 présente les vulnérabilités et les opportunités identifiées à l'aide de la littérature et de discussions avec les comités consultés. Nous décrivons brièvement les principales vulnérabilités identifiées pour les trois projets dans les paragraphes suivants. Nous présentons tout d'abord les vulnérabilités biophysiques pour ensuite nous intéresser à certaines vulnérabilités d'ordre socioéconomique.

Croissance des arbres

La réponse de la croissance des arbres au climat varie en fonction de l'espèce et de la latitude à laquelle elle croît. Le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) au-dessus de 49°N, le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) à des latitudes de 53°N et 54°N, et l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) au-dessus de 47°N pourraient bénéficier de l'augmentation des températures hivernales et printanières et y répondre par une augmentation de la croissance (Huang *et al.* 2010). Les liens entre la température et la croissance des arbres suggèrent qu'une augmentation de température devrait favoriser une meilleure croissance, entre autres, par l'allongement de la saison de croissance (20 à 27 jours d'ici 2050 selon le modèle utilisé, Logan *et al.* 2011). L'augmentation de la croissance en raison de conditions climatiques plus favorables ne sera possible que si les conditions

Tableau 3. Principaux changements climatiques attendus dans les trois territoires des projets d'aménagement forestier examinés d'ici 2050 (Comparé à la période 1971-2000, Ouranos 2011). Différence médiane (10^e percentile; 90^e percentiles). Les valeurs saisonnières sont présentées lorsqu'elles diffèrent des valeurs annuelles.

	Réserve faunique des Laurentides	Triade	Tembec
Température moyenne	2,7 (2,0 ; 3,2)	2,7 (2,0 ; 3,3)	2,9 (2,1 ; 3,3)
Hiver : (°C)	3,2 (2,5 ; 4,7)	3,2 (2,4 ; 5,0)	3,6 (2,6 ; 5,4)
Précipitations totales	+99 (44 ; 184)	100 (51 ; 172)	97 (47 ; 156)
(mm)	35,3 (-5,8 ; 58,6)	36,5 (-11 ; 58)	34 (-7 ; 63)
Printemps : Automne :	25,8 (1,5 ; 61,1)		30 (11 ; 50)
Nombre total de jours avec un événement de gel- dégel en hiver	5,7 (2,5 ; 9,25)	5,5 (2,7 ; 8,65)	5,2 (2,5 ; 9,2)
Nombre total de degrés-jours de croissance	384 (290 ; 459)	387 (285 ; 473)	381 (295 ; 454)

Tableau 4. Principales vulnérabilités et les opportunités reliées aux changements climatiques des trois projets d'aménagement examinés. Leur source d'identification (comité de partenaires régionaux, littérature ou personne ressource chargée de réaliser l'évaluation des vulnérabilités pour la stratégie examinée). Les membres des trois comités ont identifié spontanément des vulnérabilités d'après leur expérience professionnelle; certaines d'entre elles sont couramment citées dans la littérature. Les aspects identifiés par la personne-ressource touchent davantage le contexte propre au Québec (nouveau régime forestier). La première partie du tableau porte sur les vulnérabilités d'ordre biophysiques et la seconde sur les vulnérabilités d'ordre socioéconomique. V: vulnérabilité; O: opportunité.

	Tembec			Triade			Réserve faunique des Laurentides		
	Comité	Littérature	Personne ressource	Comité	Littérature	Personne ressource	Committee	Littérature	Personne ressource
Croissance des arbres	V,O	V,O	–	V,O	V,O	–	V,O	V,O	–
Migration des niches climatiques	V,O	V,O	–	V,O	V,O	–	V,O	V,O	–
Débourement hâtif de l'érable à sucre	–	–	–	–	V	–	–	–	–
Activité des feux	V,O	V,O	–	V	V	–	–	–	–
Épidémies d'insectes	–	–	–	–	V	–	V	V	–
Chablis	–	–	–	–	V	–	–	–	–
Événements extrêmes (précipitations, sécheresses) et événements de gel-dégel en hiver	V	V	–	V	V	–	–	V	V
Paludification	V,O	V,O	–	–	–	–	–	–	–
Augmentation de la température des cours d'eau (Salmonidés)	–	–	–	V	V	–	–	–	–
Certification forestière	V	–	–	–	–	–	–	–	–
Nouveau régime forestier	–	–	V,O	–	–	V,O	–	–	V,O
Diversité des utilisateurs	–	–	V,O	–	–	V,O	–	–	V,O
Fonctionnement du projet pilote	–	–	O	–	–	O	–	–	O
Historique de coupes forestière	–	–	V	–	–	V	–	–	V
Régionalisation du pouvoir décisionnel	–	–	O	–	–	O	–	–	O

édaphiques (éléments nutritifs et contenu en eau), la physiologie et la plasticité des espèces le permettent. Ces incertitudes font que cet aspect peut représenter aussi bien une vulnérabilité (si la croissance diminue) qu'une opportunité (si la croissance augmente) pour l'aménagement forestier selon la région et l'espèce considérées.

Migration des niches climatiques des principales espèces d'arbre

Dans la littérature, les changements d'aire de répartition des espèces sont considérés soit comme une vulnérabilité aux

changements climatiques (si une espèce commerciale est défavorisée par les conditions climatiques anticipées), soit comme une opportunité (si elle se trouve favorisée). Berteaux *et al.* (2010) anticipent un déplacement vers le nord des isothermes, allant de 240 km pour l'isotherme 5°C à 650 km pour l'isotherme -5°C, à partir des emplacements actuels pour l'horizon 2071 à 2100 au Québec. McKenney *et al.* (2007) suggèrent des déplacements d'habitat de plus de 700 km, correspondant à une diminution moyenne de 12% de l'aire de répartition pour 130 espèces d'arbres d'Amérique du Nord. Cependant les modèles utilisés pour anticiper cette « migration des espèces » reposent essentiellement

sur les conditions climatiques et ne tiennent pas compte des autres exigences environnementales des espèces considérées (conditions édaphiques) ni des processus écologiques qui pourraient interférer avec l'influence du climat (compétition). C'est pourquoi il est préférable de parler de la migration des niches climatiques des espèces, c'est-à-dire des conditions climatiques qui leurs sont favorables plutôt qu'en termes de migration des espèces. Compte tenu de l'incertitude face à la capacité de chaque espèce à occuper un territoire qui jusque-là lui était défavorable (dispersion, installation, compétition, etc.), il est préférable de limiter l'interprétation des résultats de ce type d'études à l'intérieur de l'aire de répartition actuelle de l'espèce (Catherine Périé, Ministère des Ressources naturelles, communication personnelle, 2012).

De façon générale, on prévoit que les conditions climatiques qui prévaudront dans les prochaines décennies favoriseront davantage les essences feuillues que les essences résineuses. Les conditions climatiques devraient rester favorables pour les espèces dominant le territoire du projet Tembec et celui du projet Triade. Cependant, ces conditions pourraient devenir plus propices à certaines espèces pas ou peu présentes sur ces territoires. Ainsi les conditions climatiques futures pourraient devenir davantage favorables au pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), au bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), au frêne noir (*Fraxinus nigra* Marsh.), au pin blanc (*Pinus strobus* L.), à l'érable rouge (*Acer rubrum* L.) et au peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michx.), pour le territoire de Tembec, et pourraient favoriser le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana* L.), l'ostoyer de Virginie (*Ostrya virginiana* [Mill.] K. Koch) et le tilleul d'Amérique (*Tilia americana* L.), pour le territoire de la Triade. Dans la RFL, les conditions climatiques futures pourraient défavoriser le mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] Koch.) et le pin gris et devenir plus favorables à la pruche (*Tsuga canadensis* [L.] Carr.), au noyer cendré (*Juglans cinerea* L.), au hêtre (*Fagus grandifolia* Ehrh.), au pin blanc et au pin rouge (Périé *et al.* 2014). Comme pour la croissance des arbres, la migration des niches climatiques est associée à de nombreuses incertitudes. C'est pourquoi cet aspect peut représenter aussi bien une vulnérabilité qu'une opportunité pour l'aménagement forestier.

Débourrement hâtif de l'érable à sucre

La production de sirop d'érable a diminué au cours des 20 dernières années en raison des conditions climatiques défavorables (Duchesne *et al.* 2009). Cette diminution devrait se poursuivre pour atteindre de 15% à 22% entre 2050 et 2090 par rapport au niveau de 1985 à 2006. Par contre, il est possible que les pertes escomptées puissent être moins grandes, voire totalement compensées, si l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) parvient à s'adapter en avançant la période de production de coulée de deux à trois semaines en moyenne, entre 2050 et 2090 (Duchesne *et al.* 2009). Il a déjà été observé que les changements climatiques pouvaient provoquer des changements phénologiques, comme le débournement de l'érable à sucre qui se produit maintenant quelques jours plus tôt par rapport aux 100 dernières années (Bernier et Houle 2005). Ce débournement hâtif pourrait entraîner une augmentation des dommages dus au gel si la fréquence de gel-dégel augmente pendant l'hiver. Les flux de sève qui peuvent être utilisés pour la production de sirop dépendent également de journées chaudes et de nuits où la température est en dessous du point de congélation. Une transition plus rapide à des périodes plus chaudes pourrait être un motif de préoccupation.

Activité des feux

L'évolution de l'activité des feux sous l'influence des changements climatiques a été identifiée comme une vulnérabilité dans le cadre des projets Tembec et Triade. Cependant, elle ne représente pas une préoccupation pour le projet d'aménagement de la RFL où l'activité des feux a peu d'influence sur la dynamique forestière. Dans le cadre du projet Tembec l'augmentation de l'activité des feux aurait la particularité d'être considérée comme une opportunité d'améliorer la production des peuplements paludifiés. En effet, si la sévérité des feux augmente, la productivité des sites où la croissance des arbres est limitée par de l'épaisseur de matière organique au sol pourrait s'améliorer. Les changements climatiques pourraient accroître la fréquence des feux dans plusieurs régions forestières au Québec (Bergeron *et al.* 2006, 2010) en raison notamment de l'allongement de la saison de croissance (Wotton et Flannigan 1993) et d'une augmentation de l'activité de foudre (Price et Rind 1994). L'augmentation anticipée des précipitations pendant la saison des feux (en été, +4% d'ici 2050, +10% d'ici 2100; Logan *et al.* 2011) pourrait moduler les effets de la hausse des températures sur la fréquence des feux. Sur le territoire du projet Tembec, un allongement du cycle de feu (qui correspond à une diminution de la fréquence des feux) est documenté sur les 300 dernières années et serait surtout d'origine climatique (Carcaillet *et al.* 2001, Lefort *et al.* 2003). Cependant, cette tendance pourrait être renversée dans le futur et les cycles de feu prédits en 2100 pourraient s'approcher des cycles de feu plus courts rapportés pour le passé (Bergeron *et al.* 2010, Girardin *et al.* 2012). Selon Le Goff *et al.* (2008), dans différentes régions de l'Est du Canada, la fréquence des feux devrait augmenter sous l'influence des changements climatiques sans toutefois excéder les valeurs historiques. Cependant, à l'échelle de l'unité d'aménagement, cette tendance est difficile à prédire. De plus, l'effet de l'augmentation des sécheresses pourrait être limité par un changement vers une végétation moins propice au feu (Terrier *et al.* 2012). Cet effet pourrait ne se faire ressentir qu'à moyen terme (d'ici 2050) en raison de la migration faible vitesse de migration des espèces d'arbre sous l'influence des changements climatiques.

Épidémies d'insectes

Les secteurs actuellement affectés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clem.]) au Québec sont situés à des latitudes plus élevées que les foyers documentés dans le passé (Régnière *et al.* 2012). Au même moment, la Colombie-Britannique est au prise avec une épidémie du dendroctone du pin (*Dendroctonus ponderosae* [Hopk.]) sans précédent. L'augmentation des sécheresses ainsi que des étés et des hivers plus chauds, possiblement associés aux changements climatiques, ont contribué à l'ampleur de ces épidémies (Carroll *et al.* 2004 dans Williamson *et al.* 2009, Berg *et al.* 2006, Soja *et al.* 2007). Les changements climatiques pourraient augmenter l'intensité, la fréquence et l'ampleur des épidémies d'insectes forestiers (Logan *et al.* 2003, Lemprière *et al.* 2008, Williamson *et al.* 2009). La dynamique des épidémies d'insectes est un phénomène complexe de sorte que les impacts des changements climatiques sont difficiles à cerner. En effet, le climat peut influencer toute sorte d'interactions à tous les niveaux trophiques, rendant spéculative toute prédiction en regard des changements climatiques (Dukes *et al.* 2009). Les professionnels forestiers consultés considéraient qu'il existait encore trop peu d'informations sur l'influence du climat sur la dynamique des populations d'insectes ravageurs forestiers au Québec pour

bien documenter ce type de vulnérabilité à l'échelle des territoires examinés (projets Triade et RFL). Cependant, Régnière *et al.* (2012) ont récemment publié des prédictions de la distribution de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à partir de simulations climatiques issues du Modèle Régional du Climat Canadien, donc bien adaptées à l'échelle des territoires examinés lors du présent projet. Leurs simulations pour la période 2041-2070 indiquent que les régions des projets Triade et Tembec deviendraient moins favorables aux épidémies de la tordeuse des bourgeons alors que l'insecte resterait une menace pour le territoire de la RFL.

Chablis

Le risque de chablis est particulièrement élevé sur les sols peu profonds ou gorgés d'eau et est plus fréquent chez les espèces à racines peu profondes ou des espèces ayant un bois de faible densité (Whitney 1961, Mitchell 1995, Auclair *et al.* 1996, Clinton et Baker 2000, Ruel 2000, Ruel *et al.* 2001). Le moment où se produisent les tempêtes de vent joue probablement un rôle dans le taux de mortalité. Par exemple, si de vents forts surviennent durant la fonte printanière lorsque les sols sont inondés, les dommages pourraient être plus sévères (Peltola *et al.* 1999). Notre compréhension des effets des changements climatiques sur la fréquence de chablis au Québec est limitée. Cependant, avec l'anticipation d'une plus grande fréquence de précipitations extrêmes, une augmentation des dommages dus au vent est probable. Par exemple, Panferov *et al.* (2009), ont anticipé une augmentation de la fréquence des événements de chablis pour des peuplements d'épinette de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst.) et de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en Allemagne au cours du 21^{ème} siècle en réponse aux changements climatiques. Les modèles climatiques globaux prévoient une augmentation de la fréquence des tempêtes et des tornades ce qui suggère également une augmentation des chablis (Overpeck *et al.* 1990).

Événements de météorologiques extrêmes

Des modifications dans la fréquence et la quantité des hausses soudaines du débit d'eau ont été observées au cours des dix dernières années sur le territoire de la Triade. Cela a conduit à l'utilisation de ponceaux de plus grands diamètres. Les intervenants du projet Triade redoutent de nouvelles augmentations des débits d'eau, particulièrement si les événements de précipitations extrêmes se produisent sur plusieurs jours successifs au printemps. Les simulations des événements de précipitations extrêmes du Modèle Régional du Climat Canadien suggèrent que leur fréquence pourrait augmenter d'ici 2100 (Barbara Casati, Ouranos, communication personnelle 2011). Le raccourcissement de la saison hivernale et de la période où le sol est gelé, l'augmentation des phénomènes de gel-dégel en janvier et en février, la diminution de la profondeur de gel et l'augmentation de l'humidité des sols en hiver pourraient affecter les coupes et le transport du bois en hiver. En été, la praticabilité des chemins peut être limitée par les nuages de poussière dus au passage des camions. Par exemple, l'assèchement accru des chemins à cause des sécheresses de l'été 2010 a nécessité plus d'arrosages (Sylvie Lepage, Ville de La Tuque, communication personnelle, 2010). Le comité scientifique de la RFL n'a pas fait mention de la vulnérabilité des opérations forestières aux changements climatiques, alors qu'il s'agit certainement d'une problématique existante sur le territoire. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'aucun spécialiste des opérations forestières n'était présent à ce comité.

Paludification

La paludification est un phénomène spécifique aux forêts situées sur la Ceinture d'Argile, par lequel la matière organique, principalement composée de mousses, s'accumule au sol et forme une épaisse couche recouvrant le sol minéral (Fenton *et al.* 2005). La croissance de cette matière organique nuit à celle des arbres en entravant le drainage, puis en diminuant la fertilité des sols et la croissance des arbres (Simard *et al.* 2007). L'allongement récent du cycle de feu dans les forêts de la Ceinture d'Argile (Bergeron *et al.* 2006) et les prévisions climatiques associées aux changements climatiques semblent indiquer que la proportion de peuplements paludifiés pourrait continuer à augmenter (Weber et Flannigan 1997, Ali *et al.* 2009), potentiellement à un rythme moins soutenu en raison d'un taux de décomposition plus élevé et d'une augmentation de la fréquence et de la sévérité des feux sous l'action des changements climatiques (Lafleur *et al.* 2013). La paludification resterait donc une préoccupation majeure sur le territoire du projet Tembec (Drobyshev *et al.* 2010).

Certification forestière

Les impacts des changements climatiques ne sont pas pris en compte dans les normes de certification forestière (Forest Stewardship Council, Sustainable Forest Initiative et Canadian Standards Association). Telles qu'elles sont formulées actuellement, les normes de certification pourraient limiter l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans l'aménagement forestier par leur façon de faire référence aux conditions préindustrielles qui prévalaient sous des conditions climatiques nécessairement différentes de celles anticipées pour le futur. Cependant, si les changements climatiques étaient considérés, les objectifs des normes de certification s'en trouveraient renforcés puisque la considération des changements climatiques en aménagement forestier est reconnue comme une condition importante pour garantir la durabilité de l'aménagement forestier (Spittlehouse et Stewart 2003).

Nouveau régime forestier

Bien que la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (Gouvernement du Québec 2010) et la Stratégie d'aménagement durable des forêts (MRNF 2010) mentionnent les changements climatiques comme sujet d'importance, la mise en œuvre de l'intégration de ces enjeux au système actuel d'aménagement forestier demeure encore théorique. Les principales limites à l'inclusion des enjeux reliés aux changements climatiques qui ont été identifiées au cours des échanges avec les partenaires sont reliées au fait que: i) la mise en œuvre du nouveau régime forestier et des principes d'aménagement écosystémique mobilise déjà beaucoup de ressources; ii) l'accès aux informations sur les changements climatiques pour les professionnels qui planifient l'aménagement forestier est difficile (il manque des experts pour faciliter cette intégration); et iii) les changements climatiques ne sont pas une priorité.

Régionalisation du pouvoir décisionnel

La mise en place d'une gestion intégrée et régionalisée pourrait favoriser l'adaptation aux changements climatiques. Les vulnérabilités associées aux changements climatiques peuvent être différentes d'une région à l'autre, tout comme les objectifs d'aménagement et le contexte socio-économique. Un mode de gestion au niveau local permet donc de déterminer les meilleures options d'adaptation et d'aménagement en fonction des conditions et des enjeux locaux. Même si la prise en compte des

Tableau 5. Exemples de mesures d'adaptation aux changements climatiques pour faire face aux vulnérabilités identifiées. RFL : Réserve faunique des Laurentides.

Vulnérabilités	Options d'adaptation	Exemples
Augmentation de l'activité des feux	Inclure le risque de feu dans la possibilité forestière Aménagement du paysage IntelliFeu Zonage fonctionnel (zone de conservation, zones d'aménagement intensive et extensive)	Le zonage fonctionnel utilisé dans le projet Triade pourrait servir à cartographier finement les priorités en matière de suppression des feux (Le Goff <i>et al.</i> 2005).
Changement de la croissance des arbres	Favoriser la régénération naturelle Replanter à l'aide d'un panier mixte afin de diversifier les chances de succès sous de nouvelles conditions climatiques Imiter la composition de la régénération naturelle si celle-ci est insuffisante Faire un suivi de la croissance Mettre en place une sylviculture qui favorise la croissance (éclaircies, coupes partielles) Effectuer des coupes d'éclaircies ou sélectives pour éliminer les arbres opprimés, endommagés ou de mauvaises qualité Adapter des règles et des pratiques sylvicoles pour maintenir les relations sites-espèces optimales Évaluer l'amélioration des génotypes sur le long terme et dans une diversité de conditions climatiques et environnementales.	Lors des travaux de plantation, utiliser des semences ou des plants avec un génotype mieux adapté aux conditions climatiques futures (Parker <i>et al.</i> 2000, Spittlehouse et Stewart 2003, Millar <i>et al.</i> 2007, Williamson <i>et al.</i> 2009). Il peut s'agir de génotypes provenant de sites plus méridionaux (dans le cas du projet Triade, dont le territoire couvre un large gradient latitudinal) ou de sites de plus basse altitude (dans le cas de la RFL)
Paludification	Préparation du terrain par drainage, scarification ou brûlage dirigé Coupes d'été	Sur la partie Nord du territoire du projet Tembec, la présence des sphaignes limite la croissance des arbres. Si les conditions climatiques futures ne permettent pas d'assécher ou d'augmenter la fréquence des feux dans ces peuplements de façon à contrer naturellement ce processus, les efforts sylvicoles pour diminuer l'épaisseur de cette couche organique devront être poursuivis afin d'améliorer la productivité.
Diminution de la traficabilité des chemins et des parterres de coupe	Changer la pressurisation des pneus en fonction de la traficabilité du terrain	L'augmentation des précipitations pluviales au printemps pourrait affecter la traficabilité des chemins forestier et des parterres de coupe. Diverses solutions techniques ont été développées afin de diminuer l'enlèvement de la machinerie et la consommation de carburant.
Migration des espèces	Migration assistée des espèces et des génotypes Diversifier les génotypes afin d'augmenter la capacité d'adaptation des espèces sous l'influence des changements climatiques Réaliser des tests de provenances sur de plus grands gradients latitudinaux Modifier les lois restreignant l'utilisation de semences provenant de zones éloignées de la zone à replanter Reconfigurer les zones de conservation, d'aménagement intensif et extensif pour faciliter la migration latitudinale et altitudinale des espèces	Voir « croissance des arbres ».
Épidémies d'insectes	Planter des génotypes ou des espèces résistantes aux épidémies, aux maladies et aux sécheresses Suivi des populations pour mieux comprendre leur dynamique	L'aire de répartition de plusieurs insectes défoliateurs pourraient s'étendre vers le nord. Notamment le puceron lanigère de la pruche (Skinner <i>et al.</i> 2003, Evans et Gregoire 2007), qui pourrait affecter les populations de pruches du territoire de la Triade.
Précipitations extrêmes	Augmenter la taille des ponceaux	Le diamètre des ponceaux a été augmenté dans certaines parties du territoire du projet Triade afin de faire face aux plus fréquents événements extrêmes de précipitation au printemps.

Tableau 5. Exemples de mesures d'adaptation aux changements climatiques pour faire face aux vulnérabilités identifiées. RFL : Réserve faunique des Laurentides. (continue)

Vulnérabilités	Options d'adaptation	Exemples
Diversité des utilisateurs	Sensibilisation Éducation Transfert des connaissances Échange des connaissances	Le territoire de la RFL est utilisé pour l'exploitation forestière, la villégiature, le plein air, la chasse, la pêche, etc. Deux communautés autochtones occupent aussi une partie du territoire. Les intérêts de cette diversité d'utilisateurs doivent arriver à converger pour éviter les actions antagonistes.
Certification, régime forestier	Évaluer la marge de manœuvre accordée par les cadres légaux et réglementaires pour intégrer les enjeux reliés aux changements climatiques Formuler des contrats d'approvisionnement à long terme Flexibilité des politiques et des plans d'aménagement Aménagement adaptatif	Les impacts des changements climatiques ne sont pas encore pris en compte dans les normes de certification forestière (Forest Stewardship Council, Sustainable Forest Initiative et Canadian Standards Association). Tel qu'elles sont formulées actuellement, ces normes pourraient limiter l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans l'aménagement forestier.
Régionalisation du pouvoir décisionnel	Sensibiliser les intervenants pour s'assurer que la question des changements climatiques soit discutée avec sérieux et considérée comme un enjeu réel Intégrer aux tables de gestion intégré des ressources et du territoire (GIRT) de scientifiques qui possèdent une expertise sur les changements climatiques et qui peuvent accompagner ces tables à prendre des décisions qui tiennent compte du contexte des changements climatiques. Développer des outils pour guider la GIRT lors de la planification S'assurer que les gestionnaires responsables de l'aménagement forestier envoient un message clair (et des moyens) aux intervenants régionaux sur la nécessité de l'adaptation aux changements climatiques et de sa prise en compte dans la planification	Les rencontres avec les comités ont permis de constater que l'identification des vulnérabilités et impacts associés sur les peuplements est un exercice complexe, même pour les experts. Intégrer l'adaptation aux changements climatiques dans le cadre de la planification forestière ne sera donc pas facile. Il y a également le risque que les intervenants ne se sentent pas interpellés par la question des changements climatiques ce qui pourrait les amener à considérer que cet enjeu ne relève pas d'eux. Il serait donc important de faciliter le transfert d'information auprès des tables de GIRT.
Manque d'outils pour identifier et diminuer les vulnérabilités aux changements climatiques	Développer une évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques des systèmes naturels et humains impliqués et développer les moyens pour y parvenir Estimer les incertitudes reliées aux projections climatiques et à leurs conséquences potentielles Améliorer l'accès à l'expertise sur les changements climatiques Favoriser l'innovation et la recherche pour déterminer quand et où mettre en œuvre des mesures d'adaptation Engager des professionnels de l'adaptation aux changements climatiques	Favoriser des options d'adaptation « sans regret » (robustes) qui permettront de diminuer les vulnérabilités aux changements climatiques et améliorer le système, quels que soient les scénarios climatiques envisagés (« no-regrets options », Ogden et Innes 2007, Lempert et Collins 2007, Johnston <i>et al.</i> 2010).

changements climatiques n'est pas obligatoire dans la planification, les tables de gestion intégrée des ressources et du territoire constituent des organes privilégiés pour débiter la sensibilisation des acteurs du secteur forestier et intégrer l'adaptation aux enjeux qui y sont discutés.

Ces vulnérabilités et opportunités reliées aux changements climatiques ont été identifiées en collaboration avec les professionnels forestiers consultés. Nous avons ensuite mené une revue de littérature pour identifier des mesures et des approches d'adaptation pour diminuer la vulnérabilité ou profiter des opportunités.

Mesures d'adaptation proposées

Peu de mesures d'adaptation ont été intégrées dans la gestion des ressources naturelles ces dernières années en raison de l'incertitude reliée aux prévisions futures du climat (Lawler *et al.* 2010). Cependant, de nombreux documents proposent des stratégies et des mesures d'adaptation. Les stratégies d'adaptation incluent par exemple des suivis ciblés, le développement de politiques d'adaptation et l'amélioration de la

capacité de suppression des perturbations naturelles (Millar *et al.* 2007; USCCSP 2008, Lindner *et al.* 2008, 2010; Eastaugh *et al.* 2009; Swanston et Janowiak 2012). Certains auteurs proposent des mesures d'adaptation destinées à réduire des vulnérabilités particulières d'ordres tactique et opérationnel (Millar *et al.* 2007; Ogden et Innes 2007a, 2008, 2009; Prato 2008; Swanston et Janowiak 2012). Le Tableau 5 présente les stratégies et mesures d'adaptation qui semblaient répondre le mieux aux vulnérabilités présentées dans la section précédente.

Certaines de ces mesures d'adaptation sont des pratiques déjà courantes (favoriser la régénération naturelle, favoriser la croissance par la sylviculture), alors que d'autres mesures d'adaptation restent à mettre en œuvre (replanter à l'aide paniers mixtes, aménagement Intelli-Feu, etc.). Pour ces dernières, il faut tout d'abord évaluer leur faisabilité et leur compatibilité avec l'ensemble des objectifs d'aménagement du territoire considéré. Dans la section suivante, nous discutons des éléments qui facilitent ou qui ralentissent l'adaptation aux changements climatiques.

Discussion

À notre connaissance, ce projet est le premier à examiner la capacité adaptative face aux changements climatiques de trois stratégies d'aménagement forestier simultanément. Ceci nous a permis d'évaluer une grande diversité de vulnérabilités. Si de nombreuses études scientifiques existent sur les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers et sur l'aménagement forestier, très peu de ces études ont été communiquées auprès des personnes impliquées dans la planification de l'aménagement forestier (Ogden et Innes 2007a,b; 2008; 2009). Ce projet a fourni une occasion unique de communiquer de l'information pertinente sur les changements climatiques aux professionnels de la forêt impliqués dans la planification au Québec.

Les enjeux écologiques aux vulnérabilités aux changements climatiques

Les enjeux écologiques définis pour les trois projets d'aménagement examinés rejoignent ceux identifiés par d'autres études menées au Québec (Varady-Szabo *et al.* 2008, Lecomte *et al.* 2010). Seuls Lecomte *et al.* (2010) ont documenté des enjeux écologiques spécifiquement reliés aux changements climatiques et à leurs impacts pour l'aménagement des forêts en Abitibi-Témiscamingue:

- l'augmentation de la productivité de la forêt sur les sites où l'eau et l'azote ne sont pas limitants,
- l'augmentation du taux de décomposition de la matière organique au sol et donc la fertilité des sols dans la majorité des forêts, la réduction du couvert de neige qui pourrait entraîner un stress hydrique chez les conifères en hiver et au printemps,
- l'appauvrissement nutritionnel des sols suite à une augmentation des épisodes de gel-dégel,
- un débourrement hâtif qui pourrait rendre les arbres plus vulnérables aux épisodes de gels printaniers,
- la migration des niches climatiques des espèces vers le nord,
- l'augmentation de la fréquence des feux,
- l'augmentation de la durée des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et la réduction de leur intensité,
- l'allongement de la saison de croissance, des conditions plus chaudes et sèches qui pourraient favoriser le développement d'épidémies de la livrée des forêts (*Malacosoma disstria* Hubn.).

Tels qu'ils sont définis actuellement, les enjeux écologiques des trois projets d'aménagement écosystémique examinés ne sont pas explicitement reliés aux changements climatiques. Par exemple, la diminution de la proportion de vieilles forêts reliée à l'exploitation forestière peut être exacerbée par une augmentation de l'activité des feux sous l'influence des changements climatiques. Par contre, l'augmentation potentielle des superficies brûlées peut compenser pour le manque de recrutement de certains types de bois mort déficient dans les forêts aménagées. La migration des espèces anticipée en raison de celle de leurs niches climatiques peut agir en combinaison avec la présence accrue d'espèces exotiques et envahissantes sur la composition des forêts déjà modifiée par l'aménagement forestier. Ainsi, bien que les enjeux écologiques ne tiennent pas explicitement compte des changements climatiques, ces derniers exacerbent ou compensent certains effets des pratiques d'aménagement sur la composition et la répartition des peuplements forestiers.

C'est pourquoi identifier et tenir compte des changements climatiques et de leurs conséquences nous aiderait à atteindre plus facilement les objectifs d'AFE.

Trois éléments facilitant l'intégration de l'adaptation en aménagement forestier

Face à la nouveauté du concept d'adaptation aux changements climatiques pour le secteur forestier et face au contexte de transition vers un nouveau régime forestier au Québec, il est nécessaire d'utiliser les éléments du système d'aménagement forestier actuel qui facilitent l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques. Trois éléments facilitent l'adaptation aux changements climatiques à l'AFE : l'objectif de maintien de la résilience des écosystèmes forestiers aménagés, un cadre d'échange des connaissances avec les professionnels forestiers et une approche de gestion adaptative.

Tout d'abord, des écosystèmes forestiers résilients auront davantage de chance de se maintenir et de maintenir leurs services écologiques dans le contexte des changements climatiques (Dale *et al.* 2001; Spittlehouse et Stewart 2003). Tout comme l'aménagement forestier écosystémique se base sur les meilleures connaissances disponibles des écosystèmes forestiers, l'adaptation aux changements climatique doit se baser sur les meilleures connaissances disponibles des changements climatiques et de leur influence sur les forêts. Ainsi, l'adaptation aux changements climatiques pourrait largement bénéficier des outils qui ont permis à l'AFE de se développer, à savoir des échanges de connaissances entre les professionnels forestiers et les scientifiques (cadre d'échange des connaissances) et une approche de gestion facilitant l'inclusion de nouvelles connaissances (gestion adaptative). Par ailleurs, notre expérience a démontré que le cadre actuel d'aménagement forestier permet de traiter certaines vulnérabilités aux changements climatiques comme l'augmentation de la fréquence des crues printanières dans le cadre du projet Triade. Ainsi plusieurs approches, déjà couramment utilisées, sont disponibles pour mettre en place dès maintenant l'adaptation aux changements climatiques en aménagement forestier.

Mettre en œuvre de nouvelles mesures pour développer la capacité d'adaptation aux changements climatiques

Les changements climatiques anticipés sont sans précédent dans l'histoire de l'aménagement forestier au Canada. C'est pourquoi il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures qui visent spécifiquement à diminuer les vulnérabilités identifiées. Plusieurs stratégies permettraient de développer la capacité adaptative des projets d'aménagement forestier. La première est de mettre en œuvre des options d'adaptation aux changements climatiques qui permettront d'atteindre les objectifs d'aménagement forestier quel que soit le climat futur. Par exemple, en diversifiant dès aujourd'hui les espèces et les génotypes plantés après coupe, il est possible de maintenir les niveaux de récolte actuels tout en diminuant le risque de mettre en place des forêts peu résilientes aux conditions climatiques futures. Par ailleurs, Lawler *et al.* (2010) ont proposé une approche permettant de prioriser la mise en œuvre des mesures d'adaptation dans le cadre de ressources limitées, en fonction de l'incertitude des impacts biophysiques projetés. On peut également penser à prioriser les mesures d'adaptation en fonction de l'efficacité projetée des mesures d'adaptation. Dans le cadre de ce projet, ni les mesures d'adaptation proposées dans la littérature ni les approches pour

prioriser leur mise en œuvre n'ont pas fait l'objet d'échange avec les partenaires régionaux. Il est maintenant nécessaire d'avoir l'avis des professionnels forestiers sur la compatibilité des options d'adaptation proposées avec les pratiques actuelles.

De nouvelles mesures d'adaptation pour développer la capacité adaptative face aux changements climatiques

Les changements climatiques anticipés sont sans précédent dans l'histoire de la foresterie au Canada. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des mesures qui visent spécifiquement à réduire les vulnérabilités identifiées. Plusieurs stratégies pourraient permettre d'améliorer la capacité adaptative des projets d'aménagement examinés. La première serait de mettre en œuvre des options d'adaptation qui permettrait d'atteindre les objectifs d'aménagement quelque soit le climat futur. Par exemple, en diversifiant les espèces et les génotypes utilisés pour la régénération artificielle, il pourrait être plus facile de maintenir les rendements actuels tout en diminuant le risque de créer des forêts mal adaptées aux nouvelles conditions climatiques. Par ailleurs, Lawler *et al.* (2010) ont proposé de mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans un contexte de ressources limitées en se basant sur le niveau de certitude associés aux impacts biophysiques futurs. Les mesures d'adaptation pourraient également être priorisées en fonction de l'efficacité escomptée. Cependant, dans le cadre de ce projet, ni les mesures d'adaptation ni l'approche utilisée pour prioriser leur réalisation n'ont pu être discutées avec les professionnels forestiers. Il s'agit de l'étape qui devrait être accomplie suite à ce projet. Il s'agirait alors que les professionnels forestiers évaluent la compatibilité des mesures d'adaptation proposées avec les pratiques et stratégies d'aménagement forestier actuelles.

L'applicabilité de l'aménagement forestier écosystémique dans le contexte des changements climatiques

L'AFE se base sur notre compréhension de la dynamique forestière et des références écologiques définissant ce qu'est un paysage « naturel ». On définit les paysages naturels en s'appuyant sur la variabilité naturelle des conditions forestières passées documentées par les études scientifiques. Parce qu'il fait référence aux conditions forestières passées découlant en partie des conditions climatiques passées, l'AFE est considéré par certains auteurs comme inapproprié dans le contexte des changements climatiques puisque les conditions futures seront différentes du climat passé (Millar *et al.* 2007). Pour ces auteurs, s'inspirer des conditions climatiques passées pour aménager la forêt pourrait conduire à créer des écosystèmes forestiers mal adaptés aux conditions climatiques futures.

Bien qu'elle soit imparfaite, l'approche utilisant la marge de variabilité naturelle historique est malgré tout la plus viable à court terme en raison de son faible niveau d'incertitude (Keane *et al.* 2009), et reste un des meilleurs moyens pour comprendre et prévoir les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers (Landres *et al.* 1999). Pour que l'aménagement forestier écosystémique soit vraiment performant dans un contexte de changements climatiques, il devrait comparer les conditions existantes à la fois à celles prévalant sous les conditions climatiques historiques (approche rétrospective) et à celles anticipées pour des scénarios climatiques futurs (approche prospective) (Gärtner *et al.* 2008).

Vers une meilleure intégration de l'adaptation aux changements climatiques à l'aménagement forestier

Nous résumons ici les principales leçons apprises du projet pour améliorer le processus d'évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques, l'identification de mesures d'adaptation et l'intégration de ces mesures au cadre d'aménagement forestier actuel.

Favoriser l'échange des connaissances sur l'adaptation aux changements climatiques

Devant la nouveauté et la complexité des changements climatiques pour les professionnels impliqués dans la planification forestière, le premier enjeu en est un de communication et de vulgarisation. L'adhésion des partenaires régionaux reposait sur leur sensibilité et leur compréhension des changements climatiques et de leurs conséquences pour leur pratique professionnelle. Pour favoriser des échanges constructifs sur les changements climatiques et la planification forestière, il faut déployer des ressources spécifiques. Par exemple, lors de la présentation du projet aux partenaires régionaux, nous nous sommes présentés comme des personnes ressources pouvant fournir de l'information pertinente sur les changements climatiques (portrait des conditions futures) et bien vulgarisée (comment interpréter les conditions futures). Par ailleurs, un élément-clé de la réussite d'une telle collaboration est la valorisation de l'expérience personnelle et professionnelle des changements climatiques des partenaires (Swift 2012). Les échanges peuvent donc se baser sur les vulnérabilités au climat expérimentées par les partenaires régionaux lors des 10 dernières années (Ogden et Innes 2008). Lorsque les partenaires ont saisi le lien entre la variabilité et les changements du climat et leurs tâches professionnelles, les vulnérabilités au climat futur et les simulations de ces conditions futures peuvent être abordées. Il est nécessaire d'engager un spécialiste de l'adaptation aux changements climatiques pour accompagner le comité dans le processus d'évaluation (pour présenter les conditions climatiques futures, expliquer le concept de l'adaptation, pour réaliser une revue de la littérature spécialisée, pour faire appel à des experts pour des questions particulières, etc.).

S'appuyer sur les préoccupations des partenaires régionaux

Comme les changements climatiques ne sont pas une priorité, nous avons choisi les enjeux écologiques et les objectifs d'aménagement correspondant pour initier l'évaluation de la vulnérabilité et pour démontrer comment les adaptations aux changements climatiques pourraient faciliter le travail des professionnels forestiers. Le lien le plus tangible est celui entre les événements extrêmes (sécheresses ou précipitations, dégel exceptionnels et prolongés) qui perturbent les opérations d'exploitation et la nécessité de modifier la planification tactique et opérationnelle en conséquence. Cet aspect démontre clairement que les changements climatiques ne sont pas seulement une nouvelle préoccupation isolée, mais un morceau du casse-tête qui va faciliter l'atteinte des objectifs d'aménagement.

Réaliser une analyse des enjeux écologiques, sociaux et économiques

Dans le cadre de ce projet, les enjeux sociaux (e.g., droits ancestraux des Autochtones, diversification des valeurs forestières) et économiques (e.g., augmentation des coûts d'approvisionnement, concurrence mondiale) ne sont pas abordés. Cependant, plusieurs vulnérabilités identifiées touchent à ces aspects et doivent faire l'objet d'efforts de recherche afin de dresser un portrait plus complet de la capacité adaptative de l'aménagement forestier au Québec face aux changements climatiques.

Évaluer la capacité d'adaptation initiale de la stratégie d'aménagement examinée

L'aménagement forestier s'est toujours adapté aux changements environnementaux (dont ceux du climat) (Prescott 2012), mais toujours en réaction à ces changements. Aujourd'hui nous disposons de nouveaux outils (modèles prédictifs, approches de gestion de risques) qui nous permettent de développer des stratégies d'adaptation avant que ne surviennent les impacts attendus. Ce projet a permis de documenter certaines adaptations déjà mises en œuvre. Utiliser les mesures d'adaptation spontanées ainsi que les pratiques déjà en place qui facilitent l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans l'aménagement forestier permet de démontrer que l'on ne part pas de zéro et que l'on peut s'adapter dès aujourd'hui en se basant sur les acquis. Il s'agit ensuite de conduire une réflexion plus spécifique aux changements climatiques en lien avec les activités de planification régulière.

Agir dans un contexte d'incertitudes

Selon Manning (2003), dès que l'on mentionne les changements climatiques, la question de l'incertitude est rapidement mise de l'avant. Pourtant la science des changements climatiques n'est pas davantage confrontée à l'incertitude que d'autres domaines scientifiques. Par exemple, la génétique, l'épidémiologie de nouvelles maladies et la gestion de la production et de la distribution des denrées alimentaires posent aussi des défis considérables aux décideurs qui doivent faire face à des connaissances incomplètes. Les incertitudes entourant les facteurs-clés doivent être décrites partout où cela est possible pour permettre aux utilisateurs des résultats de prendre des décisions éclairées. Un bon exemple pour illustrer la difficulté de prendre en compte les risques et les incertitudes liées aux changements climatiques est l'influence des feux de forêt sur la productivité des forêts et l'estimation de la possibilité forestière. Comme les estimations de la productivité des forêts sont basées sur des modèles déterministes, ils se prêtent mal à l'intégration de probabilités et les risques tels que ceux liés aux incendies de forêt. Pourtant, Raulier *et al.* (2013) ont démontré que l'intégration du risque d'incendie dans un modèle d'estimation de la productivité des forêts pourrait permettre aux décideurs de choisir le niveau de risque qu'ils sont prêts à accepter dans le cadre de l'aménagement des forêts. Une des approches préconisées pour agir dans un contexte d'incertitude est l'utilisation d'un cadre de gestion adaptative, c'est-à-dire permettant explicitement l'inclusion itérative de nouvelles informations au fur et à mesure de leur développement. Ce cadre de gestion est indissociable de l'AFE puisque notre compréhension de la dynamique naturelle des écosystèmes est en constante évolution. Ce point commun entre l'AFE et l'adaptation aux changements climatiques contribuera à l'intégration de l'adaptation dans le cadre actuel d'aménagement des forêts.

Conclusions

L'aménagement écosystémique et l'adaptation aux changements climatiques ont en commun leur dimension régionale et la nécessité d'utiliser une approche de gestion adaptative. L'aménagement écosystémique vise le développement d'écosystèmes résilients aux changements environnementaux incluant ceux du climat. De son côté, l'adaptation aux changements climatiques vise la prise en compte des changements climatiques dans la prise de décision et peut améliorer notre capacité à atteindre des objectifs d'aménagement forestier durable. Ce projet démontre clairement que les changements climatiques ne sont pas un enjeu isolé pour les professionnels forestiers, mais plutôt une pièce du casse-tête qui pourrait faciliter la mise en œuvre de l'aménagement forestier écosystémique.

Remerciements

M.-M. Gauthier, É. Cadieux et L. Bélanger (Université Laval) ont fait l'évaluation de la vulnérabilité pour le projet réserve faunique des Laurentides. G. Reyes et D. Kneeshaw (Université du Québec à Montréal) ont analysé le projet Triade. H. Le Goff a réalisé l'évaluation de la vulnérabilité pour le projet de Tembec. K. Jayen (Université du Québec à Montréal) a contribué à la finalisation des trois évaluations de la vulnérabilité et a réalisé leur analyse comparative. M. Campagna (Ministère des Ressources naturelles), P. Bernier (Service canadien des forêts), D. Houle (Ouranos), et A. Blondlot (Ouranos) ont contribué au suivi et à l'encadrement du projet. C. Périé (Ministère des Ressources naturelles) nous a fourni les résultats sur les niches climatiques. Nous remercions S. Gauthier (Service canadien des forêts) pour sa contribution à la synthèse de la littérature sur les mesures d'adaptation. Nous remercions également P. Jasinski pour la traduction anglaise d'une version préliminaire de ce manuscrit. Ouranos et le Conseil canadien des ministres des forêts ont grandement facilité l'échange de connaissances et au réseautage qui ont nourri ce projet pendant deux ans. Ce projet a été mené en partenariat avec Ressources naturelles Canada. Finalement, nous sommes reconnaissants aux deux réviseurs anonymes qui ont contribué à améliorer le manuscrit deux réviseurs anonymes et l'éditeur associé.

Références

- Adger, W.N., S. Agrawala, M.M.Q. Mirza, C. Conde, K. O'Brien, J. Pulhin, R. Pulwarty, B. Smit et K. Takahashi. 2007. Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. Dans M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éditeurs). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du groupe de travail II au 4^{ème} rapport d'évaluation du Groupe international d'experts sur le climat. pp. 717–743. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ali, A.A., P.E. Higuera, Y. Bergeron et C. Carcaillet. 2009. Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quater. Res.* 72: 462–468.
- Auclair, A.N.D., J.T. Lill et C. Revenga. 1996. The role of climate variability and global warming in the dieback of northern hardwoods. *Water, Air and Soil Pollution* 91: 163–186.
- Berg, E.E., J.D. Henry, C.L. Fastie, A.D. De Volder et S.M. Matsuoka. 2006. Spruce beetle outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: relationship to summer temperatures and regional differences in disturbance regimes. *For. Ecol. Manage.* 227: 219–232.

- Bergeron, Y. et al. 2006.** Past, current, and future fire frequencies in Quebec's commercial forests: implications for the cumulative effects of harvesting and fire on age-class structure and natural disturbance-based management. *J. Can. Rech. For.* 36: 2737–2744.
- Bergeron, Y., D. Cyr, M.P. Girardin et C. Carcaillet. 2010.** Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *Int. J. Wildl. Fire* 19: 1127–1139.
- Bernier, P. et D. Houle. 2005.** Les changements climatiques et la productivité forestière Dans Actes du Colloque « Changements Climatiques et Foresterie : Impacts et Adaptation » tenu les 20 et 21 septembre 2005 à Baie-Comeau, QC. pp. 13–17. <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/colloque-climat/documents/actes-colloque.pdf> [consulté le 23 avril 2012].
- Berteaux, D. et al. 2010.** The CC-Bio Project: Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity* 2: 1181–1204.
- Bouffroy, E. et G. Lessard. 2009.** Atelier sur les projets pilotes d'aménagement écosystémique des forêts. Rapport d'atelier. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie. 81 p.
- Bourque, A. et G. Simonet. 2008.** Québec. Dans D.S. Lemmen, F.J., Warren, J., Lacroix et E. Bush (éditeurs). From Impacts to Adaptation : Canada in a Changing Climate 2007. Gouvernement du Canada, Ottawa, ON. pp. 171–226. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/climate-change/community-adaptation/assessments/487> [consulté le 14 avril 2012].
- Brand, F.S. et K. Jax. 2007.** Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecol. Soc.* 12: 23.
- Burton, P.J., D.D. Kneeshaw et K.D. Coates. 1999.** Managing forest harvesting to maintain old-growth in boreal and sub-boreal forests. *For. Chron.* 75: 623–631.
- Carcaillet, C., Y. Bergeron, P.J.H. Richard, B. Fréchette, S. Gauthier et Y.T. Prairie. 2001.** Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forest during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? *J. Ecol.* 89: 930–946.
- Carroll, A.L., S.W. Taylor, J. Régnière et L. Safranyik. 2004.** Effects of climate change on range expansion by the Mountain Pine Beetle in British Columbia. Dans Shore, T.L., J.E. Brooks et J.E. Stone (éditeurs). Actes de l'atelier « Mountain pine beetle symposium: challenges and solutions » tenu les 30 et 31 octobre 2003, Kelowna, CB. pp. 223–232. *Ress. nat. Can., Serv. can. For. Inf. Rep.* BC-X-399.
- Clinton, B.D. et C.R. Baker. 2000.** Catastrophic windthrow in the southern Appalachians: characteristics of pits and mounds and initial vegetation responses. *For. Ecol. Manage.* 126: 51–60.
- Cyr, D., Y. Bergeron, S. Gauthier et C. Carcaillet. 2009.** Forest management is driving the eastern part of North American boreal forest outside its natural range of variability. *Front. Ecol. Environ.* 7: 519–524.
- Dale, V.H. et al. 2001.** Climate change and forest disturbances. *BioScience* 52: 723–734.
- Drever, C.R., G. Peterson, C. Messier, Y. Bergeron et M. Flannigan. 2006.** Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *J. Can. Rech. For.* 36: 2285–2299.
- Drobyshev, I., Y. Bergeron, M. Simard et A. Hofgaard. 2010.** Does soil organic layer thickness affect climate-growth relationships in the black spruce boreal forest? *Ecosyst.* 13: 556–574.
- Duchesne, L., D. Houle, M.-A. Côté et T. Logan. 2009.** Modelling the effect of climate on maple syrup production in Quebec, Canada. *For. Ecol. Manage.* 258: 2683–2689.
- Dukes, J.S. et al. 2009.** Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: what can we predict? *J. Can. Rech. For.* 39: 231–248.
- Eastaugh, C., C. Reyer, P. Gonzalez-Moreno, J. Wu, A.J. Biscoia et O. Petelkina. 2009.** Forest agencies' early adaptations to climate change. IUFRO Occasional Paper No. 23. 80 p.
- Evans, A.M. et T.G. Gregoire. 2007.** A geographically variable model of hemlock woolly adelgid spread. *Biological Invasions* 9: 369–382.
- Fenton, N., N. Lecomte, S. Légaré et Y. Bergeron. 2005.** Paludification in black spruce (*Picea mariana*) forests of eastern Canada: potential factors and management implications. *For. Ecol. Manage.* 213: 151–159.
- Füssel, H.-S. et R.J.T. Klein. 2006.** Climate change vulnerability assessment: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change* 74: 301–329.
- Gärtner, S., K.M. Reynolds, P.F. Hessburg, S.S. Hummel et M. Twery. 2008.** Decision support for evaluating landscape departure and prioritizing forest management activities in a changing environment. *For. Ecol. Manage.* 256: 1666–1676.
- Gauthier, S., M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron (éditeurs). 2008.** L'aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec. Québec, QC. 568 p.
- Girardin, M.P., A.A. Ali, C. Carcaillet, S. Gauthier, C. Hély, H. Le Goff, A. Terrier et Y. Bergeron. 2012.** Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *For. Ecol. Manage.* 294: 238–249.
- Gouvernement du Québec. 2010.** Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. Gouvernement du Québec, Québec. http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/A_18_1/A18_1.html [dernière consultation le 22 janvier 2013].
- Gouvernement du Québec. 2012.** Recueil des lois et règlements du Québec. Chapitre A-18.1 Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/A_18_1/A18_1.html [consulté le 25 juillet 2013].
- [GIEC] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2007.** Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse. 103 p.
- Hassan, R., R. Scholes et N. Ash (éditeurs). 2005.** Ecosystems and human well-being: current state and trends, vol 1. Findings of the condition and trends working group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, DC. 838 p.
- Huang, J.-G., J. Tardif, Y. Bergeron, B. Dennerle, F. Berninger et M. Girardin. 2010.** Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Glob. Change Biol.* 16: 711–731.
- Hunter, M.L. Jr. 1993.** Natural fire regimes as spatial models for managing boreal forests. *Biol. Conserv.* 65: 115–120.
- Johnston, M., T. Williamson, A. Munson, A. Ogden, M. Moroni, R. Parson, D. Price et J. Stadt. 2010.** Changements climatiques et aménagement forestier au Canada : conséquences, capacité et options d'adaptation. Rapport sur l'état des connaissances. Réseau de gestion durable des forêts, Edmonton, AB. 54 p. URL : <http://www.sfmn.ales.ualberta.ca/en/SFMN-fr/Publications/~media/sfmn/ReseauGestionDurable/About/Documents/SOK2010ClimateChangeJohnstonetalFr.pdf> [consulté le 9 août 2013].
- Keane, R.E., P.F. Hessburg, P.B. Landres et F.J. Swanson. 2009.** The use of historical range and variability (HRV) in landscape management. *For. Ecol. Manage.* 258: 1025–1037.
- Laflour, B., N.J. Fenton et Y. Bergeron. 2013.** The Potential Effects of Climate Change on the Growth and Development of Forested Peatlands in the Clay Belt (Ecodistrict 3E-1) of Northeastern Ontario. Climate Change Research Report CCRR-35. Science and Information Resources Division, Ontario Ministry of Natural Resources.
- Landres, P.B., P. Morgan et F.J. Swansons. 1999.** Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecol. Appl.* 9: 1179–1188.
- Lawler, J.J. et al. 2010.** Resource management in a changing and uncertain climate. *Front. Ecol. Environ.* 8: 35–43.
- Lecomte, N., P. Crocker, D. Cyr, E. Fréchette, B. Laib, O. Valeria et V.-A. Angers. 2010.** Détermination des enjeux écologiques reliés à la mise en place d'un aménagement écosystémique et propres aux forêts de l'Abitibi-Témiscamingue. Rapport interne de la Conférence régionale des élus de l'Abitibi-Témiscamingue. 158 p. http://www.confereceregionale.ca/documents/publications/enjeux_ecologiques_resume-executif.pdf [consulté le 2 août 2013].

- Leduc, A., S. Gauthier, Y. Bergeron et B. Harvey. 2004.** Vulnerability of the boreal forest to climate change: are managed forests more susceptible? Dans S. Gauthier et C. Li (éditeurs). Actes de l'atelier « Effects of climate change on major forest disturbances (fire, insects) and their impact on biomass production in Canada: synthesis of the current state of knowledge » tenu le 21 septembre 2003 à Québec, QC. 119 p.
- Lefort, P., S., Gauthier et Y. Bergeron. 2003.** The influence of fire weather and land use on the fire activity of the lake Abitibi area, eastern Canada. *For. Sci.* 49: 509–521.
- Le Goff, H., M.D. Flannigan, Y. Bergeron, A. Leduc, S. Gauthier et K. Logan. 2008.** Des solutions d'aménagement pour faire face aux changements climatiques, l'exemple des feux de forêt. Dans S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron (éditeurs). Aménagement écosystémique en forêt boréale. pp. 109–136. Presses de l'Université du Québec, Québec, QC.
- Le Goff, H., A. Leduc, Y. Bergeron et M. Flannigan. 2005.** The adaptive capacity of forest management to changing fire regimes in the boreal forest of Quebec. *For. Chron.* 81: 582–592.
- Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008.** Vivre avec les changements climatiques au Canada, édition 2007. Res. Nat. Can., Ottawa, ON. http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/assess/2007/pdf/full-complet_f.pdf [consulté le 15 mai 2012].
- Lempert, R. J. et M.T. Collins. 2007.** Managing the risk of uncertain threshold responses: comparison of robust, optimum, and precautionary approaches. *Risk Analysis* 27: 1009–1026.
- Lemprière, T.C., P.Y. Bernier, A.L. Carroll, M.D. Flannigan, R.P. Gilson, D.W. McKenney, E.H. Hogg, J.H. Pedlar et D. Blain. 2008.** The importance of forest sector adaptation to climate change. *Resour. Nat. Can., Serv. Can. For., Cent. For. Nord*, Edmonton, AB. Inf. Rep. NOR-X-416E.
- Lindner, M. et al. 2008.** Impacts of climate change on European forests and options for adaptation. European Forest Institute, European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. 171 p.
- Lindner, M. et al. 2010.** Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259: 698–709.
- Logan, J.A., J. Régnière et J.A. Powell. 2003.** Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Front. Ecol. Environ.* 1: 130–137.
- Logan T., I. Charron, D. Chaumont et D. Houle. 2011.** Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos. Montréal, QC. http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011-Sans-Annexes.pdf [consulté le 7 mars 2012].
- Manning, M.R. 2003.** The difficulty of communicating uncertainty. *Clim. Change* 61: 9–16.
- McKenney, D., J. Pedlar, K. Lawrence, K. Campbell et M. Hutchinson. 2007.** Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience* 57: 939–948.
- Messier, C. et D. Kneeshaw. 1999.** Thinking and acting differently for sustainable management of the boreal forest. *For. Chron.* 75: 929–938.
- Millar, C.I., N.L. Stephenson et S.L. Stephens. 2007.** Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol. Appl.* 17: 2145–2151.
- [MDDEP] Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 2008.** Plan d'action 2006–2012 contre les changements climatiques. Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec, QC. http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/index-mesures.htm [consulté le 10 janvier 2011].
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2010.** Consultation sur l'aménagement durable des forêts du Québec. Document de consultation publique, Stratégie d'aménagement durable des forêts et modalités proposées pour le futur règlement sur l'aménagement durable des forêts. Gouvernement du Québec, Québec, QC. <http://consultation-adf.mrnf.gouv.qc.ca/documents.asp> (consulté le 10 janvier 2011).
- Mitchell, S.J. 1995.** The windthrow triangle: a relative windthrow hazard assessment procedure for forest managers. *For. Chron.* 71: 446–450.
- Ogden, A.E. et J.L. Innes. 2007a.** Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest. *International For. Rev.* 9: 713–733.
- Ogden, A.E. et J.L. Innes. 2007b.** Perspectives of forest practitioners on climate adaptation in the Yukon and Northwest Territories of Canada. *For. Chron.* 83: 557–569.
- Ogden, A.E. et J.L. Innes. 2008.** Climate change adaptation and regional forest planning in southern Yukon, Canada. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 13: 833–861.
- Ogden, A.E. et J.L. Innes. 2009.** Application of structured decision making to an assessment of climate change vulnerabilities and adaptation options for sustainable forest management. *Ecol. Soc.* 14: 11.
- Ouranos. 2010.** Savoir s'adapter aux changements climatiques. Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Montréal, QC. 138 p. http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53_sssc_21_06_lr.pdf [consulté le 12 août 2013].
- Overpeck, J.T., D. Rind et R. Goldberg. 1990.** Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation. *Nature* 343: 51–53.
- Panferov, O., C. Doering, E. Rauch, A. Sogachev et B. Ahrends. 2009.** Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. *Environ. Res. Letters* 4: 045019.
- Parker, W.C., S.J. Colombo, M.L. Cherry, M.D. Flannigan, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C. Papadopol et T. Scarr. 2000.** Third millennium forestry: what climate change might mean to forests and forest management in Ontario. *For. Chron.* 76: 445–463.
- Peltola, H., S. Kellomäki et H. Vaisanen. 1999.** Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Climate Change* 41: 17–36.
- Périé C., S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus. 2014.** Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces ligneuses au Québec. Mémoire de recherche. Ministère des Ressources naturelles, Québec, Québec.
- Prato, T. 2008.** Conceptual framework for assessment and management of ecosystem impacts of climate change. *Ecol. Complexity* 5: 329–338.
- Prescott, C. 2012.** Les forêts, les changements climatiques et les sciences – Nous devons faire mieux. *For. Chron.* 88: 371.
- Price, C. et D. Rind. 1994.** Modeling global lightning distributions in a general circulation model. *Mont. Weather Rev.* 122: 1930–1939.
- Raulier, F., H. Le Goff, S. Gauthier, R. Rapanoela et Y. Bergeron. 2013.** Introducing two indicators for fire risk consideration in the management of boreal forests. *Ecol. Indic.* 24: 451–461.
- Régnière, J., R. St-Amant et P. Duval. 2012.** Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biol. Invasions* 14: 1571–1586.
- Ruel, J.-C. 2000.** Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies. *For. Ecol. Manage.* 135: 169–178.
- Ruel, J.-C., D. Pin et K. Cooper. 2001.** Windthrow in riparian buffer strips: effect of wind exposure, thinning and strip width. *For. Ecol. Manage.* 143: 105–113.
- Simard, M., N. Lecomte, Y. Bergeron, P.Y. Bernier et D. Paré. 2007.** Forest productivity decline caused by successional paludification of boreal soils. *Ecol. Appl.* 17: 1619–1637.

- Skinner, M., B.L. Parker, S. Gouli and T.A. Shikaga. 2003.** Regional responses of hemlock woolly adelgid (Homoptera: Adelgidae) to low temperatures. *Environ Entomol.* 32(3): 523–528.
- Soja, A.J., N.M. Tchebakova, N.H.F. French, M.D. Flannigan, H.H. Shugart, B.J. Stocks, A.I. Sukhinin, E.I. Parfenova, F.S. Chapin III et P.W.Jr. Stackhouse. 2007.** Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Glob. Planet. Change* 56: 274–296.
- Spittlehouse, D.L. et S.B. Stewart. 2003.** Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management* 4: 1–11.
- Swanston, C. et M. Janowiak (éditeurs). 2012.** Forest Adaptation Resources: Climate Change Tools and Approaches for Land Managers. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. Gen. Tech. Rep. NRS-87. Newtown Square, PA. 121 p. http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nrs87.pdf [consulté le 2 août 2013].
- Swift, K. 2012.** Decision support framework: A mental model for integrating the environmental and human dimensions into decision-making related to changes in natural disturbance events. *BC Journal of Ecosystems and Management* 13: 1–15.
- Terrier, A., M.P. Girardin, C. Périé et Y. Bergeron. 2013.** Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecol. Appl.* 23: 21–35.
- [USCCSP] United States Climate Change Science Program. 2008.** Preliminary review of adaptation options for climate-sensitive ecosystems and resources. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Varady-Szabo, H., M. Côté, Y. Boucher, G. Brunet et J.-P. Jetté. 2008.** Guide pour la description des principaux enjeux écologiques dans les plans régionaux de développement intégré des ressources et du territoire - Document d'aide à la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique, Gaspé, Consortium en foresterie de la Gaspésie–Les-Îles et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 61 p.
- Weber, M.G. et M.D. Flannigan. 1997.** Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes. *Dossiers Environnementaux* 5: 145–166.
- Whitney, R.D. 1961.** Root wounds and associated root rots of white spruce. *For. Chron.* 37: 401–411.
- Williamson, T.B., M.A. Campagna et A.E. Ogden. 2012.** Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques: cadre d'évaluation de la vulnérabilité et d'intégration des mesures d'adaptation dans le processus décisionnel. *Cons. Can. Min. For., Ottawa.* http://www.ccfm.org/pdf/WilliamsonVulnerability_Fr_Final_Feb13.pdf [consulté le 12 août 2013].
- Williamson, T.B., S.J. Colombo, P.N. Duinker, P.A. Gray, R.J. Hennessey, D. Houle, M.H. Johnston, A.E. Ogden et D.L. Spittlehouse. 2009.** Les changements climatiques et les forêts canadiennes: des impacts à l'adaptation. Réseau de Gestion durable des forêts et Serv. Can. For., Centre For. Nord, Edmonton, AB. 104 p. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Houle-Daniel/Rapport-changements-climatiques-Canada.pdf> [consulté le 12 août 2013].
- Wotton, B.M. et M.D. Flannigan. 1993.** Length of the fire season in a changing climate. *For. Chron.* 69: 187–192.
- Yohe, G.W. et R.S.J. Tol. 2002.** Indicators for social and economic coping capacity – Moving towards a working definition of adaptive capacity. *Glob. Environ. Change* 12: 25–40.