

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LES FORÊTS DU CANADA

DES IMPACTS À L'ADAPTATION

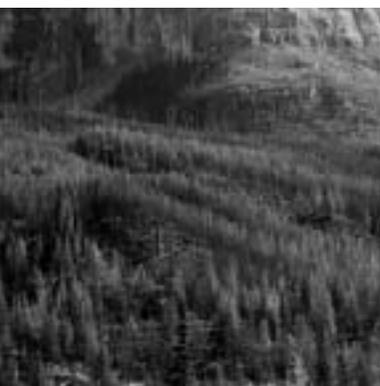


Tim Williamson, Steve Colombo, Peter Duinker, Paul Gray, Ryan Hennessey,
Daniel Houle, Mark Johnston, Aynslie Ogden, and Dave Spittlehouse



LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LES FORÊTS DU CANADA

DES IMPACTS À L'ADAPTATION



T.B. Williamson, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts

S.J. Colombo, Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario

P.N. Duinker, School for Resource and Environmental Studies, Université Dalhousie

P.A. Gray, Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario

R.J. Hennessey, School for Resource and Environmental Studies, Université Dalhousie

D. Houle, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec/Ouranos

M.H. Johnston, Saskatchewan Research Council

A.E. Ogden, Forest Management Branch, Gouvernement du Yukon

D.L. Spittlehouse, British Columbia Ministry of Forests and Range

© Sa majesté la Reine du Chef du Canada, 2009

Cette publication est disponible sans frais auprès de :

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Nord
5320 – 122 Street
Edmonton (Alberta)
T6H 3S5

Réseau de gestion durable des forêts
3-03 Civil Electrical Engineering Building
Université de l'Alberta
Edmonton (Alberta)
T6G 2G7

Pour consulter la version électronique de ce rapport, visitez le site internet du Réseau de gestion durable des forêts à <<http://sfmnetwork.ca/>>, ou la librairie en ligne du Service canadien des forêts à <<http://librairie.scf.rncan.gc.ca/>>.

This publication is also available in English under the title *Climate Change and Canada's Forests: from Impacts to Adaptation*

ATS: 613-996-4397 (appareil de télécommunication pour sourds)

TTY: 613-996-4397 (Teletype for the hearing impaired)

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Les changements climatiques : des impacts à l'adaptation /T. Williamson ... [et coll.].
Monographie électronique en format PDF.

Copublié par : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord.

Comprend des références bibliographiques.

Également disponible sur l'Internet.

No de catalogue Fo134-9/2009F-PDF

ISBN 978-1-55261-207-1

1. Arbres—Effets du réchauffement de la terre sur les—Canada. 2. Forêts—Productivité—Facteurs climatiques—Canada. 3. Climat—Changements—Canada.
4. Climat—Changements—Canada—Prévision. 5. Forêts—Canada. 6. Réchauffement de la terre. 7. Forêts—Gestion—Canada. I. Williamson, Timothy Bruce, 1953- II. Centre de foresterie du Nord (Canada) III. Réseau sur la gestion durable des forêts

SD145.C54 2009

634.9'610971

C2009-980041-1

Crédits photos : *Page couverture (de gauche à droite)* : Ressources naturelles Canada, Direction de l'aménagement forestier du Yukon, Parcs Canada, R. Parsons. *Quatrième de couverture (de gauche à droite)* : M. Michaelian, R. Parsons, M. Michaelian, Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. *Pages xvii et 59* : Direction de l'aménagement forestier du Yukon. *Pages xviii et 55* : D. Brook. *Page 4* : incendies de forêt et fumée, Parcs Canada; problèmes de récolte en hiver, The Forestry Forum (www.forestryforum.com). *Dommages causés par le vent*, Kyle McKenzie; *Grands chablis*, Peter Duinker. Toutes les autres photos sont la propriété des auteurs ou leurs établissements respectif.

Citation normalisée du rapport : Williamson, T.B.; Colombo, S.J.; Duinker, P.N.; Gray, P.A.; Hennessey, R.J.; Houle, D.; Johnston, M.H.; Ogden, A.E.; Spittlehouse, D.L. 2009. Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation. Réseau de gestion durable des forêts et Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). 112 p.

AVANT-PROPOS

Les évènements des dernières années nous indiquent que les changements climatiques ont déjà un impact important sur les forêts du Canada. Parmi ces évènements sans précédent, notons l'intensité des incendies de forêt en Colombie-Britannique et au Yukon en 2003 et 2004, la récente sécheresse dans l'ensemble du pays, l'infestation du dendroctone du pin ponderosa et une réduction des possibilités de récolte hivernale dans plusieurs régions. Les changements climatiques à venir ont un potentiel d'impact encore plus prononcé et pourraient affecter gravement la capacité de nos forêts à fournir les nombreux produits et services que nous y trouvons. Les aménagistes forestiers ressentiront directement ces impacts et ils doivent donc recevoir la meilleure information possible sur la façon dont les changements climatiques les affecteront afin qu'ils puissent développer et mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

Le Réseau de gestion durable des forêts et le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada sont heureux d'unir leurs forces afin de produire en collaboration *Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation*. Basé sur le travail de certains des auteurs (ceux du secteur forestier) de l'évaluation nationale canadienne¹ parue récemment, le présent rapport fait le point sur les connaissances concernant les impacts actuels et futurs des changements climatiques et leurs répercussions sur l'aménagement forestier.

Pour s'adapter aux changements climatiques, l'industrie forestière du Canada doit absolument se tourner vers l'innovation et partager ses connaissances. Le Réseau de gestion durable des forêts et le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada se sont fermement engagés à transmettre rapidement aux aménagistes forestiers les résultats de la recherche sur l'incidence des changements climatiques, surtout quand ils remettent en cause les possibilités d'aménagement durable des forêts du Canada.

Tim Sheldon
 Directeur général
 Centre de foresterie du Nord
 Service canadien des forêts
 Ressources naturelles Canada
 Edmonton (Alberta)

James Fyles
 Directeur scientifique
 Réseau de gestion durable des forêts
 Université McGill

¹ « *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* ». Disponible à l'adresse <http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_f.php>.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques affectent déjà les forêts du Canada. Les effets actuels les plus visibles prennent la forme d'une modification de la fréquence et de la gravité des perturbations (feux, sécheresses, tempêtes violentes, infestations d'insectes et maladies). Mais d'autres changements moins évidents sont déjà présents, notamment dans la période de débourrement au printemps. L'une des conséquences des changements climatiques à venir se présentera comme une augmentation supplémentaire de la fréquence et de la gravité des dérèglements et des manifestations extrêmes des conditions météorologiques. On s'attend également à des changements dans la productivité et la composition forestière et dans la distribution des classes d'âge. L'humidité et la température sont des facteurs clés de la productivité. On s'attend à ce que la productivité diminue dans les zones qui sont déjà sèches ou qui le deviendront, mais qu'elle augmente (du moins à court terme) dans les zones nordiques où les températures froides sont actuellement des facteurs limitants. Il est cependant important de tenir compte du génotype qui a tendance à être étroitement adapté au climat local. Les gains de productivité potentiels pourraient donc ne pas se réaliser à moins que les aménagistes forestiers ne fassent correspondre le génotype au climat approprié. Les forêts comprendront une proportion accrue de jeunes classes d'âges, d'essences pionnières et d'essences adaptées aux perturbations. Les habitats convenant à la plupart des essences sur le plan climatique vont se déplacer vers le nord et vont monter en altitude, mais le déplacement réel des essences sera retardé, car il ne pourra suivre le rythme de déplacement des niches climatiques. Les changements climatiques ont également des répercussions sur l'approvisionnement forestier, actuel et futur, mais le résultat net variera d'un endroit à l'autre. Le phénomène récent du dendroctone du pin ponderosa démontre que les facteurs reliés au climat peuvent avoir des effets considérables sur l'approvisionnement en bois dans une période relativement courte. Les changements climatiques vont avoir un impact sur les opérations d'exploitation forestière. Une partie importante de la coupe au Canada se fait en hiver quand le sol est gelé. Ce procédé permet l'accès aux zones humides, réduit la perturbation du sol et diminue les coûts de transport du bois. L'ampleur des changements climatiques auxquels devront faire face les forêts et le secteur forestier du Canada, ainsi que l'étendue des impacts prévus, n'ont aucun analogue dans l'histoire. Le secteur forestier du Canada devra s'adapter et il devra le faire sans l'avantage d'une expérience antérieure. Les aménagistes forestiers doivent prévoir l'imprévisible et s'attendre à ce que les changements soient continus et se poursuivent sans relâche. Le rapport présente quelques recommandations générales comme premier pas dans la lutte contre les changements climatiques dans le secteur forestier du Canada, notamment améliorer les capacités permettant d'entreprendre à différentes échelles des évaluations intégrées des éléments de vulnérabilité devant les changements climatiques; augmenter les ressources affectées à la surveillance des impacts des changements climatiques et celles qui sont destinées à la recherche scientifique sur l'impact et l'adaptation; réexaminer les politiques forestières, la planification forestière, les approches d'aménagement forestier, ainsi que les institutions pour déterminer si nous sommes en mesure de réaliser des objectifs sociaux compte tenu des changements climatiques; enchâsser les principes de gestion du risque et de gestion adaptative dans l'aménagement forestier; et préserver ou améliorer les capacités de communication, de réseautage et de partage de l'information avec tous les intervenants, notamment la population canadienne et les milieux forestiers.

ABSTRACT

Climate change is already affecting Canada's forests. Current visible effects include changes in the frequency and severity of disturbances (such as fires, drought, severe storms, and damaging insect and disease attacks): other less visible changes such as change in the timing of spring bud burst are also underway. One of the consequences of future climate change will be further increases in the frequency and severity of extreme weather events and disturbances. Changes in productivity, species composition, and age-class distribution are also expected. Moisture and temperature are key factors affecting productivity. Productivity is likely to decrease in areas that are now or will become drier; productivity is expected to increase (at least in the near term) in northern areas that are currently limited by cold temperatures. An important consideration, however, is that genotypes tend to be finely adapted to local climates and potential productivity gains may not be realized if forest managers don't match genotypes to suitable climates. A higher percentage of the forests will be in younger age classes, and the frequency of early succession species and species adapted to disturbance will increase. Climatically suitable habitats for most species will move northward and will increase in elevation but the actual movement of species will lag behind the rate of movement of climatic niches. Climate change has implications for both current and future timber supply. The net impact of climate change on timber supply will vary from location to location. The recent mountain pine beetle event shows that climate-related factors can have dramatic effects on timber supply in a relatively short time period. Climate change will impact harvest operations. A significant portion of the harvest in Canada occurs in the winter when the ground is frozen. Harvesting on frozen ground allows for access to wetlands, reduces soil disturbance, and decreases costs of delivered wood. The magnitudes of change in climate that will be faced by Canada's forests and forest management sector and the consequent scale of expected impacts have no historical analogue. Canada's forest sector will need to adapt and it will need to do so without the benefit of prior experience. Forest managers can expect the unexpected and they can expect that change will be ongoing and unrelenting. Some general recommendations for beginning to address climate change in Canada's forest sector include enhancing the capacity to undertake integrated assessment of vulnerabilities to climate change at various scales; increasing resources to monitor the impacts of climate change; increasing resources for impacts and adaptation science; reviewing forest policies, forest planning, forest management approaches, and institutions to assess our ability to achieve social objectives under climate change; embedding principles of risk management and adaptive management into forest management; and maintaining or improving the capacity for communicating, networking, and information sharing with the Canadian public and within the forest sector.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel du bureau du Réseau de gestion durable des forêts (Réseaux de centres d'excellence) pour leurs contributions à la production de ce rapport, qui sont trop nombreuses pour être énumérées. Les auteurs remercient également Don Lemmen (Ressources naturelles Canada) pour son appui à ce projet et pour sa collaboration visant à s'assurer de la conformité avec le rapport sur l'évaluation nationale. Kelvin Hirsch (Service canadien des forêts) a eu l'idée initiale de combiner les contributions des auteurs du secteur forestier à l'évaluation nationale pour réaliser une évaluation forestière et les auteurs le remercient pour cette initiative de même que pour ses nombreuses suggestions. Le Dr. Gordon Miller, du Service canadien des forêts, en a supervisé la rédaction et contribué du feedback utile. Plusieurs personnes ont fourni des commentaires utiles sur le contenu du rapport, dont David Price (Service canadien des forêts), Dominique Blain (Environnement Canada), Santiago Olmos (anciennement du Service canadien des forêts), Catherine Ste.-Marie (Service canadien des forêts) et Shelley Webber (Service canadien des forêts). Les auteurs remercient Brenda Laishley (Service canadien des forêts), Denis Rochon (Service canadien des forêts) et Jennifer Thomas pour leur aide à la rédaction de ce rapport. Ils tiennent aussi à remercier les examinateurs techniques : Steven McNulty (Service des forêts du Département de l'agriculture des États-Unis), Rich Fleming (Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts) et Nancy Kingsbury (Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts) pour leurs commentaires et suggestions utiles, constructifs, perspicaces et précieux.



TABLER DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS		iii
RÉSUMÉ		v
ABSTRACT		vi
REMERCIEMENTS		vii
SOMMAIRE		xi
CHAPITRE 1	INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2	IMPACTS ACTUELS SUR LES FORÊTS DU CANADA	3
	Modifications constatées (saison de croissance, phénologie et limites forestières)	3
	La sécheresse de 2001–2003	3
	Augmentation des incendies de forêt	5
	Dendroctone du pin ponderosa	7
	Dendroctone de l'épinette	7
	Brûlure en bandes rouges	8
	Répercussions	8
CHAPITRE 3	IMPACTS FUTURS SUR LES FORÊTS DU CANADA	11
	Manifestations météorologiques extrêmes et variabilité climatique	13
	Incendies de forêt	14
	Perturbations causées par les insectes et les maladies	16
	Les effets sur les processus physiologiques	18
	Productivité	22
	Composition, distribution et structure des écosystèmes forestiers du Canada	25
	Zones sensibles au climat	27
	La forêt boréale	27
	Incertitude	29
	Synthèse	31
CHAPITRE 4	ÉLÉMENTS DE VULNÉRABILITÉ DES FORÊTS RÉGIONALES	33
	Le Nord	33
	La Colombie-Britannique	35
	Provinces des Prairies	39
	L'Ontario	41
	Le Québec	44
	Le Canada atlantique	45

CHAPITRE 5	IMPACTS SUR LE SECTEUR FORESTIER	47
	Aménagement forestier	47
	Opérations forestières	52
	Industrie forestière	53
	Collectivités tributaires des forêts	54
	Biens publics et biens communs tributaires des forêts	56
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	59
	Sensibilisation croissante	59
	Caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada	60
	Adaptation	61
	Conclusion	63
	Recommandations	66
BIBLIOGRAPHIE		69
TABLEAUX ET FIGURES		
	Figure 1. Impacts actuels des changements climatiques sur les forêts du Canada	4
	Figure 2. Impacts des changements climatiques sur les forêts	12
	Figure 3. Impacts des changements climatiques sur le secteur forestier	48
	Tableau 1. Sommaire des options d'adaptations possibles pour l'aménagement des forêts canadiennes	65



Au Canada, le secteur forestier est vulnérable aux changements climatiques en raison de l'ampleur prévue de ces changements dans les latitudes nord où s'étend le territoire du Canada, de la sensibilité des écosystèmes forestiers du Canada à ces changements, du long cycle de croissance des arbres et de l'importance des forêts et du secteur forestier pour les Canadiens. Le but de ce rapport est de fournir de l'information aux experts-forestiers afin de les aider à percevoir et à évaluer les impacts potentiels des changements climatiques et à connaître les conditions et les options d'adaptation. Le rapport repose sur les contributions des auteurs des sections portant sur les forêts dans le dernier rapport sur l'évaluation nationale canadienne intitulé « Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007 »².

Impacts des changements climatiques sur les forêts du Canada

Les changements climatiques affectent déjà les forêts du Canada. Parmi les impacts les plus visibles, mentionnons les changements dans la fréquence et la sévérité des perturbations : incendies de forêt, sécheresses, tempêtes violentes, infestations d'insectes nuisibles et éclosions de maladies. Par exemple, l'infestation sans précédent du dendroctone du pin ponderosa qui sévit actuellement en Colombie-Britannique et en Alberta, la récente infestation du dendroctone de l'épinette au Yukon, l'éclosion de la brûlure en bandes rouges dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique, le dépérissement du peuplier faux-tremble dans les Prairies, les taux inégaux d'incendies dans la forêt boréale de l'Ouest et les récentes saisons records des feux dans les forêts du Yukon et de la Colombie-Britannique sont liés, du moins en partie,³ aux récents changements climatiques. Des effets beaucoup plus subtils ont aussi été observés. Par exemple, la saison de croissance s'allonge, le débourrement des érables à sucre se produit plus tôt, la période de floraison du peuplier faux-tremble est également plus hâtive et les limites forestières se déplacent en altitude. Ces exemples démontrent que certains impacts des changements climatiques se font déjà sentir et qu'on peut s'en servir pour comprendre comment les changements climatiques à venir affecteront les forêts du Canada.

² Voir : Lemmen, D.S.; Warren, F.J.; Lacroix, J.; Bush, E., éd. 2008. « *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* », Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario). Disponible à l'adresse : <http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_e.php> (anglais) et <http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_f.php> (français). Consulté le 12 août 2008.

³ Les impacts attribués aux changements climatiques sont souvent le résultat de l'interaction simultanée de facteurs multiples. À titre d'exemple, il a été suggéré que l'historique de l'utilisation du territoire, la suppression des incendies et l'aménagement des forêts ont mené à une forêt relativement équienne de pin tordu latifolié au centre de la Colombie-Britannique, dominée par les classes d'âge les plus susceptibles d'être attaquées par le dendroctone du pin ponderosa. Les changements climatiques récents ont causé une expansion du domaine de cet insecte. Tous ces facteurs ont contribué à l'infestation.

Conditions météorologiques et climatiques extrêmes

Les conditions climatiques au Canada continueront de changer au cours des 100 prochaines années et le rythme du changement devrait être beaucoup plus rapide qu'il ne l'a été au cours du dernier siècle. Une des conséquences de ces changements climatiques sera l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des conditions météorologiques et climatiques extrêmes. À titre d'exemple, la longueur, la fréquence et la gravité des périodes de sécheresse vont sans doute augmenter, ce qui aura des conséquences importantes sur les forêts dans l'ensemble du Canada, mais plus particulièrement dans les régions où le niveau d'humidité est déjà faible, comme c'est le cas dans l'intérieur méridional de la Colombie-Britannique et à la limite sud de la forêt boréale de l'Ouest canadien. La fréquence et l'intensité des tempêtes de vent et les précipitations de forte intensité devraient augmenter, entraînant ainsi une recrudescence des chablis et des risques d'inondation.

Incendies de forêt

Les changements climatiques feront augmenter les incendies de forêt. Selon les scientifiques, la superficie moyenne incendiée annuellement dans l'ensemble du pays pourrait augmenter de 74 à 118 % d'ici la fin du siècle. Toutefois, il y a une grande variation de la hausse prévue des incendies selon les régions. Par exemple, le taux d'augmentation des incendies sera plus faible au Canada atlantique et dans les parties les plus humides de la forêt boréale, dans l'Est, et plus élevé dans les forêts de l'ouest de l'Ontario et de l'Ouest canadien.

Insectes et maladies

Les insectes et les maladies sont d'importants agents de changement ou de renouvellement des forêts. Ils peuvent aussi être très destructeurs, plus particulièrement durant les périodes d'infestations. Or, le climat est un facteur clé qui influence la fréquence, l'intensité et la durée d'une infestation, de même que l'aire de distribution de certaines espèces. La réaction aux changements climatiques variera d'une espèce à l'autre; cependant, pour l'ensemble des insectes et des maladies, les changements climatiques se traduiront presque certainement par des infestations plus fréquentes, plus étendues, plus intenses et plus durables, et leur potentiel de nuisance pour les arbres-hôtes est très significatif, d'autant plus que ces arbres pourraient déjà être stressés par des régimes climatiques altérés. Parmi les insectes dont le potentiel d'impact économique serait à la hausse en période de réchauffement climatique, mentionnons le dendroctone du pin ponderosa, la tenthrède du mélèze, le dendroctone de l'épinette, la tordeuse du pin gris, la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la spongieuse, la livrée des forêts et la tordeuse du tremble. De plus, ces changements augmenteront très probablement les risques d'établissement d'insectes et de maladies exotiques dans les forêts canadiennes.



Interactions entre les perturbations

Les changements climatiques peuvent engendrer de multiples interactions entre des perturbations se produisant simultanément et les impacts qui en découlent dépassent souvent ceux d'une perturbation unique. Par exemple, les dommages causés par les insectes et les maladies peuvent augmenter le risque d'incendies de forêt, ou encore des événements comme une sécheresse, peuvent soumettre les arbres à un stress les rendant plus vulnérables aux insectes ou aux maladies. Ces interactions sont complexes et difficiles à prédire mais elles sont potentiellement importantes.

Productivité

L'incidence nette des changements climatiques sur la productivité variera d'un endroit à l'autre et dans le temps. La température, l'humidité, la disponibilité des nutriments et les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère affectent les taux de photosynthèse et de respiration, la phénologie, la reproduction, la croissance et la mortalité. Ces quatre facteurs devraient tous évoluer avec les changements du climat. La productivité diminuera probablement dans les régions où les terres sont déjà relativement sèches ou qui le deviendront. On prévoit qu'elle augmentera (du moins à court terme) dans les régions du Nord où les températures sont actuellement limitantes (en supposant que l'humidité et les nutriments n'y soient pas des facteurs limitants). Pour ce qui est de la productivité face aux changements climatiques, il ne faut pas oublier non plus que les génotypes sont généralement étroitement adaptés au climat local : un changement climatique dans une région peut créer une situation où les génotypes locaux sont mal adaptés au nouveau climat. Les arbres qui s'établissent sur un site et qui sont issus d'arbres qui se sont adaptés au climat historique de la région pourraient présenter une productivité réduite sous le nouveau climat (ou pourraient être incapables d'exploiter les gains de productivité potentiels). Pour pallier à cette situation, on pourrait penser à redistribuer les génotypes par un transfert de semences afin qu'ils correspondent mieux au climat prévu pour l'avenir dans un endroit donné. En conséquence, dans le cas d'un renouvellement de peuplement sur un site présentant des possibilités de gains de productivité, il faudra peut-être l'intervention humaine, sous forme de transfert de semences ou de semis, pour que ces gains soient réalisés.

Composition, répartition et structure des écosystèmes forestiers du Canada

Au fil du temps, les changements climatiques provoqueront des changements dans la composition et la structure forestière, la répartition des espèces et la distribution des classes d'âge. Ces changements se produiront graduellement et seront dictés par

...les changements climatiques provoqueront des changements dans la composition et la structure forestière.

plusieurs processus, notamment les impacts sur la physiologie, la compétitivité relative des plantes indigènes dans une région donnée, l'introduction de nouvelles espèces, les différences dans la capacité d'acclimatation, d'adaptation ou de migration des diverses espèces, et la modification des régimes de perturbation sur le plan spatial et temporel. On assistera à un rajeunissement des forêts et à une augmentation de la présence des espèces de début de succession et des espèces adaptées aux perturbations (par ex. le pin gris). Les habitats où le climat

est propice à la plupart des espèces se déplaceront vers le nord et en altitude. Toutefois, le mouvement des espèces accusera un retard par rapport à la vitesse de déplacement des niches climatiques. Quatre raisons principales expliquent le fait que les substitutions d'essences ne suivront pas le rythme des changements dans les niches climatiques. Premièrement, le rythme de migration des espèces est généralement bien plus lent que le rythme de développement des zones climatiques qui leur sont favorables. Deuxièmement, même si de nouvelles espèces peuvent être favorisées par un nouveau climat dans un lieu donné, leur établissement y sera retardé puisque les espèces déjà établies ont l'avantage de l'occupation des lieux. Troisièmement, les espèces ne fonctionnent pas indépendamment les unes des autres au sein d'un écosystème. Elles ont besoin d'autres espèces qui doivent mener à bien certains processus, fournir certaines fonctions ou préparer le site d'une façon particulière. Quatrièmement, les nouvelles régions favorables sur le plan climatique pourraient bien ne pas l'être du point de vue édaphique (c.-à-d. les propriétés du sol pourraient être inadéquates).

L'épinette blanche et l'épinette noire sont des essences qui occupent une place importante dans l'ensemble de la forêt boréale du Canada. Selon plusieurs études, ces espèces pourraient être affectées négativement par les changements climatiques, ce qui réduirait ainsi, au fil du temps, la superficie nette qu'elles occupent. Des études simulant les effets des changements climatiques sur le pin gris présentent des résultats mitigés. Le pin gris réagit favorablement à l'augmentation des températures et des précipitations au printemps, mais il est affecté négativement par l'augmentation du stock neigeux. Le pin gris est adapté aux incendies de forêt et peut croître dans les endroits secs; il sera probablement favorisé par la hausse des perturbations par le feu et dans les zones qui deviendront plus chaudes et plus sèches. Cette propagation potentielle du pin gris pourrait cependant être contrebalancée par les pertes dues au dendroctone du pin ponderosa, si cet insecte venait à s'étendre vers l'Est dans la forêt boréale.

Vulnérabilité de la forêt régionale

Le Nord

La forêt boréale du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest représente 13 % du couvert forestier du Canada. Le climat devrait changer de façon beaucoup plus importante dans le Nord que dans les latitudes méridionales. On prévoit donc des impacts importants sur les forêts septentrionales : les plus importants proviendront du déplacement vers le nord de la limite des arbres; des perturbations causées par l'augmentation des incendies de forêt; et de la fonte de grandes superficies de pergélisol ayant des conséquences désastreuses pour les forêts nordiques. Ces changements se produisant dans la ressource auront des répercussions sur les opérations forestières commerciales dans le Nord, sur les activités de subsistance et sur les valeurs culturelles et traditionnelles des forêts. Par exemple, l'augmentation de la fréquence des incendies pourrait accroître la disponibilité des champignons, mais aurait probablement des effets négatifs sur le caribou des bois.

La Colombie-Britannique

La Colombie-Britannique est à la fois une province côtière et montagneuse. Le climat y varie grandement et le paysage y est diversifié. La Colombie-Britannique a les forêts les plus productives et les plus écologiquement diversifiées de toutes les provinces du Canada. Cette province est également le plus grand producteur de produits ligneux du

Canada. La Colombie-Britannique fut la première province à subir un événement majeur lié aux changements climatiques : l'infestation du dendroctone du pin ponderosa. En Colombie-Britannique, les principaux éléments de vulnérabilité des forêts et du secteur forestier face aux changements climatiques seront les suivantes dans les 50 prochaines années : les répercussions de la restructuration des marchés mondiaux sur les exportations, l'augmentation des perturbations par le feu, l'accroissement des pertes causées par les insectes et les maladies, l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans les sites déjà touchés par ce problème dans l'intérieure méridional de la province, la migration des espèces, le bouleversement de la productivité, ainsi que la perte d'habitat dans les forêts de haute altitude.

Les provinces des prairies

La forêt boréale est l'écosystème forestier dominant dans la région des Prairies. Une importante partie de la forêt boréale de l'Ouest canadien pourrait être exposée à un climat plus sec, semblable à celui de la zone actuelle de la forêt-parc à peuplier faux-tremble. Pour ce qui est des incendies, on prévoit qu'ils seront plus fréquents, plus intenses et plus étendus, et que la saison des feux s'allongera. Des infestations d'insectes plus fréquentes et plus sévères sont aussi à prévoir. Les effets combinés de l'augmentation des incendies de forêt, des sécheresses et des infestations d'insectes entraîneront une hausse de la mortalité des arbres, un rajeunissement de la forêt, un essor des espèces pionnières et la perte de certaines zones forestières. Par exemple, au fil du temps, les massifs forestiers à la limite sud de la forêt boréale se transformeront en forêt-parc à peuplier faux-tremble tandis que la tremblaie actuelle sera convertie en prairies herbacées.

L'Ontario

Pour les forêts de l'Ontario, un des éléments de vulnérabilité les plus importants face aux changements climatiques est l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des perturbations. On prévoit que la surface totale incendiée augmentera de 50 à 300 % d'ici 2080, et que la plupart des augmentations se produiront dans les parties les plus éloignées du nord-ouest de la province. Les changements climatiques devraient entraîner l'accroissement des méfaits de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans le nord de la province et leur réduction dans le Sud. Le réchauffement permettra l'expansion de la limite nord de l'aire de répartition de nombreuses essences. Par contre, la migration des espèces ne suivra pas le rythme d'expansion des niches climatiques. À long terme, les espèces communes dans les forêts feuillues tempérées du sud de l'Ontario (par ex. l'érable à sucre, l'érable rouge, le pin blanc) pourraient migrer vers le nord dans ce qui est actuellement la forêt boréale (si des sites édaphiques propices sont disponibles). Toutefois, de tels changements pourraient prendre plusieurs centaines d'années. Ainsi, à court terme, les seuls changements significatifs de la composition forestière attribuables aux changements climatiques concerneront l'abondance relative des espèces déjà présentes dans une région. Les espèces adaptées aux perturbations seront favorisées davantage sous le régime des changements climatiques que sous le climat historique de l'Ontario. Il en résultera probablement une augmentation de l'abondance relative d'espèces comme le pin gris, l'épinette noire, le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble. Dans les régions qui s'assècheront, des espèces xérophiles comme le pin gris et le tremble seront favorisées aux dépens d'espèces telles que l'épinette noire et le sapin

baumier. Dans les forêts des Grands Lacs et du Saint-Laurent, il pourrait y avoir des épisodes de sécheresse qui mèneront au dépérissement précoce et au fractionnement des peuplements. Dans ces écosystèmes, les espèces xériques (c.-à-d. les espèces adaptées aux conditions sèches) telles que l'érable rouge, le pin blanc et le chêne rouge seront plus favorisées que les espèces mésiques (c.-à-d. les espèces adaptées aux conditions humides) comme l'érable à sucre et le la pruche du Canada.

Le Québec

Trois grandes écozones forestières constituent le paysage forestier du Québec. Du sud au nord, elles sont composées de forêts d'érables, de sapins et d'épinettes. Les zones climatiques de ces écozones devraient se déplacer d'environ 500 km vers le nord d'ici 2050, ce qui équivaut à une cadence approximative de 10 km par année. Tel que mentionné précédemment, ce rythme est beaucoup plus élevé que la vitesse de migration des arbres la plus rapide jamais observée. De plus, étant donné que les espèces diffèrent dans leur méthode et leur vitesse de dispersion ainsi que dans leur réponse physiologique devant les changements climatiques, elles migreront à différentes vitesses, créant au passage des assemblages d'espèces n'ayant jamais été observés à ce jour. Les forêts du Québec seront également modifiées par des changements dans les régimes de perturbations. Par exemple, les changements suivants sont prévus dans les perturbations causées par les insectes : les infestations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pourraient augmenter de façon significative en étendue et en durée et causer davantage de défoliation; la spongieuse pourrait étendre son aire de distribution, menaçant les forêts feuillues dans le sud du Québec et les forêts urbaines; et le longicorne asiatique pourrait se retrouver dans des régions actuellement occupées par des érables, des ormes et des peupliers. La fréquence des incendies de forêt devrait augmenter dans les régions de l'ouest et du nord du Québec, diminuer dans l'Est et demeurer constante au centre. L'amincissement et la fonte précoce de la couche de neige dans les forêts du sud du Québec préoccupent les experts-forestiers. Le sol exposé à l'air ambiant expose les racines au gel. Le gel des racines des arbres dans cette région cause des dommages importants qui peuvent affecter la croissance de façon significative pendant plusieurs années.

Le Canada atlantique

Il y a deux principaux types de forêts dans le Canada atlantique : la forêt acadienne, qui s'étend dans l'ensemble des provinces Maritimes (Nouvelle-Écosse, Nouveau-Brunswick et Île-du-Prince-Édouard), et la forêt boréale qu'on retrouve à Terre-Neuve et au Labrador. La répartition des espèces indigènes dans les forêts du Canada atlantique devrait connaître des modifications avec les changements climatiques à venir. Les espèces arborescentes qui auraient de la difficulté à persister lors d'un changement de climat pourraient disparaître (par ex. le sapin baumier), alors que celles pouvant subsister domineront. Parce que la migration des espèces est un processus très lent, l'afflux d'espèces propres à la forêt carolinienne du nord-est des États-Unis est improbable au cours du 21^e siècle à moins qu'il soit facilité par des programmes de reboisement. Les insectes sont la cause principale de perturbation dans les forêts acadienne et boréale du Canada atlantique. La tordeuse des bourgeons de l'épinette y représente une perturbation particulièrement importante. Le dendroctone de l'épinette et le puceron lanigère de la pruche sont d'autres espèces qui contribueront dans l'avenir à la vulnérabilité des forêts

du Canada atlantique. Le premier est une espèce indigène opportuniste qui tire avantage des arbres déracinés par le vent. L'autre espèce, actuellement absente du Canada atlantique à cause des températures hivernales rigoureuses, pourrait profiter des hivers plus doux pour s'y installer et y altérer la composition des forêts en y supprimant la pruche du Canada, comme elle l'a fait aux États-Unis. Étant donné les conditions tempérées et humides qui prévalent au Canada atlantique, la sécheresse y est considérée comme un facteur de perturbation relativement faible. Moins de 1 % de la superficie boisée des provinces du Canada atlantique a connu l'incendie en 2005. Étant donné que le feu joue un rôle mineur dans l'ensemble du régime des perturbations au Canada atlantique et qu'on y prévoit des conditions généralement plus humides dans l'avenir, il est peu probable que l'incendie y devienne une grande source d'inquiétude. Par ailleurs, les forêts acadiennes sont sujettes aux dommages par le vent, lequel constitue également un facteur de perturbation majeur dans les forêts du Labrador et de l'île de Terre-Neuve. Le réchauffement prévu en Atlantique Nord pourrait provoquer une augmentation de la gravité et de la fréquence de conditions météorologiques violentes. Les forêts du Canada atlantique deviendront ainsi vulnérables à des chablis d'envergure, notamment dans les régions côtières.

Impacts sur le secteur forestier

Aménagement forestier

La plupart (94 %) des terres forestières au Canada sont la propriété de l'État. L'approvisionnement en bois sur les terres forestières publiques est généralement calculé par des mesures telles que la possibilité annuelle de coupe et le rendement soutenu à long terme. Les changements climatiques ont déjà des répercussions sur l'approvisionnement en bois actuel et ils en auront dans l'avenir. L'incidence nette des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois sera déterminée par les effets du climat sur plusieurs facteurs interdépendants comme l'impact sur la superficie boisée, le taux de croissance, les régimes des perturbations, les intrants reliés aux aménagements, les contraintes réglementaires, la qualité de la régénération et la répartition des essences. Au niveau local, l'évolution de cet approvisionnement pourrait être positif ou négatif selon l'endroit, la période de temps et l'adaptation humaine aux effets des changements climatiques. Il n'est pas possible, à ce stade-ci, d'évaluer l'impact des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois à l'échelle du pays. On peut toutefois souligner qu'à l'échelle nationale la possibilité annuelle de coupe de résineux provenant des terres publiques provinciales était en 2004 d'environ 159 millions de mètres cubes alors que la récolte réelle de fibre de résineux se situait entre 140 et 150 millions de mètres cubes. Ainsi, toute baisse importante de la possibilité annuelle de coupe dans les résineux se traduirait probablement par une réduction de la récolte avec une diminution correspondante de la production, des exportations, des revenus, des impôts et des emplois.



Les changements climatiques risquent aussi d'avoir un impact sur la capacité du Canada d'atteindre ses objectifs d'aménagement forestier durable. Le Conseil canadien des ministres des forêts a mis au point un cadre qui définit l'aménagement forestier durable et fournit une méthode d'évaluation des progrès accomplis dans cette voie. Ce cadre de travail repose sur six critères qui représentent d'importantes catégories de valeurs que la société

canadienne associée aux forêts et à l'aménagement forestier : la diversité biologique, l'état et la productivité des écosystèmes, le sol et l'eau, la contribution des forêts aux cycles écologiques planétaires, les avantages économiques et sociaux et la responsabilité de la société. Le cadre de travail comprend également des indicateurs associés à chacun des critères et permettant de mesurer dans chaque cas la performance du Canada dans l'obtention d'un niveau socialement acceptable d'avantages. Les changements climatiques, qui sont indépendants de la volonté du secteur canadien de l'aménagement forestier, ont un potentiel de nuisance pour chacun de ces critères et pour plusieurs des indicateurs actuellement utilisés pour mesurer la performance du Canada en aménagement forestier durable.

Opérations forestières

Au Canada, une partie importante de la récolte de bois est effectuée durant l'hiver lorsque le sol est gelé. Ce procédé permet l'accès aux zones humides, réduit les coûts de transport du bois et protège le sol des perturbations. Si l'on considère les projections d'élévation des températures en hiver, avec augmentation des précipitations, on est à même de prédire que la période de gel du sol va raccourcir. Cette situation pourrait sérieusement poser problème dans plusieurs régions de la forêt boréale étant donné que la superficie visée par certains contrats d'aménagement forestier comprend jusqu'à 40 % de terres humides. Les compagnies forestières ont peu d'alternatives pour pallier à une diminution des périodes de gel du sol. À court terme, on peut augmenter la récolte durant l'été, mais tôt ou tard l'approvisionnement en bois s'épuisera sur les terres accessibles l'été. La construction de routes permanentes est une option coûteuse. De plus, les politiques provinciales de gestion des forêts dans plusieurs administrations visent à restreindre la construction de routes permanentes et à remettre en production les routes temporaires une fois les activités de récolte terminées. De l'équipement spécialisé est disponible (par ex. pneus à grande portance), mais il est cher et ne s'utilise que sur de courtes périodes à chaque année. De plus, certains de ces équipements exigent un entretien supplémentaire, ce qui vient encore augmenter les coûts.



Industrie forestière

Si elle est menacée par les changements qui pourraient survenir dans l'approvisionnement en bois et dans les coûts du transport du bois, l'industrie forestière canadienne pourrait en outre être affectée par le bouleversement que les changements climatiques provoqueront sur les marchés mondiaux. Le Canada est le premier exportateur mondial de produits forestiers. Des recherches démontrent que les changements climatiques feront augmenter l'approvisionnement en bois à l'échelle mondiale. Certains pays y gagneront plus que d'autres, ce qui modifiera les avantages comparatifs de chacun des pays exportateurs. On prévoit que les changements climatiques réduiront les retombées économiques du commerce des produits forestiers pour les producteurs de l'Amérique du Nord. Cette réduction devrait être significative au cours de la première partie du siècle en raison du déclin relatif des prix et d'une diminution de la part de marché des producteurs nord-américains.

Communautés tributaires des forêts

Les effets des changements climatiques ne seront probablement pas répartis uniformément dans la société canadienne. Certains segments de la société sont relativement plus vulnérables en raison de leur emplacement, de leur lien étroit avec des environnements sensibles au climat, ou de leurs caractéristiques économiques, politiques et culturelles. Les communautés rurales tributaires d'industries axées sur les ressources naturelles sont particulièrement vulnérables. Qu'elles dépendent ou non de la forêt, ces communautés font face aux mêmes risques et impacts devant l'arrivée des changements climatiques. Il s'agit notamment des effets potentiels sur la santé (par ex. le stress dû à la chaleur, les effets sur la qualité de l'air et de l'eau, l'exposition accrue aux insectes et aux maladies), des impacts sur l'infrastructure (par ex. routes, égouts, systèmes de climatisation et de chauffage) et de l'exposition à des conditions climatiques plus sévères (par ex. inondations et tempêtes). Cependant, les collectivités tributaires des forêts font face à plusieurs risques additionnels qui multiplient leur vulnérabilité aux changements climatiques. Premièrement, les résidents de ces collectivités ont un attachement profond pour le paysage forestier qui les entoure. Deuxièmement, ils feront face à des risques accrus en raison de l'augmentation des incendies de forêt, particulièrement si la collectivité entretient des liens étroits avec la forêt environnante. Troisièmement, les changements qui surviendront dans l'approvisionnement en bois ou dans la position concurrentielle relative des entreprises locales pourraient affecter gravement l'économie locale, surtout si l'économie dépend largement du secteur des produits forestier. D'autres facteurs socioéconomiques contribuent à la hausse du niveau de vulnérabilité des communautés canadiennes tributaires des forêts :

- la faiblesse éventuelle de la capacité d'adaptation (par ex. une économie restreinte et peu diversifiée et une main-d'œuvre locale ultraspécialisée dont les compétences sont difficilement transférables à un autre secteur);
- la possibilité d'une réaction à l'échelle macro des institutions devant la problématique des changements climatiques, ciblant une société devenue largement urbaine et qui affectera en fin de compte les petites collectivités rurales, ou qui en réduira du moins la capacité d'adaptation;
- l'absence des changements climatiques parmi les facteurs menant aux décisions des aménagistes forestiers et des institutions forestières, ce qui pourrait aboutir à une aggravation des impacts à l'échelle des collectivités; et
- la possibilité d'une perception erronée des risques associés aux changements climatiques.

Biens publics et biens communs tributaires des forêts

Les changements climatiques affecteront toute une gamme de biens et de services environnementaux associés aux forêts. Ces biens et services sont nombreux : l'air et l'eau pure, les sols productifs, la faune et la flore, la protection et la préservation de la biodiversité, la valeur d'existence (c.-à-d. savoir que certaines espèces et certains écosystèmes continuent d'exister), la valeur de transmission (c.-à-d., savoir que nous préservons le capital naturel pour les générations futures), les panoramas esthétiques et la possibilité d'activités récréatives de plein air. Par exemple, on s'inquiète de l'impact des changements climatiques sur des espèces menacées comme le caribou des bois.

Recommandations et conclusion

La magnitude des changements climatiques auxquels les forêts du Canada et le secteur forestier seront confrontés et l'ampleur des impacts prévus n'ont pas d'analogie historique. Le secteur forestier du Canada a besoin de s'adapter et doit le faire sans profiter d'un savoir tiré d'expériences antérieures. Les experts forestiers devront prévoir l'imprévisible et se préparer à faire face à des changements continus et persistants. L'adaptation de l'aménagement forestier aux changements climatiques commence à être reconnue comme étant une nécessité. L'adaptation comporte de nombreux avantages et nous amène notamment à tirer parti de certaines possibilités et à maximiser les avantages potentiels, à réduire les impacts potentiellement négatifs et à diminuer les risques. Plusieurs cas d'espèce en foresterie canadienne démontrent que le processus d'adaptation est déjà amorcé. Quelques compagnies cherchent l'information qui leur permettra de tenir compte des changements climatiques dans leur planification forestière à long terme. Quelques organismes provinciaux d'aménagement forestier commencent à examiner leurs besoins en matière d'adaptation. Cependant, il y a des étapes préliminaires et beaucoup reste à faire pour se préparer et s'adapter aux changements climatiques. Bien qu'on reconnaisse de plus en plus la nécessité de s'adapter à ces changements, il demeure une part considérable d'incertitude sur la nature et le mécanisme de cette adaptation. À cette fin, un premier pas serait de déterminer et de mieux comprendre les éléments de vulnérabilité des écosystèmes forestiers et des régimes d'aménagement forestier.

Même après avoir documenté les éléments de vulnérabilité, on verra probablement des impacts inattendus. Par conséquent, sans cesser de développer des mesures d'adaptation spécifiques, il est essentiel d'améliorer la capacité d'adaptation des aménagistes forestiers et de l'aménagement forestier en général. Non seulement cette réaction serait-elle bénéfique face aux changements climatiques, mais elle mettrait également le secteur forestier en bonne position pour faire face à toute la gamme de changements mondiaux, sociaux, politiques et économiques auxquels il est confronté. Selon Smit et Pilosova (2001), les systèmes pourvus d'une grande capacité d'adaptation possèdent certaines qualités essentielles : reconnaissance et compréhension de l'urgence de l'enjeu; grande capacité scientifique et accès à un éventail de technologies; ressources financières; institutions efficaces tournées vers l'avenir, auto-adaptatives et dont l'autorité flexible permet l'adaptation locale; capital humain hautement qualifié; réseaux efficaces et niveau élevé de confiance entre les intervenants facilitant l'échange d'information et le développement de solutions axées sur la collaboration; mécanismes de production et de diffusion du savoir, ainsi que de création d'outils et de bases de données.

Recommandations

1. Renforcer la capacité d'entreprendre à différentes échelles l'évaluation intégrée des éléments de vulnérabilité des systèmes.

Il faut réaliser une évaluation intégrée des éléments de vulnérabilité face aux changements climatiques selon de multiples échelles spatiales et temporelles et pour divers types de systèmes humains. Par exemple, il est essentiel de connaître la vulnérabilité des systèmes à l'échelle nationale, régionale et locale. Il faut disposer de

méthodes et d'approches prenant en considération la vulnérabilité des différents types de systèmes humains devant les changements climatiques, y compris les systèmes d'aménagement forestier, les zones protégées et les collectivités tributaires des forêts.

2. Augmenter les ressources pour les travaux scientifiques sur les impacts et l'adaptation et accroître également les ressources pour surveiller les impacts des changements climatiques.

Les changements climatiques sont une réalité et ils auront des répercussions majeures sur l'état futur des forêts. Pour atteindre des objectifs socialement acceptables dans l'aménagement des forêts, les experts-forestiers font appel à des modèles prédictifs (par ex. croissance et rendement, approvisionnement en bois). Dans le passé, les données historiques servaient d'intrant dans ces modèles. Cette approche ne convient plus, car les conditions historiques ne sont plus représentatives des conditions futures. Désormais, les décisions fondées sur la prémisse que les conditions futures ressembleront aux conditions historiques sont vraisemblablement vouées à l'échec. Ainsi, notre succès en matière d'aménagement forestier dépend de notre capacité à prédire l'impact futur des changements climatiques sur les forêts. Cependant, les experts-forestiers font face à un problème : si les changements climatiques rendent les prévisions indispensables (en dépit de conditions changeantes), ils augmentent par le fait même l'incertitude des prévisions. Pour contribuer à réduire cette incertitude, on peut affecter des ressources additionnelles à la surveillance des impacts et à la recherche sur les impacts et les voies d'adaptation. Pour mettre au point des stratégies efficaces d'adaptation aux changements climatiques, il faudra absolument posséder des méthodes de prédiction plus fiables, comportant moins d'incertitudes, pouvant en outre fournir des prévisions à des échelles pertinentes pour les décideurs.

3. Examiner les politiques forestières, la planification forestière, les pratiques d'aménagement forestier et les institutions pour évaluer notre capacité d'atteindre nos objectifs sociaux dans un contexte de changements climatiques.

Le secteur forestier canadien hésite encore à tenir compte des changements climatiques dans ses politiques et sa planification. Cette attitude est sans doute en partie liée au niveau élevé d'incertitude concernant les impacts à venir, particulièrement à l'échelle des peuplements et des forêts. Néanmoins, les compagnies forestières commencent déjà subir certains impacts qui pourraient être liés aux changements climatiques (par ex. le raccourcissement de la saison de récolte en hiver et l'expansion de l'aire de distribution du dendroctone du pin ponderosa). De plus, le long cycle de croissance des arbres place l'aménagiste forestier dans une situation unique où il doit dès maintenant tenir compte des changements climatiques dans la planification et le processus décisionnel. Par conséquent, l'attention aux changements climatiques ne doit aucunement être reportée par le secteur forestier.

Il y a un certain nombre d'aspects de l'aménagement forestier actuel sur lesquels les changements climatiques futurs auront des répercussions importantes. Ainsi, il est nécessaire de considérer les changements climatiques :

- dans les prévisions de croissance et de rendement,
- dans les analyses d'approvisionnement en bois à long terme et la planification de l'aménagement forestier,

- dans les choix en matière de reboisement,
- dans la définition des normes des programmes de protection et dans celles de certains types d'adaptation comme la réduction de la vulnérabilité par la configuration des paysages (les paysages « intelligents » résistant au feu et aux insectes), et
- dans les objectifs de gestion durable des forêts et les pratiques utilisées par les experts-forestiers, ou pouvant l'être, pour atteindre des objectifs modifiés.

Dans certains cas, il pourra s'avérer nécessaire de recourir à une méthode d'évaluation des effets cumulatifs pour déterminer les mesures appropriées. Dans certaines régions, par exemple, les risques de sécheresse et d'incendie s'accroîtront en même temps; c'est pourquoi une modification de la composition forestière favorisant le pin gris pourrait avoir des avantages multiples.

4. Implanter les principes de gestion du risque et de gestion adaptative dans l'aménagement forestier.

Les changements climatiques augmenteront les risques et l'incertitude associés aux objectifs d'aménagement forestier. Une modification du risque pourrait avoir des conséquences sur les valeurs forestières et sur les choix qui sont faits. On peut faire valoir que l'approche actuelle en aménagement forestier est normative et déterministe. Une telle approche fondée sur les antécédents peut être satisfaisante lorsque les conditions sont stables, mais elle n'est pas adaptée quand les conditions futures sont susceptibles de varier de multiples façons.

L'augmentation des risques dans l'approvisionnement en bois par suite des changements climatiques pourrait avoir de réels impacts économiques et pourrait en outre influencer sur l'optimisation des plans de récolte. Tenir compte des risques et les gérer constituera un important élément d'adaptation aux changements climatiques. Les stratégies de gestion des risques comprennent des éléments de prévention, de réduction et de répartition des risques (par ex. régimes d'assurances) ainsi que de diversification des options.

Outre l'apprentissage de la gestion des risques, il faut se préparer davantage à composer avec les événements imprévus et imprévisibles. C'était le cas, par exemple, de l'infestation du dendroctone du pin ponderosa. La diversité fonctionnelle, la flexibilité et les systèmes de gestion qui reconnaissent l'incertitude et l'imprévisibilité et en tiennent compte, de même que les structures sociales qui encouragent la gestion adaptative, prennent toute leur importance quand un système est vulnérable devant les impondérables.

5. Maintenir ou améliorer la capacité de communications, de réseautage et d'échange d'information avec le public canadien et au sein du secteur forestier.

La communication, le réseautage et la coopération au sein du secteur forestier canadien seront essentiels pour relever efficacement les nombreux défis dans un contexte de climat en évolution. Le capital social est essentiellement le niveau de réseautage entre les éléments de la structure sociale et le niveau de confiance mutuel des diverses composantes de la structure sociale. Le capital social fournit aux individus et aux groupes de l'information et des ressources auxquelles ils n'auraient peut-être pas accès autrement. Il contribue à la capacité de résilience et à l'adaptabilité.

Conclusion

Le but de ce rapport est d'éveiller la conscience face aux changements climatiques, à leurs impacts sur le secteur forestier canadien et à leurs conséquences pour l'aménagement forestier et le secteur forestier canadien. Car le secteur forestier du Canada ressent déjà et continuera de ressentir l'impact de changements climatiques. Ces changements viennent rapidement et auront des conséquences importantes sur la capacité du Canada de gérer les forêts de façon économique et durable tout en respectant l'environnement. En fin de compte, c'est toute la foresterie et ses dirigeants qui devront s'adapter. Le rapport cherche donc à informer le milieu de l'aménagement forestier et voudrait contribuer à un débat constructif sur les mesures d'adaptation qu'il convient d'adopter.

L'un des éléments les plus marquants de cette situation, c'est que nous affrontons des niveaux élevés d'incertitude en ce qui concerne les transformations qui se profilent à l'horizon. Mais l'incertitude ne doit pas être une barrière. Elle ne doit pas nous empêcher d'entreprendre le processus d'adaptation, même si elle rend cette adaptation plus complexe. La science peut aider à réduire l'incertitude au fil du temps. Les changements climatiques constituent fondamentalement une problématique scientifique, mais ils recèlent un potentiel immense de répercussions socioéconomiques et politiques. Pour y voir clair, il faudra par conséquent consentir des efforts de recherche scientifique considérables, mieux soutenus, financés et orientés. Mais ces travaux scientifiques ne doivent pas et ne peuvent pas avancer indépendamment des besoins des décideurs politiques et des aménagistes forestiers. En somme, il faut mettre en place les mécanismes qui permettront de les encadrer et de les lier directement aux politiques, à la planification et aux décisions.

INTRODUCTION



Le climat change naturellement au fil du temps en réaction aux variations de l'orbite de la Terre, de l'activité solaire, de l'activité volcanique et de la composition de l'atmosphère (Girardin et coll., 2006). La plupart de ces facteurs causent toutefois des changements climatiques qui se produisent sur de longues périodes de temps. Mais la modification rapide du climat au cours des 100 dernières années ne peut s'expliquer par des facteurs naturels. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les changements anthropiques de la composition de l'atmosphère sont les principaux responsables de la rapidité des récents changements climatiques et ils seront le facteur principal des changements climatiques qui se produiront dans les 100 prochaines années (GIEC, 2007).

Le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2007) confirme les constatations antérieures selon lesquelles les changements climatiques résultant d'activités humaines sont considérables et bien réels. Dans ce rapport, le GIEC déclare que le réchauffement au cours des 100 dernières années est « sans équivoque », avec un accroissement estimé à 0,74 °C ($\pm 0,18$ °C) de la température mondiale moyenne entre 1906 et 2005. Le rapport fournit également, selon les meilleures estimations possibles, des projections de l'augmentation des températures pour les années 2090 (en comparaison de celle de 1980 à 1999). Ces augmentations varient de 1,8 °C, selon le scénario le plus optimiste des émissions futures de gaz à effet de serre, à 4,0 °C selon le pire des scénarios. Pour le Canada, particulièrement dans les régions du centre du continent, les modèles généraux de circulation prévoient généralement un réchauffement supérieur à la moyenne mondiale (Kirschbaum et Fishlin, 1996; Weber et Flannigan, 1997).

Les forêts sont sensibles au climat. Les différences de température, de précipitations, de vents et de rayonnement que l'on constate actuellement selon la latitude et l'altitude expliquent en grande partie la variation spatiale à grande échelle de la composition forestière et de la productivité des écosystèmes forestiers (Iverson et Prasad, 1998; Aber et coll., 2001; Hansen et coll., 2001; Jackson, 2004). Le climat a une influence directe sur les processus biologiques et écologiques. Il affecte la régénération, la phénologie et son synchronisme entre les espèces en interaction, la photosynthèse, la respiration, la consommation en eau et la transpiration, les perturbations (feu, insectes, maladies, tempêtes et sécheresse), le succès de certaines espèces dans la compétition avec les autres, ainsi que les taux d'accumulation et de décomposition de la nécromasse. Avant que les humains n'engendrent d'importantes émissions de gaz à effet de serre, les changements de climat étaient généralement assez lents pour permettre aux arbres de s'acclimater, de s'adapter ou de migrer. Depuis, les « enveloppes climatiques », au sein desquelles les divers écosystèmes forestiers du Canada se développent, ont commencé à se transformer à un rythme sans précédent. Les incidences d'un climat qui se réchauffe à grande vitesse sont importantes pour les organismes longévifs (comme les arbres) ainsi que pour les systèmes de gestion ayant une planification à long terme (comme la foresterie) (Dale et coll., 2000; McNulty et Aber, 2001; Chuine et coll., 2004).

Les impacts des changements climatiques dans le secteur forestier et le besoin d'adaptation sont des sujets de grandes inquiétudes (voir Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts, 2003; Lazar, 2005; Snetsinger, 2006; Lemprière et coll., 2008). Le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a désigné l'atténuation des

changements climatiques et l'adaptation, de même que la transformation du secteur forestier, comme étant les « deux priorités d'importance nationale » pour le secteur forestier du Canada (CCMF, 2008). Le Canada se trouve dans une position particulièrement vulnérable comparativement à d'autres pays à cause de l'ampleur prévue des changements climatiques sur son territoire, de la sensibilité des forêts aux changements climatiques, du long cycle de croissance des arbres et de l'importance socioéconomique des forêts et du secteur forestier pour les Canadiens. Cependant, une action immédiate aurait le potentiel de réduire notre vulnérabilité aux changements climatiques. S'adapter rapidement pourrait permettre de réduire les impacts négatifs des changements climatiques et d'en maximiser les avantages potentiels. De plus, étant donné que les investissements en foresterie rapportent à long terme et qu'ils sont généralement irréversibles, une adaptation précoce est nécessaire pour réduire au minimum les impacts à long terme des changements climatiques. Ainsi, il est important que les forestiers soient conscients des changements climatiques et qu'ils commencent à élaborer des stratégies et des approches d'adaptation et à en tenir compte dans leurs politiques, décisions de gestion et plans à long terme.

Ce rapport complète et met à jour les documents de synthèse antérieurs sur les impacts des changements climatiques sur les forêts du Canada (par ex. Saporta et coll., 1998; Forget et coll., 2003; Lemmen et Warren, 2004; Juday et coll., 2005; Johnston et coll., 2006; Lemprière et coll., 2008). Il est basé sur les contributions des auteurs issus du monde forestier ayant contribué au récent rapport de l'évaluation nationale canadienne sur les impacts des changements climatiques (Lemmen et coll., 2008). Le but du présent rapport est de sensibiliser la population aux changements climatiques et de fournir de l'information aux intervenants forestiers pour les aider à connaître et à évaluer les besoins et les options en matière d'adaptation. Le rapport offre un résumé des changements et des événements survenus dans les forêts canadiennes au cours des 30 dernières années qui pourraient être, du moins partiellement, liés aux récentes tendances climatiques. Il décrit ensuite comment les changements climatiques futurs pourraient affecter les forêts et le secteur forestier en faisant d'abord un portrait d'ensemble, puis en examinant plus particulièrement les diverses régions du Canada. Il présente également les incidences potentielles des changements climatiques sur l'aménagement forestier, les opérations forestières, l'industrie forestière et les collectivités tributaires des forêts. Finalement, il aborde les défis, les contreparties financières et les options d'adaptation, et présente des recommandations.



IMPACTS ACTUELS SUR LES FORÊTS DU CANADA

Les changements climatiques ont déjà une incidence sur les forêts du Canada (Lemmen et coll., 2008). Ce chapitre décrit les changements survenus récemment dans les forêts canadiennes et qui comportent un lien quelconque avec les changements climatiques. Dans le secteur forestier canadien, les effets les plus visibles des changements climatiques au cours des 30 dernières années se présentent sous la forme d'une modification de la fréquence, de la sévérité ou de la situation géographique des perturbations. Cependant, on perçoit également des changements dans la longueur de la saison de croissance, les limites forestières et la phénologie. Les exemples abordés dans ce chapitre ont été choisis parce qu'ils prouvent que les changements climatiques ont déjà un impact. Qui plus est, les types de changements climatiques et d'impacts actuellement observés pourraient être précurseurs d'événements à venir encore plus importants à mesure que notre climat continuera de se réchauffer, peut-être à un rythme accéléré.

Modifications constatées (saison de croissance, phénologie et limites forestières)

Les changements climatiques augmentent la longueur de la saison de croissance. Zhou et coll. (2001) ont découvert que la durée moyenne de la saison de croissance (période durant laquelle l'arbre est en activité végétale, c-à-d. que sa sève circule et contribue à son développement) a augmenté de 12 jours en Amérique du Nord et de 18 jours dans le nord de l'Eurasie entre 1981 et 1999. Par ailleurs, McDonald et coll. (2004) ont découvert que la date moyenne de la fonte printanière dans la forêt boréale d'Amérique du Nord a été devancée de 13 jours entre 1988 et 2001; Goetz et coll. (2005) rapportent une tendance similaire pour la toundra du Canada et de l'Alaska.

Les arbres commencent à réagir aux changements climatiques. Bernier et Houle (2005) rapportent que l'épanouissement des bourgeons de l'érable à sucre survient plusieurs jours plus tôt qu'il y a une centaine d'années. Colombo (1998) rapporte des résultats similaires en ce qui a trait à l'épinette blanche en Ontario. Beaubien et Freeland (2000) ont rapporté que la période de floraison du peuplier faux-tremble se produit maintenant 26 jours plus tôt que durant le dernier siècle. Danby et Hik (2007) ont découvert que la limite des arbres se déplace en altitude et que la densité des peuplements a augmenté au Yukon en raison du réchauffement durant le 20^e siècle. Roland et Matter (2007) ont aussi noté que la limite des arbres a monté en altitude. Il en résulte un empiètement sur les écosystèmes alpins. Soja et coll. (2007) ont décrit des résultats similaires en Sibérie. Gamache et Payette (2004) ont rapporté que la taille des épinettes noires progresse depuis 1970 dans la toundra forestière septentrionale de l'est du Canada.

La sécheresse de 2001–2003

La sécheresse qui a sévit à l'échelle nationale de 2001 à 2003 pourrait être liée aux récents changements climatiques. Les sécheresses sont courantes au Canada. Par exemple, d'importantes sécheresses se sont produites au début de la décennie 1930, et des années 1961 et 1988, et plus récemment de 2001 à 2003 (Wheaton, 2005). Cependant,

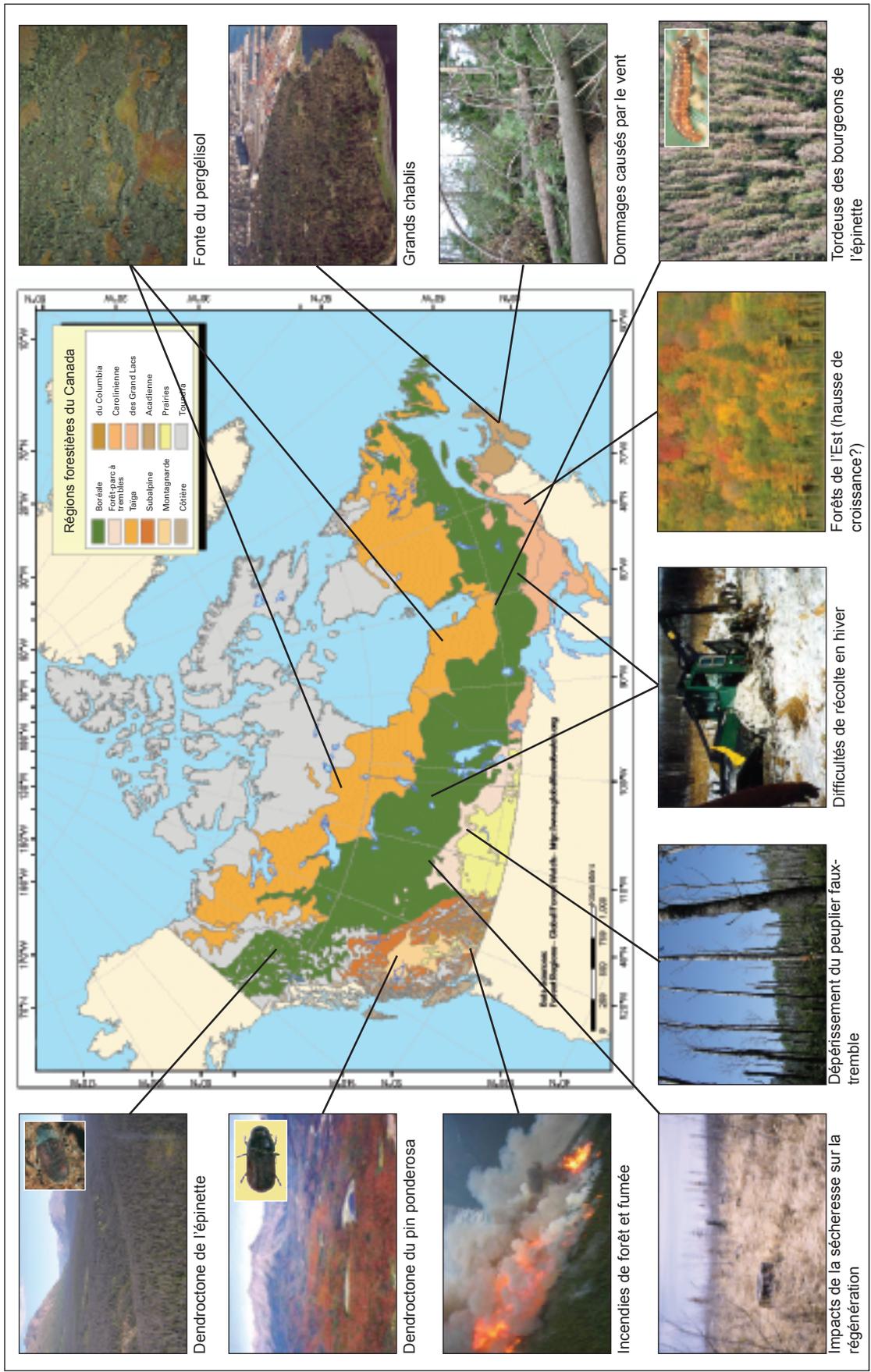


Figure 1. Impacts actuels des changements climatiques sur les forêts du Canada.

cette dernière était sans précédent en termes de durée, de superficie et de gravité (du moins à certains endroits) (Wheaton, 2005). Cette sécheresse n'était pas exclusive au Canada. Zeng et coll. (2005) et Lotsch et coll. (2005) décrivent une période de sécheresse qui s'est produite dans des régions de latitude moyenne dans tout l'hémisphère Nord de 1998 à 2002.

Le dépérissement du peuplier faux-tremble a été tout d'abord observé au début des années 1990 (Hogg et coll., 2002). À partir de relevés aériens effectués en 2004, Hogg et coll. (2005) ont noté que la sécheresse de 2001 à 2003 pourrait avoir contribué à la mortalité généralisée du peuplier faux-tremble dans l'ouest de la Saskatchewan et l'est de l'Alberta. Cette observation a été confirmée dans un article écrit par Hogg et coll. (2007) qui ont découvert dans l'Ouest canadien que les forêts intérieures de peuplier faux-tremble sont limitées en eau et que la récente sécheresse a contribué à y augmenter la mortalité des tiges et à ralentir le rythme de croissance.

La sécheresse peut aussi avoir des effets secondaires. Par exemple, les saisons des feux dévastatrices en Colombie-Britannique et au Yukon, au cours des dernières années, sont probablement dues à l'effet combiné de l'augmentation des matières combustibles (résultant du taux élevé de mortalité causé par les insectes) et des conditions chaudes et sèches associées à la sécheresse. La sécheresse augmente le niveau de stress des arbres et leur vulnérabilité face aux maladies et aux ravageurs (Dale et coll., 2001). Par exemple, Juday et coll. (2005) citent la sécheresse comme un facteur potentiel de l'augmentation de la mortalité causée par le dendroctone de l'épinette dans les forêts de la péninsule sud de l'Alaska.

Augmentation des incendies de forêt

L'activité du feu au cours d'une année dans une région donnée est influencée par la météo de l'année courante ou de l'année précédente, les conditions atmosphériques, la foudre, les courants océaniques (c.-à-d. El Niño et La Niña), la quantité de combustible disponible (c.-à-d. les caractéristiques de la végétation forestière), les taux de décomposition (qui affectent l'accumulation du carburant), l'utilisation des terres, la topographie, les caractéristiques du terrain ainsi que la gestion des incendies (Flannigan et coll., 2001; Podur et coll., 2002). Ces facteurs sont interdépendants et, dans certains cas, stochastiques (par ex. la météorologie). Ainsi, le niveau d'activité du feu dans une région donnée peut varier largement d'une année à l'autre.

Les épisodes d'incendies extrêmes sont devenus courants, et c'est l'illustration de l'influence des récents changements climatiques sur l'activité du feu. Plus particulièrement, les incendies sont devenus plus fréquents et plus intenses, et ils surviennent à des moments de l'année où ils ne devraient pas se produire normalement. À titre d'exemple, on peut citer la saison des feux de 2003 en Colombie-Britannique qui fut la pire de toute l'histoire de cette province. Le coût total des efforts déployés pour lutter contre ces incendies est estimé à 700 millions de dollars (Filmon, 2004). Plus de 334

...les incendies sont devenus plus fréquents et plus intenses...

maisons et entreprises ont été détruites et plus de 45 000 personnes ont été évacuées de leur résidence (Filmon, 2004). Des incendies similaires se sont produits dans d'autres parties du Canada. L'été 2004 fut le plus chaud jamais documenté au Yukon. Ce territoire avait également

reçu des précipitations inférieures à la normale et une incidence record de la foudre ce même été. La réunion de ces conditions a produit une saison des feux record au Yukon : environ 1,8 million d'hectares ont été incendiés. Le record précédent (1958) couvrait moins de la moitié de cette superficie, soit 891 000 hectares. Des conditions météorologiques anormales, favorisant les incendies de forêts, ont aussi été observées dans l'est du Canada. Par exemple, on a retrouvé ces conditions météorologiques particulières dans le nord-ouest de l'Ontario jusqu'en qu'en septembre, en 2006. On note également que les opérations de suppression des incendies commencent beaucoup plus tôt dans la saison qu'auparavant.

L'évaluation des tendances des incendies de forêt se complique par la piètre qualité des données provenant du début du 20^e siècle (par ex. la superficie brûlée était probablement sous-estimée avant 1960 [Amiro et coll., 2004]) ainsi que par la nature extrêmement variable de l'activité du feu d'une année à l'autre. Néanmoins, les scientifiques qui étudient les incendies ont déterminé que l'activité du feu a augmenté de façon considérable au cours des 40 dernières années (Flannigan et Van Wagner, 1991; Podur et coll., 2002; Stocks et coll., 2002; Gillett et coll., 2004; Amiro et coll., 2004; Juday et coll., 2005; Soja et coll., 2007). Kasischke et Turetsky (2006) ont démontré que, malgré des augmentations correspondantes de la capacité de suppression des incendies, la fréquence des grands incendies et la superficie brûlée dans la région boréale de l'Amérique du Nord (c.-à-d. l'Alaska et le Canada) ont doublé entre les décennies 1960 et 1970 et les décennies 1980 et 1990. La majorité de ces augmentations se sont produites dans la partie ouest de la région forestière boréale. De plus, la proportion de la superficie totale incendiée au début et à la fin de la saison des feux est en progrès. On peut en déduire que les forêts subissent un prolongement général de la période de vulnérabilité aux incendies de forêt.

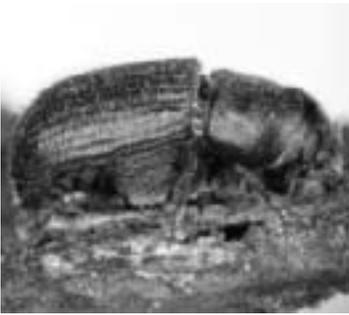
Flannigan et Harrington (1988), Gillett et coll. (2004) et McCoy et Burn (2005) ont noté que même si plusieurs facteurs influencent l'activité du feu, la température est celui qui prédit le mieux la superficie incendiée. Westerling et coll. (2006) ont examiné les liens entre le réchauffement de la planète et les incendies de forêt dans l'ouest des États-Unis. Ils ont fait les constatations suivantes : les stocks neigeux fondent de 1 à 4 semaines plus tôt qu'il y a 50 ans, les températures estivales sont plus élevées, la saison des feux a augmenté de 78 jours et la durée moyenne des incendies est passée de 7,5 jours à 37,1 jours. Ces changements ont eu pour résultat de quadrupler la fréquence des grands incendies et de multiplier par six la superficie incendiée dans l'ouest des États-Unis.

Bien qu'il y ait des preuves que les changements climatiques ont contribué à l'augmentation de l'activité du feu au cours des 40 dernières années, il convient d'y apporter certaines nuances et d'en présenter le contexte historique. Premièrement, s'ils varient au fil du temps, les incendies de forêt varient également en fonction des régions. En général, le cycle de feu (c.-à-d. le nombre moyen d'années entre les incendies renouvelant les peuplements) est plus long dans la partie est de la forêt boréale que dans la partie ouest (Bergeron et coll., 2006). Deuxièmement, bien que l'activité du feu ait augmenté au cours des dernières années, elle pourrait avoir été plus faible dans la première partie du 20^e siècle qu'au 19^e siècle (Bergeron et Flannigan, 1995; Bergeron et coll., 2004, 2006; Girardin et coll., 2006).

Dendroctone du pin ponderosa

Le dendroctone du pin ponderosa est originaire de l'Amérique du Nord. L'hôte principal de cet insecte nuisible est le pin tordu latifolié parvenu à maturité, mais d'autres pins subissent également ses attaques, y compris le pin ponderosa et le pin gris (Cerezke, 1995; Carroll et coll., 2004). Le dendroctone vit sous l'écorce en se nourrissant du phloème et parvient à tuer l'arbre en l'annelant. Il est également porteur du champignon du bleuissement. Ce champignon se répand dans le bois d'aubier et bloque finalement le mouvement de l'eau entre les racines et la cime de l'arbre.

Le dendroctone du pin ponderosa est un ravageur des forêts normalement inoffensif. Cependant, des infestations se produisent occasionnellement provoquant une vague de mortalité du pin sur de grandes superficies. Il y a eu quatre infestations majeures du dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique au cours des 120 dernières années (Taylor et coll., 2006; Carroll, 2006). L'infestation actuelle est sans précédent. Depuis 2005, plus de 8,7 millions d'hectares de pinède ont été affectés en Colombie-Britannique (BC Ministry of Forests and Range, 2006). Cette zone est 10 fois plus grande que celle de toute autre infestation antérieure (Carroll, 2006). De plus, les régions actuellement touchées n'ont jamais été exposées aux attaques de cet insecte. À ce jour, le dendroctone a tué environ 40 % des pins tordus matures de la province (Walton et coll., 2007). Selon les projections, l'infestation pourrait provoquer la perte de 77 % des pins matures dans la province d'ici 2014 (Walton et coll., 2007). Parti de la Colombie-Britannique, le dendroctone du pin ponderosa a récemment étendu son aire aux régions nord-ouest de l'Alberta, régions qui n'avaient jamais été infestées auparavant. D'importantes populations se sont établies aux alentours de Grande Cache et de Grande Prairie, et sur la frontière de l'Alberta et de la Colombie-Britannique, à l'ouest de la rivière de la Paix.



Deux facteurs ont contribué à l'infestation actuelle : la présence de grandes superficies de pin tordu latifolié parvenu à maturité et un nombre sans précédent d'hivers consécutifs anormalement chauds (Carroll et coll., 2004). Auparavant, la portée géographique du dendroctone du pin ponderosa était limitée par le climat. Les récents changements climatiques en Colombie-Britannique ont augmenté de plus de 75 % l'habitat optimal du dendroctone sur le plan climatique. Les impacts sur l'approvisionnement forestier, et par conséquent sur l'économie forestière de la Colombie-Britannique et les collectivités tributaires de la forêt, sont importants (voir au chapitre 5 les impacts sur le secteur forestier).

Dendroctone de l'épinette

Le Yukon vit actuellement la plus importante infestation du dendroctone de l'épinette jamais observée. Même si le dendroctone de l'épinette est une espèce endémique dans cette région, les niveaux de population ont toujours été faibles, la zone infestée étant demeurée restreinte et les impacts limités. Historiquement, les principaux facteurs limitant la répartition de ce dendroctone étaient la fraîcheur et l'humidité des étés et la rigueur de l'hiver : cet insecte prenait alors deux années entières pour réaliser son cycle de vie. Des hivers rigoureux consécutifs entraînaient une certaine mortalité du dendroctone de l'épinette et une réduction des populations (Juday et coll., 2005; Berg et coll., 2006). L'envergure de l'infestation actuelle est sans précédent. Elle touche plus de 340 000 hectares de forêt dans le sud-ouest du Yukon (<<http://yukon.taiga.net/swyukon/>

beetle.cfm>, consulté le 5 mars 2007) et l'on constate une certaine mortalité des arbres dans 1,6 millions d'hectares de forêt en Alaska (Juday et coll., 2005). L'hôte principal de ce dendroctone est l'épinette mature (c.-à-d. l'épinette de Sitka, l'épinette blanche et les hybrides). L'infestation actuelle est directement liée à la récente sécheresse et aux conditions sans précédent caractérisées par des étés et des hivers plus chauds au Yukon et en Alaska (Berg et coll., 2006; Soja et coll., 2007). Toutefois, les populations dendroctone de l'épinette ont commencé leur déclin en Alaska, principalement en raison de la disponibilité décroissante d'arbres hôtes vivants.

Brûlure en bandes rouges

L'infestation du dendroctone du pin ponderosa, la pullulation du dendroctone de l'épinette et l'augmentation des incendies de forêt sont trois perturbations liées aux changements climatiques qui se produisent actuellement à une échelle spatiale relativement grande. D'autres impacts sur les forêts attribuables aux récents changements climatiques, également sans précédent, se produisent à plus petite échelle.

La brûlure en bandes rouges (*Dothistroma pini*) est un champignon qui s'attaque aux aiguilles du pin tordu latifolié et à d'autres espèces de pin (Woods et coll., 2005). Le champignon a normalement un impact mineur sur les forêts. Cependant, il a récemment atteint des proportions épidémiques dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique, s'attaquant à la fois aux plantations de jeunes pins tordus et aux forêts matures de pin tordu latifolié. Il cause une forte mortalité dans les plantations et une certaine mortalité chez le pin mature (c'est un dommage sans précédent pour le pin mature). Woods et coll. (2005) ont effectué des relevés aériens de 2002 à 2004. Sur les 41 000 hectares qu'ils ont étudiés, 92 % étaient infestés. Neuf pour cent de la zone devra être reboisée suite à l'échec des plantations de pin, et 7 % de la zone présente des arbres qui ont été tués par la brûlure en bandes rouges (Woods et coll., 2005). La grande disponibilité d'arbres hôtes et la modification des conditions environnementales favorisant la brûlure en bandes rouges sont les principaux facteurs qui contribuent à l'accroissement des dommages. L'augmentation de la fréquence de pluies chaudes durant l'été, comparativement au milieu des années 1990 (Woods et coll., 2005), est l'élément nouveau des conditions environnementales qu'on associe à cette infestation et il pourrait être dû aux récents changements climatiques.

Certains impacts des changements climatiques, se produisent à petite échelle.

Répercussions

Les exemples cités dans ce chapitre montrent que les changements climatiques affectent déjà les forêts du Canada et ils mettent en lumière deux caractéristiques générales des impacts des changements climatiques. Premièrement, des événements comme celui de l'infestation du dendroctone du pin ponderosa sont souvent le résultat d'une combinaison de facteurs interdépendants. Une modification du climat local pourrait contribuer à de tels événements, mais beaucoup d'autres facteurs (par ex. les caractéristiques d'agents de perturbation particuliers, les interactions entre les perturbations, les caractéristiques des arbres et des écosystèmes forestiers et l'aménagement antérieur) peuvent aussi se combiner pour créer un ensemble de circonstances menant à une manifestation ou à un impact particulier. Ces constatations

démontrent bien la nature polydimensionnelle de l'évaluation des impacts des changements climatiques et les nombreux défis auxquels nous ferons face dans la prévision de ces répercussions. Elles montrent également qu'il est possible de réduire la vulnérabilité des forêts devant les changements climatiques au moyen de l'aménagement à l'échelle du paysage.

Le deuxième aspect des changements climatiques mis en évidence par les événements récents, c'est qu'ils ont le potentiel de produire des impacts multiples et interdépendants qui surviennent en même temps. Il se produira simultanément une modification du risque de sécheresse, d'incendie, de perturbation par les insectes et les maladies et de conditions

météorologiques extrêmes, et du taux de croissance et de rendement. Il en résulte des conséquences importantes pour l'aménagement forestier. Premièrement, les forestiers auront besoin de reconnaître et de comprendre les impacts cumulatifs des changements climatiques, puis de s'y adapter. Il faudra mettre au point des cadres d'évaluation et des stratégies d'adaptation complètes, holistiques et intégrées. En outre, la grande complexité du risque associé aux changements climatiques peut éventuellement entraîner une sous-estimation ou une

Les changements climatiques ont le potentiel de produire des impacts multiples et interdépendants qui surviennent en même temps.

surestimation du risque par les décideurs (Davidson et coll., 2003). Des sondages auprès des experts-forestiers de la Colombie-Britannique et de l'Ontario ont permis de découvrir que les forestiers avaient le sentiment que l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers n'est pas bien compris par le public ni par les milieux de l'aménagement forestier (Ogden et Innes, 2007a; Colombo, 2006; Williamson et coll., 2005). Il existe par conséquent un besoin d'éducation et de communication, et il faut générer de nouveaux outils et de nouvelles banques de données auxquels les forestiers pourront avoir accès et qu'ils devront mettre à profit. Ces initiatives ne pourront qu'enrichir notre connaissance scientifique fondamentale de la problématique des changements climatiques. Mais comme les conséquences des changements climatiques sont multidimensionnelles, il faudra que la recherche entreprise par les scientifiques, ainsi que les connaissances et les outils qui en découleront, aient des caractéristiques multidisciplinaires, holistiques et intégrées.



IMPACTS FUTURS SUR LES FORÊTS DU CANADA

Les impacts décrits dans le chapitre précédent mettent en évidence la vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques rapides. Une bonne connaissance des impacts actuels des changements climatiques fournit un point de départ pour se faire une idée de la façon dont les changements à venir pourraient affecter les forêts du Canada. Le climat du Canada continuera de se réchauffer durant le prochain siècle. Le GIEC estime que le réchauffement planétaire se situera d'ici 2100 entre 1,8 °C (selon le scénario B1 du GIEC, qui comportant le plus bas niveau d'émissions de GES) et 4,0 °C (selon le scénario A1F1 prévoyant une forte consommation de carburants fossiles) (GIEC 2007). Cette tendance au réchauffement sera considérablement plus prononcée aux latitudes nord (Lemmen et coll., 2008). Au cours des 100 prochaines années, le taux de réchauffement des forêts du Canada sera considérablement plus élevé que depuis 100 ans et nettement supérieur au taux planétaire moyen.

Dans ce chapitre, on présente un survol des impacts sur les forêts du Canada que les changements climatiques provoqueront selon les prévisions. Il est cependant difficile de décrire systématiquement ces impacts, de façon simple et intégrée, en raison du grand nombre de facteurs en cause et de l'interdépendance et de l'intradépendance de ces facteurs (site, perturbations, physiologie), contribuant tous aux répercussions nettes des changements climatiques. Les changements climatiques auront des effets primaires, secondaires et tertiaires sur les écosystèmes forestiers. Les nombreuses interactions et rétroactions entre ces effets rendent la situation complexe. Néanmoins, il est possible de préciser les facteurs de changements primordiaux pour les forêts et les interactions entre ces facteurs, et certaines des variables inéluctables qui détermineront in fine les changements que subiront les forêts ou qui expliqueront du moins l'ampleur des bouleversements (figure 2). Dans le reste du chapitre, on examine plusieurs des éléments mentionnés à la figure 2 : les facteurs de changement (énumérés dans les trois encadrés de gauche), puis les impacts potentiels sur les forêts (précisés dans l'encadré de droite).

Étant donné ce qu'on observe actuellement, on peut prédire que la modification des régimes de perturbation sera l'une des voies privilégiées par lesquelles les changements climatiques agiront sur les forêts. On résume d'abord dans ce chapitre, les effets potentiels des changements climatiques à venir sur les manifestations météorologiques extrêmes, les feux de forêt, les insectes et les maladies. Par ailleurs, les changements climatiques affecteront également les ressources exigées par les arbres (c.-à-d. l'humidité, les éléments nutritifs, la chaleur), l'état des sites et les processus biologiques des organismes individuels. Ces changements auront des répercussions sur la croissance, la mortalité et la régénération; ils exerceront également une pression sur les arbres pour qu'ils s'acclimatent, s'adaptent et migrent. On présente donc dans la suite du chapitre l'influence des changements climatiques sur les processus biologiques, la productivité, la composition et la structure des forêts. Ensuite, on accorde une attention particulière à certaines zones forestières dans lesquelles les facteurs décrits dans les chapitres précédents se combineront, les rendant particulièrement sensibles et

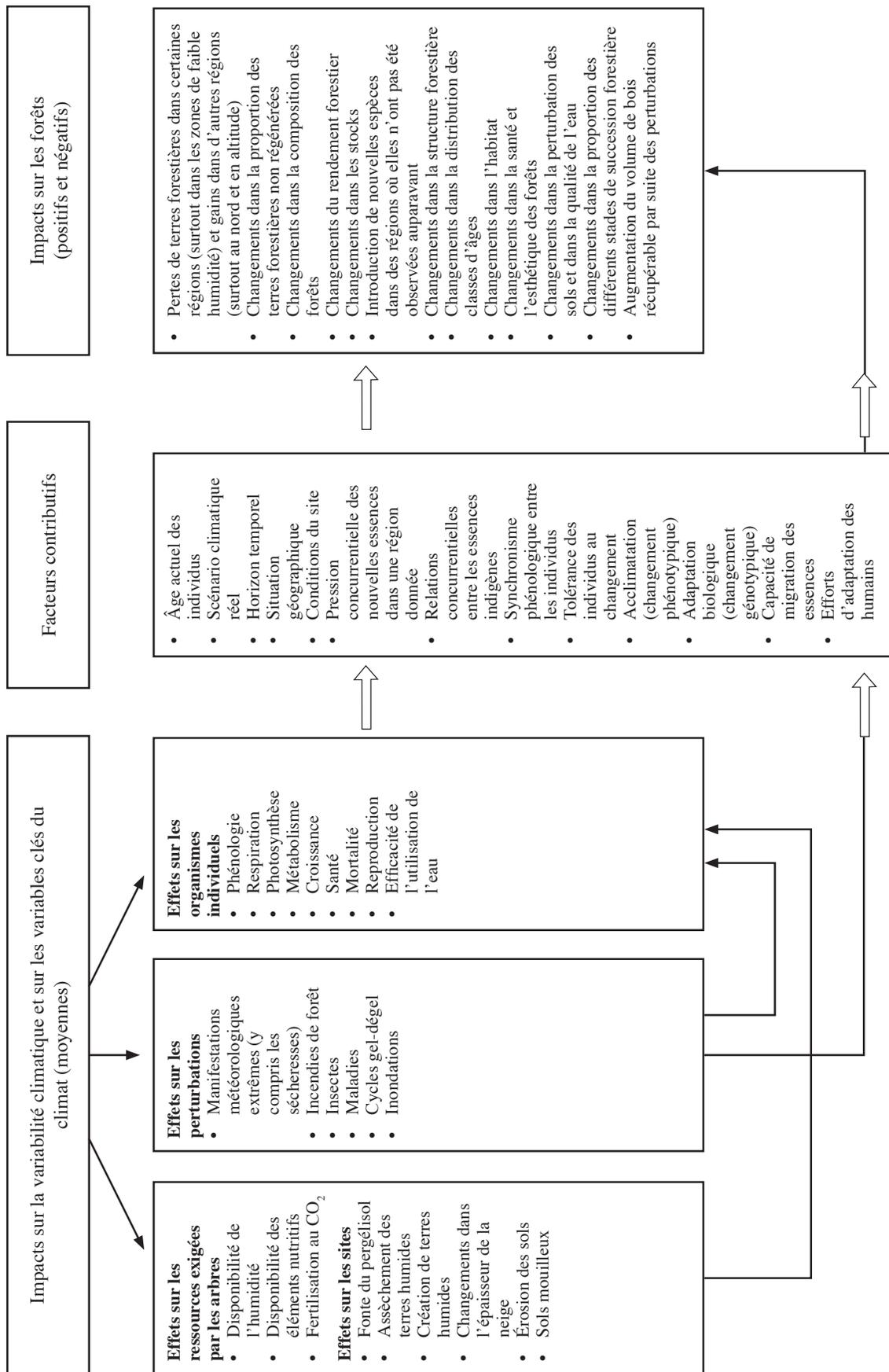


Figure 2. Impacts des changements climatiques sur les forêts.

vulnérables aux changements climatiques. Ce point est suivi d'un examen de la documentation scientifique portant sur l'impact des changements climatiques sur la forêt boréale au Canada. Le chapitre se termine par une description des sources d'incertitude dans la prédiction des impacts.

Manifestations météorologiques extrêmes et variabilité climatique

La hausse du risque associé à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des dérèglements et des manifestations extrêmes des conditions météorologiques a été donnée par le GIEC comme l'une des cinq catégories de raisons de s'inquiéter des changements climatiques à venir (Smith et coll., 2001). (Les quatre autres catégories sont les suivantes : le risque concernant des écosystèmes exceptionnels, la répartition des impacts, le regroupement ou agrégation des impacts et le risque provenant de discontinuités à grande échelle.) Mastrandea et Schneider (2004) ont émis l'hypothèse qu'une augmentation légèrement supérieure à 2 °C de la température moyenne risquerait d'amplifier sérieusement la fréquence des manifestations extrêmes de la météo et du climat. Selon le scénario le plus pessimiste de l'évolution du climat, il est possible que le Canada connaisse dès 2030 une augmentation de 2 °C de la température moyenne (voir la figure RiD.6 dans GIEC, 2007).

Il est probable qu'une atmosphère plus chaude (c.-à-d. contenant plus d'énergie thermique stockée) augmente la fréquence et l'intensité des manifestations extrêmes de la météo (tempêtes) et du climat (sécheresses) (Berz, 1993; Meehl et coll., 2000; Easterling et coll., 2000; Smit et coll., 2000; Smit et Pilosova, 2002). Dans un climat plus chaud, de nombreux phénomènes extrêmes risquent de s'accroître : orages électriques et tempêtes de vent, tempêtes de grêle, précipitations intenses causant des inondations, tornades, ouragans (et tempêtes tropicales), hivers anormalement chauds et périodes chaudes et sèches (menant à des situations de danger d'incendie extrême, des saisons des feux plus longues, des vagues de chaleur et de sécheresses s'étendant sur des mois voire des années).

Graumlich (1993) ainsi que Parmesan et coll. (2000) suggèrent que les manifestations météorologiques extrêmes et la variabilité climatique (et les régimes de perturbations qui en découlent) affectent la croissance et la morphologie des espèces et expliquent en partie la composition et la structure des peuplements. Une modification de ces conditions et des perturbations qui leur sont associées va probablement affecter le biote terrestre de plusieurs façons : elle pourrait forcer les organismes à changer leurs stratégies de reproduction, favoriser les espèces mieux adaptées à la variabilité climatique et aux perturbations, affecter la dynamique des populations et des communautés et altérer les processus de l'écosystème.

Une sécheresse est une manifestation climatique extrême. Comme il a été mentionné, les sécheresses se produisent bel et bien dans les régions forestières du Canada et y affectent les écosystèmes forestiers (Hogg et Bernier, 2005). Le préjudice qu'elles infligent à une forêt donnée dépend des sols, des essences et de l'âge des plantes dans cette forêt, ainsi que de leur durée et de leur gravité (Dale et coll., 2001). Les plantations, les arbres enracinés superficiellement, sensibles à ce fléau, poussant dans des sols à faible rétention d'eau (Spittlehouse, 2003) ou dans des régions déjà peu humides sont particulièrement vulnérables. Toutefois, si une sécheresse est assez longue et prononcée, la plupart des essences indigènes du Canada en seront affectées.

MANIFESTATIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

On prévoit que la progression du réchauffement planétaire augmentera la durée, la fréquence et la gravité des sécheresses (Dale et coll., 2001; Sauchyn et coll., 2003). L'humidité est déjà le facteur limitant qui détermine la limite sud des forêts dans l'Ouest canadien (Hogg et Bernier, 2005). La croissance prévue de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans les régions du centre du continent va exacerber la vulnérabilité des forêts à la limite sud de la zone forestière de l'Ouest canadien (Hogg, 1994; Hogg et Hurdle, 1995; Hogg et coll., 2005; Hogg et Bernier, 2005).

Les tempêtes de vents perturbent aussi considérablement les forêts (Dale et coll., 2001). En fait, les manifestations de vents violents constituent la principale perturbation des forêts feuillues de l'est des États-Unis (Peterson, 2000). La fréquence et l'intensité des fortes tempêtes accompagnées de vents violents (orages, tornades, ouragans et tempêtes tropicales) vont probablement augmenter avec les changements climatiques. Les espèces aux racines peu profondes, les peuplements de faible densité et certains types de structure et d'orientation des peuplements sont particulièrement vulnérables aux vents.

- **La fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes augmenteront fort probablement : orages, tempêtes de vent et de grêle, précipitations intenses, sécheresses, vagues de chaleur et hivers anormalement chauds.**
- **Une augmentation relativement forte du risque associé aux conditions météorologiques extrêmes est possible dès 2030.**
- **L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses sera particulièrement contraignante dans les régions déjà sèches.**

Incendies de forêt

Les principaux facteurs déterminant l'activité du feu sont les conditions météorologiques et climatiques, les caractéristiques du combustible, les agents d'allumage et les activités humaines (y compris la gestion des incendies). Au Canada, les conditions météorologiques et climatiques sont les facteurs prédominants (Flannigan et coll., 2005a, b). On prévoit que la progression du réchauffement fera augmenter les niveaux d'activité du feu dans de nombreux écosystèmes canadiens (Stocks et coll., 1998; Flannigan et coll., 2000; Amiro et coll., 2001, 2004; Flannigan et coll., 2005a, b), particulièrement dans le centre et l'ouest du Canada. Selon Flannigan et coll. (2008), la gestion des incendies dans la forêt circumboréale pourrait basculer dans les 20 prochaines années quand les saisons des feux dépasseront de plus en plus fréquemment les ressources consacrées à la lutte. Le résultat net pourrait être un accroissement relatif de la superficie incendiée, plus grand que l'augmentation correspondante de la gravité des conditions météorologiques propices aux incendies de forêt.

...la gestion des incendies dans la forêt circumboréale pourrait basculer dans les 20 prochaines années...

Flannigan et coll. (2005b) ont calculé pour l'ensemble des écozones modifiées du Canada les effets des changements climatiques futurs sur la moyenne des superficies incendiées. Leur analyse prévoit une augmentation de 74 à 118 % de la superficie incendiée au Canada dans un scénario où la concentration atmosphérique de CO₂ est trois fois plus élevée que le niveau actuel (d'ici environ 2080-2100). Toutefois, il y a une grande variation dans la projection des effets du feu selon l'écozone et, dans certains cas, les résultats comportent des différences significatives selon le modèle de circulation générale (MCG) servant aux projections climatiques. L'étude de Flannigan et coll. (2005b) utilise le Modèle couplé canadien de circulation générale (MCCG1) et le modèle Hadley du Royaume-Uni pour prévoir le climat dans des écozones modifiées. Par exemple, l'étude prévoit pour l'écozone de la Cordillère boréale une augmentation de la superficie moyenne incendiée annuellement de 233 % avec le modèle MCCG1 et de 240 % avec le modèle Hadley. Dans l'ouest de l'écozone du Bouclier boréal, l'augmentation serait respectivement de 67 et 92 %. Dans la moitié est du Bouclier boréal, région plus humide, ce serait respectivement 64 et 74 %. La plus grande divergence des projections selon le modèle climatique se situe dans l'écozone des Plaines boréales où l'augmentation projetée des superficies incendiées est de 9 % pour le modèle MCCG1 et de 245 % pour le modèle Hadley.

Dans leur calcul des futures superficies incendiées, Flannigan et coll. (2005b) n'ont pas pris en considération la fréquence de la foudre ou l'allongement de la saison des feux. Pour cette raison, leurs projections de l'augmentation des superficies incendiées découlant des changements climatiques sont peut-être modérées. Néanmoins, les projections expriment un impact important des changements climatiques sur les

MESSAGES CLÉS

INCENDIES DE FORÊT

- **Les changements climatiques augmenteront les superficies incendiées annuellement dans les forêts.**
- **Il y aura des écarts régionaux dans l'influence des changements climatiques sur les incendies de forêt, des augmentations plus prononcées étant prévues dans les régions ouest et nord du Canada que dans l'Est.**
- **L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies de forêt sera le facteur de changement prédominant dans les écosystèmes forestiers du Canada.**
- **La saison des feux connaîtra un allongement.**

superficies incendiées. La perturbation par le feu pourrait être l'agent dominant des changements climatiques dans les écosystèmes forestiers, éclipsant peut-être les effets directs sur les écosystèmes (Flannigan et coll., 2000). Flannigan et coll. (2005a) font remarquer que « l'écart entre la réussite et l'échec est mince pour les organismes de gestion des incendies [et] que sous un climat plus chaud un nombre disproportionné d'incendies pourraient échapper à l'attaque initiale, entraînant une augmentation beaucoup plus importante des superficies incendiées que l'augmentation correspondante de la gravité des conditions météorologiques propices au feu ». Ils ajoutent : « Cette interaction entre les changements climatiques et le feu est également importante en ce sens qu'elle pourrait éclipser les effets directs du réchauffement planétaire sur la répartition et la migration des espèces végétales. »

Même si les projections de Flannigan et coll. (2005b) concernant la modification des superficies incendiées s'appliquent aux années 2080 à 2100, il est important de souligner qu'on prévoit également des changements dans l'activité du feu au début et au milieu du siècle présent. De fait, comme on l'a déjà mentionné, les changements climatiques récents ont déjà fait augmenter l'activité du feu en forêt. Ainsi, les effets des changements climatiques sur les incendies de forêt et leurs répercussions sur l'aménagement forestier, l'industrie forestière et les collectivités tributaires des forêts ne sont pas seulement une question d'actualité : ils deviendront de plus en plus importants au fil du temps. L'augmentation de l'activité du feu dans un avenir rapproché pourrait affecter les populations humaines de plusieurs façons :

- augmentation du risque d'évacuation et de pertes matérielles dans les collectivités,
- impacts négatifs sur la santé à cause de l'augmentation de la fumée et des particules en suspension dans l'atmosphère,
- augmentation des coûts de la lutte contre les incendies,
- impacts sur l'approvisionnement en bois,
- perturbations ou retards dans les activités de récolte.

Perturbations causées par les insectes et les maladies

Les insectes et les maladies sont d'importants agents de changement et de renouvellement des forêts (Fleming, 2000; Volney et Hirsch, 2005). Jusqu'au milieu du siècle dernier, les forêts canadiennes ont évolué conjointement avec les insectes et les maladies indigènes dans un ensemble relativement stable de paramètres climatiques. Par exemple, les populations d'insectes fluctuent au cours des années selon des cycles relativement prévisibles. Lorsqu'une population d'insecte donnée atteint le sommet de son cycle, il en résulte une infestation ou pullulation. Le climat y est un facteur clé, influant sur la fréquence, l'intensité et la durée des infestations (Fleming et Volney, 1995; Fleming, 1996; Fleming et Candau, 1998; Volney et Fleming, 2000; Harrington et coll., 2001; Boland et coll., 2003; Logan et coll., 2003; Boland et coll., 2004; Candau et Fleming, 2005; Fleming, 2006; Volney et Fleming, 2007; Gray, 2008). Le climat affecte aussi la répartition géographique des diverses espèces d'insectes et de maladies (Harrington et coll., 2001; Juday et coll., 2005; Gray, 2004; Carroll et coll., 2004). Par conséquent, les changements climatiques peuvent influencer à la fois la distribution et l'abondance des insectes et des maladies (Logan et coll., 2003; Carroll et coll., 2004; Volney et Hirsch, 2005). Le réchauffement pourrait avoir un impact positif sur certaines espèces d'insectes si leur aire de distribution est déterminée en partie par la température, si la disponibilité des hôtes n'est pas limitée et si les conditions climatiques influencent la fréquence, l'intensité et la durée des infestations. Cet impact pourrait entraîner des infestations plus fréquentes, plus intenses, plus étendues et de plus longue durée (Fleming et Volney, 1995; Fleming, 1996; Fleming, 2006; Gray, 2008). À leur tour, ces réactions pourraient avoir des impacts négatifs considérables sur les arbres hôtes qui sont mal adaptés à la combinaison du nouveau climat et des attaques plus vigoureuses des insectes. Les forêts sont particulièrement vulnérables parce que les insectes, mobiles et à courts cycles de vie, sont généralement mieux adaptés aux changements climatiques rapides que les arbres hôtes qui sont, eux, relativement stationnaires et longévifs (Parker et coll., 2000).

Le paragraphe précédent brosse un tableau relativement simple de la dynamique des populations d'insectes et de leurs réactions aux changements climatiques. En réalité, cette dynamique est complexe et très difficile à prédire (peut-être beaucoup plus que les

incendies de forêt). La dynamique et les changements non linéaires du climat augmenteront la complexité et l'imprévisibilité des effets sur la dynamique des populations d'insectes. Les températures plus élevées pourraient favoriser directement le

La dynamique et les changements non linéaires du climat augmenteront la complexité et l'imprévisibilité des effets sur la dynamique des populations d'insectes.

développement, la reproduction, la répartition et la migration de nombreuses espèces d'insectes au Canada (Parker et coll., 2000). Toutefois, les diverses espèces d'insectes peuvent avoir une énorme différence de réaction et il reste beaucoup à apprendre sur la réaction individuelle des espèces à l'élévation des températures (Volney et Fleming, 2000). Les changements climatiques auront aussi un impact indirect sur la répartition et l'abondance des insectes. La dynamique de ces populations est régie par l'interrelation complexe et dynamique des facteurs abiotiques (feu, sécheresse, humidité, hydrologie,

maximums et minimums saisonniers des températures, etc.), des facteurs biotiques (parasites, prédateurs, maladies des insectes, concurrents, disponibilité d'arbres hôtes, vulnérabilité des hôtes en raison de l'âge, du passé récent, etc.), de la structure forestière, de l'aménagement forestier ainsi que des programmes de lutte contre les insectes et les maladies. Ces facteurs sont interdépendants et, dans la plupart des cas, eux-mêmes influencés par le climat. En outre, le climat et la météo affectent le synchronisme des insectes et des hôtes (Parker et coll., 2000). Par exemple, l'émergence de la tordeuse des bourgeons de l'épinette se produit à peu près en même temps que l'ouverture des bourgeons sur les arbres (Volney et Fleming, 2007). Les gelées tardives du printemps peuvent tuer les nouveaux bourgeons et ainsi priver de nourriture les insectes émergents.

Étant donné que les changements climatiques sont évolutifs, leur influence sur les relations et interrelations entre les insectes, les maladies, les arbres hôtes et les facteurs connexes changeront continuellement. Toutefois, la complexité des interactions, en aval et en amont, entre les climats, les pathogènes et les écosystèmes forestiers fait en sorte qu'il est impossible de prédire la réaction de pathogènes spécifiques aux climats futurs à des endroits et à des moments précis (Volney, 1996; Parker et coll., 2000; Volney et Hirsch, 2005). Le potentiel de résultats imprévus est très élevé. L'avènement de perturbations inattendues et sans précédent pourraient bien être l'un des impacts les plus importants des changements climatiques sur les forêts canadiennes. Ainsi, les changements climatiques augmentent significativement l'incertitude et les risques de lacunes dans notre capacité d'aménagement forestier durable et dans notre capacité à maintenir la stabilité de l'approvisionnement en bois en provenance des forêts. Des sources d'incertitudes additionnelles seront abordées plus loin.

La tordeuse des bourgeons de l'épinette est un insecte économiquement important au Canada, particulièrement dans les forêts d'épinette et de sapin de l'est du Canada. Gray (2008) a découvert qu'avec les changements climatiques les infestations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dureront plus longtemps et causeront davantage de défoliation. D'autres espèces d'insectes réagissant aux changements du climat pourraient augmenter leurs impacts économiques sur les forêts du Canada : le dendroctone du pin ponderosa (pin), la tenthrède du mélèze (mélèze), le dendroctone de l'épinette (épinette blanche, épinette d'Engelmann, hybrides), la tordeuse du pin gris (pin gris), la tordeuse des bourgeons de l'épinette (sapin baumier et épinette blanche), la spongieuse (feuillus), la livrée des forêts (peuplier) et la tordeuse du tremble (peuplier) (Carroll et coll., 2004;

Gray, 2004; Volney et Hirsch, 2005; Juday et coll., 2005; Régnière et coll., 2005; Fleming, 2006; Gray, 2008). Les dommages causés par les insectes ont des impacts directs sur les arbres, mais également des impacts indirects sur les forêts. Fleming et coll. (2002) ont remarqué une association positive entre les infestations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux de forêt qui se produisent ultérieurement. On peut donc en déduire que ces infestations pourraient augmenter le risque d'incendies.

L'une des grandes préoccupations des aménagistes forestiers, c'est que la tendance soutenue du réchauffement climatique permette au dendroctone du pin ponderosa de s'étendre aux pinèdes grises, à haute valeur économique, de la forêt boréale qui s'étend à l'est des Rocheuses (Carroll et coll., 2004). Depuis toujours l'hôte principal du dendroctone du pin ponderosa est le pin tordu latifolié. Toutefois, cet insecte peut également s'attaquer au pin gris (Cerezke, 1995). L'aire du pin gris étant presque ininterrompue de l'Alberta jusqu'au Nouveau-Brunswick, plusieurs provinces pourraient souffrir de cette infestation accentuée par le progrès du réchauffement planétaire (Parker et coll., 2000; Régnière et coll., 2005). Le dendroctone s'étendrait alors aux écosystèmes de la forêt boréale. Il demeure, toutefois, que de nombreux autres facteurs pourraient limiter l'expansion de cet insecte, par exemple le fait que les peuplements de pin gris dans la forêt boréale sont plus sporadiques que ceux du pin tordu dans le nord de la Colombie-Britannique. On aura des détails supplémentaires en consultant Logan et coll. (2003), Carroll et coll. (2004), Régnière et coll. (2005) et Taylor et coll. (2006).

MESSAGES CLÉS

INSECTES ET MALADIES

- **Il y a un potentiel d'augmentation de la superficie, de la durée et de l'intensité des infestations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, du dendroctone de l'épinette, de la livrée des forêts et de la tordeuse du tremble.**
- **Il est probable que le statut de certains insectes passera de « relativement inoffensif » à « sévèrement destructeurs ».**
- **Il y aura de plus en plus d'incertitude entourant le moment et l'ampleur des grandes infestations d'insectes**
- **Il est possible que le dendroctone du pin ponderosa devienne une espèce endémique dans les régions forestières boréales, avec la possibilité d'infestations périodiques dans les forêts de pin gris.**

Les effets sur les processus physiologiques

Quel que soit le site forestier, les changements climatiques apporteront des modifications au microclimat moyen, lesquelles auront des conséquences sur les processus physiologiques de la photosynthèse et de la respiration des plantes, de même que sur le succès de la régénération, la survie des espèces et la production primaire (Colombo et Buse, 1998; Kirschbaum, 2000). La température, l'humidité, la disponibilité des éléments nutritifs et les concentrations atmosphériques de CO₂ ont une incidence sur la productivité primaire nette des arbres (Aber et coll., 2001) et tous risquent d'être modifiés avec les changements aux régimes climatiques. Dans certaines régions, notamment aux écotones (zones de transition entre deux écosystèmes distincts) et autres limites de végétation, de petits changements de température et de précipitation peuvent

grandement affecter le succès de la reproduction, de la croissance et de la compétitivité d'une essence par rapport à une autre, ainsi que le taux de survie (Rehfeldt et coll., 1999; Lemmen et Warren, 2004). Certaines espèces (et génotypes au sein de ces espèces) sont adaptées à des domaines environnementaux limités et sont ainsi probablement plus sensibles aux petits changements survenant dans le climat et d'autres facteurs environnementaux. L'adaptation génétique aux changements du climat, qui permettrait aux espèces de bénéficier pleinement des conditions plus chaudes, risque d'exiger plusieurs générations (et donc de nombreuses décennies, sinon plus) (Beaulieu et Rainville, 2005). Dans l'intérim, le stress des arbres est une réelle possibilité qui réduirait la productivité et pourrait entraîner un dépérissement modéré ou même une mortalité importante (c.-à-d. que les conditions environnementales locales pourraient changer plus rapidement que le rythme auquel la plupart des espèces d'arbres peuvent se régénérer et produire des graines porteuses de génotypes nouveaux et mieux adaptés). Le reste de ce chapitre examine comment les arbres pourraient être affectés par une modification de la température, de l'humidité, des éléments nutritifs et des concentrations atmosphériques de CO₂.

La productivité primaire nette est l'une des mesures clés de la croissance des plantes. Il s'agit de la quantité nette des produits de la photosynthèse après déduction des ressources consommées par la respiration des plantes (Roy et Saugier, 2001). Elle est calculée en unités de biomasse produites par unité de superficie par unité de temps (par ex. grammes par mètre carré par année). Or, la réponse des plantes à la température est hyperbolique. Une modification de la productivité primaire nette des plantes en réaction à l'augmentation de la température peut donner des résultats positifs (si les températures courantes sont limitantes ou inférieures à la température optimale de la plante [c.-à-d. qu'après l'augmentation de la température, les produits de la photosynthèse excèdent toujours les pertes dues à la respiration]) ou négatifs, si l'augmentation de la température cause la mort des tissus ou entraîne une situation où les produits consommés dans le processus de respiration des plantes excèdent ceux qui sont créés par la photosynthèse (Aber et coll., 2001; Baldocchi et Amthor, 2001; Amthor et Baldocchi, 2001). L'élévation de la température pourrait également donner lieu à une saison de croissance plus longue. Mais l'allongement de la saison de croissance peut à son tour avoir des effets positifs ou négatifs sur la productivité primaire nette au cours d'une année. Par exemple, si l'eau et les éléments nutritifs ne sont pas limitants et que la température est inférieure au seuil optimal, une saison de croissance plus longue aura des effets positifs sur la productivité primaire nette au cours d'une année donnée. Cependant, si l'augmentation des températures fait en sorte que le rythme respiratoire est plus élevé que le rythme de photosynthèse, alors une saison de croissance plus longue pourrait amplifier le déclin de la productivité primaire nette (Aber et coll., 2001).

La plupart des projections du climat suggèrent que la configuration des précipitations changera dans une certaine mesure, variant selon les régions et les saisons, soit dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution selon tel ou tel modèle climatique ou scénario d'émission de gaz à effet de serre. Quand les précipitations sont combinées aux projections d'augmentation de la température (qui augmentera les besoins en eau pour l'évaporation), on prévoit que certaines régions deviendront plus sèches en moyenne. La modification de la productivité des forêts viendra des variations de la disponibilité en eau durant la saison de croissance.

La capacité de rétention d'eau des sols est un facteur crucial pour déterminer la quantité d'eau disponible pour l'assimilation par les plantes. Selon des recherches effectuées en Saskatchewan, les différences de capacité de rétention en eau peuvent affecter la production de biomasse en forêt et la rendre fortement sensible au réchauffement et à l'assèchement du climat (Price et coll. 1999). Johnston (2001) a découvert que la productivité sur les sites à faible capacité de rétention en eau (réserve de moins de 100 mm) va probablement diminuer dans tous les scénarios climatiques dont la projection utilise le MCCG1. Sur les sites qui ont une capacité moyenne de teneur en eau disponible (réserve de 100 à 200 mm), la productivité augmenterait initialement, selon les projections, en réaction aux températures plus élevées, mais diminuerait au cours des décennies suivantes. Cependant, les sites ayant une capacité élevée de rétention en eau (réserve de plus de 200 mm) permettraient à la productivité des forêts de s'accroître durant le 21^e siècle. En effet, les réserves en eau du sol seraient alors suffisantes pour soutenir cette croissance accrue (Johnston, 2001). Price et coll. (1999) ont obtenu des résultats similaires avec une version modifiée du modèle paramétrique FORSKA de Prentice et coll. (1993) en utilisant les changements prescrits aux températures et aux précipitations actuelles pour de nombreux sites le long d'un transect s'étendant entre le sud de l'Alberta et le nord du Manitoba. De la même façon, Johnston et Williamson (2005) ont établi que la productivité de l'épinette blanche en Saskatchewan diminuait d'environ 20 % sur les sites à faible capacité de rétention en eau en situation de sécheresse.

...les différences de capacité de rétention en eau peuvent affecter la production de biomasse en forêt et la rendre fortement sensible au réchauffement et à l'assèchement du climat...

Avec certaines réserves, on peut prétendre que l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère sera bénéfique pour la croissance des arbres (Norby et coll., 2005). Reich et coll. (2006) ont découvert que la végétation réagit positivement à une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère si de l'azote est également disponible. Une concentration enrichie de CO₂ dans l'atmosphère stimule la photosynthèse et augmente l'efficacité avec laquelle les arbres utilisent leurs ressources en eau (Baldocchi et Amthor, 2001). Dans le contexte d'une augmentation de la concentration de CO₂, les plantes peuvent maintenir des rendements similaires ou plus élevés de photosynthèse avec une conductance stomatique plus faible (Baldocchi et Amthor, 2001). De nombreux travaux de recherche, en commençant par le travail avant-gardiste de Farquhar et de ses collaborateurs au début des années 1980, ont démontré que c'est essentiellement le niveau de photosynthèse qui gouverne la conductance stomatique (par ex. Wong, 1979; Farquhar et coll., 1980). Ainsi, le ratio d'eau transpirée par rapport à la consommation de CO₂ (connu comme étant l'efficacité d'utilisation de l'eau) va augmenter à titre de réaction initiale à une augmentation de la concentration ambiante de CO₂ (Long et coll., 2004). Cette augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau pourrait être particulièrement importante sur les sites où l'eau est restreinte, permettant aux arbres de poursuivre leur croissance là où ils seraient, autrement, sévèrement limités sous les niveaux actuels de CO₂ (Aber et coll., 2001). Gitay et coll. (2001) ont signalé qu'une concentration élevée de CO₂ augmente généralement l'efficacité d'utilisation de l'eau, mais que l'ampleur de la réaction varie selon l'âge des arbres. De nombreux chercheurs ont découvert que la réaction initialement positive diminue au fil du temps puisque les plantes s'acclimatent aux concentrations plus élevées de CO₂ (Gitay et coll., 2001).

Plusieurs expériences d'enrichissement de l'air libre en dioxyde de carbone (Free-Air CO₂ Enrichment, FACE) où de jeunes peuplements sont exposés à des niveaux élevés de CO₂ (typiquement le double des niveaux préindustriels) sont actuellement en cours (Norby et coll., 2005). Aucune de ces expériences n'a été réalisée au Canada, mais deux sites aux États-Unis ont une certaine pertinence pour le Canada : une tremblaie près de

Une concentration élevée de CO₂ pourrait mener à une augmentation à court terme de l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la végétation.

Rhinelanders dans le nord du Wisconsin, et une plantation de pin à encens à Duke Forest en Caroline du Nord. Les résultats issus du site où se trouvent les pins démontrent que l'augmentation initiale de la productivité primaire nette est relativement de courte durée (3 à 4 ans) et qu'elle se produit quand l'eau et les éléments nutritifs du sol sont relativement abondants (DeLucia et coll., 1999; Oren et coll., 2001). Dans l'étude FACE effectuée sur le tremble, les arbres ont été exposés au CO₂, au CO₂

combiné à de l'ozone (O₃) et à de l'ozone seul. La productivité primaire nette a augmenté lors du traitement qui utilisait uniquement du CO₂. Mais lorsque les arbres ont été exposés au CO₂ combiné à de l'ozone, leur productivité primaire nette n'était pas très différente de celle des arbres non traités. Long et coll. (2004) ont effectué une méta-analyse de la croissance des plantes avec une série de sites FACE à travers le monde. Ils ont constaté que les arbres réagissent davantage à l'augmentation des concentrations de CO₂ que d'autres types de végétation : leur productivité primaire nette augmentait en moyenne d'environ 20 %. Norby et coll. (2005) ont trouvé que la productivité primaire nette dans l'ensemble des sites FACE en Europe et aux États-Unis montrait une augmentation moyenne assez stable de 23 % ± 2 % lorsqu'on doublait les concentrations préindustrielles de CO₂. D'autres travaux effectués par Körner et coll. (2005) démontrent que la productivité primaire nette des arbres forestiers matures augmente peu lorsque les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère sont élevées. On peut en conclure que le volume maximal qu'un peuplement peut atteindre sur un site donné ne serait pas affecté mais que la période de temps qu'il prendrait pour l'atteindre serait réduit.

La modification de la disponibilité relative des éléments nutritifs essentiels pour les végétaux est une autre façon dont les changements climatiques affecteront les arbres dans les forêts du Canada. L'azote joue un rôle clé dans la croissance des arbres et des plantes dans les forêts septentrionales. Toutefois, la croissance des plantes dans les forêts boréales septentrionales est limitée par le manque d'azote disponible (Näsholm et coll., 1998). Ste-Marie et Houle (2006) ont découvert que les microorganismes du sol dans les pessières à épinette noire sont limités en azote principalement à cause de la brève présence de l'azote inorganique et du faible débit de minéralisation de l'azote. Des études démontrent que la réaction des plantes aux changements climatiques sera fortement orientée par l'influence de ces changements sur la disponibilité de l'azote inorganique (Reich et coll., 2006). Or, cela n'est pas souvent pris en considération dans les prédictions des effets des changements climatiques sur la croissance des forêts.

Les changements climatiques pourraient modifier de deux façons la disponibilité de l'azote inorganique pour les arbres. Premièrement, la modification des données de la pluviosité pourrait jouer un rôle étant donné que le couvert des conifères peut intercepter jusqu'à 60 % de l'azote inorganique apporté par la pluie (Houle et coll., 1999). Deuxièmement, l'augmentation de la température du sol pourrait accroître la

décomposition de la matière organique, augmentant de ce fait l'azote disponible pour les plantes (Van Cleve et coll., 1990; Kirschbaum, 1995; MacDonald et coll., 1995; Rustad et coll., 2000, 2001; Verburg, 2005).

Productivité

Il est difficile de déterminer les effets nets des changements climatiques sur la croissance des arbres étant donné que, comme on l'a déjà mentionné, il y a plusieurs facteurs en interaction (Colombo et Buse, 1998; Girardin et coll., 2008; O'Neill et coll., 2008). Dans l'ensemble, le facteur le plus déterminant de la croissance est probablement la teneur en eau disponible dans les sols. Généralement, il existe un potentiel de diminution de la productivité des forêts dans les régions qui sont actuellement sèches, et un potentiel d'augmentation dans les régions qui reçoivent suffisamment de précipitations durant la saison de croissance. La partie sud du nord-ouest et du nord-est de l'Ontario, le sud de la région boréale dans l'Ouest canadien, et les régions chaudes et sèches de l'intérieur méridional de la Colombie-Britannique sont des régions qui risquent de subir une réduction des précipitations durant la saison de croissance ainsi qu'une augmentation de l'évaporation. Plus au nord, où les réserves d'eau sont actuellement suffisantes pendant la saison de croissance,¹ il est possible qu'une augmentation de la croissance soit observée quand ces forêts actuellement limitées par le froid connaîtront des conditions plus chaudes accompagnées de concentrations plus élevées de CO₂ dans l'atmosphère. Il est à noter que les gains potentiels de productivité résultant de l'amélioration des conditions physiologiques de croissance pourraient être atténués, comme on l'expliquera plus loin, par la non-adaptation des géotypes locaux au nouveau climat.

Juday et coll. (2005) ont résumé plusieurs études qui ont porté sur l'influence de la température et des précipitations sur la croissance des arbres. Une de ces études utilise un transect nord-sud de 1000 km au centre de la Sibérie, lequel s'étend de la limite nord des arbres jusqu'à l'écotone de la steppe forestière et qui représente ainsi un large éventail de températures et de conditions d'humidités traversant plusieurs écozones. Il s'agit d'un concept similaire à l'étude « Boreal Forest Transect Case Study (BFTCS) du Service canadien des forêts (Price et Apps, 1995), qui comprend des études théoriques et expérimentales effectuées au cours de la dernière décennie et qui fait des recoupements solides avec l'Étude de l'atmosphère et des écosystèmes boréaux (BOREAS) de 1994-1999 et les expériences menées depuis 1998 aux Sites de recherche et de surveillance des écosystèmes boréaux (BERMS) dans le cadre de Fluxnet-Canada. Les deux projets contribuent à un projet stratégique du PIGB (Programme international Géosphère-Biosphère) et du Programme de recherche sur les transformations planétaires et les écosystèmes terrestres (GCTE). Ces études confirment que les étés plus chauds stimulent la croissance dans les régions froides septentrionales. Les effets du réchauffement des conditions sont moins importants dans les régions centrales, dans la mesure où l'humidité n'est pas limitative, tandis qu'ils sont indirectement négatifs dans le Sud. D'un autre côté, les effets d'une augmentation des précipitations sont bénéfiques dans le Sud

Les étés plus chauds stimulent la croissance dans les régions froides septentrionales mais moins importants dans les régions centrales.

¹ Elles vont probablement demeurer les mêmes selon la plupart des scénarios de modélisation de la circulation.

(particulièrement au printemps), mais ils ont peu d'avantages plus au nord. Le climat qui favorise le plus la croissance dans l'écotone de la steppe forestière méridionale du centre de la Sibérie semble être un printemps et un début d'été frais et pluvieux suivant un automne frais l'année précédente.

Généralement, les génotypes d'espèces particulières sont étroitement adaptés au climat dans lequel ils vivent. Cela explique la pratique actuelle voulant que le matériel de renouvellement (graines et plants) soit utilisé généralement dans la même région que son lieu d'origine. Toutefois, la maxime « vive les produits locaux » pourrait ne pas convenir à l'époque des changements climatiques (Wang et coll., 2006). Différents auteurs ont étudié les impacts potentiels des changements climatiques sur les génotypes locaux. Ils ont examiné les effets qu'on obtient sur la croissance quand des graines ou des plants d'une espèce provenant de climats différents (c.-à-d. des provenances différentes) sont implantés dans un endroit donné (ou réciproquement, lorsque des graines et des plants de même provenance sont utilisés dans des régions où le climat est différent).

L'implantation d'un génotype particulier dans un climat différent de son climat d'origine peut avoir d'importantes conséquences (O'Neill et coll., 2008). Par exemple, Carter (1996) a comparé la croissance du sapin baumier, du mélèze, de l'épinette blanche et du pin gris

de même provenance qui poussaient sur un site de l'est de l'Amérique du Nord où la température moyenne annuelle excédait d'environ 4 °C celle de leur région d'origine. La productivité du pin gris était modérément plus faible alors que celle des autres essences était significativement plus faible sur le site aux températures élevées. Andalo et coll. (2005) ainsi que Beaulieu et Rainville (2005) ont effectué une expérience similaire sur des génotypes d'épinette blanche au Québec. Ils ont découvert que lorsque des pousses sont transplantées dans des régions où la

L'implantation d'un génotype particulier dans un climat différent de son climat d'origine peut avoir d'importantes conséquences .

température moyenne est plus élevée d'environ 4 °C que la température moyenne du lieu d'origine, et que les précipitations y sont plus élevées d'environ 10 %, leur productivité diminue de manière significative. Savva et coll. (2007) ont effectué plusieurs expériences sur des provenances de pin gris et démontré que lorsque des arbres provenant de régions plus au nord étaient plantés sur un site à Petawawa, en Ontario (ce qui simule les effets du réchauffement général sur les génotypes), leur croissance radiale était réduite. Rehfeldt et coll. (2004) ont postulé qu'étant donné que les espèces seront incapables de suivre le rythme des changements climatiques par la migration, la sélection et le flux génétique, il faudra l'intervention humaine sous la forme d'une redistribution des génotypes pour s'assurer d'assortir les « génotypes » au « climat qui leur convient le mieux ». Ces constatations ont des répercussions importantes pour la planification du reboisement, le transfert des semences et l'aménagement forestier. La productivité potentielle pourrait diminuer dans certaines régions et augmenter dans d'autres. Toutefois, étant donné le long décalage d'adaptation pour les arbres longévifs, l'intervention humaine sous forme de transfert de semences pourrait s'avérer nécessaire pour éviter les déclins de productivité et exploiter les gains potentiels. Le transfert de semences d'une zone climatique actuelle à une autre nous assure que les arbres seront mieux adaptés aux conditions environnementales qu'ils connaîtront à l'arrivée des changements climatiques (O'Neill et Simpson, 2004; Beaulieu et Rainville, 2005; Alberta Forest Genetics Resources Council, 2007; Savva et coll., 2007; O'Neill et coll., 2008).

L'important dans ce débat, c'est de noter qu'à l'échelle régionale et locale les changements climatiques auront des effets multiples, dynamiques et, dans certains cas, concurrentiels dans la transformation qu'ils apporteront au potentiel de productivité des sites. En bout de ligne, les effets pourraient aussi bien être positifs ou négatifs, selon l'endroit et l'année de prédiction. Les techniques traditionnelles pour l'estimation de la croissance et du rendement s'appuient sur une méthode empirique faisant appel au remesurage de parcelles-échantillons. L'hypothèse fondamentale veut que le climat local ne change pas au cours de la rotation naturelle d'un peuplement et que la croissance historique sur un site soit représentative de la croissance future. Or, cette hypothèse pourrait bien ne plus être valable (O'Neill et coll., 2008). Il pourrait ainsi être nécessaire d'adopter de nouvelles approches pour évaluer la croissance et le rendement des forêts. Les approches adéquates feront probablement appel à des modèles fondés sur les processus ou des modèles empiriques de croissance des peuplements dans lesquels on peut ajouter des facteurs de sensibilité au climat à des estimations de croissance tirées de modèles de rendement traditionnels calibrés avec des données de peuplements locaux. Il faudra également tenir compte des différences d'une population à l'autre dans cette nouvelle modélisation des taux de croissance, particulièrement là où les changements climatiques produiront une population mal adaptée (O'Neill et coll., 2008). Cependant, étant donné la variabilité et l'incertitude grandissante des projections de croissance, il pourrait être nécessaire d'y inclure des analyses statistiques formelles liées en outre aux analyses d'approvisionnement en bois.

Une analyse récente effectuée par Girardin et coll. (2008) démontre que différentes approches des modèles de projections peuvent produire des résultats divergents en termes d'impact des changements climatiques sur un site en particulier. Leur étude cherche à déterminer l'impact d'un

MESSAGES CLÉS

PRODUCTIVITÉ

- **Il est possible que la productivité augmente dans les régions nordiques au climat relativement froid et humide, et qu'elle diminue dans les régions du sud relativement chaudes et sèches.**
- **Les géotypes locaux sont étroitement adaptés au climat local actuel de leur région; ils seront donc stressés par les changements climatiques et pourraient bien être incapables de s'acclimater, de s'adapter ou de migrer au rythme du déplacement des niches climatiques.**
- **L'intervention humaine sous la forme d'une redistribution des géotypes (par ex. par le transfert de semences) pour tenter de les jumeler aux climats futurs leur convenant le mieux, pourrait réduire les pertes de productivité et produire les gains potentiels.**
- **Les changements climatiques signifient que l'estimation de la croissance et du rendement par les approches empiriques traditionnelles — fondées sur le remesurage des parcelles-échantillons — ne pourront peut-être plus appuyer les analyses d'approvisionnement en bois parce que les conditions historiques ne correspondront plus à celles de l'avenir.**
- **Les estimations de croissance et de rendement de l'avenir pourraient gagner en précision avec des projections faites à partir de modèles fondés sur les processus, mais enrichis d'estimations empiriques. Toutefois, même avec ces méthodes de projections améliorées, l'incertitude et la variabilité s'accroîtront dans les projections des volumes de bois.**

climat présentant des concentrations de CO₂ deux fois plus élevées que celles que l'on connaît actuellement, en appliquant la deuxième génération du MCCG (Modèle couplé canadien de circulation générale) au pin gris, au tremble et à l'épinette noire dans le parc provincial du mont Duck près de Swan River, au Manitoba. Avec les méthodes empiriques, leurs résultats faisaient état d'une diminution de l'accroissement radial alors que les méthodes fondées sur les processus donnaient une augmentation de la productivité primaire nette. Ainsi, la modélisation peut donner des résultats contradictoires.

Ce qu'on peut en conclure, c'est qu'il faut faire appel à une variété de modèles et d'approches de modélisation pour évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur la productivité dans une région donnée. Les résultats des projections seront probablement ambigus et parfois contradictoires. Étant donné l'importance de la planification à long terme en aménagement forestier, l'incertitude entourant les projections de croissance et de rendement sous le régime des changements climatiques est l'un des défis fondamentaux auxquels les forestiers devront faire face dans l'établissement des plans et des stratégies d'adaptation.

Composition, distribution et structure des écosystèmes forestiers du Canada

Au fil du temps, les changements climatiques apporteront des bouleversements dans la composition forestière et la distribution des espèces, ainsi que dans la répartition des classes d'âge et la structure des écosystèmes (Hebda, 1998; Li et coll., 2000; Kirschbaum, 2000; Chuine et coll., 2004; Hamman et Wang, 2006; McKenney et coll., 2007; Aitken et coll., 2008). Les écosystèmes seront modifiés par l'entremise de plusieurs facteurs/processus, notamment les effets physiologiques (présentés précédemment) (Kirschbaum, 2000); le développement de nouvelles conditions locales affectant la floraison, la pollinisation, la grenaison et la compétitivité (Singh et Wheaton, 1991); les invasions de nouvelles espèces (Dale et coll., 2001); les différences dans la capacité pour chaque espèce de s'acclimater, s'adapter ou migrer (Aitken et coll., 2008); et la redistribution spatiale et temporelle des agents perturbateurs. Les espèces qui réussiront le mieux à s'adapter ou à concurrencer les autres, lors d'un changement de climat, sont celles qui ont une grande tolérance physiologique aux conditions climatiques, qui peuvent réaliser leur cycle de vie sur de courtes périodes et qui ont des mécanismes de dissémination efficaces leur permettant de trouver de nouvelles niches et de migrer relativement rapidement (Kirschbaum, 2000; Gray, 2005; Varrin et coll., 2007).

Au fur et à mesure que le climat continuera de changer, certaines essences vont s'acclimater ou s'adapter aux nouvelles conditions alors que d'autres ne le feront pas (Gray, 2005; Aitken et coll., 2008).² Un changement rapide du climat (c.-à-d. un rythme qui excède la tolérance des espèces, leur capacité à s'acclimater [changement phénotypique], ou à s'adapter [changement génotypique]) signifie que les espèces ou génotypes actuels ne répondront plus aux conditions climatiques locales (Gray, 2005). Par le fait même, de nouvelles espèces ou différents génotypes s'en trouveront favorisés dans une région donnée. Comme on l'a décrit dans les paragraphes précédents, il pourrait alors y avoir une certaine réduction initiale de la productivité, mais à plus long terme, il se produirait une substitution des essences poussant dans cette région.

² Silvertown (1998) définit la capacité d'organismes individuels, y compris les plantes, à répondre à des stimuli environnementaux durant leur vie comme étant la plasticité phénotypique.

Comme on l'a déjà évoqué, la fréquence et l'intensité des perturbations risquent d'augmenter en raison des changements climatiques (Dale et coll., 2001). Les taux de perturbation plus élevés réduiront l'âge moyen des forêts et par conséquent le volume des peuplements (Rothman et Hebert, 1997). Cette hausse des perturbations pourrait aussi provoquer des changements dans la composition et la structure des forêts (Li et coll., 2000). Par exemple, elle aura tendance à favoriser les espèces pionnières, comme le peuplier faux-tremble et le pin gris (Thompson et coll., 1998). Les changements climatiques auront également pour effet de modifier la dimension moyenne des parcelles, de réduire la superficie des forêts anciennes, d'augmenter le taux de disparition des espèces locales et d'élargir les paysages forestiers où les écosystèmes s'adaptent activement aux nouvelles conditions (Thompson et coll., 1998; Li et coll., 2000; Hansen et Dale, 2001).

Les recherches de Brooks et coll. (1998), de Malcolm et coll. (2002) et de Juday et coll. (2005) donnent à penser que les espèces arborescentes sont plus susceptibles de répondre individuellement aux changements climatiques, avec comme conséquence que les biomes et les écosystèmes ne changeront en unités cohérentes (Hebda, 2006). Les gammes de conditions climatiques optimales pour les diverses espèces vont probablement changer sur deux plans ; latitude et altitude. Étant donné la vitesse du réchauffement prévu par plusieurs modèles généraux de circulation, la modification des habitats favorables sur le plan climatique se produira plus rapidement que la capacité de migration de la plupart des espèces (Weber et Flannigan, 1997; Parker et coll., 2000; Price et coll., 2001; Malcolm et coll., 2002; Neilson et coll., 2005; Aitken et coll., 2008). McKenney et coll. (2007), par exemple, ont estimé, qu'en moyenne, l'enveloppe climatique des principales espèces en Amérique du Nord se déplacera de 330 km (en supposant l'absence de dispersion) à 700 km (en supposant une dispersion maximale) vers le nord d'ici 2070-2100. Mais on estime la vitesse moyenne de migration naturelle des plantes à environ 50 km par siècle (McKenney et coll., 2007).

MESSAGES CLÉS

COMPOSITION DES FORÊTS
ET DISTRIBUTION DES
ESSENCES

- **Pour la plupart des espèces, les habitats favorables sur le plan climatique se déplaceront vers le nord et monteront en altitude.**
- **La vitesse de déplacement des habitats favorables sur le plan climatique excédera considérablement la capacité de migration des espèces arborescentes.**
- **De nouvelles espèces pourraient s'implanter sur un site donné, mais comme les espèces actuelles ont l'avantage de l'occupation du terrain, il pourrait y avoir un décalage entre la modification du climat local et celle de la composition des forêts.**
- **Près des zones de transition actuelles entre la forêt et la prairie, les régions forestières seront converties en prairie.**
- **L'aire des espèces adaptées aux climats chauds et secs s'étendra aux régions qui sont actuellement occupées par des espèces mieux adaptées aux climats frais et humides.**
- **L'augmentation des perturbations signifie que les espèces pionnières seront favorisées, que les peuplements anciens deviendront moins nombreux, que l'âge moyen des forêts va s'abaisser et que les volumes marchands moyens vont décroître.**

Les conditions du sol (c.-à-d. la capacité de rétention en eau et la disponibilité des éléments nutritifs) pourraient faire obstacle à la migration vers le nord de certaines espèces. Les conditions nécessaires de fertilité du sol varient selon les essences : à titre d'exemple, les

...la modification des habitats favorables sur le plan climatique se produira plus rapidement que la capacité de migration de la plupart des espèces.

forêts du sud-est du Canada (p. ex. érable à sucre) ont un plus grand besoin d'éléments nutritifs que les forêts septentrionales (érable à sucre > sapin baumier > épinette noire). Bien que les restrictions en éléments nutritifs dans les sols risquent de limiter la migration de certaines espèces d'arbres vers le nord, l'élévation des températures pourrait améliorer la disponibilité des éléments nutritifs et augmenter le taux de renouvellement de la matière organique dans le sol (Reich et coll., 2006), ce qui pourrait compenser les limites nutritives des sols nordiques.

On trouvera dans le chapitre suivant de plus amples informations sur les changements prévus à la composition forestière selon les régions.

Zones sensibles au climat

Les impacts des changements climatiques sur la composition, la structure et la productivité des forêts du Canada seront d'abord visibles (et plus prononcés) aux écotones (c.-à-d. dans les zones de transition entre les unités écologiques) ainsi que dans les milieux forestiers insulaires (voir les paragraphes portant sur les provinces des Prairies dans le chapitre suivant). En effet, les espèces sont souvent plus sensibles dans ces zones aux changements survenant dans les facteurs limitatifs (Parker et coll., 2000). Ces zones comprennent les parties méridionales, exposées à la sécheresse, des forêts boréales de l'Ouest canadien (Hogg et Bernier, 2005), les écosystèmes des forêts alpines (Luckman et Kavanagh, 2000; Beniston, 2003; Danby et Hik, 2007), la limite nord des arbres (MacDonald et coll., 1998; Juday et coll., 2005), la rencontre de la forêt boréale et de la forêt tempérée dans le sud de l'Ontario et du Québec (Thompson et coll., 1998; Parker et coll., 2000; Gray, 2005); l'interface de la prairie et de la forêt dans les zones sèches du sud de la Colombie-Britannique (Hebda, 2007), et les milieux forestiers insulaires à l'intérieur de l'écozone des Prairies (Henderson et coll., 2002). Les enjeux des changements climatiques liés à ces zones forestières sensibles au climat sont étudiés davantage plus loin dans ce rapport.

La forêt boréale

La proportion de la forêt boréale circumpolaire présente au Canada est la deuxième en importance après celle de la Russie (Shvidenko et Apps, 2006). La sensibilité des forêts boréales aux changements climatiques est potentiellement élevée (Singh et Wheaton, 1991; Rizzo et Wiken, 1992; Monserud et coll., 1993; Neilson, 1993; Price et Apps, 1995; Weber et Flannigan, 1997; Stewart et coll., 1998; Price et coll., 1999; Shvidenko et Apps, 2006; Soja et coll., 2007). Le deuxième rapport d'évaluation du GIEC conclut que la forêt boréale est probablement plus vulnérable aux changements climatiques que les forêts tempérées et tropicales (Houghton et coll., 1996). Kirilenko et coll. (2000) laissent entendre que les changements climatiques provoqueront une importante diminution de l'étendue de la forêt boréale circumpolaire d'ici 2100.

Dans la forêt boréale de l'Amérique du Nord, les espèces importantes sont l'épinette blanche, l'épinette noire, le mélèze laricin, le sapin baumier, le pin gris, le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble et le peuplier baumier (Volney et Hirsch, 2005). Ces essences se trouvent à la fois dans des peuplements purs et dans des peuplements mixtes, mais la forme et la structure des arbres individuels, des peuplements et des paysages forestiers varient grandement selon le climat, le site, les caractéristiques du sol et d'autres conditions locales. Les perturbations ont une influence importante sur la composition et la structure des forêts. Par exemple, dans les plaines boréales centrales, les incendies qui ravagent des peuplements libèrent des zones pour l'établissement d'espèces pionnières comme le tremble (sur les sites relativement humides) et le pin gris (sur les sites secs, bien drainés et sablonneux) (Volney et Hirsch, 2005). L'épinette blanche, plus tolérante, s'implante en sous-étage des peuplements de tremble et forme, à la longue, un peuplement mixte comportant à la fois des composantes feuillues et résineuses. Au fil du temps, l'épinette blanche devient dominante. Sur les sites relativement secs, l'épinette noire ou le tremble suivront souvent le pin gris pour former une communauté mixte. Ces progressions sont perturbées périodiquement par des infestations d'insectes qui créent des ouvertures dans le couvert des peuplements ou qui causent parfois la mortalité complète des peuplements. Il s'agit là d'interactions importantes entre les infestations d'insectes et les feux dans la forêt boréale puisque ces attaques d'insectes induisent souvent une quantité élevée de matière combustible pendant une certaine période (Flemming et coll., 2002; Volney et Hirsch, 2005).

L'épinette blanche et l'épinette noire sont des espèces commerciales importantes dans la majeure partie de la forêt boréale du Canada, mais elles pourraient aussi être les espèces les plus vulnérables au réchauffement du climat. Selon certaines études, des conditions généralement plus chaudes réduiront la couverture surfacique nette de ces deux espèces d'épinette dans la forêt boréale canadienne. Brooks et coll. (1998) ont découvert qu'une augmentation de la température réduit la croissance radiale annuelle de l'épinette noire autant dans le nord que dans le sud de l'étude BOREAS. Lenihan et Neilson (1995) ont simulé la réaction de l'épinette blanche et de l'épinette noire du Canada (ainsi que d'autres espèces) dans deux scénarios climatiques, obtenant une réduction de 20 à 30 % de la superficie des forêts où elles étaient les essences dominantes. Par ailleurs, Burton et Cumming (1995) ont modélisé l'impact des changements climatiques sur les espèces arborescentes dans les régions boréales de la Colombie-Britannique, pour découvrir que les peuplements d'épinette blanche et d'épinette noire seraient probablement remplacés par le pin au fil du temps. Hamann et Wang (2006) prévoient une réduction de 52 % de l'abondance (mesurée en pourcentage de la couverture végétale) de l'épinette blanche (en se fondant sur l'habitat potentiel) en Colombie-Britannique, et une réduction de 14 % de l'abondance de l'épinette noire d'ici 2055.

L'épinette blanche et l'épinette noire être les espèces les plus vulnérables au réchauffement du climat.

Juday et ses collaborateurs (2005) ont aussi fait état de résultats d'enquêtes portant sur les effets des changements climatiques sur l'épinette blanche et l'épinette noire en Alaska et au Canada. Les températures plus élevées au cours du prochain siècle auront des impacts négatifs sur la croissance de l'épinette blanche dans les stations sèches du centre de l'Alaska, menant à la disparition complète de cette espèce sur certains sites d'ici 2100. Inversement, il est prévu que l'augmentation des températures aura des effets positifs sur

la croissance radiale à la limite des arbres dans le nord du Labrador. D'autre part, étant donné que l'épinette noire est mieux adaptée aux sites frais et humides, on prévoit une réaction négative de la croissance aux températures plus élevées de l'été sur trois des quatre sites étudiés en Alaska et à deux sites de l'étude BOREAS dans l'Ouest canadien.

Le pin gris est, lui aussi, une espèce abondante et commercialement importante. Des études simulant les effets des changements climatiques sur le pin gris ont eu des résultats mitigés. Brooks et coll. (1998) ont constaté une augmentation de la croissance du pin gris à des températures plus élevées et avec l'augmentation des précipitations printanières. Lenihan et Neilson (1995) ont indiqué que le pin gris tolère mal les grandes accumulations de neige et qu'il sera affecté négativement dans les régions où le stock neigeux augmentera.

Le sapin baumier a une distribution étendue, mais il est surtout prédominant dans les forêts de l'est de la région boréale, plus humide. Comme les épinettes, ses niches écologiques sont définies par des conditions d'humidité du sol relativement faibles aux limites ouest et sud de son domaine et par la température (c.-à-d. la longueur et la chaleur de la saison de croissance) au Nord (Ritchie, 1987). Une combinaison de conditions plus sèches dans les sections sud et plus chaudes dans la section nord de son domaine provoquerait probablement un déplacement vers le nord de l'habitat climatique optimal du sapin baumier.

À l'échelle du paysage, un climat plus chaud et plus sec va probablement provoquer une augmentation des perturbations, qui auront tendance à favoriser les espèces adaptées aux incendies (par ex. le pin gris et l'épinette noire) et les espèces pionnières (notamment

À l'échelle du paysage, un climat plus chaud et plus sec va probablement provoquer une augmentation des perturbations, qui auront tendance à favoriser les espèces adaptées aux incendies et les espèces pionnières...

le tremble et les espèces de pin en général) (Thompson et coll., 1998). Comme on l'a déjà mentionné, il y a beaucoup d'inquiétudes concernant la possibilité que les hivers progressivement plus doux permettent aux populations de dendroctone du pin ponderosa de s'étendre vers l'Est dans les peuplements de pin gris de la forêt boréale (Carroll et coll., 2004) et d'envahir l'ensemble du Canada, et même d'attaquer d'autres espèces de pin dans l'est du Canada et des États-Unis. Étant donné l'importance économique actuel du pin gris et de son potentiel pour le remplacement de l'épinette blanche et de l'épinette noire dans un climat plus chaud, les conséquences à long terme de la propagation des populations de dendroctone du pin ponderosa pourraient être importantes.

Incertitude

Bien qu'il soit certain qu'il se produira des changements dans la composition, la structure et l'âge des forêts, on n'a aucune certitude sur la direction, l'ampleur, l'endroit et le moment de ces changements. L'une des sources de cette incertitude est celle qui concerne le climat futur. Toutefois, il existe un certain nombre d'autres éléments de doute. Les écosystèmes sont complexes. L'interaction de nombreux facteurs expliquera une réaction particulière aux changements climatiques et il est difficile de savoir quels facteurs seront dominants. Par exemple, on ne sait pas si les effets directs des changements climatiques sur les processus physiologiques seront les facteurs les plus importants ou si les effets

indirects du bouleversement des régimes de perturbation domineront les processus de changement. Des incertitudes entourent la réponse des plantes aux températures résultant des changements climatiques (Loehle et LeBlanc, 1996; Loehle, 2000; Norgaard et Baer, 2005). Les arbres bien établis pourraient tolérer les changements de climat, mais ils pourraient bien être incapables de faire concurrence aux nouvelles espèces apportées par les perturbations. Il pourrait donc y avoir un décalage entre les changements climatiques et la modification de la composition des forêts. Il y a également de l'incertitude quant aux effets à long terme de la fertilisation par le CO₂ et les effets de plus grandes concentrations atmosphériques en CO₂ sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Aber et coll., 2001). On n'est pas sûr des prédictions concernant la réalisation des niches par les espèces favorisées (c.-à-d. les niches effectivement occupées compte tenu de la concurrence) dans les climats futurs (Kirschbaum, 2000)³, ni des impacts que subiront les écosystèmes si les espèces sont incapables de migrer assez rapidement pour suivre le rythme des changements climatiques (Dyer, 1995; Malcolm et coll., 2002).

L'incertitude entourant la réaction des écosystèmes forestiers aux changements climatiques entraîne de nombreux défis dans la prédiction de l'impact des changements climatiques sur les forêts (Kirilenko et coll., 2000; Aber et coll., 2001; Neilson et coll., 2005). Les modèles actuels projetant la répartition future des écosystèmes, des communautés végétales et de la productivité sont peu précis et peu uniformes dans les développements issus du bouleversement des perturbations comme le feu, de la physiologie (Reynolds et coll., 2001) et du recrutement (Price et coll., 2001). De nombreux modèles ne peuvent tenir compte de la capacité des organismes individuels, propre à chacun, de s'acclimater aux changements climatiques dans l'avenir, ou encore de l'adaptation des génotypes et de l'intervention humaine dans l'aménagement. Finalement, nombre d'entre eux ne tiennent pas compte de l'évolution de la température du sol et de l'impact potentiel des changements climatiques sur la disponibilité des éléments nutritifs et le développement des racines (Houle et coll., 1999).

L'incertitude entourant la réaction des écosystèmes forestiers aux changements climatiques entraîne de nombreux défis dans la prédiction de l'impact des changements climatiques sur les forêts.

En raison des incertitudes de l'avenir et des limites de la modélisation, qu'elle soit climatique ou écologique, les experts ont une grande variété d'opinions sur les effets possibles ou probables des changements climatiques sur la composition et la distribution des écosystèmes et sur la vitesse de migration des forêts septentrionales (voir notamment Morgan et coll., 2001). Par exemple, Lenihan et Neilson (1995) ont prédit que les changements climatiques allaient provoquer une expansion des forêts canadiennes en général, alors que Saporta et coll. (1998) ont laissé entendre que la forêt boréale subira une importante réduction de sa superficie. Des variations similaires ont été notées aux États-Unis dans les prédictions entourant les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers (voir notamment Aber et coll., 2001).

³ Kirschbaum (2000) fait une distinction entre les niches fondamentales des espèces et les niches réalisées des espèces. La niche fondamentale est l'aire qui serait occupée par une espèce s'il n'y avait pas de concurrence entre espèces. La niche réalisée est celle qui est vraiment occupée par une espèce (malgré la concurrence d'autres espèces).

Synthèse

Les relations entre le climat et les écosystèmes forestiers sont complexes. Prédire l'impact à long terme des changements climatiques sur ces écosystèmes est tout aussi difficile. Il y a un certain nombre de mécanismes en interaction et les changements peuvent affecter les forêts par des cheminements divers (figure 1). Les perturbations, notamment les manifestations météorologiques extrêmes, les incendies de forêt, les insectes et les maladies augmenteront probablement en fréquence et en ampleur, et leurs impacts se multiplieront. La modification des régimes de perturbation aura des conséquences sur le stock forestier (c.-à-d. qu'il diminuera possiblement), sur l'âge des forêts (c.-à-d. qu'elles rajeuniront) et sur la composition forestière (c.-à-d. que les espèces pionnières [les premières à occuper un site après une perturbation] deviendront plus communes). La disponibilité en eau et en éléments nutritifs changera d'un endroit à l'autre. La saison de croissance sera probablement plus longue et les hivers moins rigoureux. Les températures moyennes pendant la saison de croissance devraient augmenter, ce qui pourrait soit diminuer, soit augmenter la productivité primaire nette (tout dépendra si un organisme en particulier se trouve dans la partie sud ou nord de son domaine). Les températures moyennes des hivers connaîtront également une hausse, ce qui favorisera peut-être les essences moins sensibles au froid et endommagera les essences spécialisées qui sont adaptées aux climats rigoureux. Le réchauffement des hivers donnera lieu à une réduction de la mortalité chez plusieurs insectes nuisibles. Les cycles de gels et de dégels seront modifiés. Les changements climatiques affecteront aussi les processus biologiques et écologiques, comme la photosynthèse, la respiration, la régénération, la succession, la croissance et la mortalité.

Les changements climatiques produiront de nouvelles niches écologiques temporaires qui favoriseront l'établissement de nouvelles espèces sur un site donné. Cependant, les espèces actuelles ont l'avantage de l'occupation du site. Il pourrait donc y avoir un décalage important entre les changements climatiques et le moment où les forêts réagiront. Toute cette transformation signifie que les changements climatiques auront des conséquences effectives en modifiant l'approvisionnement en bois de valeur commerciale (ou stock forestier), en bouleversant la disponibilité d'essences commercialement importantes et en changeant les rendements. Les impacts varieront au fil du temps mais aussi d'un endroit à l'autre. Étant donné la complexité des interactions entre le climat et les forêts et la nature dynamique des changements climatiques, sans compter l'incertitude entourant ces changements et la réaction des forêts dans l'avenir, il n'est pas possible de donner, à l'échelle nationale, un compte rendu détaillé et sans équivoque de leurs impacts à long terme sur les forêts. Néanmoins, une tendance générale se dégage. La recherche évoquée dans ce chapitre démontre que l'impact des changements climatiques sur les forêts sera probablement majeur et qu'il sera de plus en plus important au fil du temps. Toutefois, l'adaptation pourrait atténuer ou réduire une partie de cet impact. Les enjeux de l'adaptation et les avenues possibles pour les forêts canadiennes sont examinés en détail dans le chapitre suivant.

Pour commencer à comprendre l'impact des changements climatiques sur les forêts, on peut désormais s'appuyer sur un important corpus de textes scientifiques de source canadienne. Ces études fournissent des bases solides. Cependant, il faut poursuivre la

recherche afin de réduire l'incertitude et d'appuyer les décisions et les politiques portant sur les possibilités d'adaptation. Malheureusement, ce ne sera pas suffisant. En raison de la nature transversale des changements climatiques, la recherche scientifique devra être coordonnée et intégrée, et devra s'imposer dans l'ensemble des organismes et des disciplines, sans égard aux frontières habituelles. Mais plus encore, étant donné que les changements climatiques ont des conséquences majeures pour les politiques forestières, il sera nécessaire de renforcer les liens entre le milieu de la recherche et celui des décideurs.

ÉLÉMENTS DE VULNÉRABILITÉ DES FORÊTS RÉGIONALES



Dans chaque région du Canada, les forêts ont des caractéristiques distinctives et seront probablement affectées différemment par les changements climatiques. Les chapitres précédents ont pris en considération les impacts actuels et potentiels des changements climatiques sur les forêts du Canada et sur le secteur forestier de façon générale. Celui-ci décrit comment les changements climatiques pourraient toucher les forêts au niveau régional.

Le Nord

La forêt boréale du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest représente environ 13 % du couvert forestier total du Canada (le Nunavut est au-delà de la limite des arbres et n'est pas pris en considération dans le présent rapport). La foresterie commerciale y est relativement réduite comparativement à celle des provinces du Sud, bien qu'il s'agisse néanmoins d'une activité économique importante dans plusieurs communautés du Nord (Rothman et Herbert, 1997). Les forêts septentrionales sont cependant d'une importance cruciale pour le bien-être culturel, social et économique des peuples autochtones et des communautés indigènes du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest (Cohen, 1997) et elles jouent un rôle important dans les activités traditionnelles et spirituelles. La chasse et le trappage, ainsi que la collecte de plantes médicinales, de petits fruits et de champignons, sont des activités de subsistance importantes dans ces forêts nordiques (Nuttall et coll., 2005). Le maintien ou la persistance de certaines activités traditionnelles pourrait être menacés par les

Dans le Nord, les activités traditionnelles, le caribou et les systèmes de transports pourraient être affectés de manière négative par les changements climatiques.

modifications que provoqueront les changements climatiques dans l'écosystème de cette région (Cohen, 1997). Par exemple, le caribou des bois et le caribou des toundras sont tous deux culturellement et économiquement importants pour les collectivités autochtones du Nord. Une augmentation de la fréquence des incendies de forêt et d'autres facteurs liés aux changements climatiques pourrait nuire aux populations de caribou des bois (Conseil de l'Arctique, 2005). Parallèlement, le mouvement vers le nord de l'écotone forêt-toundra pourrait déplacer l'habitat du caribou des toundras et modifier son parcours de migration (Nuttall et coll., 2005). Les communautés du Nord s'inquiètent également de la perturbation du système de transport à cause de la perte des routes de glace, de la déstabilisation des bâtiments et de l'infrastructure par la fonte du pergélisol, de la difficulté de prévoir le temps en raison d'une augmentation de la variabilité des conditions météorologiques et du risque accru qu'entraîne l'amplification des manifestations météorologiques extrêmes (Conseil de l'Arctique, 2005; Furgal et Prowse, 2008).

Les écosystèmes forestiers nordiques sont adaptés au climat froid et sont donc particulièrement sensibles aux changements climatiques (Cohen, 1997; Juday et coll., 2005; Furgal et Prowse, 2008). Les changements relativement mineurs que le climat a connus récemment ont déjà des effets importants sur les écosystèmes du Nord, notamment des incendies de forêt anormaux, des infestations d'insectes sans précédent (par ex. le dendroctone de l'épinette) et des dépérissements forestiers associés à la fonte du pergélisol (Parmesan et Yohe, 2003; Juday et coll., 2005; Jorgenson et Osterkamp,

2005; Conseil de l'Arctique, 2005; Scholze et coll., 2006; Ogden, 2006). L'été 2004 fut le plus chaud répertorié dans les annales du Yukon. Des températures records alliées à des précipitations sous la normale et à une incidence record de la foudre (et une saison d'orages électriques plus longue [Green, 2004]) ont produit une année sans précédent au Yukon sur le plan des incendies de forêt. Il en est résulté des impacts positifs et négatifs. Du côté négatif, on peut mentionner une certaine perte de valeur du bois sur pied et l'augmentation des opérations de récupération. Du côté positif, la saison des feux de 2004 a entraîné une récolte importante de morilles, une espèce de champignon lucrative qui est abondante en forêt après un incendie (voir Gouvernement du Yukon, <<http://www.gov.yk.ca/news/2005/05-196.html>>).

Les projections veulent que les changements climatiques futurs soient beaucoup plus importants dans le Nord qu'aux latitudes sud (Houghton et coll., 1996; Conseil de l'Arctique, 2005; Furgal et Prowse, 2008). Des impacts spectaculaires sont prévus pour les écosystèmes des forêts septentrionales. En outre, le Nord est relativement peu peuplé et les ressources financières pour l'adaptation aux changements climatiques sont limitées (pour enrichir par exemple les services de protection des forêts). Les forêts du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest, et les valeurs qui y sont associées, ont un niveau relativement élevé de vulnérabilité aux changements climatiques en raison de leur grande exposition aux risques et de leur grande sensibilité, ainsi que des contraintes entourant les capacités d'adaptation.

Les projections veulent que les changements climatiques futurs soient beaucoup plus importants dans le Nord qu'aux latitudes sud.

Parmi les impacts les plus importants sur les forêts du Nord, on retrouve le déplacement de la limite des arbres vers le nord et l'augmentation de deux types de perturbations : les incendies de forêt et la fonte de grandes superficies de pergélisol (avec des conséquences négatives pour les forêts en croissance sur ces terres). On considère généralement que la limite septentrionale des arbres est déterminée par les températures froides (Price et Apps, 1995; Price et coll., 1999). On prévoit que le réchauffement entraînera un déplacement vers le nord de la limite entre la forêt boréale et la taïga, mais pas de façon égale et continue (Payette et coll., 2001; Juday et coll., 2005; Danby et Hik, 2007). MacDonald et coll. (1998) pensent que le réchauffement futur pourrait augmenter la croissance et la productivité des arbres à la limite forestière et que le recrutement de l'épinette blanche et de l'épinette noire sera favorisé. Mais il pourrait y avoir un décalage considérable entre la création de nouvelles niches climatiques adéquates et l'occupation de ces mêmes niches. En effet, la vitesse de dispersion de certaines espèces devrait être plus lente que le rythme des changements climatiques (Conseil de l'Arctique, 2005; Juday et coll., 2005). Payette et coll. (2001) montrent que la limite forestière n'est pas une ligne bien tracée. Il s'agit plutôt d'une vaste zone ininterrompue qui s'étend de la limite du couvert forestier continu des conifères jusqu'à la limite de la toundra arctique. L'écotone forêt-toundra est complexe et comprend une « constellation de limites forestières subarctiques » où la forêt occupe les terres basses, humides et protégées et la toundra les sites surélevés, exposés et bien drainés. Ils notent que l'écotone de la toundra forestière septentrionale réagira vraisemblablement aux changements climatiques en passant de la toundra à la forêt, transformation qui prendra la forme d'une colonisation par les arbres des sites actuellement considérés comme toundra et, inversement, de la substitution de forêts par la toundra à la suite de perturbations causées par le feu. Ainsi, la réponse des forêts nordiques aux changements climatiques sera complexe et non linéaire.

Les changements climatiques devraient augmenter la fréquence, l'étendue et l'intensité des incendies de forêt dans le Nord. Il en résultera une réduction de l'intervalle moyen entre les feux, une évolution de la distribution des classes d'âge vers des forêts plus jeunes et une diminution du carbone terrestre stocké dans la forêt boréale nordique (Flannigan et coll., 2000; Stocks et coll., 2002; Juday et coll., 2005; McCoy et Burn, 2005). Dans les annales, l'activité de la foudre est faible dans le sud-ouest du Yukon, ce qui se traduit par un cycle de feu relativement long (Francis, 1996; Ogden, 2006). Toutefois, le récent réchauffement du climat pourrait contribuer à l'augmentation de la foudre dans le Nord (Green, 2004). Fosberg et coll. (1990) de même que Price et Rind (1994) laissent entendre que les changements climatiques feront augmenter l'activité de la foudre. Ils provoqueront une hausse des températures durant la saison des feux et l'allongement de la période des feux dans le Nord. Flannigan et coll. (2005b) prévoient une augmentation de 80 % (avec le modèle climatique canadien) à 90 % (avec le modèle climatique Hadley) de la superficie incendiée dans les zones forestières nordiques et ce, dans un scénario où la concentration en CO₂ serait trois fois supérieure à la mesure actuelle (vers 2080).

Le réchauffement climatique dans les régions à pergélisol pourrait entraîner un dégel saisonnier plus profond et l'éventuelle transformation de grandes superficies de ces pergélisols en milieux humides. Ainsi, les forêts boréales du Nord, qui poussent actuellement dans les régions de pergélisol, pourraient devenir des terres humides arborescentes (Gray, 2005). Smith et Burgess (1999) ont estimé que les régions canadiennes à pergélisol pourraient être réduites de moitié d'ici 2050 (par rapport à leur superficie actuelle). Camill (2005) a signalé que le dégel du pergélisol se produit déjà à grande vitesse en raison du réchauffement continu depuis les années 1940. Osterkamp et coll. (2000) ont indiqué que d'importantes parties de la forêt boréale de l'Alaska ont été transformées en zones humides durant les 20 dernières années du 20^e siècle.

La grande vulnérabilité des forêts du Nord signifie qu'il faut tenir compte des changements climatiques dans les décisions concernant la gestion et la planification forestière du Nord (Ogden et Innes, 2007b). On a demandé aux forestiers du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest de participer à un sondage sur l'impact probable des changements climatiques pour la durabilité du secteur forestier et sur les options qu'ils envisageaient pour s'y adapter (Ogden et Innes, 2007a). Les trois facteurs d'impacts qu'ils ont mentionnés le plus fréquemment sont les suivants : modification de l'intensité, de la sévérité ou de l'ampleur des infestations d'insectes, changements dans les manifestations météorologiques extrêmes et changements dans l'intensité, la sévérité et l'ampleur des feux de forêt. Cependant, plus de la moitié des répondants ont indiqué que le prix des produits, la disponibilité du bois d'œuvre, les politiques commerciales, la réglementation environnementale et la capacité d'obtenir du capital sont actuellement des facteurs négatifs plus importants pour la durabilité que les changements climatiques.

La Colombie-Britannique

La Colombie-Britannique est le principal producteur de produits forestiers au Canada. Les recettes totales générées par l'industrie forestière de cette province grâce à la vente des produits dérivés du bois (comme le bois d'œuvre, les panneaux à copeaux orientés (OSB), les bardeaux et les pâtes et papiers) étaient d'environ 22,3 milliards de dollars en 2005 (<<http://canadaforests.nrcan.gc.ca/statsprofile/bc>>, consulté le 4 nov. 2007). La majorité de ces revenus étaient dérivés de la vente de produits forestiers aux consommateurs sur des

marchés étrangers. Tout comme dans les autres provinces, les forêts de la Colombie-Britannique procurent à ses habitants de nombreux autres avantages. Les champignons, les petits fruits et les produits phytopharmaceutiques sont d'importants produits forestiers non ligneux. Les forêts aident à la régulation de l'apport en eau et contribuent à sa qualité. Elles fournissent leur habitat aux poissons et aux autres espèces fauniques, constituent des refuges importants pour les espèces menacées, fournissent des aires de loisirs en toutes saisons, contribuent à l'attrait de la Colombie-Britannique comme destination touristique, et elles sont culturellement et spirituellement importantes pour la population de cette province. Les changements climatiques pourraient nuire à toutes ces fonctions et valeurs.

La Colombie-Britannique est une province tout à la fois côtière et montagneuse. Le climat y varie grandement et le terrain et les paysages sont diversifiés. En comparaison avec celles des autres provinces, ses forêts sont les plus productives et les plus écologiquement diversifiées du Canada. Les principaux éléments de vulnérabilité des forêts et du secteur forestier de la Colombie-Britannique face aux changements climatiques sont les suivants :

- la restructuration des marchés mondiaux, qui pourrait modifier les exportations de la Colombie-Britannique;
- l'augmentation des incendies de forêt;
- l'augmentation des dommages causés par les infestations d'insectes et par les maladies;
- l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans la partie intérieure sud de la province déjà sujette aux sécheresses;
- la migration des espèces et les changements dans la productivité des forêts;
- la perte d'habitat dans les forêts situées en altitude.

Le Ministry of Forests and Range de la Colombie-Britannique (2006) décrit les impacts potentiels des changements climatiques sur les trois principales essences dans la province.

Pin tordu latifolié : La menace du dendroctone du pin ponderosa se poursuivra. Cet insecte attaque et tue des arbres ayant 60 ans de moins que l'âge de susceptibilité autrefois admis. La brûlure en bandes rouges et d'autres maladies foliaires du pin tordu latifolié sont également préoccupantes, car elles sont à la hausse. Il existe une possibilité d'augmentation de la productivité du pin tordu latifolié à court et à moyen terme dans l'intérieur nord en cas d'augmentation modérée des températures (2 °C ou moins), mais cette espèce pourrait être vulnérable aux augmentations de température plus élevées si les sources de semences ne sont pas déplacées (Wang et coll., 2006). Le pin tordu sera avantagé par rapport au douglas vert, si les climats futurs sont plus chauds et plus secs; mais le douglas vert sera favorisé si le climat futur est plus chaud et plus humide (Nigh et coll., 2004).

Douglas vert : Le douglas vert pourrait remplacer, ou du moins accompagner le pin tordu latifolié dans les zones biogéoclimatiques subboréales à épinette dans la mesure où le pin tordu est atteint par des organismes nuisibles en raison des changements climatiques. Cependant, dans des écosystèmes secs, le douglas vert sera stressé par la sécheresse. La tordeuse des bourgeons de l'épinette et les autres insectes défoliateurs ainsi que des maladies, comme le pourridié-agaric et la carie jaune annelée, suivront le déplacement vers le nord du douglas vert. Nigh (2006) a utilisé des données transversales pour



modéliser les effets de la température, des régimes nutritifs et des régimes d'humidité sur l'indice de site du douglas vert côtier et il a découvert que la réaction à la température et à l'humidité de l'indice de site du douglas vert côtier est positive (c.-à-d. que les sites dont la température ambiante et l'humidité sont plus élevées ont un indice de site plus élevé). Ainsi, l'augmentation de la température aura probablement un effet positif sur la croissance. Toutefois, les changements climatiques futurs auront probablement un impact majeur sur le douglas vert côtier, en raison de l'augmentation de la demande en eau. Spittlehouse (2003) a calculé l'évaporation potentielle durant l'été pour un éventail de scénarios climatiques dans le bassin de Géorgie pour découvrir que la productivité du douglas vert diminuera de 10 à 30 % au cours du cycle de vie d'un peuplement à cause de la disponibilité réduite de l'eau.

Pruche de l'Ouest : La survie de la pruche de l'Ouest et le potentiel d'expansion de son domaine en fonction des changements climatiques dépendra de l'équilibre qui se produira entre la demande pour l'évaporation et la disponibilité de l'eau. Toute augmentation de l'eau disponible (c.-à-d. les précipitations moins l'évaporation) sera probablement bénéfique. Ce sont cependant les insectes défoliateurs qui feront probablement le plus de torts à cette espèce sous le régime des changements climatiques.

Mélèze (de l'Ouest et de Sibérie) : Le mélèze pourrait bien composer avec la sécheresse et pourrait s'ajouter au pin tordu latifolié dans la zone subboréale lors des changements climatiques. Dans les régions où il y a augmentation des précipitations estivales, ces espèces seront vulnérables aux pertes causées par des maladies foliaires.

Épinette : L'épinette devrait subir des pertes attribuables au charançon du pin blanc et aux maladies foliaires. La productivité pourrait augmenter avec l'allongement de la saison de croissance et la hausse des températures, plus particulièrement si les précipitations estivales augmentent dans le centre et le nord de la Colombie-Britannique tel que prévu.

Thuja géant : Cette espèce pourrait être bien adaptée aux conditions en vigueur sous les changements climatiques dans la région forestière intérieure nord. Elle est moins vulnérable au pourridié-agaric que d'autres espèces de la région. Le thuya géant pourrait s'avérer une espèce adéquate pour les zones qui sont gravement infestées par ce pathogène. Sur la côte, le thuya géant disparaîtra probablement des sites les plus secs où il est déjà marginal.

Sapin subalpin : Le sapin subalpin pousse en altitude dans l'intérieur de la Colombie-Britannique, où les étés sont frais et les hivers froids.¹ Avec le réchauffement des conditions climatiques, la distribution de cette essence se rétrécira probablement dans les parties les moins élevées de son aire. Il y a un risque accru que le puceron lanigère du sapin s'étende dans les forêts de l'intérieur. Le sapin subalpin est également vulnérable aux champignons lignicoles. Les lichens qui poussent sur les branches inférieures du sapin subalpin sont une source importante de nourriture pour le caribou. Toute réduction de la présence de ces arbres pourrait avoir des conséquences négatives pour les populations de caribou.

¹ <<http://www.for.gov.bc.ca/hfd/library/documents/treebook/subalpinefir.htm>>, consulté le 10 nov. 2007

En Colombie-Britannique, les changements climatiques devraient avoir les impacts régionaux suivants :

Forêts côtières : Dans le Sud, le temps chaud et sec à la fin du printemps et au début de l'été pourrait faire augmenter les risques d'incendie de forêt et réduire la disponibilité en eau. Le stress hydrique affectera les espèces comme le thuya géant sur les sites marginaux de la côte est de l'Île de Vancouver. Au centre et au nord de l'île, on prévoit que la côte actuellement humide et froide connaîtra une amélioration de ses conditions de croissance. Mais l'accroissement des tempêtes, en fréquence et en intensité, pourrait bien faire augmenter les chablis et le bris des arbres. L'augmentation de la sévérité des tempêtes pourrait faire augmenter la probabilité de glissements de terrain et leur cortège de débris ligneux.

Intérieur méridional (basse altitude) : Des conditions plus sèches sont généralement prévues, mais aussi la possibilité d'un accroissement de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Il s'ensuivra des implications négatives pour la régénération, la croissance et la mortalité. Au fil du temps, les écosystèmes des prairies pourraient remplacer les écosystèmes forestiers dans les régions sèches de l'intérieur méridional (Hebda, 2006, 2007).

Intérieur méridional (haute altitude) : Quelques bénéfices sont espérés face à une saison de neige plus courte et une période de croissance plus longue. Cependant, la baisse des précipitations et la hausse des températures pourraient accroître le risque d'incendies et le stress causé par la sécheresse.

Intérieur septentrional : On peut s'attendre à court terme à certaines augmentations de la croissance des arbres et à de légers changements dans les précipitations estivales comme résultat du réchauffement climatique. Des saisons hivernales plus courtes réduiront l'accès aux sites sensibles dans certaines régions.

Hamman et Wang (2006) ont utilisé un modèle d'enveloppe climatique basé sur l'écosystème pour évaluer les possibilités d'évolution des niches convenant aux diverses essences et de zones biogéoclimatiques en Colombie-Britannique. L'étude a analysé les niches climatiques actuelles des arbres et des zones biogéoclimatiques pour les comparer à l'état futur des niches de certaines espèces et types écologiques en se basant sur les projections du modèle climatique MCGG1 selon le scénario d'émissions IS92a (Leggett et coll., 1992). Les espèces d'arbres dont la limite nordique se trouve en Colombie-Britannique gagneront des habitats favorables à un rythme d'au moins 100 km par décennie (mais tel que noté précédemment, la vitesse réelle de migration des arbres est d'environ 5 km par décennie en moyenne). Les feuillus les plus communs semblent être moins sensibles aux changements climatiques tandis que certaines des espèces de conifères les plus importantes en Colombie-Britannique pourraient perdre une grande partie de leur habitat climatique favorable. Hamman et Wang (2006) ont rapporté que les zones écologiques biogéoclimatiques suivantes s'étendront en superficie d'ici 2085 : graminée cespiteuse, douglas vert côtier, pruche de l'Ouest côtière, thuya pruche de l'intérieur, douglas vert de l'intérieur et pin ponderosa. En contrepartie, toujours selon les projections, la superficie des zones écologiques suivantes diminuera d'ici 2085 : toundra alpine, épinette boréale, épinette d'Englemann, sapin subalpin, pruche subalpine, épinette subalpine, épinette et pin subboréaux, épinette subboréale et épinette-saule-bouleau.

Il existe peu d'information sur la façon dont les produits et services non ligneux seront affectés par les changements climatiques, notamment les produits forestiers botaniques comme les champignons, les petits fruits, les plantes vertes et les plantes médicinales, ainsi que les activités de loisir en forêt. La récolte des produits forestiers botaniques est une industrie en pleine croissance en Colombie-Britannique. L'impact économique et culturel des changements climatiques sur cette industrie pourrait être important. La hausse des incendies de forêt pourrait favoriser certaines espèces de champignons et d'arbustes. Pour ce qui est des activités récréatives en plein air, le réchauffement raccourcira la saison hivernale tandis que la saison récréative estivale s'allongera. Mais l'augmentation des risques d'incendie pourrait restreindre les loisirs en plein air durant l'été.

L'habitat de plusieurs espèces montera en altitude, rendant les forêts subalpines vulnérables à l'extinction et réduisant les niches des conifères subalpins comme l'épinette d'Engelmann, la pruche subalpine et plusieurs espèces de sapin (Hansen et Dale, 2001).

Laroque et Smith (2003) prévoient d'ici 2100 un déclin significatif de la croissance radiale de la pruche subalpine qui croît en altitude dans l'île de Vancouver. Luckman et Kavanagh (2000) ont découvert, en fait, que la limite des arbres a déjà monté au cours du 20^e siècle dans les Rocheuses canadiennes en réaction aux changements climatiques. Dans une étude sur la dynamique des arbres subalpins, Danby et Hik (2007) notent que la limite des arbres ne se déplace pas de façon graduelle en réaction aux changements climatiques. Les changements observés

à ce jour font plutôt penser à une réponse de seuil (c.-à-d. que le climat peut changer jusqu'à certain point sans qu'on observe d'impact, mais qu'il est ensuite suivi d'un mouvement soudain).

...la limite des arbres a déjà monté au cours du 20^e siècle dans les Rocheuses canadiennes en réaction aux changements climatiques.

Provinces des Prairies

La forêt boréale est l'écosystème forestier dominant dans la région des provinces des Prairies. Une grande partie de la discussion sur la forêt boréale dans la chapitre précédente est également applicable à la façon dont les changements climatiques affecteront les forêts des Prairies.

Dans les Prairies, les changements climatiques à venir pourraient donc entraîner des pertes permanentes de couvert forestier par suite de perturbations, et d'importantes réductions de productivité forestière dans le sud de la forêt boréale.

La lisière sud de la forêt boréale dans l'Ouest canadien correspond étroitement à la disponibilité de l'humidité (Hogg, 1994, 1997). Un assèchement plus prononcé sera une grande source de vulnérabilité dans l'écotone forêts-prairies de l'Ouest canadien. Dans les parties les plus sèches de la forêt boréale, des pertes de couvert forestier sont prévues avec le temps et quelques peuplements forestiers actuellement fermés évolueront vers un type de conditions similaires à une forêt-parc à tremblaie. La hausse prévue des précipitations dans la région seront probablement contrebalancées par la hausse prévue de l'évaporation causée par l'élévation des températures. La moitié de la forêt boréale de l'Ouest canadien pourrait être exposée à un climat plus sec, similaire à celui de la zone

actuelle de la forêt-parc à tremblaie. Les changements climatiques à venir pourraient donc entraîner des pertes permanentes de couvert forestier par suite de perturbations, et d'importantes réductions de productivité forestière dans le sud de la forêt boréale (Hogg et Hurdle, 1995).

Les scénarios climatiques pour les Prairies nous portent à croire que l'avenir amènera des hivers plus chauds avec plus de précipitations et des printemps précoces (Flato et coll., 2000; McDonald et coll., 2004; Barnett et coll., 2005). Les étés pourraient être un peu plus chauds, mais ils seraient plus secs à cause d'une augmentation des taux d'évaporation (Laprise et coll., 2003; Wang, 2005). En outre, les manifestations climatiques extrêmes sur le plan des précipitations et des sécheresses pourraient devenir plus fréquentes (Sauchyn et coll., 2003). Au printemps, il faudra prévoir une humidité printanière excessive, provenant d'une fonte des neiges plus précoce et plus rapide, qui entraînera une période de restriction de poids plus hâtive et peut-être plus longue dans les transports routiers, ainsi que des conditions de saturation en eau dans les secteurs d'exploitation. Cette situation pourrait affecter la mobilisation des bois ainsi que la construction et l'utilisation des routes forestières. Dans le cas où le terrain gelé est essentiel pour la récolte et le transport du bois, la douceur des hivers sera un élément de vulnérabilité, puisque la période propice au débardage sera écourtée.

On prévoit que les feux de forêt seront plus fréquents (Bergeron et coll., 2004) et de plus grande intensité (Parisien et coll., 2004, 2005) et qu'ils toucheront de grandes superficies (Flannigan et coll., 2005b) dans les Prairies. Les épidémies d'insectes seraient également plus fréquentes et plus sévères (Volney et Fleming, 2000). L'effet à long terme d'infestations d'insectes sur l'aménagement forestier est difficile à prévoir, mais selon des recherches récentes, la mortalité des arbres augmentera en raison de l'interaction entre les insectes, la sécheresse et les feux à la limite sud de la forêt boréale des Prairies (Hogg et Bernier, 2005; Volney et Hirsch, 2005).

Certaines espèces de conifères sont plus inflammables que les espèces feuillues (Parisien et coll., 2004). Ainsi, une hausse de l'activité du feu en forêt favorisera les espèces de début de succession (comme le pin gris, le peuplier faux-tremble, le pin tordu latifolié) au lieu d'espèces de fin de succession (comme l'épinette blanche et le sapin baumier). Certains conifères comme le pin gris sont bien adaptés à la reproduction après l'incendie : ainsi, une hausse de la fréquence des incendies de forêt pourrait mener, à long terme, à une augmentation du peuplier faux-tremble et du pin gris au détriment de l'épinette et d'autres espèces.

Il y a de nombreuses petites parcelles de forêt disséminées dans les prairies de l'Ouest canadien. On appelle ces parcelles boisées des forêts insulaires. Henderson et coll. (2002) y ont étudié les impacts éventuels des changements climatiques sur un certain nombre de sites, y compris les collines Cypress (qui chevauchent l'extrémité sud de la frontière de la Saskatchewan et de l'Alberta), les collines Turtle (au nord de la frontière américaine dans le sud du Manitoba), Spruce Woods (au nord et à l'est des collines Turtle) et le mont Moose (dans le sud de la Saskatchewan et près de la frontière du Manitoba). Dans les collines Cypress, les changements climatiques accroîtront le risque d'infestations d'insectes et d'incendies de forêt. La régénération des espèces dominantes (le pin tordu latifolié et l'épinette blanche) deviendra de plus en plus difficile en raison des conditions plus sèches. Le paysage passera d'une forêt à couvert continu à un paysage irrégulier où de petits bouquets d'arbres se maintiennent, mais uniquement dans les sites abrités. Les

collines Turtle sont vulnérables aux changements climatiques à cause de l'assèchement et de la sécheresse. Avec le temps, le chêne à gros fruits pourrait remplacer quelques peupliers faux-trembles.

Dans la forêt de Spruce Woods, la proportion de tremble diminuera avec le temps et cette essence sera peut-être remplacée par le chêne à gros fruits en certains endroits. La forêt du mont Moose est hautement vulnérable aux changements climatiques à cause de l'assèchement. On prévoit la transformation du couvert forestier actuel relativement continu en une forêt-parc ouverte composée de bouquets d'arbres dispersés dans une mosaïque d'arbustes et de prairies.

L'Ontario

Les changements climatiques vont accroître l'activité du feu en Ontario en raison des températures élevées combinées à la fréquence et à l'intensité accrues des années de sécheresse (Flannigan et Van Wagner, 1991; Simard, 1997; McAlpine, 1998; Wotton et coll., 2003; Gillett et coll., 2004). Un climat plus chaud et plus sec augmentera le nombre de feux subitement allumés par la foudre qu'on désigne en anglais sous le nom de « fire flaps ». Ce type de feu découle de l'augmentation du risque d'incendie à la suite de nombreuses semaines sans pluie (ou très peu), jumelées à une source d'allumage, plus particulièrement la foudre. En Ontario, les feux allumés par la foudre représentent 80 % de la superficie des forêts incendiées (McAlpine, 1998). Fosberg et coll. (1990) ainsi que Price et Rind (1994) ont établi que les changements climatiques pourraient favoriser l'augmentation de la foudre.

On prévoit que les changements climatiques feront augmenter les incendies de forêt de 1,5 à 4 fois en Ontario en nombre (Wotton et coll., 2003) et en superficie d'ici la fin du siècle (Flannigan et coll., 2005b). L'augmentation de la superficie incendiée sera la plus élevée dans le nord-ouest de la forêt boréale de l'Ontario où la suppression des incendies n'est pas pratiquée. Ward et coll. (2001) estiment que 0,34 % de la forêt du nord-ouest la plus éloignée brûle chaque année, ce qui correspond à un intervalle approximatif du retour du feu de 294 années). En comparaison, la suppression intensive des incendies dans les parties sud de la forêt boréale limite la superficie touchée à environ 0,11 % de la superficie forestière totale chaque année (Ward et coll., 2001) (ce qui correspond à un intervalle du retour du feu d'environ 900 ans).

Des sécheresses prolongées et des températures plus élevées résultant des changements climatiques pourraient atteindre un point culminant où les feux deviendraient incontrôlables certaines années. En théorie, cette situation pourrait même faire augmenter la superficie moyenne incendiée au-delà de ce que prévoyaient Flannigan et coll. (2005b). Maintenir l'action du feu à son taux actuel dans la forêt boréale aménagée exigera un supplément d'investissement dans la lutte contre les incendies. Cependant, lors des années extrêmes, cet effort accru de suppression des feux pourrait être insuffisant pour prévenir les déflagrations de grande envergure.

De grandes superficies de forêts en Ontario sont touchées par des infestations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et de la livrée des forêts, ravageurs qui seront également affectés par les changements climatiques. Selon les prédictions, la tordeuse des bourgeons de l'épinette, l'insecte actuellement le plus dévastateur en Ontario, intensifiera ses dommages dans les parties les plus au nord de la forêt boréale de

l'Ontario, mais les réduira dans les parties les plus au sud (Candau et Fleming, 2005). La sécheresse accrue, combinée à la défoliation par les insectes, devrait réduire la croissance et augmenter le risque de dépérissement chez le peuplier faux-tremble dans les forêts boréales près de la frontière Ontario-Manitoba (Hogg et Bernier, 2005).

L'adoucissement des hivers devrait permettre l'expansion vers le nord des essences qui sont actuellement près de la limite nord de leur aire de distribution. Cependant, la migration des espèces arborescentes vers le nord ne correspondra pas au rythme d'évolution du climat prévu d'ici la fin du siècle (Roberts, 1989; Loehle, 2000; McKenney et coll., 2007). Même les phénomènes ponctuels de dispersion sur une longue distance (Clark, 1998; Higgins et coll., 2003) ne permettront pas aux espèces de se déplacer au rythme des changements climatiques. Les types de forêts cantonnées au sud (par ex. les forêts de chêne à caryer du sud-ouest de l'Ontario, du centre-sud du Minnesota et du Michigan) exigeraient des centaines d'années pour migrer naturellement dans la zone actuelle de la forêt boréale (Davis, 1989; Roberts, 1989). Mise à part l'expansion locale des espèces près de leur limite nord de distribution, les seuls changements significatifs à court terme dans la composition des forêts que les changements climatiques pourront causer seront les modifications de l'abondance relative des essences qui sont déjà propres à la région. Par exemple, les espèces adaptées aux perturbations pourraient connaître un meilleur sort sous les changements climatiques que dans les annales de l'Ontario.



L'augmentation des feux de forêt dans la forêt boréale éliminera les forêts sur pied à un rythme accéléré (Flannigan et coll., 2005a). Il en résultera probablement une hausse du nombre d'écosystèmes de début de succession, dominés par des espèces adaptées au feu, comme le pin gris, l'épinette noire, le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble. Durant les périodes de sécheresse, les sites sensibles à cette condition auront tendance à être colonisés par des espèces tolérantes à la sécheresse (Grime, 1993; Bazzaz, 1996). Dans la forêt boréale, ce processus favorisera les espèces comme le pin gris et le peuplier faux-tremble aux dépens d'espèces comme l'épinette noire et le sapin baumier. Dans la région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent, il pourrait y avoir des périodes de sécheresse menant à la fragmentation et au dépérissement précoce des peuplements (Overpeck et coll., 1990). Dans ces écosystèmes, les espèces xériques (c.-à-d. adaptées aux conditions de sécheresse), comme l'érable rouge, le pin blanc et le chêne rouge, seront favorisées aux dépens des espèces mésiques (c.-à-d. adaptées à des conditions humides), comme l'érable à sucre et la pruche du Canada.

Outre les impacts sur les espèces arborescentes, les changements climatiques produiront des variations (réduction ou expansion) de l'aire des espèces fauniques en Ontario. Varrin et coll. (2007) ont passé en revue les études scientifiques publiées au sujet de l'impact des changements climatiques sur les espèces vertébrées présentes en Ontario, et ils ont découvert que parmi les 175 espèces étudiées on y prévoit la réduction de l'aire de 10 d'entre elles, l'expansion possible de 62, tandis que la réaction de 103 espèces y est considérée comme équivoque.

La région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent est située le long de la limite sud de l'écozone du Bouclier boréal en Ontario et au Québec. Les forêts tempérées de conifères et de feuillus y dominant, composées d'érable, de tilleul d'Amérique, de chêne et de pin blanc (Colombo et coll., 1998). On prévoit que le réchauffement provoquera un déplacement vers le nord de la région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent qui

empiétera ainsi sur l'écozone du Bouclier boréal (Colombo et coll., 1998; Thompson et coll., 1998; Parker et coll., 2000; Gray, 2005). Cette prévision est appuyée par des indices paléocologiques qui permettent d'affirmer que l'écosystème des Grands-Lacs et du Saint-Laurent s'étendait autrefois aussi loin qu'au nord de Timmins, en Ontario, durant une période de réchauffement qui s'est produite de 7 000 à 3 000 av. J.-C. (Liu, 1990; Gray, 2005). La substitution des forêts boréales par des forêts tempérées ne se manifesterait, cependant, que dans les régions où le régime des incendies n'augmenterait pas (Thompson et coll., 1998). Comme on l'a déjà expliqué, il est toutefois improbable que le taux général de migration des espèces se fasse au même rythme que le taux de création, par suite des changements climatiques, de niches climatiques favorables (Parker et coll., 2000). Par conséquent, il est improbable qu'il se produise un changement général et uniforme de la forêt boréale au profit du type de forêt actuel de la région des Grands-Lacs et du Saint-Laurent (Thompson et coll., 1998; Parker et coll., 2000).

Goldblum et Rigg (2005) ont utilisé des données dendrochronologiques et des analyses de pollen pour étudier les changements qui se sont produits dans la croissance et l'abondance de l'érable à sucre, de l'épinette blanche et du sapin baumier en réaction aux changements de régime climatique durant l'holocène dans une région située à 200 km au nord de Sault Ste. Marie, en Ontario. Ils ont utilisé les corrélations entre le climat et la

Dans la forêt boréale de feuillus en Ontario, l'érable à sucre a le plus grand potentiel d'augmentation de croissance.

croissance en combinaison avec les projections d'un MCG pour prédire la croissance de l'érable à sucre, de l'épinette blanche et du sapin baumier dans l'écotone forêt boréale-forêt feuillue en Ontario. Ils ont conclu que l'érable à sucre possède le plus grand potentiel d'augmentation de croissance au cours des 80 prochaines années. Le pin blanc en profitera moins et le sapin baumier subira

probablement une diminution de productivité. En termes d'abondance, les espèces actuellement communes dans la région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent, au sud de l'Ontario et du Québec, devraient migrer graduellement vers le nord par suite des changements climatiques, quoiqu'à des rythmes différents. Les espèces tempérées comme l'érable et le pin blanc seront favorisées par les changements climatiques et pourraient de se retrouver dans la région formant actuellement les parties sud de l'écozone du Bouclier boréal (en supposant que les terres nordiques soient suffisamment riches — compte tenu des besoins plus élevés en éléments nutritifs de l'érable et du pin blanc — pour supporter ces espèces).

Une étude récente de Browne et Hunt (2007) résume les impacts des changements climatiques sur l'écotourisme, le plein air et le secteur forestier en Ontario. Ils rapportent que les changements climatiques devraient avoir un effet net positif sur l'écotourisme et les activités de plein air en Ontario, alors que la participation aux activités qui dépendent de la neige et de la glace diminuera probablement à cause du raccourcissement de la saison. Ils soulignent également que les producteurs forestiers traditionnels de l'Ontario doivent s'attendre à subir des effets négatifs avec l'arrivée des changements climatiques. On prévoit que l'approvisionnement en matière ligneuse connaîtra un déclin en Ontario, tandis que les coûts d'aménagement, de récolte et de transformation devraient augmenter. Ces changements se produiraient en même temps qu'une augmentation mondiale de l'approvisionnement en bois et qu'une diminution mondiale du prix des produits forestiers.

Le Québec

Trois grands types forestiers composent le paysage du Québec. Du sud au nord, il s'agit de l'érablière, de la sapinière et de la pessière. Le réchauffement significatif observé au cours du dernier siècle a déjà altéré la composition des forêts. Les indices de l'allongement de la saison de croissance sont déjà évidents. Par exemple, Bernier et Houle (2005) ont découvert que le débourrement (ouverture des bourgeons) de l'érable à sucre se produit maintenant plusieurs jours plus tôt qu'il y a 100 ans.

Les projections d'augmentation de la température annuelle moyenne pour le centre du Québec sont de 3,2 °C d'ici l'an 2050, ce qui se traduirait par un mouvement des zones climatiques de 515 km vers le nord, c'est-à-dire une vitesse de migration approximative de 10 km par année. Comme on l'a déjà indiqué, cette vitesse est beaucoup plus grande que la vitesse de migration la plus rapide jamais observée chez des arbres (Malcolm et coll., 2002). De plus, étant donné les différentes méthodes de dispersion des espèces et leurs différences de réactions physiologiques aux changements du climat, les espèces migreront à des rythmes différents. Il en résultera probablement des assemblages d'espèces qui n'ont jamais été observées auparavant. La fertilité du sol pourrait cependant limiter la migration des arbres, car les exigences nutritionnelles des forêts varient selon le type de peuplement (par ex. les exigences d'une érablière sont plus élevées que celles d'une sapinière, qui sont plus élevées que celles d'une pessière [Sté-Marie et Houle, 2006]). Cependant, comme on l'a mentionné au chapitre précédent, des hausses de températures pourraient aussi améliorer la disponibilité des éléments nutritifs du sol, plus particulièrement en ce qui a trait à l'azote inorganique.

Il existe de nombreuses possibilités d'impact des changements climatiques sur les infestations d'insectes dans les forêts du Québec. L'étendue des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pourrait augmenter de façon significative (en outre, selon Gray [2008], les infestations pourraient être plus longues et plus sévères sur le plan de la défoliation), l'aire de la spongieuse pourrait s'étendre (Gray, 2004), le dendroctone du pin ponderosa pourrait venir de l'Ouest en gagnant la forêt boréale (Carroll et coll., 2004) et le longicorne asiatique pourrait étendre son domaine aux régions qui sont actuellement occupées par des érables, des ormes et des peupliers (Cavey et coll., 1998).

Même si la majorité des modèles climatiques prédisent une hausse de la fréquence des incendies dans l'hémisphère nord, largement due à une saison de croissance plus longue et à une augmentation de la foudre (Wotton et Flannigan, 1993), la situation est différente au Québec. La fréquence des incendies de forêt devrait y augmenter dans les régions de l'ouest et du nord, diminuer dans la région de l'est et demeurer constante dans la région du centre (Bergeron et coll., 2004).

Une diminution de la durée des hivers a un effet direct et immédiat sur la planification de l'aménagement forestier et sur les opérations forestières : la réduction de la période d'accès aux forêts en l'hiver, la hausse du potentiel de dégradation du terrain et l'augmentation des fluctuations saisonnières de l'emploi.

Les pratiques forestières doivent donc évoluer pour s'ajuster à la diminution de la durée de l'hiver. Ce genre d'impacts directs est actuellement la plus grande source d'inquiétude pour les compagnies forestières.

L'amincissement et la discontinuité de la couche de neige, ainsi que sa fonte prématurée, inquiètent les responsables

Au Québec, les hivers plus courts ont exigés des changements sur les opérations forestières.

de l'aménagement forestier dans la région des feuillus du sud du Québec, car le sol exposé à l'air libre gèle plus profondément. Ce gel au niveau des racines des essences feuillues entraîne des dommages substantiels qui peuvent affecter la croissance de l'arbre et la chimie du sol pendant de nombreuses années (Boutin et Robitaille, 1995).

Le Canada atlantique

Il existe deux types de forêt principaux dans le Canada atlantique : la forêt acadienne qui s'étend dans l'ensemble des provinces Maritimes (Nouvelle-Écosse, Nouveau-Brunswick et Île-du-Prince-Édouard), et la forêt boréale (qu'on retrouve à Terre-Neuve et au Labrador). Les forêts couvrent une grande proportion de la superficie totale dans toutes les provinces de l'Atlantique, de 47 % à l'Île du Prince-Édouard à 86 % au Nouveau-Brunswick. Par conséquent, la foresterie y joue un rôle primordial dans l'économie. Les forêts des provinces Maritimes appartiennent essentiellement à des intérêts privés. À Terre-Neuve par contre, elles sont de propriété publique. La forêt acadienne des Maritimes est plutôt mixte, tandis que la forêt boréale de Terre-Neuve est largement résineuse.

Les pratiques d'aménagement forestier des provinces de l'Atlantique ont été dominées par le reboisement, la suppression du feu et la lutte contre les insectes et les animaux brouteurs (Ayres et Lombardo, 2000; Etheridge et coll., 2005), ce qui a eu pour effet d'altérer la distribution des espèces forestières. Le retour des forêts sur les terres agricoles a fait augmenter la proportion d'espèces de début de succession, comme le sapin baumier et l'épinette blanche, en particulier dans les provinces Maritimes (Loo et Ives, 2003).

La répartition des espèces indigènes dans les forêts du Canada atlantique devrait se modifier avec l'avènement des changements climatiques. D'une part, certaines essences indigènes devraient maintenir leur répartition normale dans une certaine mesure malgré

les bouleversements climatiques (Chapin et coll., 2004).

D'autre part, les essences qui auraient de la difficulté à survivre dans les Maritimes lors des changements climatiques pourraient perdre leur prépondérance (par ex. le sapin baumier), tandis que celles qui pourraient persister deviendraient plus communes. La migration des espèces étant un processus si lent chez les arbres, il est peu probable qu'il se produise une affluence d'espèces propres aux forêts caroliniennes du nord-est des États-Unis au 21^e siècle, à moins qu'il ne soit encouragé par des

programmes de plantation. Certaines espèces introduites particulièrement aptes à concurrencer les espèces indigènes dans cette ère de conditions climatiques changeantes pourraient s'implanter, transformant radicalement la répartition actuelle des espèces indigènes (Simberloff, 2000).

Les insectes constituent la première cause de perturbation tant dans les forêts acadiennes (Etheridge et coll., 2005) que dans les forêts boréales (Bergeron et coll., 2002) du Canada atlantique. La tordeuse des bourgeons de l'épinette en particulier y représente une source importante de perturbation forestière. Le renforcement des chablis et des sécheresses ainsi que l'adoucissement des hivers qu'on prévoit avec l'altération du climat augmenteront inévitablement la vulnérabilité des forêts de l'Atlantique aux insectes de ce genre (Fleming et Candau, 1998). Les autres espèces qui contribueront éventuellement à la vulnérabilité des forêts de l'Atlantique sont notamment le dendroctone de l'épinette et

Dans les Maritimes, le sapin baumier pourrait avoir de la difficulté à persister à cause des changements climatiques.

le puceron lanigère de la pruche. La première est une espèce indigène opportuniste qui tire avantage des arbres déracinés par le vent. La seconde, actuellement exclue du Canada atlantique en raison des températures hivernales, pourrait profiter des hivers moins rigoureux pour y altérer la composition des forêts en éradiquant la pruche du Canada, une composante de la forêt acadienne, comme elle l'a fait aux États-Unis.

Les agents pathogènes contribuent également à la vulnérabilité des forêts. Plus particulièrement, la maladie hollandaise de l'orme, le chancre du noyer cendré et la maladie corticale du hêtre ont eu un impact important sur les feuillus de la région forestière acadienne au cours du dernier siècle (Loo et Ives, 2003). L'action nuisible des agents pathogènes déjà présents pourraient s'intensifier, car les changements climatiques occasionneront un stress pour toutes les essences établies en forêts (Ayles et Lombardo, 2000). L'incidence de proliférations pathogéniques actuellement inconnues dans la région, notamment celles qui sont favorisées par des hivers plus doux (Bertrand et Castonguay, 2003), pourrait également augmenter.

Étant donné les conditions douces et humides qui prévalent au Canada atlantique, la sécheresse y est considérée, comme une source de perturbation relativement mineure. Même si on prévoit, de façon générale, que les conditions climatiques deviendront encore plus douces et plus humides, on y entrevoit avec le réchauffement climatique des printemps et des étés plus secs dans certaines régions. Les prévisions concernant la modification du régime des précipitations vont cependant aggraver le problème des sécheresses saisonnières. En effet, la région pourrait recevoir une plus grande quantité de précipitations apportées par un nombre réduit de tempêtes qui seraient cependant plus sévères et entrecoupées de périodes plus longues de temps sec.

Moins de 1 % de la superficie des zones forestières du Canada atlantique a connu l'incendie en 2005. Étant donné la faible contribution directe du feu au régime actuel des perturbations du Canada atlantique et les conditions généralement plus humides qui sont prévues pour la région dans le climat à venir (Flannigan et coll., 2001), les incendies ne risquent probablement pas de devenir préoccupants en eux-mêmes. Mais en raison des liens croisés qui relient toutes les perturbations, la vulnérabilité de ces forêts pourrait tout de même augmenter face au feu dans un climat en évolution. Cette situation s'expliquerait par la présence d'un grand nombre de chicots et d'arbres renversés, conséquence de la hausse des infestations d'insectes et des tempêtes de vents venant s'ajouter au surcroît de sécheresses.

Les forêts acadiennes sont sujettes aux dommages causés par le vent comme on a pu le constater par le sillage de dévastation laissée par l'ouragan Juan en 2003 en Nouvelle-Écosse et dans l'Île du Prince-Édouard (Service canadien des forêts, 2005). Le vent est également un facteur de perturbation important dans les forêts du Labrador (Bergeron et coll., 2002) et dans l'île de Terre-Neuve. Le réchauffement pressenti de l'Atlantique Nord pourrait avoir des résultats aggravant sur la sévérité et de la fréquence des conditions météorologiques violentes (Peterson, 2000). Quand on y ajoute l'augmentation générale de la vitesse du vent, également établie par les projections, on peut s'attendre à ce que les forêts de l'Atlantique connaissent des chablis d'envergure, surtout dans les régions côtières. Les essences à racines superficielles, typiques du Canada atlantique, sont particulièrement sujettes aux dommages causés par les vents violents (Peterson, 2000).

IMPACTS SUR LE SECTEUR FORESTIER



Jusqu'ici, ce rapport a porté sur les interactions actuelles et futures entre les changements climatiques et les écosystèmes forestiers, à l'échelle nationale et régionale. Dans ce chapitre, on examine les conséquences de cette transformation du climat pour le secteur forestier canadien, notamment les aspects suivants qui seront certainement touchés s'ils ne le sont pas déjà :

- l'aménagement des forêts (par ex. approvisionnement en bois et capacité d'atteindre les objectifs d'aménagement forestier);
- les opérations forestières (c.-à-d. capacité de fournir un approvisionnement stable de matières premières aux usines à un coût raisonnable avec le minimum d'impact sur l'environnement);
- l'industrie forestière (c.-à-d. capacité d'obtenir un rendement concurrentiel pour le capital investi);
- les communautés tributaires de la forêt (par ex. emplois, revenu, bien-être social, liens sociaux et culturels avec le paysage forestier avoisinant);
- les services publics que la société canadienne retire des forêts (par ex. habitat de la faune, lieux exceptionnels, air sain et eau potable, sols productifs, biodiversité, possibilités de loisirs et de tourisme et aspect esthétique) (figure 3).

L'ampleur et la nature des impacts dans ces différents domaines seront remarquablement différentes selon l'endroit et l'horizon temporel. Mais il est difficile de faire des prédictions précises et sans équivoque, particulièrement sur le long terme. En fait, parce que l'incertitude s'accumule à chaque étape, l'impact des changements climatiques sur le secteur forestier est plus difficile à prévoir que dans le cas des écosystèmes forestiers. Il est toutefois possible de s'y engager en inférant certaines conséquences pour le secteur forestier du Canada et en proposant certaines possibilités d'effets inéluctables pour l'aménagement et les opérations forestières.

Aménagement forestier

L'aménagement forestier, dans un contexte de terres publiques, concerne l'utilisation, la manipulation, l'aménagement et la transformation des forêts et des terres forestières avec des objectifs sociaux, économiques et environnementaux. C'est une opération d'envergure qui comprend généralement certains aspects de très nombreuses fonctions : inventaire et cartographie des forêts, estimation de la croissance et du rendement, analyse de la ressource et de l'approvisionnement en bois, règlements entourant la récolte, planification de l'aménagement du territoire et des forêts, zonage, consultation publique, application de normes environnementales, analyse et arbitrage des choix, reboisement et autres techniques sylvicoles, et protection des forêts. Les changements climatiques et les impacts biophysiques évoqués dans ce rapport empêcheront probablement les forestiers du Canada d'atteindre leurs objectifs d'aménagement forestier (Mote et coll., 2003; Ogden et Innes, 2007b). Il s'ensuit qu'il faudra peut-être modifier les objectifs d'aménagement et les moyens utilisés pour les atteindre.

La majorité (94 %) des terres forestières du Canada sont publiques. Des concepts comme la possibilité annuelle de coupe et le rendement soutenu à long terme offrent des moyens d'en mesurer physiquement les stocks de bois. La possibilité annuelle de coupe

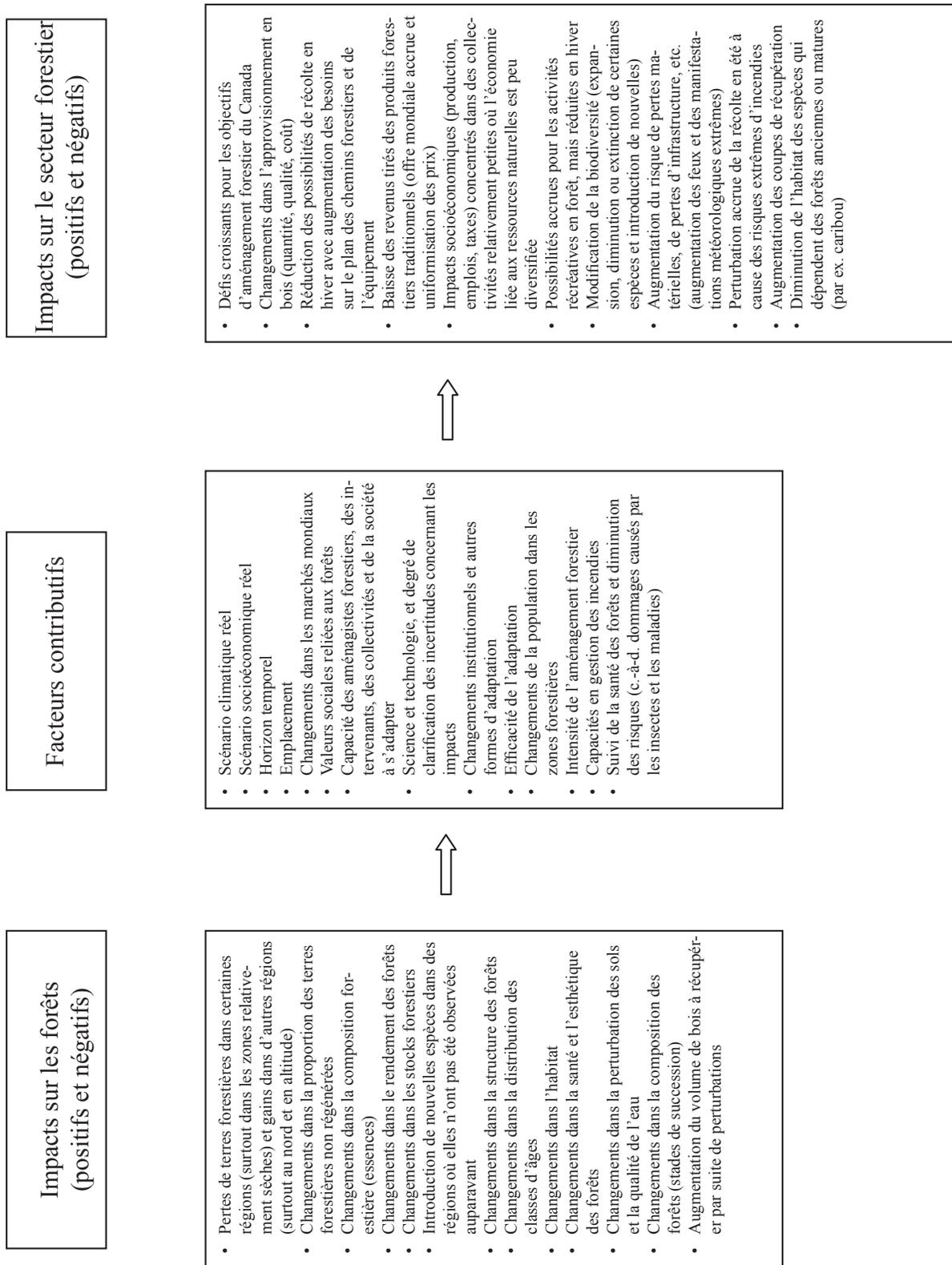


Figure 3. Impacts des changements climatiques sur le secteur forestier.

MESSAGES CLÉS

APPROVISIONNEMENT EN BOIS

- **La modification de l’approvisionnement en bois pourrait être positive ou négative selon l’endroit, l’échelle de temps et l’adaptation humaine aux effets des changements climatiques.**
- **Les régions qui sont actuellement chaudes et sèches pourraient à terme subir une diminution de leur productivité et de leurs stocks.**
- **L’ampleur des incidences socioéconomiques résultant des changements survenant dans l’approvisionnement en bois dépendra de la rapidité de ces changements.**
- **Si les changements sont graduels, les aménagistes forestiers seront en mesure de s’adapter et de s’ajuster selon les données actualisées.**
- **Les impacts les plus graves surviendront quand la modification de l’approvisionnement en bois se produira en peu de temps. L’expérience actuelle du dendroctone du pin ponderosa démontre bien cette réalité.**

correspond au volume de coupe ciblé par les aménagistes forestiers afin d’atteindre leurs objectifs (notamment le rendement soutenu). Pour déterminer la possibilité annuelle de coupe, on tient compte de multiples facteurs, notamment les suivants : facteurs socioéconomiques, quantité de terres forestières publiques mises de côté et désignées comme terrains commerciaux, capacité productive du territoire désigné, stocks forestiers, pertes prévues en raison des perturbations, efforts d’aménagement (par ex. reboisement, éclaircie, amélioration génétique des arbres), âge de rotation et contraintes réglementaires (par ex. contraintes d’approvisionnement). Les paramètres de l’approvisionnement forestier comme la possibilité annuelle de coupe et le rendement soutenu à long terme ne sont pas des mesures statiques. Elles sont régulièrement modifiées et mises à jour pour suivre l’évolution des données pertinentes, notamment celles qui concernent le territoire, les priorités sur l’utilisation des ressources, les pertes inattendues provenant des perturbations, la productivité et l’accessibilité (par ex. nouvelles routes) (Hauer et coll., 2001).

Les changements climatiques ont déjà modifié l’approvisionnement en bois et continueront de le faire à l’avenir. Quelle que soit la zone de planification, l’impact net des changements climatiques sur l’approvisionnement en bois sera déterminé par de nombreux autres facteurs interdépendants, y compris leurs incidences sur les superficies forestières, la croissance, les régimes de perturbation, les efforts d’aménagement, les contraintes réglementaires, le succès de la régénération et la composition forestière. À l’échelle locale, la modification de l’approvisionnement en bois pourrait être positive ou négative selon l’endroit, l’échelle de temps et l’adaptation humaine aux effets des changements climatiques.

L’ampleur des impacts socioéconomiques engendrés par la modification de l’approvisionnement en bois dépendra fondamentalement de la rapidité de cette évolution. Même lents et graduels, les changements qui surviendront dans l’approvisionnement seront importants avec le temps et il faut en tenir compte dès aujourd’hui dans la planification de l’aménagement forestier. Mais si la transformation est graduelle, les forestiers, l’industrie forestière et les communautés tributaires des forêts seront probablement en mesure de s’adapter et de s’ajuster. Dans le cas de l’industrie, la

question clé sera de savoir si les changements mettent en péril les immobilisations. Si les changements climatiques ne font pas tomber l'approvisionnement en deçà des besoins d'une usine donnée au cours de sa vie utile, alors l'impact net pourrait être relativement faible étant donné qu'il sera possible d'ajuster et d'adapter les technologies et les immobilisations aux nouvelles conditions forestières.

Les effets socioéconomiques seront le plus durement ressentis dans le cas des modifications soudaines de l'approvisionnement en bois. L'expérience du dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique démontre que certains effets provoqués par le réchauffement climatique peuvent en très peu de temps contribuer à un changement radical de l'approvisionnement en bois. Par exemple, la possibilité annuelle de coupe dans le district forestier de Vanderhoof, dans la zone forestière de Prince George, est passée d'un niveau traditionnel d'environ 2 millions de mètres cubes (autour de l'an 2000) au chiffre actuel d'environ 6,5 millions de mètres cubes (pour favoriser la récupération du pin tué par le dendroctone [Pederson, 2004]). Selon le scénario de projection le plus défavorable, la récolte de ce district pourrait chuter à environ 1 million de mètres cubes par an d'ici 2020 (une fois la phase de récupération terminée), puis augmenter graduellement jusqu'à 1,75 million de mètres cubes sur une période de 50 ans (Pederson, 2004). De telles fluctuations locales de l'approvisionnement, et les bouleversements qui en découlent dans la production et l'emploi en un temps relativement court, peuvent engendrer des défis considérables pour les collectivités et les compagnies forestières.

Un deuxième enjeu concerne le degré auquel les changements climatiques affecteront la capacité du Canada d'atteindre ses objectifs d'aménagement forestier durable (Mote et coll., 2003; Ogden et Innes, 2007b). Le Conseil canadien des ministres des forêts a développé un cadre de travail qui définit l'aménagement forestier durable et fournit une base pour mesurer le progrès accomplis pour y arriver (CCMF, 2006). Ce cadre de travail repose sur six critères qui représentent d'importantes catégories de valeurs que la société canadienne associe aux forêts et à l'aménagement forestier :

- 1) Diversité biologique
- 2) État et productivité des écosystèmes
- 3) Sol et eau
- 4) Contribution des forêts aux cycles écologiques planétaires
- 5) Avantages économiques et sociaux
- 6) Responsabilité de la société

Le cadre de travail comprend également un ensemble d'indicateurs ou de mesures permettant d'évaluer dans chaque cas la performance du Canada dans l'obtention d'un niveau socialement acceptable d'avantages.

Les changements climatiques, qui sont indépendants de la volonté du secteur canadien de l'aménagement forestier, ont un potentiel de nuisance pour chacune de ces catégories de valeurs (Ogden et Innes, 2007b). Par exemple, le critère 1 (diversité biologique) spécifie que « le maintien de l'étendue naturelle des écosystèmes et de la capacité de leurs composantes à réagir aux forces et aux processus externes fournissent l'équilibre nécessaire à la préservation de la diversité des espèces ». Toutefois, comme on l'a mentionné, les changements climatiques outrepasseront probablement la capacité des espèces de migrer et ils entraîneront presque à coup sûr, au fil du temps, des déséquilibres et des modifications de la composition forestière et de la distribution des

espèces. Par conséquent, il ne sera probablement pas possible, avec la venue des changements climatiques, de conserver les espèces actuelles, ni la configuration des écosystèmes et la répartition des classes d'âge que nous connaissons actuellement (Hebda, 1998).

Le critère 2 (état et productivité des écosystèmes) indique que « le développement durable de nos écosystèmes forestiers repose sur leur capacité de maintenir les fonctions et les processus écologiques et de se perpétuer à long terme ». Le secteur forestier canadien pourrait devoir se doter d'approches d'aménagement fondamentalement nouvelles s'il veut atteindre cet objectif. Plus particulièrement, il pourrait avoir besoin d'un système de gestion qui prévoit les conditions futures, encourage et facilite la migration et le déplacement des espèces et des génotypes, et admette que les écosystèmes se déplaceront avec le temps.

Le critère 3 (sol et eau) déclare que « la construction de routes d'accès et autres pratiques forestières pourraient avoir divers impacts sur la quantité et la qualité du sol et de l'eau ». Toutefois, comme on le verra au prochain chapitre, les changements climatiques ont déjà provoqué le raccourcissement des opérations forestières en hiver. Cela signifie que l'industrie forestière pourrait être obligée de construire davantage de routes afin de poursuivre ses activités. Les possibilités de perturbation du terrain sont également amplifiées si l'on franchit plus fréquemment des sols non gelés pour faire la récolte.

Le critère 4 (rôle des forêts dans les cycles écologiques planétaires) précise que « les indicateurs de ce critère portent sur le rôle des forêts et du secteur forestier dans le cycle planétaire du carbone ». Les indicateurs de performance comprennent des mesures telles que la variation nette du carbone des écosystèmes forestiers. Les effets à long terme des changements climatiques sur le carbone piégé dans les forêts du Canada sont inconnus. Cependant, les augmentations prévues des perturbations (incendies, insectes et maladies) pourraient provoquer l'émission dans l'atmosphère d'importantes quantités de carbone actuellement stockées dans les écosystèmes forestiers (voir par exemple Kurz et coll. [2008]).

MESSAGES CLÉS

OBJECTIF D'AMÉNAGEMENT FORESTIER

- **Les changements climatiques vont • Les changements climatiques mettront à l'épreuve notre capacité d'atteindre nos objectifs d'aménagement forestier.**
- **Le secteur de l'aménagement forestier doit envisager des moyens de commencer à tenir compte des changements climatiques dans ses objectifs d'aménagement forestier et dans les moyens à privilégier pour les atteindre.**

Étant donnée la vulnérabilité des forêts et le potentiel d'impacts généralisés sur toute une gamme de biens et de services que les forêts procurent à la société canadienne, il faut commencer dès maintenant à tenir compte des facteurs liés aux changements climatiques dans tous les aspects de l'aménagement forestier au Canada (Mote et coll., 2003; McKinnon et Webber, 2005; Lazar, 2005; Ogden et Innes, 2007b). Une des premières choses à faire serait d'accroître notre capacité d'estimation des impacts futurs et d'en tenir compte dans les analyses et les plans à long terme entourant l'approvisionnement forestier. Deuxièmement, étant donné que les changements climatiques ont des

conséquences majeures pour notre capacité d'atteindre les objectifs d'aménagement forestier telles qu'ils sont définis actuellement, le secteur de l'aménagement forestier doit commencer à réviser ses objectifs, de même que les moyens à privilégier pour les atteindre. Ogden et Innes (2007b) font un examen approfondi des options que les forestiers pourraient envisager (à noter que l'adaptation est abordée un peu plus loin au Chapitre 6). Haley et Nelson (2007) ont établi les propriétés et attributs qu'il faudrait idéalement privilégier dans un nouveau modèle de tenures afin de faciliter et d'améliorer la capacité du Canada de réaliser une foresterie durable. Il s'agit de notions comme la légitimité sociale, la flexibilité, la transparence, la sécurité, la diversité, l'application rentable de la réglementation et l'établissement équitable mais efficace des prix du bois sur pied.

OPÉRATIONS FORESTIÈRES

- **Les compagnies forestières observent déjà les effets des changements climatiques qui s'expriment concrètement par le raccourcissement des saisons de récolte hivernale.**
- **La période favorable aux travaux sur sol gelé continuera de diminuer avec le temps.**
- **La réduction des possibilités de récolte hivernale pourrait signifier la construction de chemins additionnels ou l'utilisation d'équipement différent dans les sites sensibles, ce qui fera augmenter les coûts du bois livré à l'usine.**

Opérations forestières

Selon des entretiens avec des compagnies forestières de la Saskatchewan, les changements aux opérations de récolte saisonnières sont déjà importants. Durant l'hiver 2005-2006, les travaux sur terrain gelé n'ont commencé qu'après le premier janvier. Les « secteurs d'hiver » comprennent les sites humides, ceux qui sont sujets au compactage des sols ou qui sont inaccessibles durant l'été. Les activités de récolte forestière qui devaient se faire sur sol gelé ont donc été remplacées par d'autres qui se font sur des sites plus secs (dans les « secteurs d'été »). Compte tenu des projections qui nous présentent pour l'avenir des hivers plus chauds avec davantage de précipitations (à noter que les chutes de neige précoce isolent le sol et limitent le gel), on peut prédire que la période favorable aux travaux sur sol gelé continuera de se rétrécir (Barrow et coll., 2004). Selon le Modèle régional canadien du climat (Laprise et coll., 2003), la proportion d'eau gelée dans les 100 premiers cm de sol diminuera durant les mois d'hiver d'ici les années 2050. Pour le territoire de l'entente de gestion forestière de Mistik dans le nord-ouest de la Saskatchewan, une diminution d'environ 10 % est prévue pour chaque mois de décembre à mars et de 30 % en avril (Johnston, 2007). Il s'agit d'un problème potentiel sérieux pour de nombreuses régions de la forêt boréale étant donné que certains territoires faisant l'objet d'ententes de gestion forestière comprennent 40 % de milieux humides.

Les compagnies forestières n'ont pas vraiment de choix et doivent composer avec une diminution des périodes de gel du sol. À court terme, on peut exploiter davantage les secteurs accessibles l'été, mais à la longue les stocks de bois s'y épuiseront. Certains ont suggéré de construire des chemins plus permanents, mais ce genre de projet est coûteux. De plus, la politique provinciale de gestion forestière de plusieurs administrations vise à réduire au minimum la construction de chemins permanents et de restaurer les chemins

temporaires une fois la récolte terminée. L'équipement spécialisé (par ex. les pneus à grande portance) est disponible mais cher, et ne sert qu'en de courtes périodes chaque année. De plus, certains de ces équipements exigent un entretien supplémentaire, ce qui vient encore augmenter les coûts.

Industrie forestière

L'industrie forestière canadienne risque d'être affectée par les changements climatiques parce que ces changements entraîneront des modifications dans le coût et la disponibilité du bois d'œuvre et qu'ils bouleverseront les marchés internationaux (van Kooten et Arthur, 1989). On a déjà mentionné dans ce rapport les incidences des changements climatiques pour l'approvisionnement en bois et les opérations forestières. Nous allons cette fois examiner de quelles façons l'industrie forestière canadienne pourrait être affectée par les changements que pourraient subir les marchés mondiaux.

Le Canada est le plus grand pays exportateur de produits forestiers au monde. Et ces produits forestiers sont en retour d'importantes marchandises d'exportation pour le Canada et revêtent ainsi une grande importance pour l'économie du pays. Mais Sohngen et Sedjo (2005) sont d'avis que les changements climatiques vont accroître l'approvisionnement en bois à travers le monde. Car si dans certaines régions du monde les forêts pourraient subir un déclin, elles s'étendraient dans d'autres régions. On prévoit donc généralement qu'il se produira une augmentation de l'approvisionnement mondial de produits forestiers, laquelle amènera dans son sillage une restructuration du commerce international. Cependant, certains pays y gagneront plus que d'autres, et ce sont donc les avantages concurrentiels des pays exportateurs qui détermineront l'ordre nouveau. Sohngen et Sedjo (2005) affirment que les changements climatiques réduiront les retombées économiques (c.-à-d. les bénéfiques) pour les producteurs d'Amérique du Nord. La réduction des bénéfiques sera importante dans la première partie du 21^e siècle en raison d'un déclin du rapport des prix et de la part relative de marché des producteurs de l'Amérique du Nord. Les producteurs de l'hémisphère sud seront avantagés par les changements climatiques et cet avantage persistera durant tout le 21^e siècle.

Perez-Gracia et coll. (2002) ont fait pour divers pays des prédictions de l'impact sur les marchés exercé par les changements climatiques d'ici 2040. De tous les pays compris dans

Les producteurs canadiens de produits forestiers sont particulièrement vulnérables à la restructuration des marchés en comparaison de leurs homologues du reste du monde.

l'analyse, le Canada est le seul où les producteurs subiraient des effets négatifs. Qui plus est, ces impacts négatifs devraient être considérables. En fait, les analyses nous amènent à penser que les producteurs canadiens de produits forestiers sont particulièrement vulnérables à la restructuration des marchés en comparaison de leurs homologues du reste du monde.

Il est important de noter que cet impact sur les marchés devrait s'étaler sur une longue période. On prévoit en outre que les types de changements structurels qu'entraîneront les changements climatiques se produiront parallèlement à toute une gamme d'autres

changements qui affecteront simultanément les marchés des produits forestiers. Les adaptations technologiques, les différends commerciaux, les variations des taux de change et des taux d'intérêt ainsi que les changements de goûts et de préférences des consommateurs ne sont que quelques exemples des modifications qui se produiront en

même temps que le bouleversement des marchés par les changements climatiques. Il pourrait ainsi être difficile d'isoler les effets des changements climatiques des autres forces qui s'exercent sur les marchés, et il pourrait s'avérer difficile de développer ou d'implanter des mesures d'adaptation spécifiques en réaction aux premiers seuls.

Les coûts de la main-d'œuvre ainsi que ceux du bois sont relativement élevés au Canada. La part de marché du Canada dans les catégories traditionnelles de produits a, dans certains cas, déjà commencé à diminuer pour des raisons étrangères aux changements climatiques. Les pays dont les produits remplacent les produits canadiens sur les marchés internationaux devraient être d'importants bénéficiaires des changements climatiques (c.-à-d. les pays de l'Amérique du Sud et de l'Océanie) (Perez-Garcia et coll., 2002). L'adaptation doit donc, dans ce cas, tenir compte de l'effet combiné des changements climatiques et des autres facteurs touchant les marchés.

Il pourrait être nécessaire d'augmenter la capacité d'adaptation des entreprises canadiennes en identifiant, en abolissant ou en réduisant les barrières institutionnelles qui limitent la capacité du Canada de s'adapter et d'être compétitif sur les marchés mondiaux. Plus précisément, on a proposé les mesures suivantes : favoriser la mise au point de nouveaux produits à valeur ajoutée, développer des marchés dans des créneaux spécialisés, améliorer le rendement et réduire les coûts. Chacun de ces aspects nécessitera des engagements fermes en termes de développement technologique et d'innovation, ainsi qu'une forte résolution visant à détecter et à réduire les barrières institutionnelles qui ralentissent la capacité de production de l'industrie forestière à un coût concurrentiel, et qui l'empêchent de s'adapter et d'évoluer en réaction aux changements des conditions du marché (Haley et Nelson, 2007).

Collectivités tributaires des forêts

L'impact des changements climatiques n'affecte pas uniformément la société canadienne. Certains segments font face à des risques plus élevés à cause de leur lieu de résidence, de leur association avec des environnements vulnérables au climat et de leurs caractéristiques économiques, politiques et culturelles (Davidson et coll., 2003; Williamson et coll., 2007). La situation des collectivités rurales tributaires de l'industrie primaire est particulièrement inquiétante (Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts, 2003).

IMPACTS SUR LES MARCHÉS

- **Les changements climatiques pourraient entraîner une restructuration des marchés mondiaux des produits forestiers; les producteurs de l'hémisphère sud en seront les principaux bénéficiaires.**
- **Pour les producteurs nord-américains, l'impact d'une restructuration des marchés mondiaux provoquée par les changements climatiques pourrait être négatif.**
- **L'industrie forestière canadienne pourrait considérer une stratégie d'ensemble pour se positionner face aux impacts combinés des changements climatiques et des autres tendances sur les marchés mondiaux.**

Avec l'arrivée des changements climatiques, les collectivités tributaires des forêts doivent affronter le même type d'impacts et de risques que les autres collectivités : effets potentiels sur la santé, impacts sur les infrastructures et exposition aux phénomènes météorologiques extrêmes. Cependant, les premières font face à plusieurs facteurs additionnels qui contribuent à augmenter leur vulnérabilité générale aux changements climatiques (Williamson et coll., 2007), notamment leurs liens étroits avec le paysage forestier environnant sensible à ces changements, la hausse du risque d'exposition aux incendies de forêt (en certains endroits), la modification de l'approvisionnement forestier local et de la position concurrentielle des entreprises locales. Ces derniers facteurs peuvent avoir d'importantes conséquences sur l'économie locale, particulièrement quand elle est fortement tributaire du secteur des produits forestiers.

Davidson et coll. (2003) ont déterminé cinq facteurs socioéconomiques additionnels qui contribuent aux niveaux accrus de vulnérabilité des collectivités canadiennes tributaires des forêts :

- 1) les contraintes de la capacité d'adaptation (par ex. petites économies non diversifiées et force ouvrière locale hautement spécialisée dont les compétences ne se transfèrent pas à d'autres secteurs);
- 2) la possibilité d'une réaction à l'échelle macro des institutions devant la problématique des changements climatiques et qui affectera en fin de compte les petites collectivités rurales tributaires des forêts;
- 3) l'absence des changements climatiques parmi les facteurs menant aux décisions des aménagistes forestiers et des institutions forestières, ce qui pourrait aboutir à une aggravation des impacts à l'échelle des collectivités;
- 4) la possibilité d'une perception erronée des risques associés aux changements climatiques; et
- 5) une augmentation des risques, qui seraient multiples, interdépendants et simultanés.

L'effet combiné d'un potentiel d'impact élevé et d'une faible capacité d'adaptation signifie que les collectivités tributaires des forêts sont plus vulnérables que d'autres aux changements climatiques. Le degré de vulnérabilité réel variera d'une collectivité à l'autre. Quoiqu'il en soit, l'évaluation systématique et structurée de la vulnérabilité à l'échelle des collectivités peut aider les personnes et les collectivités à percevoir les principaux facteurs contribuant à leur vulnérabilité ou pouvant y contribuer dans l'avenir (Williamson et coll., 2006). Williamson et coll. (2007) présentent un cadre de travail et une approche pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle de la collectivité.



Williamson et coll. (2008) ont développé des méthodologies pour évaluer les impacts locaux et exposé les résultats d'une étude de cas dans laquelle on a examiné les conséquences biophysiques et socioéconomiques éventuelles des changements climatiques pour une collectivité tributaire des forêts du centre de la Colombie-Britannique (collectivité de Vanderhoof). L'étude de cas de Vanderhoof met en relief les enjeux de cette situation et les mécanismes par lesquels les collectivités tributaires des forêts sont exposées, sensibles et ainsi potentiellement vulnérables aux changements climatiques. Vanderhoof est actuellement touchée directement par l'infestation du dendroctone du pin ponderosa qui affecte la Colombie-Britannique. Comme on l'a déjà souligné, cette infestation s'explique en partie par les récents

changements climatiques. Le dendroctone du pin ponderosa a un impact considérable sur le capital forestier naturel sur lequel repose l'économie de Vanderhoof dans une bonne mesure. Dans l'immédiat, il en résulte une importante augmentation de la récolte locale, car on s'affaire à récupérer les arbres tués par le dendroctone. On prévoit cependant que la récolte va tomber dans cette région sous les niveaux historiques une fois la récupération terminée.

Pour évaluer la situation à long terme (c.-à-d. aux alentours de 2050), l'étude adopte l'approche des scénarios et en développe quatre portant sur les possibilités locales d'impact des changements climatiques à Vanderhoof. Ces scénarios reposent sur différentes hypothèses entourant le climat et les conditions socioéconomiques à venir. L'étude a démontré qu'à long terme (jusqu'à 2050) le couvert forestier perdurera dans cette région et, qu'en fait la productivité (et les possibilités de récolte) augmentera selon les scénarios climatiques envisagés pour Vanderhoof (quoique les récoltes n'atteindront pas celle de 2000). Cependant, les risques d'incendie dans la région de Vanderhoof devraient aussi augmenter d'ici 2050, ce qui pourrait réduire une partie des gains de productivité attendus. Autre facteur de risque pour une collectivité comme Vanderhoof qui est tributaire de l'industrie forestière, la rentabilité du marché des produits forestiers traditionnels pourrait s'affaiblir par suite de l'augmentation, généralement prévue, de l'approvisionnement mondial en bois que les changements climatiques devraient entraîner (voir section précédente) et des possibilités réduites de récolte en hiver.

Le cas de Vanderhoof démontre que les effets des changements climatiques sont parfois immédiats et importants. L'évaluation du niveau de vulnérabilité des collectivités face aux changements climatiques serait une première étape fort utile. Voici certaines des questions que les collectivités tributaires des forêts devraient commencer à élucider :

- En quoi le climat local a-t-il changé? Quels sont les changements actuels et ceux que les changements climatiques pourraient apporter dans la région?
- Quelles sont les possibilités régionales de manifestations météorologiques extrêmes et d'autres dangers comme les incendies de forêt et les inondations?
- Étant donné les changements prévus dans le risque de catastrophes, les mesures d'urgence en place sont-elles adéquates?
- Sur quels types d'actifs manufacturiers (bâtiments, équipement, infrastructure) et d'actifs naturels (forêts, agriculture, eau) repose actuellement l'économie locale et comment ces actifs seront-ils affectés par les changements climatiques et par l'évolution de l'économie mondiale?
- La collectivité peut-elle modifier la composition des avoirs dont elle dépend pour réduire sa vulnérabilité aux changements climatiques (par ex. diversification, substitution du capital naturel à des formes de capital moins vulnérables)?
- La collectivité possède-t-elle les capacités lui permettant de s'adapter? Comment la collectivité peut-elle renforcer ses capacités d'adaptation?

Biens publics et biens communs tributaires des forêts

Les gouvernements provinciaux détiennent la grande majorité (71 %) des terres forestières au Canada. Les forêts demeurent la propriété de l'État parce que la société canadienne a déterminé que la propriété publique est nécessaire pour obtenir des forêts le niveau optimal d'avantages sociaux et de biens et services non marchands (c.-à-d.

MESSAGES CLÉS

COLLECTIVITÉS TRIBUTAIRES
DES FORÊTS

- **Les collectivités tributaires des forêts pourraient être vulnérables aux changements climatiques en raison de leurs liens étroits avec un environnement forestier sensible au climat et de leurs caractéristiques économiques, sociales, politiques et culturelles particulières.**
- **Des facteurs comme la petite taille, la faible diversité économique et la main-d'œuvre hautement spécialisée pourraient gêner la capacité d'adaptation des collectivités tributaires des forêts.**
- **Les changements climatiques ont déjà affecté des collectivités du centre de la Colombie-Britannique et leurs effets se poursuivront au cours des 50 prochaines années.**
- **Une première démarche importante pour les collectivités est de commencer à évaluer leurs éléments de vulnérabilité aux changements climatiques, notamment leur exposition et leur sensibilité à cette transformation du climat, et leur capacité de s'y adapter en général.**

climat (Johnston et coll., 2006). Browne et Hunt (2007) ont établi que les changements climatiques auront probablement un effet positif sur les activités de plein air qui se déroulent en été, notamment à cause de la saison qui sera plus longue et des températures plus élevées. Les activités hivernales, toutefois, devraient accuser un déclin en raison du raccourcissement de la saison.

La diversité écologique comprend la diversité des espèces, la diversité génétique et la diversité des écosystèmes (Gray, 2005). Les changements qui surviendront dans la diversité écologique auront des impacts socioéconomiques importants. Bon nombre des

biens publics et biens communs).¹ Parmi les biens publics et les biens communs liés aux forêts, on peut citer l'air sain et l'eau potable, la productivité des sols, la faune et la flore, la protection et la préservation de la biodiversité, la valeur d'existence (c.-à-d. savoir que des espèces ou écosystèmes continuent d'exister), la valeur de transmission (c.-à-d. savoir que nous préservons le capital naturel pour les générations futures), les panoramas esthétiques et les possibilités d'activités récréatives en plein air. Les biens publics et les biens communs, de nature environnementale, fournis par les forêts qu'on retrouve sur les terres de la Couronne sont vulnérables aux changements climatiques parce qu'ils sont étroitement liés à la santé de ces forêts.

Les activités récréatives en plein air et la biodiversité sont deux importants produits forestiers non marchands. La population canadienne a passé 225 millions de jours en diverses activités de plein air en 1996 (Duwors et coll., 1999). Les éco-provinces forestières y représentaient 195 millions de journées-utilisateurs (86 %) (Williamson et coll., 2002). Les principales destinations pour ces activités étaient l'éco-province des Grands-Lacs et du Saint-Laurent et celle du Sud du bouclier boréal. Les activités récréatives de plein air dépendent du

¹ Les biens publics sont des biens qui sont non exclusifs (c.-à-d. les propriétés du bien sont telles qu'il ne faut empêcher personne de l'utiliser) et non concurrentiels (c.-à-d. les propriétés du bien sont telles que son utilisation par une personne n'en réduit pas la disponibilité pour une deuxième personne), par exemple les services de police, d'ambulance et d'incendies. La protection contre le crime, l'attention médicale rapide et la réduction du risque de pertes graves en cas d'incendie sont accessibles à tout le monde dans une administration donnée. Qui plus est, l'utilisation de ces services par une personne n'en réduit pas la disponibilité pour une autre personne. Un bien commun est un bien qui est non exclusif mais concurrentiel sur le plan de la consommation. Un exemple de bien commun serait la faune.

valeurs psychologiques des forêts ou valeurs de préservation (par ex. valeur d'option, valeur de legs, valeur d'existence, valeur intrinsèque) sont associées à la biodiversité et à la diversité écologique ou ont un lien étroit avec ces réalités (Hauer et coll., 2001). On prévoit que la diversité écologique changera considérablement au cours du prochain siècle en réaction non seulement aux changements climatiques, mais aussi aux activités humaines comme la modification de l'occupation du territoire et sa fragmentation (Gray, 2005). Varrin et coll. (2007) se sont penchés sur les effets des changements climatiques sur les espèces représentatives de l'Ontario. Ils ont noté que les risques de changements climatiques pour ces espèces ne sont pas unidirectionnels, mais qu'ils vont plutôt varier en fonction de chacune, de leurs traits spécifiques et de leurs interdépendances. Les risques les plus élevés concernent les espèces à faible aire de répartition géographique, vivant en populations réduites, exigeant un habitat spécialisé, à faible variabilité génétique et au pouvoir de dispersion limité, ainsi que celles dont la limite sud de l'aire de répartition est située au Canada. Même s'il faut poursuivre les recherches, on peut d'ores et déjà supposer que les changements climatiques exerceront des pressions additionnelles sur les espèces qui sont déjà en péril — par exemple le caribou des bois.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Sensibilisation croissante

L'inquiétude concernant les effets des changements climatiques sur les forêts canadiennes a commencé à s'exprimer pendant les années 1980. Depuis quelques années, on a noté une augmentation significative de la sensibilisation aux changements climatiques, des préoccupations entourant leurs impacts sur le secteur forestier et de la reconnaissance de la nécessité d'en tenir compte dans les prises de décision (Lemprière et coll., 2008).

- 1) Le Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts a souligné que les changements climatiques affecteront de manière significative l'agriculture, les forêts, l'eau, les collectivités rurales et les peuples autochtones. Il a recommandé d'intensifier les recherches, d'améliorer les communications et de façonner les programmes gouvernementaux pour favoriser l'adaptation (Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts, 2003).
- 2) L'Association des produits forestiers du Canada a noté que les changements climatiques « posent des risques significatifs à la santé, la vitalité et la durabilité à long terme des forêts et des nombreuses collectivités qui en dépendent » (Lazar, 2005, page 631). Elle réclame des politiques forestières qui conservent l'équilibre entre l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation des facteurs qui contribuent à ces changements.
- 3) Récemment, le gouvernement du Québec a annoncé une initiative de 6 millions de dollars pour examiner la vulnérabilité des forêts du Québec aux changements climatiques.
- 4) Le Chef forestier du Ministry of Forests and Range de la Colombie-Britannique a émis un avis selon lequel « il incombe aux gestionnaires des ressources d'adapter l'approche de l'aménagement forestier aux changements environnementaux et écologiques » (Snetsinger, 2006). Le ministère a réagi en mettant en place un certain nombre d'initiatives pour faire face aux impacts des changements climatiques et s'y adapter.
- 5) Le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario a financé des travaux de recherche ciblant l'impact des changements climatiques sur les forêts et les stratégies d'adaptation appropriées.
- 6) Le milieu professionnel de la foresterie a également lancé un dialogue sur les changements climatiques. Des articles et des numéros complets consacrés aux changements climatiques ont été présentés par *BC Forest Professional* (septembre-octobre 2006), *Canadian Silviculture* (novembre 2006) et *Forestry Chronicle* (Vol. 81, N° 5, septembre-octobre 2005). La déclaration N° 4 de l'Institut forestier du Canada demande aux chercheurs et aux gestionnaires de travailler de concert pour comprendre l'impact des changements climatiques sur les forêts du Canada et pour développer des stratégies et des approches adaptatives en vue de réduire cet impact (<http://www.cif-ifc.org/uploads/Website_Assets/F-Pos-4-Forests_Climate.pdf>, consulté le 23 avr. 2009).

- 7) Au niveau national, le Conseil canadien des ministres des forêts a établi les changements climatiques (atténuation et adaptation) et la transformation du secteur forestier comme étant « deux priorités d'importance nationale » pour le secteur forestier du Canada (CCMF, 2008).

Caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les forêts et le secteur forestier du Canada

Les changements climatiques présentent certaines caractéristiques qui en font un enjeu unique et particulièrement complexe pour le secteur forestier du Canada. Premièrement, l'expérience du dendroctone du pin ponderosa a démontré qu'il pouvait réellement se produire des impacts ou des phénomènes importants à l'échelle d'une région entière. Ces phénomènes sont habituellement le résultat de plusieurs facteurs interdépendants, dont parfois un seul est lié aux changements climatiques. On peut donc affirmer que les changements climatiques ont un effet précipitant dans la transformation des systèmes forestiers, mais que bien souvent ils ne sont pas seuls en cause. Comme on peut le voir dans la situation du dendroctone, des facteurs non climatiques peuvent contribuer à la vulnérabilité des systèmes forestiers, notamment les anciennes pratiques d'aménagement forestier, le défrichage et la suppression des incendies. On peut en conclure qu'il est peut-être possible de réduire l'impact des changements climatiques en adoptant des mesures préventives pour réduire la vulnérabilité du système (ou augmenter sa résilience) aux effets prévus.

Une deuxième particularité de la question des changements climatiques, c'est que les gestionnaires pourraient devoir gérer les forêts dans un environnement de plus en plus complexe, dynamique et incertain. Bien qu'il existe un certain degré de certitude entourant les changements climatiques et leur impact à l'échelle nationale, il y a, au contraire, à l'échelle des peuplements et des forêts, une incertitude significative qui augmente d'ailleurs avec la longueur des périodes de prévision. Pour guider les efforts locaux d'adaptation, il faut certainement s'attabler à prédire l'impact des changements climatiques à l'échelle des peuplements et des forêts, mais toute prévision en elle-même est entachée de beaucoup d'incertitude et s'avérera probablement erronée (c'est pourquoi il faut faire appel à plusieurs scénarios quand on évalue les conséquences du climat futur).

L'incertitude qui subsiste à l'échelle des peuplements et des forêts est attribuable aux nombreux facteurs interdépendants qui produisent en fin de compte des résultats particuliers pour un endroit donné, et au fait que l'incertitude s'accumule au fur et à mesure qu'on passe des prévisions du climat aux impacts sur les forêts et finalement aux répercussions sur le secteur forestier. Le degré d'incertitude augmente aussi avec la longueur de la période de prévision.

Certains gestionnaires pourraient croire qu'il est plus risqué de réagir à des impacts futurs incertains que de ne rien faire et qu'il faut composer avec les impacts lorsqu'ils se produisent, et non pas avant qu'ils se manifestent.

Toutefois, l'incertitude ne doit pas être utilisée comme excuse pour ne rien faire. Dans certains cas, les délais pourraient être justifiables. Dans d'autres cas, il serait parfaitement sensé de prendre des mesures préventives pour réduire le risque de conséquences négatives

... l'incertitude ne doit pas être utilisée comme excuse pour ne rien faire.

généralisées. Il faut par conséquent faire des évaluations systématiques et tenir compte de l'incertitude entourant les prévisions, ainsi que des coûts et avantages potentiels de l'inaction par rapport à l'action.

Si l'on veut faire face aux changements climatiques qui s'annoncent, il faut prendre des mesures rapidement. Une des options serait de commencer par évaluer la vulnérabilité des forêts et des systèmes humains qui dépendent des forêts ou qui y sont étroitement liés. On peut aller plus loin en amorçant le développement de stratégies d'adaptation et en renforçant les programmes de surveillance. L'évaluation de la vulnérabilité et le développement de stratégies d'adaptation font partie d'un processus itératif : ces évaluations et stratégies doivent être révisées et mises à jour au fur et à mesure de l'acquisition de données nouvelles.

L'impact des changements climatiques va varier dans l'espace et dans le temps. Qui plus est, il ne sera pas exclusivement négatif. Il est possible qu'à certains endroits on constate un accroissement de la productivité et une augmentation de la valeur des ressources forestières. L'adaptation peut jouer sur les deux tableaux : réduire les impacts négatifs et accroître les impacts positifs.

Adaptation

Le secteur forestier du Canada sera confronté à des changements climatiques dont le rythme et l'ampleur des conséquences n'ont pas de précédent historique. Il devra donc s'adapter (Lazar, 2005; McKinnon et Webber, 2005; Lemprière et coll., 2008) et il devra le faire sans l'avantage d'une expérience antérieure.

Adapter la gestion forestière de façon à réagir aux changements climatiques commence à être reconnu comme étant une nécessité (Lemmen et coll., 2008; CCMF, 2008).

L'adaptation comporte de nombreux avantages : 1) tirer profit des opportunités; 2) réduire les impacts potentiellement négatifs des changements climatiques; et 3) réduire les risques associés aux changements climatiques. On peut voir par quelques exemples

isolés que le processus d'adaptation a déjà commencé en foresterie canadienne. Par exemple, Millar Western Forest products Limited, en Alberta, évalue la façon de tenir compte des changements climatiques dans ses plans d'aménagement forestier à long terme (Yamasaki et coll., 2008). Comme on l'a mentionné au début de ce chapitre, quelques organismes provinciaux de gestion forestière commencent à penser à leurs besoins d'adaptation et le

Ministry of Forests and Range de la Colombie-Britannique va de l'avant avec une stratégie d'adaptation. Il s'agit, toutefois, d'étapes préliminaires et il faudra faire bien davantage pour se préparer et s'adapter aux changements climatiques imminents.

Bien qu'on reconnaisse de plus en plus la nécessité de s'adapter aux changements climatiques, il existe tout de même une certaine incertitude sur les paramètres précis de cette adaptation. Une première étape serait de cerner et de mieux comprendre les éléments de vulnérabilité des écosystèmes forestiers et des systèmes d'aménagement forestier (Spittlehouse, 2005, 2006, 2008; Lemprière et coll., 2008). Le système d'aménagement forestier considéré comme vulnérable serait celui pour lequel on prévoit

...il faudra faire bien davantage pour se préparer et s'adapter aux changements climatiques imminents.

des changements climatiques importants, qui est particulièrement sensible au type de changements climatiques qui sont actuellement prévus et celui dont la capacité d'adaptation est relativement faible (Smit et Pilosova, 2001; Johnston et Williamson, 2007).

Même après que les éléments de vulnérabilité ont été documentés, des répercussions imprévues surviendront probablement. Ainsi, les mesures particulières d'adaptation ne suffiront pas : il faudra en outre accroître la capacité générale d'adaptation des responsables de l'aménagement forestier et de leur entourage. Cette attitude comporte d'ailleurs tous les avantages : non seulement convient-elle face aux changements climatiques, mais elle mettrait également le secteur forestier en bonne position pour qu'il puisse aborder toute la gamme des changements à venir, qu'ils soient de nature sociale, politique ou économique, au pays ou à l'échelle mondiale. Selon Smit et Pilosova (2001), les attributs essentiels suivants caractérisent les systèmes dont la capacité adaptative est élevée :

- Une reconnaissance et une compréhension de l'urgence de l'enjeu;
- une capacité scientifique solide et l'accès à un éventail de technologies pour l'adaptation;
- des ressources financières;
- des institutions efficaces tournées vers l'avenir, auto-adaptatives et dont l'autorité flexible permet l'adaptation locale;
- un capital humain hautement qualifié, des réseaux efficaces et un niveau élevé de confiance entre les intervenants, facilitant l'échange d'information et le développement de solutions axées sur la collaboration; et,
- des mécanismes de production et de diffusion du savoir ainsi que de création d'outils et de bases de données.

Pour ce qui est des mesures d'adaptation particulières dans le secteur forestier canadien, Spittlehouse (2005, 2006, 2008) et Lemprière et coll. (2008) ont décrit un certain nombre de conditions pour que l'adaptation se produise. Il faut augmenter le niveau de sensibilisation et déployer des efforts pour éduquer le secteur forestier aux besoins d'adaptation, établir des objectifs pour les forêts futures et déterminer la vulnérabilité des écosystèmes forestiers, des collectivités forestières et de la société face aux changements climatiques. Il faut développer des mesures économiques pour l'adaptation, applicables à court et long terme. Il faut surveiller l'état des forêts pour être alerté quand les seuils critiques seront atteints. Finalement, il faut aménager la forêt de façon à réduire sa vulnérabilité et son délai de réhabilitation après une perturbation.

L'adaptation aux changements climatiques ne sera pas facile. Le secteur forestier canadien fait face à de nombreux défis d'adaptation (Spittlehouse, 2005). Le premier est le niveau élevé d'incertitude concernant l'orientation, l'ampleur et le rythme des transformations qui seront amenées par les changements climatiques (Spittlehouse 2005; Williamson et coll., 2006). Dans les milieux de l'aménagement forestier, il y a un manque généralisé de modèles et de méthodes de prédiction fiables permettant de prendre des décisions dans le contexte d'incertitude entourant les changements climatiques. Pour que l'adaptation soit efficace, il faudra disposer de modèles de prévision permettant d'estimer les contrecoups que les changements climatiques feront subir aux forêts et la réaction des forêts aux diverses mesures d'adaptation. Il faut redoubler d'effort pour améliorer ces modèles et pour en intégrer les résultats aux outils de prise de décisions et aux plans d'aménagement forestier. Cependant, il faut également admettre les limites de ces

modèles et reconnaître que les changements climatiques vont probablement produire des événements qu'on n'aura pas prévus. C'est pourquoi il faut dépasser le travail de prédiction et renforcer la capacité générale du secteur forestier à s'adapter aux événements imprévus (c.-à-d. la capacité adaptative), et les compétences en gestion du risque et en administration en présence d'incertitude (Ohlson et coll., 2005). La capacité des responsables de l'aménagement forestier de composer avec les incertitudes associées aux changements climatiques s'améliorera si les institutions sont flexibles, si elles donnent accès à un éventail d'options prescriptives et si elles font la promotion d'une gestion adaptative.

Le deuxième défi que doit affronter le secteur forestier canadien pour faire progresser l'adaptation concerne les obstacles institutionnels et politiques à cette adaptation, qu'il faut réduire ou éliminer. La plupart des politiques et institutions forestières ont été conçues et développées avec la prémisse d'un climat constant. Généralement, il n'y a pas, dans la gestion forestière canadienne, d'exigences ou de directives spécifiquement conçues pour encourager l'adaptation aux changements climatiques (Spittlehouse, 2005). Les politiques et les institutions forestières devront être modifiées, ou restructurées, pour accommoder les changements climatiques et pour encourager l'adaptation. Or ce sera difficile parce que les politiques et les institutions forestières évoluent lentement au fil du temps et qu'elles s'appuient sur l'expérience historique. Par leur résistance au changement et leur fidélité à l'expérience passée, les politiques et institutions forestières nous procurent ainsi une certaine part de stabilité et de prévisibilité. Mais quand il s'agit d'encourager l'adaptation, efficace et économiquement rationnelle, les institutions et politiques forestières doivent se tourner vers l'avenir et adopter une attitude flexible. Le défi de l'avenir réside dans la réingénierie des institutions et des politiques qui devront favoriser l'adaptation dans l'efficacité, sans sacrifier la prévisibilité et la stabilité.

De nombreux auteurs ont élaboré des mesures précises que le secteur forestier canadien pourrait commencer à adopter pour s'adapter aux changements climatiques, notamment Spittlehouse et Stewart (2004), Spittlehouse (2005, 2006, 2008), Ohlson et coll. (2005), Johnston et coll. (2006), Ogden et Innes (2007b) et Lemprière et coll. (2008). Certains exemples représentatifs sont énumérés dans le tableau 1. On encourage les lecteurs à consulter les articles pour un examen plus complet des options d'adaptation.

Conclusion

Le but de ce rapport est d'éveiller la conscience face aux changements climatiques, à leurs impacts sur le secteur forestier canadien et à leurs conséquences pour l'aménagement forestier et le secteur forestier canadien. Car le secteur forestier du Canada ressent déjà et continuera de ressentir l'impact de changements climatiques. Ces changements viennent rapidement et auront des conséquences importantes sur la capacité du Canada de gérer les forêts de façon économique et durable tout en respectant l'environnement. En fin de compte, c'est toute la foresterie et ses dirigeants qui devront s'adapter. Le rapport cherche donc à informer le milieu de l'aménagement forestier et voudrait contribuer à un débat constructif sur les mesures d'adaptation qu'il convient d'adopter.

L'un des éléments les plus marquants de cette situation, c'est que nous affrontons des niveaux élevés d'incertitude en ce qui concerne les transformations qui se profilent à l'horizon. Mais l'incertitude ne doit pas être une barrière. Elle ne doit pas nous empêcher d'entreprendre le processus d'adaptation, même si elle rend cette adaptation plus

complexe. La science peut aider à réduire l'incertitude au fil du temps. Les changements climatiques constituent fondamentalement une problématique scientifique, mais ils recèlent un potentiel immense de répercussions socioéconomiques et politiques. Pour y voir clair, il faudra par conséquent consentir des efforts de recherche scientifique considérables, mieux soutenus, financés et orientés. Mais ces travaux scientifiques ne doivent pas et ne peuvent pas avancer indépendamment des besoins des décideurs politiques et des aménagistes forestiers. En somme, il faut mettre en place les mécanismes qui permettront de les encadrer et de les lier directement aux politiques, à la planification et aux décisions.

Tableau 1. Sommaire des options d'adaptations possibles pour l'aménagement des forêts canadiennes

- Planter des géotypes de remplacement ou de nouvelles espèces en prévision du climat futur.

- S'entendre sur des scénarios climatiques normalisés aux fins d'analyses.

- Modifier les zones de transfert de semences.

- Développer des technologies pour utiliser le bois selon ses nouvelles qualités et dimensions.

- Consentir à augmenter les coupes de récupération.

- Tenir compte des variables du climat dans les modèles de croissance et de rendement, et faire entrer les effets des changements climatiques dans les analyses à long terme des stocks de bois et dans les plans d'aménagement forestier.

- Tenir compte des changements climatiques dans les plans d'affectation du territoire et envisager des modifications d'affectation à certains endroits (forêt pour agriculture et vice versa).

- Raccourcir la période de rotation.

- Développer des paysages et des communautés de type « Intelli-feu ».

- Prévoir des paysages visant à minimiser la prolifération d'insectes et de maladies.

- Adopter les principes d'évaluation du risque et de gestion adaptative.

- Diversifier l'éventail des actifs forestiers de la société.

- Mettre au point et implanter des systèmes et des pratiques de remplacement pour la récolte.

- Prendre en considération les changements climatiques dans la planification, la construction et le remplacement des infrastructures.

- Se préparer à un approvisionnement forestier marqué par les variations.

- Engager un dialogue avec le public sur les valeurs et la gestion en période de changements climatiques.

- Maintenir la connectivité dans un paysage diversifié et dynamique.

- Exercer une surveillance pour connaître la nature et le moment des changements.

- Mettre en place des institutions, restructurées ou nouvelles, qui favorisent les mesures d'adaptation économiquement rentables et efficaces et qui fournissent aux responsables de l'aménagement forestier les outils nécessaires pour atteindre leurs objectifs.

- Modifier les objectifs d'aménagement forestier durable et les moyens de les atteindre.

- Se préparer à la réduction des travaux forestiers en hiver.

- Se préparer à l'augmentation des incendies de forêt.

Recommandations

Johnston et coll. (2006) ont fait les cinq recommandations suivantes pour positionner le secteur forestier canadien afin qu'il se prépare aux changements climatiques :

1. Renforcer la capacité d'entreprendre à différentes échelles l'évaluation intégrée des éléments de vulnérabilité des systèmes.

Il faut réaliser une évaluation intégrée des éléments de vulnérabilité face aux changements climatiques selon de multiples échelles spatiales et temporelles et pour divers types de systèmes humains. Par exemple, il est essentiel de connaître la vulnérabilité des systèmes à l'échelle nationale, régionale et locale. Il faut disposer de méthodes et d'approches prenant en considération la vulnérabilité des différents types de systèmes humains devant les changements climatiques, y compris les systèmes d'aménagement forestier, les zones protégées et les collectivités tributaires des forêts.

2. Augmenter les ressources pour les travaux scientifiques sur les impacts et l'adaptation et accroître également les ressources pour surveiller les impacts des changements climatiques.

Les changements climatiques sont une réalité et ils auront des répercussions majeures sur l'état futur des forêts. Pour atteindre des objectifs socialement acceptables dans l'aménagement des forêts, les experts-forestiers font appel à des modèles prédictifs (par ex. croissance et rendement, approvisionnement en bois). Dans le passé, les données historiques servaient d'intrant dans ces modèles. Cette approche ne convient plus, car les conditions historiques ne sont plus représentatives des conditions futures. Désormais, les décisions fondées sur la prémisse que les conditions futures ressembleront aux conditions historiques sont vraisemblablement vouées à l'échec. Ainsi, notre succès en matière d'aménagement forestier dépend de notre capacité à prédire l'impact futur des changements climatiques sur les forêts. Cependant, les experts-forestiers font face à un problème : si les changements climatiques rendent les prévisions indispensables (en dépit de conditions changeantes), ils augmentent par le fait même l'incertitude des prévisions. Pour contribuer à réduire cette incertitude, on peut affecter des ressources additionnelles à la surveillance des impacts et à la recherche sur les impacts et les voies d'adaptation. Pour mettre au point des stratégies efficaces d'adaptation aux changements climatiques, il faudra absolument posséder des méthodes de prédiction plus fiables, comportant moins d'incertitudes, pouvant en outre fournir des prévisions à des échelles pertinentes pour les décideurs.

3. Examiner les politiques forestières, la planification forestière, les pratiques d'aménagement forestier et les institutions pour évaluer notre capacité d'atteindre nos objectifs sociaux dans un contexte de changements climatiques.

Le secteur forestier canadien hésite encore à tenir compte des changements climatiques dans ses politiques et sa planification. Cette attitude est sans doute en partie liée au niveau élevé d'incertitude concernant les impacts à venir, particulièrement à l'échelle des peuplements et des forêts. Néanmoins, les compagnies forestières commencent déjà subir certains impacts qui pourraient être liés aux changements climatiques (par ex. le raccourcissement de la saison de récolte en hiver et l'expansion de l'aire de distribution du dendroctone du pin ponderosa). De plus, le long cycle de croissance des arbres place l'aménagiste forestier dans une situation unique où il doit dès maintenant tenir compte des changements climatiques dans la planification et le processus décisionnel. Par conséquent, l'attention aux changements climatiques ne doit aucunement être reportée par le secteur forestier.

Il y a un certain nombre d'aspects de l'aménagement forestier actuel sur lesquels les changements climatiques futurs auront des répercussions importantes. Ainsi, il est nécessaire de considérer les changements climatiques :

- dans les prévisions de croissance et de rendement,
- dans les analyses d'approvisionnement en bois à long terme et la planification de l'aménagement forestier,
- dans les choix en matière de reboisement,
- dans la définition des normes des programmes de protection et dans celles de certains types d'adaptation comme la réduction de la vulnérabilité par la configuration des paysages (les paysages « intelligents » résistant au feu et aux insectes), et
- dans les objectifs de gestion durable des forêts et les pratiques utilisées par les experts-forestiers, ou pouvant l'être, pour atteindre des objectifs modifiés.

Dans certains cas, il pourra s'avérer nécessaire de recourir à une méthode d'évaluation des effets cumulatifs pour déterminer les mesures appropriées. Dans certaines régions, par exemple, les risques de sécheresse et d'incendie s'accroîtront en même temps; c'est pourquoi une modification de la composition forestière favorisant le pin gris pourrait avoir des avantages multiples.

4. Implanter les principes de gestion du risque et de gestion adaptative dans l'aménagement forestier.

Les changements climatiques augmenteront les risques et l'incertitude associés aux objectifs d'aménagement forestier. Une modification du risque pourrait avoir des conséquences sur les valeurs forestières et sur les choix qui sont faits. On peut faire valoir que l'approche actuelle en aménagement forestier est normative et déterministe. Une telle approche fondée sur les antécédents peut être satisfaisante lorsque les conditions sont stables, mais elle n'est pas adaptée quand les conditions futures sont susceptibles de varier de multiples façons.

L'augmentation des risques dans l'approvisionnement en bois par suite des changements climatiques pourrait avoir de réels impacts économiques et pourrait en outre influencer sur l'optimisation des plans de récolte. Ignorer la modification des risques provoquée par les changements climatiques entraînera des erreurs dans l'estimation des avantages tirés des forêts ainsi que des décisions de planification sous-optimales. Tenir compte des risques et les gérer constituera un important élément d'adaptation aux changements climatiques. Les stratégies de gestion des risques comprennent des éléments de prévention, de réduction et de répartition des risques (par ex. régimes d'assurances) ainsi que de diversification des options.

Outre l'apprentissage de la gestion des risques, il faut se préparer davantage à composer avec les événements imprévus et imprévisibles. C'était le cas, par exemple, de l'infestation du dendroctone du pin ponderosa. La diversité fonctionnelle, la flexibilité et les systèmes de gestion qui reconnaissent l'incertitude et l'imprévisibilité et en tiennent compte, de même que les structures sociales qui encouragent la gestion adaptative, prennent toute leur importance quand un système est vulnérable devant les impondérables.

5. Maintenir ou améliorer la capacité de communications, de réseautage et d'échange d'information avec le public canadien et au sein du secteur forestier.

La communication, le réseautage et la coopération au sein du secteur forestier canadien seront essentiels pour relever efficacement les nombreux défis dans un contexte de climat en évolution. Le capital social est essentiellement le niveau de réseautage entre les éléments de la structure sociale et le niveau de confiance mutuel des diverses composantes de la structure sociale. Le capital social fournit aux individus et aux groupes de l'information et des ressources auxquelles ils n'auraient peut-être pas accès autrement. Il contribue à la capacité de résilience et à l'adaptabilité.



- Aber, J.; Neilson, R.P.; McNulty, S.; Lenihan, J.M.; Bachelet, D.; Drapek, R.J. 2001. **Forest processes and global environmental change: predicting the effects of individual and multiple stressors.** *Bioscience* 51(9):735–751.
- Aitken, S.N.; Yeaman, S.; Holliday, J.A.; Wang, T.; Curtis-McLane, S. 2008. **Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree species.** *Evol. Appl.* 1(1):95–111.
- (AFGRC) Alberta Forest Genetics Resources Council. 2007. **Climate change and genetic resources.** Alta. For. Genet. Resour. Counc., Edmonton (AB). [en ligne] <<http://www.abtreegene.com/images/climate%20change.pdf>>, consulté le 2 nov. 2007.
- Amiro, B.D.; Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Flannigan, M.D.; Wotton, B.M. 2001. **Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian boreal forest.** *Int. J. Wildland Fire* 10:405–413.
- Amiro, B.D.; Logan, K.A.; Wotton, B.M.; Flannigan, M.D.; Todd, J.B.; Stocks, B.J.; Martell, D.L. 2004. **Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest.** *Int. J. Wildland Fire* 13:391–400.
- Amthor, J.; Baldocchi, D.D. 2001. **Terrestrial higher plant respiration and net primary production.** Pages 33–52 en J. Roy, B. Saugier, H.A. Mooney, éditeurs. *Terrestrial global productivity.* Academic Press, New York, NY.
- Andalo, C.; Beaulieu, J.; Bousquet, J. 2005. **The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada.** *For. Ecol. Manag.* 205:169–182.
- Ayres, M.; Lombardero, M. 2000. **Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens.** *Sci. Total Environ.* 262:263–286.
- Baldocchi, D.D.; Amthor, J. 2001. **Canopy photosynthesis: history, measurements and models.** Pages 9–26 en J. Roy, B. Saugier, H.A. Mooney, éditeurs. *Terrestrial global productivity.* Academic Press, New York, NY.
- Barnett, T. P.; Adam, J.C.; Lettenmaier, D.P. 2005. **Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions.** *Nature* 433: 303–309.
- Barrow, E.; Maxwell, B.; Gachon, P., éditeurs. 2004. **Climate variability and change in Canada: past, present and future.** *Serv. Can. de météorologie, Environ. Can., Toronto (Ont.). ACSD Science Assess.* Ser. N° 2.
- Bazzaz, F.A. 1996. **Plants in changing environments.** Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- BC Ministry of Forests and Range. 2006a. **Preparing for climate change: adapting to impacts on British Columbia's forests and range.** *B.C. Minist. For. Range, Victoria (C.-B).* [en ligne] <http://www.for.gov.bc.ca/mof/climate_change/preparing_for_climate_change.pdf>, consulté le 29 nov. 2007.
- BC Ministry of Forests and Range. 2006b. **Forest health – aerial overview survey.** [en ligne] <<http://www.for.gov.bc.ca/hfp/health/overview/overview.htm>>, consulté le 11 août 2008.

- Beaubien, E.G.; Freeland, H.J. 2000. **Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperatures.** *Int. J. Biometeorol.* 44(2):53–59.
- Beaulieu, J.; Rainville, A. 2005. **Adaptation to climate change: genetic variation is both a short- and a long-term solution.** *For. Chron.* 81(5):704–709.
- Beniston, M. 2003. **Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts.** *Clim. Chang.* 59:5–31.
- Berg, E.E.; Henry, J.D.; Fastie, C.L.; De Volder, A.D.; Matsuoka, S.M. 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. Manag.* 227:219–232.
- Bergeron, Y.; Flannigan, M.D. 1995. **Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest.** *Water Air Soil Pollut.* 82:437–444.
- Bergeron, Y.; Leduc, A.; Harvey, B.; Gauthier, S. 2002. **Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest.** *Silva Fenn.* 36(1):81–95.
- Bergeron, Y.; Flannigan, M.D.; Gauthier, S.; Leduc, A.; Lefort, P. 2004. **Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: implications for sustainable forest management.** *Ambio* 33(6):356–360.
- Bergeron, Y.; Cyr, D.; Drever, R.; Flannigan, M.; Gauthier, S.; Kneeshaw, D.; Lauzon, E.; Le Goff, H.; Lesieur, D.; Logan K. 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.** *Can. J. For. Res.* 36:2737–2744.
- Bernier, P.; Houle, D. 2005. **Les changements climatiques et la productivité forestière.** Pages 13–17 en A.T. Pham, éditeur. **Actes du Colloque changements climatiques et foresterie : impacts et adaptation.** *Ouranos*, Montréal (Québec).
- Bertrand, A.; Castonguay, Y. 2003. **Plant adaptations to overwintering stresses and implications of climate change.** *Can. J. Bot.* 81(12):1145–1152.
- Berz, G.A. 1993. **Global warming and the insurance industry.** *Interdiscip. Sci. Rev.* 18:120–125.
- Boland, G.J.; Higgins, V.; Hopkin, A.; Nasuth, A.; Melzer, M.S. 2003. **Climate change and plant disease in Ontario.** Pages 152–170 en S. Greifenhagen and T.L. Noland, comps. **A synopsis of known and potential diseases and parasites associated with climate change.** *Min. des Rich. nat. de l'Ont. Inst. de rech. for.*, Sault Ste. Marie (Ont.). For. Res. Inf. Pap. No. 154.
- Boland, G.J.; Melzer, M.S.; Hopkin, A.; Nassuth, A. 2004. **Climate change and plant diseases in Ontario.** *Can. J. Plant Pathol.* 26:335–350.
- Boutin, R.; Robitaille, G. 1995. **Increased soil nitrate losses under mature sugar maple trees affected by experimentally induced deep frost.** *Can. J. For. Res.* 25:588–602.
- Brooks, J.R.; Flanagan, L.B.; Ehleringer, J.R. 1998. **Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses.** *Can. J. For. Res.* 28:524–533.

- Browne, S.A.; Hunt, L.M. 2007. **Climate change and nature-based tourism, outdoor recreation, and forestry in Ontario: potential effects and adaptation strategies.** *Ont. Minist. Nat. Resour., Appl. Res. Dev. Branch., Sault Ste. Marie (Ont.). Clim. Chang. Res. Rep.* CCRR-08.
- Burton, P.J.; Cumming, S.G. 1995. **Potential effects of climatic change on some western Canadian forests, based on phonological enhancements to a patch model of forest succession.** *Water Air Soil Pollut.* 82:401–414.
- Burton, I.; Huq, S.; Lim, B.; Pilofosova, O.; Schipper, E.L. 2002. **From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy.** *Clim. Policy* 2:145–159.
- Camill, P. 2005. **Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late 20th century climate warming.** *Clim. Chang.* 68:135–152.
- Candau, J.-L.; Fleming, R.A. 2005 **Landscape-scale spatial distribution of spruce budworm defoliation in relation to bioclimatic conditions.** *Can. J. For. Res.* 35:2218–2232.
- Carroll, A.L.; Taylor, S.W.; Régnière, J.; Safranyik, L. 2004. **Effects of climate change on range expansion by the Mountain Pine Beetle in British Columbia.** Pages 223–232 *en* T.L. Shore, J.E. Brooks et J.E. Stone, éditeurs. Proc. **Mountain pine beetle symposium: challenges and solutions.** 30 et 31 oct. 2003, Kelowna (C.-B.). *Res. nat. Can., Serv. can. des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.), Inf. Rep.* BC-X-399.
- Carroll, A.L. 2006. **The influence of climate change on the mountain pine beetle: Today's reality or tomorrow's problem.** *BC For. Prof.* 13(5):16–17.
- Carter, K.K. 1996. **Provenance tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species.** *Can. J. For. Res.* 26:1089–1095.
- Cavey, J.F.; Hoebeke, E.R.; Passoa, S.; Lingafelter, S.W. 1998. **A new exotic threat to North American hardwood forests: an Asian longhorned beetle, *Anoplophora glabripennis*: larval description and diagnosis.** *Proc. Entomol. Soc. Wash.* 100(2):373–381.
- Cerezke, H.F. 1995. **Egg gallery, brood production, and adult characteristics of mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae*, Hopkins (*Coleoptera:Scolytidae*), in three pine hosts.** *Can. Entomol.* 127:995–965.
- Chapin, F.S.; Callaghan, T.; Bergeron, Y.; Fukuda, M.; Johnstone, J.; Juday, G.; Zimov, S. 2004. **Global change and the boreal forest: thresholds, shifting states or gradual change?** *Ambio* 33(6):361–365.
- Chuine, I.; Thuiller, W.; Morin, X. 2004. **Impacts of climate change on populations and species distributions.** Pages 1–6 *en* G.A. O'Neill and J.D. Simpson, éditeurs. 2004. **Climate change and forest genetics.** Proc. 29th Meet. Can. Tree Improv. Assoc., Kelowna (C.-B.), 26-29 juill. 2004. [en ligne] <<http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/Fo1-16-2004E2.pdf>>, consulté le 1^{er} nov. 2007.
- Clark, J.S. 1998. **Why trees migrate so fast: confronting theory with dispersal biology and the paleorecord.** *Am. Nat.* 152:204–224.
- Cohen, S., éditeur. 1997. **Mackenzie Basin impact study: Final report.** Environmental Adaptation Research Group. *Atmos. Environ. Serv., Environ. Can., Ottawa (Ont.).*

Colombo, S.J. 1998. **Climatic warming and its effect on bud burst and risk of frost damage to white spruce in Canada.** *For. Chron.* 74(4):567–577.

Colombo, S.J.; Buse, L.J., éditeurs. 1998. **The impacts of climate change on Ontario's forests.** *Ont. Minist. Nat. Resour., Ont. For. Res. Inst., For. Res. Inf. Paper No. 143.* Queen's Printer for Ontario, Toronto (Ont.).

Colombo, S.J. 2006. **How OMNR staff perceive risks related to climate change and forests.** *Ont. Minist. Nat. Resour., Appl. Res. Dev. Branch. Res. Inf. Note 2.* Queen's Printer, Toronto (Ont.).

Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts. 2003. **Le changement climatique : nous sommes menacés.** Rapport final. L'honorable Donald Oliver, Q.C., président. *Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts,* Ottawa (Ont.).

(CCMF) Conseil canadien des ministres des forêts. 2006. **Critères et indicateurs de l'aménagement forestier durable au Canada: Bilan national 2005.** *Ress. nat. Can. et Cons. can. des ministres des forêts,* Ottawa (Ont). 177 p.

(CCMF) Conseil canadien des ministres des forêts. 2008. **Une vision pour les forêts du Canada : 2008 et au-delà.** [en ligne] <http://ccfm.org/pdf/Vision_FR.pdf>, consulté le 23 avr. 2009.

Conseil de l'Arctique. 2005. **Arctic climate impact assessment: scientific report.** *Cambridge Univ. Press,* Cambridge, UK. [en ligne] <<http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html>>, consulté le 5 nov. 2007.

Dale, V.H.; Joyce, L.A.; McNulty, S.; Neilson, R.P. 2000. **The interplay between climate change, forests, and disturbances.** *Sci. Total Environ.* 262:201–204.

Dale, V.H.; Joyce, L.A.; McNulty, S.; Neilson, R.P.; Ayres, M.P.; Flannigan, M.D.; Hanson, P.J.; Irland, L.C.; Lugo, A.E.; Peterson, C.J.; Simberloff, D.; Swanson, F.J.; Stocks, B.J.; Wotton, B.M. 2001. **Climate change and forest disturbances.** *Bioscience* 51(9):723–733.

Danby, R.K.; Hik, D. 2007. **Variability, contingency and rapid changes in recent sub-arctic alpine tree line dynamics.** *J. Ecol.* 95:352–363.

Davidson, D.J.; Williamson, T.B.; Parkins, J.R. 2003. **Understanding climate change risk and vulnerability in northern forest-based communities.** *Can. J. For. Res.* 33:2252–2261.

Davis, M.B. 1989. **Lags in vegetation response to greenhouse warming.** *Clim. Chang.* 15:75–82.

DeLucia, E.; Hamilton, J.; Naidu, S.; Thomas, R.; Andrews, J.; Finzi, A.; Lavine, M.; Matamala, R.; Mohan, J.; Hendrey, G.; Schlesinger, W. 1999. **Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment.** *Science (Wash.)* 284:1177–1179.

Duwors, E.; Villeneuve, M.; Fillion, F.; Reid, R.; Bouchard, P.; Legg, D.; Boxall, P.; Williamson, T.; Bath, A.; Meis, S. 1999. **The importance of nature to Canadians: highlights of the 1991 survey.** *Environ. Can., Serv. Can. de la faune,* Ottawa (Ont.).

Dyer, J.M. 1995. **Assessment of climatic warming using a model of forest species migration.** *Ecol. Model.* 17:199–219.

- Easterling, D.R.; Meehl, G.A.; Parmesan, C.; Changnon, S.A.; Karl, T.R.; Mearns, L.O. 2000. **Climate extremes: observations, modeling and impacts.** *Science (Wash.)* 289(22):2068–2074.
- Etheridge, D.; MacLean, D.; Wagner, R.; Wilson, J. 2005. **Changes in landscape composition and stand structure from 1945–2002 on an industrial forest in New Brunswick, Canada.** *Can. J. For. Res.* 35:1965–1977.
- Farquhar, G.D.; von Caemmerer, S.; Berry, J.A. 1980. **A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species.** *Planta* 149:78–90.
- Filmon, G. 2004. **Firestorm 2003 provincial review.** Province of British Columbia, Victoria (C.-B.). [en ligne] <<http://www.2003firestorm.gov.bc.ca/firestormreport/default.htm>>, consulté le 29 nov. 2007.
- Flannigan, M.D.; Harrington, J.B. 1988. **A study of the relation of meteorology variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953–80.** *J. Appl. Meteorol.* 27:441–452.
- Flannigan, M.D.; Van Wagner, C.E. 1991. **Climate change and wildfire in Canada.** *Can. J. For. Res.* 21:66–72.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.J.; Wotton, B.M. 2000. **Climate change and forest fires.** *Sci. Total Environ.* 262:221–229.
- Flannigan, M.; Campbell, I.; Wotton, I.; Carcaillet, C.; Richard, P.; Bergeron, Y. 2001. **Future fire in Canada's boreal forest: paleoecology results and general circulation model-regional climate model simulations.** *Can. J. For. Res.* 31:854–864.
- Flannigan, M.D.; Amiro, B.D.; Logan, K.A.; Stocks, B.J.; Wotton, B.M. 2005a. **Forest fires and climate change in the 21st century.** *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 11(4):847–859.
- Flannigan, M.D.; Logan, K.A.; Amiro, B.D.; Skinner, W.R.; Stocks, B.J. 2005b. **Future area burned in Canada.** *Clim. Chang.* 72:1–16.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.; Turetsky, M.; Wotton, M. 2008. **Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest.** *Glob. Chang. Biol.* 14:1–12.
- Flato, G.M.; Boer, G.J.; Lee, W.G.; McFarlane, N.A.; Ramsden, D.; Reader, M.C.; Weaver, A.J. 2000. **The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate.** *Clim. Dyn.* 16: 451–467.
- Fleming, R.A.; Volney, W.J.A. 1995. **Effects of climate change on insect defoliator population processes in Canada's boreal forest: some plausible scenarios.** *Water Air Soil Pollut.* 82:445–454.
- Fleming, R.A. 1996. **A mechanistic perspective of possible influences of climate change on defoliating insects in North America's boreal forests.** *Silva Fenn.* 30(2):281–294.
- Fleming, R.A.; Candau, J.-N. 1998. **Influences of climatic change on some ecological processes of an insect outbreak system in Canada's boreal forests and the implications for biodiversity.** *Environ. Monit. Assess.* 49:235–249.
- Fleming, R.A. 2000. **Climate change and insect disturbance regimes in Canada's boreal forests.** *World Resour. Rev.* 12(3):520–555.

- Fleming, R.A.; Candau, J.-N.; McAlpine, R.S. 2002. **Landscape-scale analysis of interactions between insect defoliation and forest fire in central Canada.** *Clim. Chang.* 55:251–272.
- Fleming, R.A. 2006. **Forecasting insect outbreak responses to climatic change.** *Can. Silv.* November. Page 9.
- Forget, É.; Drever, R.; Lorenzetti, F. 2003. **Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises — Revue de littérature.** Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue; *Ouranos*. 57 p. [en ligne] , <http://www.iqaff.qc.ca/publications_IQAFF/Changements%20climatiques%20%20impacts%20sur%20les%20forets%20quebecoises.PDF>, consulté le 23 avril 2009.
- Fosberg, M.A.; Goldammer, J.G.; Rind, D.; Price, C. 1990. **Global change: effects on forest ecosystems and wildfire severity.** Pages 463–486 en J.G. Goldammer, éditeur. **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges.** *Ecol. Stud.* 84. Springer-Verlag, Berlin.
- Francis, S.R. 1996. **Linking landscape pattern and forest disturbance: fire history of the Shakwak Trench, southwest Yukon Territory.** M.Sc. Thesis. *Univ. Alberta, Dep. Bot.*, Edmonton (AB).
- Furgal, C.; Prowse, T.D. 2008. Nord du Canada. Pages 57–118 en D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix, et E. Bush, éditeurs. **Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007.** *Gouvernement du Canada, Ottawa (Ont.)* 448 p. [en ligne] <http://www.adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_f.php>, consulté le 23 avr. 2009.
- Gamache, I.; Payette, S. 2004. **Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest-tundra of eastern Canada.** *J. Ecol.* 92:835–845.
- Girardin, M.P.; Bergeron, Y.; Tardif, J.C.; Gauthier, S.; Flannigan, M.D.; Mudelsee, M. 2006. **A 229-year dendroclimatic-inferred record of forest fire activity for the boreal shield of Canada.** *Int. J. Wildland Fire* 15:375–388.
- Girardin, M.P.; Raulier, F.; Bernier, P.Y.; Tardif, J.C. 2008. **Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based, and hybrid modeling approaches.** *Ecol. Model.* 213:209–228.
- Gillett, N.P.; Weaver, A.J.; Zwiers, F.W.; Flannigan, M.D. 2004. **Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires.** *Geophys. Res. Lett.* Vol. 31, L18211.
- Gitay, H.; Brown, S.; Easterling, W.; Jallow, B. 2001. **Ecosystems and their goods and services.** Pages 235–342 en J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White, K.S. éditeurs. **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability.** Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press, New York, NY.*
- (GIEC) Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. 2007. **Résumé à l'intention des décideurs.** Pages 1–18 en **Climate change 2007: the physical science basis.** Contribution of Working Group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.* [en ligne] <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/arc4-wg1.htm>>, consulté le 11 juill. 2008.

- Goetz, S.J.; Bunn, A.G.; Fiske, G.J.; Houghton, R.A. 2005. **Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 102:13521–13525.
- Goldblum, D.; Rigg, L.S. 2005. **Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal ecotone, Ontario, Canada.** *Can. J. For. Res.* 35:2709–2718.
- Graumlich, L.J. 1993. **Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region.** *Can. J. For. Res.* 23:133–143.
- Gray, D. 2004. **The gypsy moth life stage model: landscape-wide estimates of gypsy moth establishment using a multi-generational phenology model.** *Ecol. Model.* 176:155–171.
- Gray, P. 2005. **Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples.** *For. Chron.* 81(5):655–661.
- Gray, D. 2008. **The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada.** *Clim. Chang.* 87:361–383.
- Green, D. 2004. **Fire weather report: end of year report.** *Government of Yukon Community Services, Wildland Fire Management, Whitehorse, YT.*
- Grime, J.P. 1993. **Vegetation functional classification systems as approaches to predicting and quantifying vegetation change.** Pages 293–305 *en* A.M. Solomon and H.H. Shugart, éditeurs. **Vegetation dynamics and global change.** *Chapman-Hall, New York, NY.*
- Haley, D.; Nelson, H. 2007. **Has the time come to rethink Canada's crown forest tenure systems?** *For. Chron.* 83(5):630–641.
- Hamann, A.; Wang, T. 2006. **Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia.** *Ecology* 87(11):2773–2786.
- Hansen, A.J.; Dale, V.H. 2001. **Biodiversity in US forests under global climate change.** *Ecosystems* 4:161–163.
- Hansen, A.J.; Neilson, R.P.; Dale, V.H.; Flather, C.H.; Iverson, L.R.; Currie, D.J.; Shafer, S.; Cook, R.; Bartlein, P.J. 2001. **Global change in forests: responses of species, communities, and biomes.** *Bioscience* 51(9):765–779.
- Harrington, R.; Fleming, R.A.; Wolwod, I.P. 2001. **Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted?** *Agric. For. Entomol.* 3:233–240.
- Hauer, G.; Williamson, T.; Renner, M. 2001. **Socioeconomic impacts and adaptive responses to climate change: a Canadian forest sector perspective.** *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (AB).* Inf. Rep. NOR-X-373.
- Hebda, R. 1998. **Atmospheric change, forests, and biodiversity.** *Environ. Monit. Assess.* 49:195–212.
- Hebda, R. 2006. **Transformations: climate change and forestry.** *BC For. Prof.* 13(5):12–13.
- Hebda, R. 2007. **Ancient and future grasslands: climate change and insights from the fossil record and climate models.** *BC Grassl.* 11:14–16.

Henderson, N.; Hogg, E.; Barrow, E.; Dolter, B. 2002. **Climate change impacts on the island forests of the Great Plains and the implications for nature conservation policy.** *Prairie Adaptation and Research Collaborative (PARC)*, Regina, SK. [en ligne] <http://www.parc.ca/pdf/research_publications/forestry1.pdf>, consulté le 27 mai 2007.

Higgins, S.I.; Nathan, R.; Cain, M.L. 2003. **Are long-distance dispersal events in plants usually caused by nonstandard means of dispersal?** *Ecology* 84:1945–1956.

Hogg, E.H. 1994. **Climate and the southern limit of the western Canadian boreal forest.** *Can. J. For. Res.* 24:1835–1845.

Hogg, E.H.; Hurdle, P.A. 1995. **The aspen parkland in western Canada: a dry-climate analogue for the future boreal forest.** *Water Air Soil Pollut.* 82:391–400.

Hogg, E.H. 1997. **Temporal scaling of moisture and forest-grassland boundary in western Canada.** *Agric. For. Meteorol.* 84:115–122.

Hogg, E.H.; Brandt, J.P.; Kochtubajda, B. 2002. **Growth and dieback of aspen forests in northwestern Alberta, Canada in relation to climate and insects.** *Can. J. For. Res.* 32: 823–832.

Hogg, E. H.; Bernier, P.Y. 2005. **Climate change impacts on drought-prone forests in western Canada.** *For. Chron.* 81(5):675–682.

Hogg, E.H.; Brandt, J.P.; Kochtubajda, B. 2005. **Factors affecting interannual variation in growth of western Canadian aspen forests during 1951–2000.** *Can. J. For. Res.* 35:610–622.

Hogg, E.H.; Brandt, J.P.; Michaelian, M. 2008. **Impacts of regional drought on the productivity, dieback, and biomass of western Canadian aspen forests.** *Can. J. For. Res.* 38:1373-1384.

Houghton, J.T.; Meira, F.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K. 1996. **Climate change 1995. The science of climate change.** *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.

Houle, D.; Ouimet, R.; Paquin, R.; Laflamme, J.-G. 1999. **Interactions of atmospheric deposition with a mixed hardwood and a coniferous forest canopy at the Lake Clair watershed (Duchesnay, Québec).** *Can. J. For. Res.* 29:1944–1957.

Iverson, L.R.; Prasad, A.M. 1998. **Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States.** *Ecol. Monogr.* 68(4):465–485.

Jackson, S.T. 2004. **Impacts of past climate change on species distributions of woody plants in North America.** Pages 7–11 en G.A. O’Neill and J.D. Simpson, éditeurs. 2004. **Climate change and forest genetics.** Proc. 29th Meet. Can. Tree Improv. Assoc. Kelowna (C.-B.). 26-29 juill. 2004. [en ligne] <<http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/Fo1-16-2004E2.pdf>>, consulté le 1^{er} nov. 2007.

Johnston, M. 2001. Sensitivity of boreal forest landscapes to climate change. Prepared for the Government of Canada’s Climate Change Action Fund. *Saskatchewan Res. Council*, Saskatoon, SK. SRC Publ. No. 11341–7E01.

Johnston, M.; Williamson, T. 2005. **Climate change implications for stand yields and soil expectation values: a northern Saskatchewan case study.** *For. Chron.* 81(5):683–690.

- Johnston, M.; Williamson, T.; Price, D.; Spittlehouse, D.; Wellstead, A.; Gray, P.; Scott, D.; Askew, S.; Webber, S. 2006. **Adapting forest management to the impacts of climate change in Canada. A BIOCAP Research Integration Program synthesis paper.** *BIOCAP* Canada, Kingston (Ont). [en ligne] <http://www.biocap.ca/rif/report/johnston_M.pdf>, consulté le 29 nov. 2007.
- Johnston, M. 2007. **The effects of climate change on frozen ground in the Mistik FMA Area.** *Saskatchewan Res. Counc.*, Saskatoon, SK. SRC Publ. No. 11949–4E07.
- Johnston, M.; Williamson, T. 2007. **A framework for assessing climate change vulnerability of the Canadian forest sector.** *For. Chron.* 83(3):1–4.
- Jorgenson, M.T.; Osterkamp, T.E. 2005. **Response of boreal ecosystems to varying modes of permafrost degradation.** *Can. J. For. Res.* 35:2100–2111.
- Juday, G.P.; Barber, V.; Duffy, P.; Linderhorm, H.; Rupp, S.; Sparrow, S.; Vaganov, E.; Yarie, J. 2005. **Forests, land management and agriculture.** Pages 781–854 *en Arctic Council. 2005. Arctic climate impact assessment: scientific report.* *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.
- Kasischke, E.S.; Turetsky, M.R. 2006. **Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska.** *Geophys. Res. Lett.* 33(9): L09703.
- Kirilenko, A.P.; Belotelov, N.V.; Bogatyrev, B.G. 2000. **Global model of vegetation migration: incorporation of climatic variability.** *Ecol. Model.* 132:125–133.
- Kirschbaum, M.U.F.; Fishlin, A. 1996. **Climate change impacts on forests.** Pages 93–129 *en* R. Watson, M. Zinyowera, and R. Moss, éditeurs. **Climate change 1995.** Contributions of Working Group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.
- Kirschbaum, M.U.F. 2000. **Forest growth and species distribution in a changing climate.** *Tree Physiol.* 20:309–322.
- Kirschbaum, M.U.F. 2005. **The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage.** *Soil Biol. Biochem.* 27:753–760.
- Körner, C.; Asshoff, R.; Bignucolo, O.; Hättenschwiler, S.; Keel, S.G.; Peláez-Riedl, S.; Pepin S.; Siegwolf, R.T.W.; Zotz, G. 2005. **Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂.** *Science (Wash.)* 309:1360–1362.
- Kurz, W.A.; Dymond, C.C.; Stinson, G.; Rampley, G.J.; Neilson, E.T.; Carroll, A.L.; Ebata, T.; Safranyik, L. 2008. **Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change.** *Nature* 452:987–990.
- Laprise, R.; Caya, D.; Frigon, A.; Paquin, D. 2003. **Current and perturbed climate as simulated by the second-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM-II) over northwestern North America.** *Clim. Dyn.* 21:405–421.
- Laroque, C.P.; Smith, D.J. 2003. **Radial-growth forecasts for five high elevation conifer species on Vancouver Island, British Columbia.** *For. Ecol. Manag.* 183:313–325.

Lazar, A. 2005. **A proud record of leadership in addressing and adapting to climate change.** *For. Chron.* 81(5):631–632.

Leggett, J.; Pepper, W.J.; Swart, R.J.; Edmonds, J.; Meira Filho, L.G.; Mintzer, I.; Wang, M.X.; Watson, J. 1992. **Emissions scenarios for the IPCC: an update.** Pages 68-95 *en Climate change 1992: the supplementary report to the Intergovernmental Panel on Climate Change scientific assessment.* Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

Lemmen, D.S.; Warren, F.J. 2004. **Climate change impacts and adaptation: a Canadian perspective.** *Ress. nat. Can., Dir. Imp. Adap. Chang. Clim.,* Ottawa (Ont.). [en ligne] : <http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_e.php>, consulté le 12 août 2008.

Lemmen, D.S.; Warren, F.J.; Lacroix, J.; Bush, E., éd. 2008. **Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007.** *Gouvernement du Canada,* Ottawa (Ont.). 448 p. [en ligne] <http://www.adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_f.php>, consulté le 23 avr. 2009.

Lemprière, T.C.; Bernier, P.Y.; Carroll, A.L.; Flannigan, M.D.; Gilsenan, R.P.; McKenney, D.W.; Hogg, E.H.; Pedlar, J.H.; Blain, D. 2008. **L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques.** *Ress. nat. can., Serv. can. des forêts, Centre de foresterie du Nord,* Edmonton (AB). Inf. Rep. NOR-X-416F. 64 p.

Lenihan, J.M. Neilson, R.P. 1995. **Canadian vegetation sensitivity to projected climatic change at three organizational levels.** *Clim. Chang.* 30(1):27–56.

Li, C.; Flannigan, M.D.; Corns, I.G.W. 2000. **Influence of potential climate change on forest landscape dynamics of west-central Alberta.** *Can. J. For. Res.* 30:1905–1912.

Liu, K.B. 1990. **Holocene paleoecology of the boreal forest and Great Lakes-St. Lawrence forest in northern Ontario.** *Ecol. Monogr.* 60:179–212.

Loehle, C. 2000. **Forest ecotone response to climate change: sensitivity to temperature response functional forms.** *Can. J. For. Res.* 30:1632–1645.

Loehle, C.; LeBlanc, D. 1996. **Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review.** *Ecol. Model.* 90:1–31.

Logan, J.A.; Régnière, J.; Powell, J.A. 2003. **Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics.** *Front. Ecol. Environ.* 1(3):130–137.

Long, S.P.; Ainsworth, E.A.; Rogers, A.; Ort, D.R. 2004. **Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future.** *Annu. Rev. Plant Biol.* 55:591–628.

Loo, J.; Ives, N. 2003. **The Acadian forest: historical condition and human impacts.** *For. Chron.* 79(3):462–474.

Lotsch, A.; Friedl, M.A.; Anderson, B.T.; Tucker, C.J. 2005. **Response of terrestrial ecosystem to recent northern hemispheric drought.** *Geophys. Res. Lett.* 32: L06705.

Luckman, B.; Kavanagh, T. 2000. **Impact of climate fluctuations on mountain environments in the Canadian Rockies.** *Ambio* 7:371–380.

MacDonald, G.M.; Szeicz, J.M.; Claricoates, J.; Dale, K. 1998. **Response of the central Canadian treeline to recent climatic changes.** *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 88(2):183–208.

- MacDonald, N.W.; Zak, D.R.; Pregitzer, K.S. 1995. **Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:233–240.
- Malcom, J.R.; Markham, A.; Neilson, R.P.; Garaci, M. 2002. **Estimated migration rates under scenarios of global climate change.** *J. Biogeogr.* 29:835–849.
- Mastrandrea, M.D.; Schneider, S.H. 2004. **Probabilistic integrated assessment of dangerous climate change.** *Science (Wash.)* 304:571–575.
- McAlpine, R.S. 1998. **The impact of climate change on forest fires and forest fire management in Ontario.** Pages 21–24 en S. Colombo and L.J. Buse, éditeurs. **The impacts of climate change on Ontario's forests.** *Ont. Minist. Nat. Resour., Ont. For. Res. Inst., For. Res. Inf. Pap. No. 143.*
- McCoy, V.M.; Burn, C.R. 2005. **Potential alteration by climate change of the forest-fire regime in the boreal forest of central Yukon Territory.** *Arctic* 58(3):276–285.
- McDonald, K.C.; Kimball, J.S.; Njoku, E.; Zimmerman, R.; Zhao, M. 2004. **Variability in springtime thaw in the terrestrial high latitudes: monitoring a major control on the biospheric assimilation of atmospheric CO₂ with spaceborne microwave remote sensing.** *Earth Interact.* 8(20):1–23.
- McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Lawrence, K.; Campbell, K.; Hutchinson, M.F. 2007. **Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees.** *Bioscience* 57(11):939–948.
- McKinnon, G.A.; Webber, S.L. 2005. **Climate change impacts and adaptation in Canada: is the forest sector prepared?** *For. Chron.* 81(5):653–654.
- McNulty, S.G.; Aber, D.A. 2001. **US national climate change assessment on forest ecosystems: an introduction.** *Bioscience* 51(9):720–722.
- Meehl, G.A.; Zwiers, F.; Evans, J.; Knutson, T.; Mearns, L.; Whetton, P. 2000. **Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change.** *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81(3):427–436.
- Monserud, R.A.; Tchepakova, N.M.; Leemans, R. 1993. **Global vegetation change predicted by the modified Budyko model.** *Clim. Chang.* 25:59–83.
- Mote, P.W.; Parson, E.A.; Hamlet, A.F.; Keeton, W.W.; Lettenmaier, D.; Mantua, N.; Miles, E.L.; Peterson, D.W.; Peterson, D.L.; Slaughter, R.; Snover, A.K. 2003. **Preparing for climatic change: the water, salmon, and forests of the Pacific Northwest.** *Clim. Chang.* 61:45–88.
- Morgan, M.G.; Pitelka, L.F.; Shevliakova, E. 2001. **Elicitation of expert judgements on climate change impacts on forest ecosystems.** *Clim. Chang.* 49:279–307.
- Näsholm, T.; Ekblad, A.; Nordin, A.; Giesler, R.; Högberg, P. 1998. **Boreal forest plants take up organic nitrogen.** *Nature* 392:914–916.
- Neilson, R.P. 1993. **Transient ecotone response to climatic change: some conceptual and modeling approaches.** *Ecol. Appl.* 3:385–395.
- Neilson, R.P.; Pitelka, L.F.; Solomon, A.M.; Nathan, R.; Midgley, G.F.; Fragoso, F.M.V.; Lischke, H.; Thompson, K. 2005. **Forecasting regional to global plant migration in response to climate change.** *Bioscience* 55(9):749–759.

Nigh, G.D.; Ying, C.C.; Quan, H. 2004. **Climate and productivity of major conifer species in the interior of British Columbia, Canada.** *For. Sci.* 50(5):659–671.

Nigh, G.D. 2006. **Impact of climate, moisture regime, and nutrient regime on the productivity of Douglas-fir in coastal British Columbia, Canada.** *Clim. Chang.* 76:321–337.

Norby, R.J.; DeLucia, E.H.; Gielen, B.; Calfapietra, C.; Giardina, C.P.; King, J.S.; Ledford, J.; McCarthy, H.R.; Moore, D.J.P.; Ceulemans, R.; De Angelis, P.; Finzi, A.C.; Karnosky, D.F.; Kubiske, M.E.; Lukac, M.; Pregitzer, K.S.; Scarascia-Mugnozza, G.E.; Schlesinger, W.H.; Oren, R. 2005. **Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 102:18052–18056.

Norgaard, R.B.; Baer, P. 2005. **Collectively seeing climate change: the limits of formal models.** *Bioscience* 55(1):961–966.

Nuttall, M.; Berkes, F.; Kofinas, G.; Vlassova, T.; Wenzel, G. 2005. **Hunting, herding, fishing, and gathering: indigenous peoples and renewable resource use in the Arctic.** Pages 649-690 *en Conseil de l'Arctique. 2005. Arctic climate impact assessment: scientific report.* Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

Ogden, A.E. 2006. **Forest management in a changing climate: building the environmental information base for southwest Yukon: overview report.** *Northern Climate Exchange*, Whitehorse, YT. Available at <http://yukon.taiga.net/swyukon/>, consulté le 29 mai 2007.

Ogden, A.E.; Innes, J. 2007a. **Perspectives of forest practitioners on climate change adaptation in the Yukon and Northwest Territories of Canada.** *For. Chron.* 83(4):557–569.

Ogden, A.E.; Innes, J. 2007b. **Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest.** *Int. For. Rev.* 9(3):713–733.

Ohlson, D.W.; McKinnon, G.A.; Hirsch, K.G. 2005. **A structured decision-making approach to climate change adaptation in the forest sector.** *For. Chron.* 81:97–103.

O'Neill, G.A.; Simpson, J.D., éditeurs. 2004. **Climate change and forest genetics.** Proc. 29th Meet. Can. Tree Improv. Assoc. [en ligne] <<http://www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/1400.htm>>, consulté le 29 nov. 2007.

O'Neill, G.A.; Hamann, A.; Wang, T. 2008. **Accounting for population variation improves estimates of the impact of climate change on species' growth and distribution.** *J. Applied Ecol.* 45:1040-1049.

Oren, R.; Ellsworth, D.; Johnsen, K.; Phillips, N.; Ewers, B.; Maier, C.; Schafer, K.; McCarthy, H.; Hendrey, G.; McNulty S.; Katul, G. 2001. **Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere.** *Nature* 411: 469–472.

Osterkamp, T.E.; Viereck, L.; Shur, Y.; Jorgenson, M.T.; Racine, C.; Doyle, A.; Boone, R.D. 2000. **Observations of thermokarst and its impact in boreal forests of Alaska, USA.** *Arct. Antarct. Alp. Res.* 32:303–315.

Overpeck, J.T., Rind, D.; Goldberg, R. 1990. **Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation.** *Nature* 343:51–53.

Overpeck, J.T.; Bartlein, P.J.; Webb, T. 1991. **Potential magnitude of future vegetation change in eastern North America: comparison with the past.** *Science (Wash.)* 254:692–695.

- Parisien, M.A.; Hirsch, K.G.; Lavoie, S.G.; Todd, J.B.; Kafka, V.G. 2004. **Saskatchewan fire regime analysis**. *Res. nat. Can., Serv. can. des forêts, Centre de foresterie du Nord*, Edmonton (AB). Rapp. d'inf. NOR-X-394.
- Parisien, M.A.; Kafka, V.; Flynn, N.; Hirsch, K.; Todd, B.; Flannigan, M. 2005. **Fire behaviour potential in central Saskatchewan under predicted climate change**. *Prairie Adaptation Research Collaborative*. Summary Doc. No. 05-01. [en ligne] <http://www.parc.ca/pdf/research_publications/forestry8.pdf>, consulté le 19 juill. 2007.
- Parker, W.; Colombo, S.; Cherry, M.L.; Flannigan, M.D.; Greifenhagen, S.; McAlpine, R.S.; Papadopol, C.; Scarr, T. 2000. **Third millennium forestry: what climate change might mean to forests and forest management in Ontario**. *For. Chron.* 76(3): 445–463.
- Parmesan, C.; Root, T.L.; Willig, M.R. 2000. **Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota**. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81(3):443–450.
- Parmesan, C.; Yohe, G. 2003. **A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems**. *Nature* 421:37–42.
- Payette, S.; Fortin, M.-J.; Gamache, I. 2001. **The subarctic forest-tundra: the structure of a biome in a changing climate**. *Bioscience* 51(9):709–718.
- Pederson, L. 2004. **Prince George timber supply area: rationale for allowable annual cut (AAC) determination**. *BC Minist. For.*, Victoria (C.-B.).
- Perez-Garcia, J.; Joyce, L.A.; McGuire, A.D.; Xiao, X. 2002. **Impacts of climate change on the global forest sector**. *Clim. Chang.* 59:439–461.
- Peterson, C.J. 2000. **Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change**. *Sci. Total Environ.* 262:287–311.
- Podur, J.; Martell, D.L.; Knight, K. 2002. **Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada**. *Can. J. For. Res.* 32:195–205.
- Prentice, I.C.; Sykes, M.T.; Cramer, W. 1993. **A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes**. *Ecol. Model.* 65:51–70.
- Price, C.; Rind, D. 1994. **Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies**. *J. Geophys. Res.* 99:108–123.
- Price, D.T.; Apps, M.J. 1995. **The boreal forest transect case study: global change effects on ecosystem processes and carbon dynamics in Canada**. *Water Air Soil Pollut.* 82: 203–214.
- Price, D.T.; Halliwell, D.H.; Apps, M.J.; Peng, C.H. 1999. **Adapting a patch model to simulate the sensitivity of central Canadian boreal ecosystems to climate variability**. *J. Biogeogr.* 26:1101–1113.
- Price, D.T.; Zimmermann, N.E.; van der Meer, P.J.; Lexer, M.J.; Leadley, P.; Jorritsma, I.T.M.; Schaber, J.; Clark, D.F.; Lasch, P.; McNulty, S.; Wu, J.; Smith, B. 2001. **Regeneration gap models: priority issues for studying forest responses to climate change**. *Clim. Chang.* 51:475–508.

Régnière, J.; Cooke, B.J.; Logan, J.A.; Carroll, A.L.; Safranyk, L. 2005. **Les changements climatiques et les ravageurs indigènes et exotiques : une nouvelle réalité?** Pages 26–30 en A.T. Pham, éditeur. Actes du colloque Changements climatiques et foresterie : impacts et adaptation. *Ouranos*, Montréal (Québec).

Rehfeldt, G.E.; Ying, C.C.; Spittlehouse, D.L.; Hamilton, D.A. 1999. **Genetic responses to climate in *Pinus contorta*: niche breadth, climate change, and reforestation.** *Ecol. Monogr.* 69(3):375–407.

Rehfeldt, G.E.; Tchebakova, N.M.; Parfenova, E.I. 2004. **Genetic responses to climate and climate change in conifers of the temperate and boreal forests.** Pages 12–24 en G.A. O'Neill and J.D. Simpson, J.D, éditeurs. 2004. **Climate change and forest genetics.** Proc. 29th Meet Can. Tree Improv. Assoc. [en ligne] <<http://www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/1402.htm>>, consulté le 1^{er} nov. 2007.

Reich, P.B.; Hobbie, S.E.; Lee, T.; Ellsworth, D.S.; West, J.B.; Tilman, D.; Knops, J.M.H.; Naeem, S.; Trost, J. 2006. **Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂.** *Nature* 440: 922-925 (13 April 2006).

Reynolds, J.F.; Bugmann, H.; Pitelka, L.F. 2001. **How much physiology is needed in forest gap models for simulating long-term vegetation response to global change? Challenges, limitations, and potentials.** *Clim. Chang.* 51:541–557.

Ritchie, J.C. 1987. **Postglacial vegetation of Canada.** *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.

Rizzo, B.; Wiken, E. 1992. **Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climatic change.** *Clim. Chang.* 21:37–55.

Roberts, L. 1989. **How fast can trees migrate?** *Science (Wash.)* 243:735–737.

Roland, J.; Matter, S.F. 2007. **Encroaching forests decouple alpine butterfly population dynamics.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 104(34):13702–13704.

Rothman, D.S.; Herbert, D. 1997. **The socio-economic implications of climate change in the forest sector of the Mackenzie Basin.** Pages 225–241 en S.J. Cohen, éditeur. **Mackenzie Basin impact study: final report.** *Environ. Can., Serv. Env. Atmos.*, Ottawa (Ont.).

Roy, J.; Saugier, B. 2001. **Terrestrial primary productivity: definitions and milestones.** Pages 1–8 en J. Roy, B. Saugier, and H.A. Mooney, éditeurs. **Terrestrial global productivity.** *Academic Press*, San Diego, CA.

Rustad, L.E.; Melillo, J.M.; Mitchell, M.J.; Fernandez, I.J.; Steudler, P.A.; McHale, P.J. 2000. **Effects of soil warming on C and N cycling in northern U.S. forest soils.** Pages 357–381 en R. Mickler, R. Birsdey, and J. Horn, éditeurs. **Responses of northern U.S. forests to environmental change.** *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, New York, NY.

Rustad, L.E.; Campbell, J.; Marion, G.M.; Norby, R.J.; Mitchell, M.J.; Hartley, A.E.; Cornelissen, J.H.C.; Gurevitch, J. 2001. **A meta-analysis of the response of soil respiration, net N mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming.** *Oecologia* 126:543–562.

- Saporta, R.; Malcolm, J.R.; Martell, D.L. 1998. **The impact of climate change on Canadian forests.** Pages 319–382 *en* G. Koshida and W. Avis, éditeurs. **The Canada country study: climate impacts and adaptation.** Vol. 7. National sectoral volume. *Environ. Adapt. Res. Group*, Toronto (Ont.).
- Sauchyn, D.J.; Stroich, J.; Beriault, A. 2003. **A paleoclimatic context for the drought of 1999–2001 in the northern Great Plains of North America.** *Geogr. J.* 169:58–167.
- Savva, Y.; Denneler, B.; Koubaa, A.; Tremblay, F.; Bergeron, Y.; Tjoelker, M.G. 2007. **Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada.** *For. Ecol. Manag.* 242:636–647.
- Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N.W.; Prentice, I.C. 2006. **A climate change risk analysis for world ecosystems.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103(35):12116–13120.
- Service canadien des forêts. 2005a. **Will Hurricane Juan spark a spruce beetle attack?** *For. Health Biodivers. News* 9(1):2.
- Service canadien des forêts. 2005b. **Abrégé de statistiques forestières canadiennes.** [en ligne] <http://nfdp.ccfm.org/compendium/index_e.php>, consulté le 1^{er} mars 2006.
- Service canadien des forêts. 2005c. **Profils à l'échelle du pays.** Pages 20 à 26 *en* **L'état des forêts au Canada 2004–2005: La forêt boréale.** [en ligne] <<http://librairie.scf.rncan.gc.ca/>>. consulté le 23 avril 2009.
- Shvidenko, A.; Apps, M. 2006. **The international boreal forest research association: understanding boreal forests and forestry in a changing world.** *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.* 11:5–32.
- Silverton, J. 1998. **Plant phenotypic plasticity and non-cognitive behaviour.** *Trends Ecol. Evol.* 13 (7):255–256.
- Simard, A.J. 1997. **Atelier national sur l'ampleur des incendies de végétation au Canada : Rapport de l'atelier.** *Ress. nat. Can., For. Serv., Ottawa (Ont.).* Rapp. d'inf. Rep. ST-X-13F. 44 p.
- Simberloff, D. 2000. **Global climate change and introduced species in United States forests.** *Sci. Total Environ.* 262: 253–261.
- Singh, T.; Wheaton, E.E. 1991. **Boreal forest sensitivity to global warming: implications for forest management in western interior Canada.** *For. Chron.* 67:342–348.
- Smit, B.; Burton, I.; Klein, R.F.T.; Wandel, J. 2000. **An anatomy of adaptation to climate change and variability.** *Clim. Chang.* 45:223–251.
- Smit B., Pilifosova, O. 2001. **Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity.** Pages 877–912 *en* J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White, éditeurs. **Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability.** Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.
- Smith, S.L.; Burgess, M.M. 1999. **Mapping the sensitivity of Canadian permafrost to climate warming.** Pages 71–80 *en* M. Tranter, R. Armstrong, E. Brun, G. Jones, M. Sharp, M. Williams, éditeurs. **Interactions between the cryosphere, climate and greenhouse gases.** Proc. Int. Union Geodesy and Geophys., Birmingham, July 1999. *International Association of Hydrological Sciences*, Birmingham, UK. Publ. No. 256.

- Smith, J.B.; Schellnhuber, H.-J.; Mirza, M.M.Q. 2001. **Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis.** Pages 913–967 en J.J. McCarthy, O.F. Canzianni, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White, éditeurs. **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability.** Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.
- Snetsinger, J. 2006. **Government initiatives address climate change.** *BC For. Prof.* 13(5):14–15.
- Sohngen, B.; Sedjo, R. 2005. **Impacts of climate change on forest product markets: implications for North American producers.** *For. Chron.* 81(5):669–674.
- Soja, A.J.; Tchebakova, N.M.; French, N.H.F.; Flannigan, M.D.; Shugart, H.H.; Stocks, B.J.; Sukhinin, A.I.; Parfenova, E.I.; Chapin, F.S.; Stackhouse, P.W. 2007. **Climate induced boreal forest change: predictions versus current observations.** *Glob. Planet. Chang.* 56:274–296.
- Spittlehouse, D. L. 2003. **Water availability, climate change and the growth of Douglas-fir in the Georgia Basin.** *Can. Water Resour. J.* 28(4):673–688.
- Spittlehouse, D.; Stewart, R.B. 2004. **Adapting to climate change in forest management.** *J. Ecosyst. Manag.* 4(1):7–17.
- Spittlehouse, D. 2005. **Integrating climate change adaptation into forest management.** *For. Chron.* 81(5):691–695.
- Spittlehouse, D. 2006. **Adaptation to climate change in forestry.** *BC Prof. For.* 13(5): 22–23.
- Spittlehouse, D. 2008. **Climate change, impacts, and adaptation scenarios: climate change and forest and range management in British Columbia.** *B.C. Minist. For. Range, For. Sci. Progr.*, Victoria (C.-B.). Tech. Rep. 045.
- Ste-Marie, C.; Houle, D. 2006. **Forest floor gross and net nitrogen mineralization in three forest types in Quebec, Canada.** *Soil Biol. Biochem.* 38:2135–2143.
- Stewart, R.B.; Wheaton, E.; Spittlehouse, D. 1998. **Climate change: implications for the boreal forest.** *Sask. Res. Counc.*, Saskatoon (Sask.). Publ. No. 10442–4D98.
- Stocks, B.J.; Fosberg, M.A.; Lynham, T.J.; Mearns, L.; Wotton, B.M.; Yang, Q.; Jin, J.-Z.; Lawrence, K.; Hartley, G.R.; Mason J.A.; McKenney, D.W. 1998. **Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests.** *Clim. Chang.* 38:1–13.
- Stocks, B.J.; Mason, J.A.; Todd, J.B.; Bosch, E.M.; Wotton, B.M.; Amiro, B.D.; Flannigan, M.D.; Hirsch, K.G.; Logan, K.A.; Martell, D.L. Skinner, W.R. 2002. **Large forest fires in Canada, 1959–1997.** *J. Geophys. Res.* 107:8149.
- Taylor, S.W.; Carroll, A.L.; Alfaro, R.I.; Safranyik, L. 2006. **Forest, climate and mountain pine beetle dynamics.** Pages 67–94 en L. Safranyik and B. Wilson, éditeurs. **The mountain pine beetle: a synthesis of its biology, management and impacts on lodgepole pine.** *Res. nat. Can., Serv. can. des forêts, Centre de foresterie du Pacifique*, Victoria (C.-B.). [en ligne] <http://mpb.cfs.nrcan.gc.ca/synthesis_e.html>, consulté le 30 nov. 2007.
- Thompson, E.D.; Flannigan, M.D.; Wotton, B.M.; Suffling, R. 1998. **The effects of climate change on landscape diversity: an example in Ontario forests.** *Environ. Monit. Assess.* 49:213–233.

- Van Cleve, K.; Oechel, W.C.; Hom, J.L. 1990. **Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska.** *Can. J. For. Res.* 20: 1530–1535.
- Van Kooten, G.C.; Arthur, L. 1989. **Assessing economic benefits of climate change on Canada's boreal forest.** *Can. J. For. Res.* 19:463–470.
- Varrin, R.; Bowman, J.; Gray, P.A. 2007. **The known and potential effects of climate change on biodiversity in Ontario's terrestrial ecosystems: case studies and recommendations for adaptation.** *Ont. Minist. Nat. Resour., Appl. Res. Dev. Branch. Clim. Chang. Res. Rep.* CCRR-09.
- Verburg, P.S.J. 2005. **Soil solution and extractable soil nitrogen response to climate change in two boreal forest ecosystems.** *Biol. Fertil. Soils* 41(4):257–261.
- Volney, W.J.A. 1996. **Climate change and management of insect defoliators in boreal forest ecosystems.** Pages 79–88 en M.J. Apps and D.T. Price, éditeurs. **Forest ecosystems, forest management, and the global carbon cycle.** Springer-Verlag, Berlin. NATO ASI Ser. Vol. I 40,
- Volney, W.J.A.; Fleming, R. 2000. **Climate change and impacts of boreal forest insects.** *Agric. Ecosyst. Environ.* 82:283–294.
- Volney, W.J.A.; Hirsch, K. 2005. **Disturbing forest disturbances.** *For. Chron.* 81(5):662–668.
- Volney, W.J.A.; Fleming, R.A. 2007. **Spruce budworm (*Choristoneura* spp.) biotype reactions to forest and climate characteristics.** *Glob. Chang. Biol.* 13:1–14.
- Walton, A.; Hughes, J.; Eng, M.; Fall, A.; Shore, T.; Riel, B.; Hall, P. 2007. **Provincial-level projections of the current mountain pine beetle outbreak: update of the infestation projected based on the 2006 provincial aerial overview of forest health and revisions to the "model" (BCMPB.v4).** Available at <<http://www.for.gov.bc.ca/hre/bcmpb/BCMPB.v4.BeetleProjection.Update.pdf>>, consulté le 24 août 2007.
- Wang, G. 2005. **Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment.** *Clim. Dyn.* 25:739–753.
- Wang, T.; Hamann, A.; Yanchuk, A.; O'Neill, G.A.; Aitken, S.N. 2006. **Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climates.** *Glob. Chang. Biol.* 12:2404–2416.
- Ward, P.C.; Tithecott, A.G.; Wotton, B.M. 2001. **Reply: a re-examination of the effects of fire suppression in the boreal forest.** *Can. J. For. Res.* 31:1467–1480.
- Weber, M.G.; Flannigan, M.D. 1997. **Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes.** *Environ. Rev.* 5:145–166.
- Westerling, A.L.; Hidalgo, H.G.; Cayan, D.R.; Swetnam, T.W. 2006. **Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity.** *Science (Wash.)* 313:940–943.
- Wheaton, E. 2005. **Canadian droughts of 2001 and 2002: comparing the 2001 and 2002 droughts with other droughts in western Canada.** *Sask. Res. Coun. Publ.* 11602–9E03.
- Williamson, T.B.; Hoscheit, R.; Luttrell, H. 2002. **Participation in outdoor recreation in forested ecoprovinces in Canada in 1996.** *RESS. NAT. CAN., SERV. CAN. DES FORÊTS, CENTRE DE FORESTERIE DU NORD*, Edmonton (AB). Rapp. d'inf. NOR-X-385.

- Williamson, T.B.; Parkins, J.R.; McFarlane, B. 2005. **Perceptions of climate change risk to forest ecosystems and forest-based communities.** *For. Chron.* 81(5):710–716.
- Williamson, T.B.; Hirsch, K.; Frenkel, B. 2006. **Adapting to climate change: issues and challenges for BC's forest-based communities.** *BC Prof. For.* 13(5):20–21.
- Williamson, T.B.; Price, D.T.; Beverly, J.L.; Bothwell, P.M.; Parkins, J.R.; Patriquin, M.N.; Pearce, C.V.; Stedman, R.C.; Volney, W.J.A. 2007. **A framework for assessing vulnerability of forest-based communities to climate change.** *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent.,* Edmonton, AB. Inf. Rep. NOR-X-414.
- Williamson, T.B.; Price, D.T.; Beverly, J.L.; Bothwell, P.M.; Frenkel, B.; Park, J.; Patriquin, M.N. 2008. **Évaluation des répercussions biophysiques et socioéconomiques potentielles du changement climatique sur les collectivités axées sur les ressources forestières : une étude de cas méthodologique.** *Ress. nat. Can., Serv. can. des forêts, Centre de foresterie du Nord,* Edmonton (AB) Rapp. d'inf. NOR-X-415F.
- Wong, S.C. 1979. **Elevated atmospheric partial pressure CO₂ and plant growth: interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C₃ and C₄ plants.** *Oecologia* 44:68–74.
- Woods, A.; Coates, K.D.; Hamann, A. 2005. **Is an unprecedented dothistroma needle blight epidemic related to climate change?** *Bioscience* 55(9):761–769.
- Wotton, B.M.; Flannigan, M.D. 1993. **Length of the fire season in a changing climate.** *For. Chron.* 69(2):187–191.
- Wotton, B.M.; Martell, D.L.; Logan, K.A. 2003. **Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario.** *Clim. Chang.* 60:275–295.
- Yamasaki, S.H.; Duchesneau, R.; Doyon, F.; Russell, J.S.; Gooding, T. 2008. **Making the case for cumulative impacts assessment: modelling the potential impacts of climate change, harvesting, oil and gas, and fire.** *For. Chron.* 84(3):349–368.
- Zeng, N.; Quian, H.; Roedenbeck, C.; Heimann, M. 2005. **Impact of 1998–2002 midlatitude drought and warming on terrestrial ecosystem and the global carbon cycle.** *Geophys. Res. Lett.* 32:L22709.
- Zhou, L.; Tucker, C.J.; Kaufmann, R.K.; Slayback, D.; Shabanov, N.V.; Myneni, R.B. 2001. **Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999.** *J. Geophys. Res.* 106(D17):20069–20084.



Réseau de gestion durable des forêts
3-03 Civil Electrical Engineering Building
Université de l'Alberta
Edmonton (Alberta) T6G 2G7

Tél: 780-492-6659
Télé: 780-492-8160
info@sfmnetwork.ca
www.sfmnetwork.ca



Natural Resources Canada Ressources naturelles Canada

Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Nord
5320 – 122 Street
Edmonton (Alberta) T6H 3S5

Tél: 780-435-7210
www.nrcan-rncan.gc.ca



Networks of Centres of Excellence